

董媛媛,范立民,裘丽萍,等. 光合细菌强化生物絮团替代饵料对罗非鱼生长、水体环境及水体微生物多样性的影响[J]. 江苏农业科学,2020, 48(3):167-174.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.029

# 光合细菌强化生物絮团替代饵料对罗非鱼生长、 水体环境及水体微生物多样性的影响

董媛媛<sup>1</sup>, 范立民<sup>2</sup>, 裘丽萍<sup>2</sup>, 李丹丹<sup>2</sup>, 秦璐<sup>1</sup>, 东新旭<sup>1</sup>, 陈家长<sup>1,2</sup>

(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, 江苏无锡 214081)

**摘要:**以吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)为研究对象,以外加葡萄糖为碳源促进生物絮团的形成以替代部分饵料,设置3个梯度,分别为A组(全部投喂饵料)、B组(替代10%的饵料)和C组(替代20%的饵料),探究光合细菌强化生物絮团对罗非鱼生长及水环境状况的影响,同时采用Biolog-ECO技术研究养殖水中微生物碳代谢多样性的变化。结果表明,不同饵料替代梯度下的水体微生物碳源的利用程度均随着培养时间的延长而升高,整体表现为替代10%的饵料>全部投喂饵料>替代20%的饵料;合适的替代率既能增强水体微生物对碳源的整体利用能力,又能节约养殖成本。主成分分析表明,不同饵料替代梯度下的水体微生物群落碳源代谢具有明显差异,其中聚合糖类、酯类和氨基酸类是水体微生物的偏好碳源,而胺类和酸类的利用率较低。

**关键词:**光合细菌;生物絮团;饵料替代;微生物群落;罗非鱼

**中图分类号:** S965.125;S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)03-0167-08

罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)属于鲈形目鲈形亚目丽鱼科罗非鱼属,原产于非洲内陆水域,又被称为“非洲鲫鱼”。大部分的罗非鱼属于杂食性鱼类,常以水体中的植物和碎屑为食。吉富罗非鱼是20世纪末世界鱼类中心等研究机构利用尼罗罗非鱼在菲律宾选育出的罗非鱼新品系,适应能力强,遗传性状稳定,养殖周期短,生长速度快,是我国目前罗非鱼养殖业中的主导品种之一<sup>[1]</sup>,也是联合国粮农组织向世界推广的优良品种之一。随着水产养殖业的集约化、高产化模式的发展,大量投喂造成的残饵、粪便堆积及其反应产生的有害物质,不仅对养殖对象本身产生一定的危害,还影响养殖水体环境。

随着微生物技术的发展,微生物在水产养殖中的研究也日渐深入。微生物种类繁多,分布广泛,对环境敏感,易变异,且在生物系统中不可替代<sup>[2-3]</sup>。光合细菌能分解利用养殖水体中的有机

物,具有净化水质、改善水体微生态环境的作用<sup>[4]</sup>。Biolog-ECO平板法通过直接在微平板上培养微生物群体,测定微生物对不同碳源的利用程度,实时监测其引起的光吸收度变化,借以探究微生物生理特征及其群落结构<sup>[5-6]</sup>。近年来,关于光合细菌在水产养殖中的应用研究已有不少报道<sup>[7-8]</sup>。有研究表明,以葡萄糖、蜂蜜、蔗糖等作为外加碳源能够很好地形成生物絮团<sup>[9-12]</sup>。由于葡萄糖成本低廉且能够形成稳定高效的生物絮团,因此,本试验以葡萄糖作为外加有机碳源,同时向养殖水体中添加光合细菌以进行强化,旨在探究水产养殖中的水质调控问题和生物絮团形成过程中水体微生物群落结构和碳源利用情况,为池塘养殖生物絮团的饵料替代和微生物群落结构的研究提供参考数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 养殖管理

养殖试验于2018年7—8月在江苏省无锡市中国水产科学研究院淡水渔业研究中心开展,试验为期60 d。选用9个容积约为1 000 L的圆形养殖桶,试验前期向养殖桶内加入新鲜表层土壤以提供土著微生物源,然后每桶悬挂1串由全塑性夹片和维纶醛化丝构成的组合填料,其目的是为微生物提供

收稿日期:2019-10-25

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-46)。

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

通信作者:陈家长,硕士,研究员,研究方向为渔业资源环境监测与保护、生态环境评价等。E-mail:chenjz@ffrc.cn。

附着基,促进生物絮团的生成,最后每桶加入约 700 L 的水,放置在太阳下充分暴晒,养殖试验期间为保证充足的供氧,每个养殖桶底部设有微孔增氧管,在提高水体溶解氧浓度的同时,使水体得到充分的搅动混匀。

每个养殖桶放养 20 尾规格相同的罗非鱼,体质量为 $(6.50 \pm 0.50)$  g,养殖过程中进行相同频率的投喂,前期投喂量约为罗非鱼体质量的 10%,后期随着水体环境和天气的变化,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,分别为 A 组(全部投喂饵料)、B 组(替代 10%的饵料)和 C 组(替代 20%的饵料),每组设 3 个平行,待养殖水体中的氨水平满足试验要求后,开始添加碳源和光合细菌菌液。

1.2 试验方法

依据中国水产科学研究院淡水渔业研究中心推出的淡水池塘生物絮团生态养殖技术构建操作规程,确定碳源添加量 $A(g) = H \times S \times (30 \times C_{TAN-N} - 38)$ ,式中: $H$ 为池塘平均水深,m; $S$ 为池塘面积, $m^2$ ; $C_{TAN-N}$ 为池塘初始氨氮浓度,mg/L。每 2 d 添加 1 次葡萄糖,添加时间为上午投饲后 30 min,先用养殖水体溶解碳源,然后均匀地泼洒在养殖桶里。光合细菌菌液由实验室扩大培养,其浓度为 $10^9$  CFU/mL,依据陈家长等有关研究<sup>[13]</sup>确定光合细菌菌液每隔 1 周使用 1 次,每次 100 mL,总共添加 6 次。

自生物絮团形成稳定后,每隔 1 周自水面以下 30 cm 处采集水样,进行总磷含量、总氮含量、氨氮含量、亚硝酸盐含量和 pH 值等相关指标的测定。采用钼酸铵分光光度法测定总磷含量;纳氏试剂分光光度法测定氨氮含量; $N-(1-萘基)-乙二胺$ 光

度法测定硝酸盐含量;pH 值采用便携式 pH 计测定。待生物絮团稳定后,取适量的水样用 0.85%的 NaCl 溶液进行稀释,然后用 8 孔加样器加到 Biolog-ECO 板中,每孔加 150  $\mu$ L,置于 28  $^{\circ}$ C 恒温条件下避光培养,用酶标仪分别读取培养 12、24、48、60、72、84、96、108、120、132、144、156、168、180 h 时 590、750 nm 波长处的吸光度。

1.3 统计方法

平均每孔颜色变化率(average well color development, AWCD)<sup>[14]</sup>计算公式为 $AWCD = \sum(C - R)/n$ 。式中: $C$ 代表每个碳源孔的 2 个波段(590、750 nm)吸光度差值; $R$ 代表对照(空白)孔的吸光度; $n$ 为 Biolog-ECO 上碳源种类数量(在本研究中 $n=31$ )。本研究选取培养 72 h 的 AWCD 数据进行多样性 Shannon 指数、Simpson 指数、McIntosh 指数和丰富度指数的计算,具体参照文献[15],同时选取 72 h 的数据进行微生物对不同碳源利用程度的主成分分析(principal component analysis,PCA)和方差分析(analysis of variance,ANOVA),确定不同组别处理间水中微生物群落代谢的差异,统计分析通过 SPSS 25.0 统计软件实现,数据统计和绘图通过 Excel 2016 和 Origin 8.1 来完成。

2 结果与分析

2.1 不同饵料替代梯度对罗非鱼养殖效果的影响

如表 1 所示,减少罗非鱼的饵料投喂,以葡萄糖为外加碳源,添加光合细菌进行强化,进行不同比例的饵料替代之后,不同处理组间的终体质量、增质量均表现出差异显著( $P<0.05$ );不同处理组间的饵料系数差异不显著。

表 1 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖效果比较

处理	终体质量 (g)	增质量 (g)	投喂量 (g)	饵料系数
A 组	121.844 $\pm$ 1.776a	115.478 $\pm$ 1.650a	119.130 $\pm$ 0.001a	1.032 $\pm$ 0.015a
B 组	110.371 $\pm$ 1.984b	104.048 $\pm$ 2.056b	107.210 $\pm$ 0.021a	1.030 $\pm$ 0.021a
C 组	102.709 $\pm$ 1.162c	96.169 $\pm$ 1.072c	95.340 $\pm$ 0.003a	0.992 $\pm$ 0.011a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表 2、表 3 同。

2.2 生物絮团对养殖水体水质的影响

如表 2 所示,C 组处理的总磷和氨氮含量显著低于对照组( $P<0.05$ ),总氮和硝酸盐含量均低于对照组,但差异不显著;B 组处理的氨氮含量显著低于对照组( $P<0.05$ ),总磷、总氮、硝酸盐含量与对

照组相比均差异不显著,其含量分别比对照组低 11.20%、3.41%、29.65%。随着饵料替代率的增加,除 pH 值外,不同处理组的水质指标均表现为降低趋势,其中 B 组和 C 组处理之间总磷含量差异显著( $P<0.05$ );不同处理组间的 pH 值差异不明显。

表 2 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖水体水质理化因子的变化

处理	总磷含量 (mg/L)	总氮含量 (mg/L)	氨氮含量 (mg/L)	硝酸盐含量 (mg/L)	pH 值
A 组	2.134 ± 0.189 <sub>a</sub>	9.264 ± 1.619 <sub>a</sub>	1.977 ± 0.155 <sub>a</sub>	0.226 ± 0.008 <sub>a</sub>	7.813 ± 0.047 <sub>a</sub>
B 组	1.895 ± 0.264 <sub>a</sub>	8.948 ± 1.149 <sub>a</sub>	1.667 ± 0.047 <sub>b</sub>	0.159 ± 0.078 <sub>a</sub>	7.790 ± 0.035 <sub>a</sub>
C 组	1.102 ± 0.140 <sub>b</sub>	6.913 ± 0.406 <sub>a</sub>	1.503 ± 0.068 <sub>b</sub>	0.126 ± 0.023 <sub>a</sub>	7.897 ± 0.045 <sub>a</sub>

2.3 生物絮团对养殖水体微生物六大类碳源利用的影响

平均颜色变化率(AWCD)可以有效地反映水体微生物的整体活性,反映微生物对 31 种碳源的利用能力和偏好。由图 1 可知,不同饵料替代梯度下的水体微生物对全部碳源的利用强度均随着培养时间的延长而呈增加趋势,12 h 以内水体中的微生物活性较低,12 ~ 120 h 之间,AWCD 随着培养时间的

延长而逐渐增大,在 120 ~ 156 h 之间,微生物碳源利用出现先下降后上升的趋势,156 ~ 168 h 之间,AWCD 逐渐增加而后趋于稳定。不同饵料替代梯度下的 AWCD 大小顺序排序为替代 10% 的饵料组 > 对照组 > 替代 20% 的饵料组,表明替代 10% 的饵料组微生物碳源代谢强度最高,而替代 20% 的饵料组对碳源的利用能力整体下降。

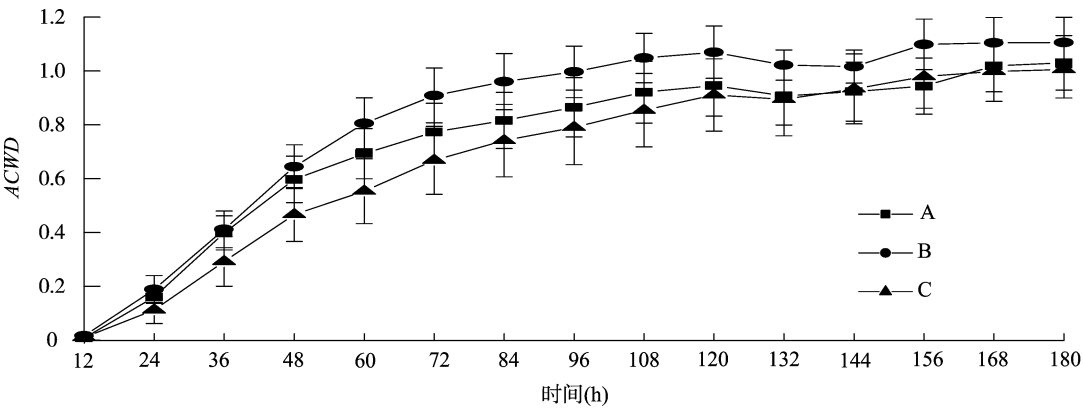


图 1 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖水体微生物全部碳源利用情况

由表 3 可知,进行不同梯度饵料替代之后,B 组处理的水体微生物 Shannon 指数、Simpson 指数、

McIntosh 指数及丰富度指数均高于对照组,但差异不显著;C 组处理均低于对照组。

表 3 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖水体微生物多样性指数

处理	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数	丰富度
A 组	3.137 ± 0.085 <sub>a</sub>	0.952 ± 0.005 <sub>a</sub>	5.149 ± 0.482 <sub>a</sub>	23.333 ± 1.764 <sub>a</sub>
B 组	3.260 ± 0.068 <sub>a</sub>	0.959 ± 0.004 <sub>a</sub>	5.667 ± 0.404 <sub>a</sub>	27.000 ± 2.000 <sub>a</sub>
C 组	3.098 ± 0.095 <sub>a</sub>	0.949 ± 0.006 <sub>a</sub>	4.551 ± 0.567 <sub>a</sub>	22.333 ± 2.848 <sub>a</sub>

2.4 罗非鱼养殖水体中微生物群落对不同碳源利用情况

Biolog - ECO 板中包含的 31 种单一碳源主要分为六大类,即聚合糖类、氨基酸类、酯类、醇类、胺类和酸类。如图 2 所示,对于不同程度的替代比例,水体微生物对碳源的利用程度表现出不同的偏好:在对氨基酸类、酯类、胺类和酸类碳源的利用上,替代 10% 的饵料利用强度最高,而替代 20% 的饵料则表现为 60 h 之后对醇类的利用最强;随着时间的推移,不同处理组对碳源的利用都表现为上升趋势,在对胺类碳源的利用上,在 120 ~ 156 h 之间表现为

先下降后上升最终趋于平稳的趋势。  
为研究生物絮团及光合细菌对水体微生物群落碳代谢的影响,选择 Biolog - ECO 培养 72 h 作为分析时间点,采用 SPSS 25.0 软件进行 PCA 分析,提取 3 个主成分,第 1 主成分(PC1)为 37.649%,第 2 主成分(PC2)为 19.163%,第 3 主成分(PC3)为 11.090%,三维主成分综合了全部 31 种碳源的 67.902% 的信息,提取前 2 个主成分进行作图(图 3),以表征各组水体微生物群落碳源代谢特征,其中前 2 个主成分积累贡献率达 56.812%。主成分分析中不同处理组间距离的大小表示不同处理组

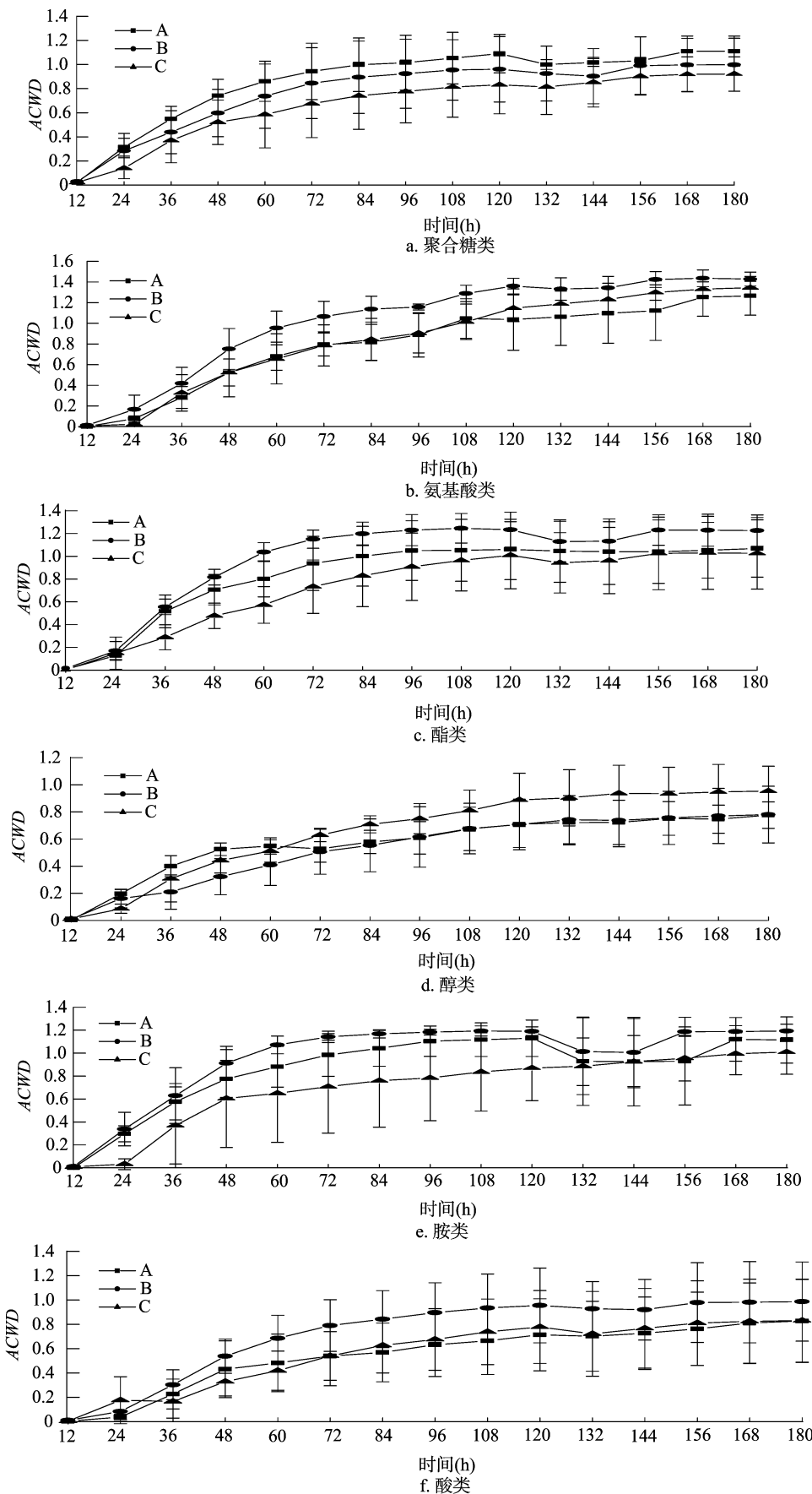


图2 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖水体微生物碳源利用情况

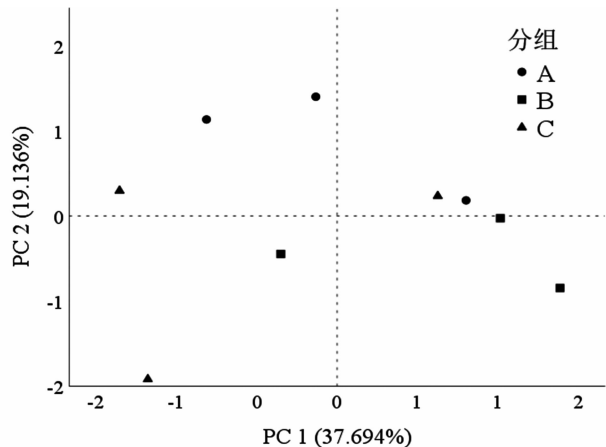


图3 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖水体微生物主成分分析

之间的相似水平,间隔越近相似程度越高,对不同碳源的利用能力就越相似。由图3可知,对照组A主要分布在第一、二象限,处理组B主要分布在第三、四象限,处理组C主要分布在第一、二、三象限,

说明处理组B和对照组之间水体微生物碳代谢特征差异明显,处理组C和对照组之间差异不明显。

表4列出了31种碳源与3个主成分之间的相关系数,反映了各个变量对主成分的重要程度,碳

表4 31种碳源与3个主成分之间的相关系数

碳源类型	碳源种类	相关系数		
		主成分1	主成分2	主成分3
聚合糖类	$\beta$ -甲基D-葡萄糖苷	0.247	0.689	0.453
	D-木糖	0.790	0.321	-0.017
	$\alpha$ -环式糊精	0.627	0.165	0.248
	肝糖	0.583	0.670	-0.051
	D-纤维二糖	0.740	-0.324	0.325
	葡萄糖-1-磷酸盐	0.539	0.494	0.347
	$\alpha$ -D-乳糖	0.885	0.169	0.388
氨基酸类	L-精氨酸	0.402	0.532	-0.176
	L-天冬酰胺酸	0.206	-0.499	0.691
	L-苯基丙氨酸	0.664	-0.020	-0.005
	L-丝氨酸	0.759	0.003	0.081
	L-苏氨酸	0.823	-0.127	-0.291
	甘氨酸-L-谷氨酸	0.686	-0.208	0.001
酯类	D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯	0.558	-0.624	0.081
	丙酮酸甲酯	0.881	-0.139	-0.123
	吐温40	0.359	0.640	0.261
	吐温80	0.591	0.473	-0.379
醇类	I-赤藻糖醇	0.142	-0.822	0.163
	D-甘露醇	0.354	0.210	0.557
	D,L- $\alpha$ -甘油	0.050	0.807	0.341
胺类	N-乙酰基-D-葡萄糖胺	0.533	-0.049	0.173
	苯乙基胺	0.815	0.317	-0.275
	腐胺	0.651	-0.416	0.066
酸类	D-半乳糖醛酸	0.737	-0.645	0.069
	2-羟苯甲酸	0.664	-0.020	-0.005
	4-羟基苯甲酸	0.759	0.003	0.081
	$\gamma$ -羟基丁酸	0.420	-0.016	-0.479
	D-葡萄糖胺酸	0.551	-0.357	0.707
	衣康酸	0.599	-0.327	-0.050
	$\alpha$ -丁酮酸	0.653	-0.003	-0.479
	D-苹果酸	0.674	0.486	-0.248

源的相关性越高,表明碳源对不同处理的区分的贡献率越大。但是相关系数较高,不能完全说明该碳源的实际利用程度也高,也有可能是因为不同处理间的碳源利用率差异性高。表 4 显示,3 组水体微生物代谢基质主成分 1 相关系数 0.55 以上的基质有 21 种,相关系数大于 0.75 的有 7 种,其中聚合糖类 2 种,氨基酸类 2 种,酯类、胺类和酸类各 1 种;主成分 2 相关系数 0.55 以上的基质仅有 4 种;主成分 3 相关系数 0.55 以上的基质仅有 3 种,说明不同处理组及对照组间水体微生物代谢功能群落结构的差异主要体现在与主成分 1 相关系数较高的基质上。与主成分 1 相关系数在 0.80 以上的依次为  $\alpha$ -D-乳糖、丙酮酸甲酯、L-苏氨酸和苯乙基胺。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 光合细菌强化生物絮团对罗非鱼生长的影响

王潮辉等研究发现,在生物絮凝系统构建过程中养殖的吉富罗非鱼没有明显的应激反应,且其生长要比循环水养殖系统养殖效果更加有利<sup>[16]</sup>。李朝兵等在生物絮团技术培育小规格罗非鱼种的研究中发现,生物絮团可以作为蛋白饵料被罗非鱼鱼种所摄食利用,提高其生长性能<sup>[17]</sup>。刘文畅等在无碳源添加的罗非鱼养殖系统的研究中发现,水体重复利用的养殖系统中,不额外投加碳源是可行的,其碳源的添加目的是调节水体中的碳氮比例,促进生物絮团的形成<sup>[18]</sup>。在本研究中,减少饵料投喂,补充葡萄糖和光合细菌来调节水体微生物结构,结果表明,随着饵料替代率的增加,罗非鱼的增质量出现下降趋势,这有可能是光合细菌的加入对生物絮团的形成或利用产生了影响,并且随着有机碳替代饵料的比例越高,影响越大,这有可能与有机碳的循环过程发生改变有关。Crab 等研究发现,不同类型的外加碳源对生物絮团的营养组成成分的影响具有一定差异,和全部投喂饵料的组相比,不同饵料替代率下的饵料系数差异不显著,替代 20% 的饵料处理组饵料系数降低 3.8%,可以明显观察到罗非鱼的生长速度变慢<sup>[19]</sup>。徐武杰研究发现,在以蔗糖为外加碳源的生物絮团养殖系统中,生物絮团可以提高对虾胃中脂肪酶、淀粉酶以及蛋白酶的活力<sup>[20]</sup>。唐汇娟等在零换水条件下添加枯草芽孢杆菌和碳源对罗非鱼生长的影响研究中发现,枯草芽孢杆菌和碳源的添加在一定程度上提高了罗非鱼的存活率、生长率以及饲料转化效率,但并未达到

显著水平<sup>[21]</sup>。而在本研究中,随着饵料替代率的增加,罗非鱼的生长明显呈下降趋势,这有可能与外加碳源种类有关,也有可能是因为饵料替代率过大,生物絮团不能完全满足罗非鱼生长的需要,进而限制了罗非鱼的生长。生物絮团在养殖生态系统中扮演着很多不同的角色,发挥着关键作用<sup>[21-24]</sup>。在本研究中,生物絮团的组成成分和光合细菌的加入是否影响了罗非鱼的某些消化酶活性,进而影响罗非鱼生长,还需要通过进一步试验来验证。

#### 3.2 光合细菌强化生物絮团对养殖水体水质的影响

卢炳国等在不同 C/N 水平的生物絮团技术对草鱼的研究中发现,C/N 为 15 时最佳,对降低水中的氨氮、亚硝酸盐水平具有明显效果<sup>[25]</sup>。李彦等在养殖水体中以小麦淀粉作为碳源,降低三态氮含量,改善水质,并生成鱼类可食用的絮团,降低饲料系数<sup>[26]</sup>。尚谦对关于木薯渣在生物絮团处理养殖废水技术的应用研究中提出,蔗糖的添加能够有效控制氨氮污染<sup>[27]</sup>。唐肖峰等在碳源对花鳢养殖水质的影响研究中发现,生物絮团组在总磷、总氮、三态氮方面均显著低于非生物絮团组<sup>[28]</sup>。在本研究中,替代 20% 的饵料组总磷、氨氮水平均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),替代 10% 的饵料组总磷水平降低 11.20%,但差异不显著,氨氮水平显著低于对照组( $P < 0.05$ );替代 20% 的饵料组和替代 10% 的饵料组硝酸盐含量分别平均降低 44.25%、29.65%,这与上述研究结果趋势相同。自养硝化反应和异养硝化反应对无机氮都有着良好的降解效能,王涛等研究发现,生物絮团中的异养硝化反应有利于养殖水中无机氮素的脱除,降低养殖水体的富营养化,添加碳源培育生物絮团对氨氮的快速异养转化的功能在水产养殖中具有重要意义<sup>[29-30]</sup>。在罗非鱼养殖水体中以葡萄糖为外加碳源、以土著微生物为菌源构建养殖系统,利用光合细菌进行强化,能够进一步对水质进行调控,降低水体中总氮、总磷及氨氮的水平;同时增强水体微生物对聚合糖类、酯类和氨基酸类碳源的利用率,降低对胺类和酸类碳源的利用率。

#### 3.3 光合细菌强化生物絮团对养殖水体微生物群落多样性的影响

Biolog-ECO 平板中的 AWCD 值反映了微生物群落利用不同单一碳源的整体能力和偏好,在碳源

种类相同的条件下,对不同微生物利用碳源情况进行比较,可以反映出不同饵料替代梯度及光合细菌强化下的水体微生物对不同类型的碳源的利用强度存在一定差异<sup>[23]</sup>;其中,替代 10% 的饵料平均 AWCD 值最高,对照组次之,替代 20% 的饵料最低,因此可知适当减少一定的饵料投喂,有利于增强水体微生物群落对碳源的利用。采用不同的多样性指数,可以反映不同的微生物群落功能多样性变化<sup>[31]</sup>。本研究中,随着饵料替代率的增加,水体微生物多样性及丰富度无显著变化,说明碳源添加和光合细菌的加入对水环境中的微生物无显著影响,这与李志斐等关于生物絮团可增加水体微生物的 Shannon 指数和丰富度指数的结果<sup>[32]</sup>相反,与史磊磊等研究的组合填料对罗非鱼养殖环境水体微生物多样性影响结果<sup>[33]</sup>一致,这可能是与微生物的附着基和外加光合细菌菌液有关。近年来,随着微生物生态制剂的发展,其改善养殖环境、维持养殖水体微生物生态平衡以及促进动物生长的优点不断在水产养殖中扩大应用。

Biolog – ECO 法通过微生物对不同类型碳源的利用程度来反映微生物群落的功能多样性。其主成分分析可以有效反映微生物群落功能结构特征<sup>[34]</sup>。平板上的 31 种碳源主要分为六大类:聚合糖类、氨基酸类、酯类、醇类、胺类、酸类,综合 PC1、PC2 和 PC3 结果可知,不同饵料替代梯度下对水体微生物群落代谢功能起作用的主要碳源类型为聚合糖类、酯类和氨基酸类,不同处理下的差异主要体现在对氨基酸类和酯类碳源的利用上,其中以氨基酸类最为突出。结合不同处理组对不同碳源的整体利用程度可以得出,不同处理的水体微生物对碳源的利用特征差异比较明显,这一点可能与水体中外加葡萄糖作为碳源有一定的关系,也可能和光合细菌的加入有关。随着饵料替代率的增加,水体中的微生物多样性发生了变化,因此作为主要输入碳源的残饵和粪便的组成及含量发生了比较明显的变化,进而影响了水体微生物对不同类型的碳源代谢发生一定的改变,最终影响其对碳源利用的种类和强度。有研究表明,不同碳源产生的胞外聚合物有很大的差异<sup>[35]</sup>,并且水体中的藻类在光照和二氧化碳充足的条件下,可以产生大量的酯类和碳氢化合物<sup>[36]</sup>,进一步影响参与生物絮团的组成及其微生物从不同碳源中的获益方式<sup>[37]</sup>。张哲等研究发现,系统中微生物群落结构随添加碳源的不同会发

生一定的变化<sup>[38]</sup>;Ballester 等研究发现,生物絮团中微生物在维持水质和提供必需营养素方面发挥着重要作用<sup>[39]</sup>。在本研究中,不同饵料替代下的罗非鱼养殖水体微生物分布在不同区域,说明其碳源代谢特征存在一定的差异。主成分分析法可以很好地反映出水质综合状态的变化,进而提炼出更多的有用信息<sup>[40]</sup>。由于 Biolog – ECO 微平板技术存在一定的局限性,仅采用此技术很难完整地反映不同处理下水体微生物群落功能多样性的变化规律,有关生物絮团微生物种类等方面的研究,还需进一步探索。适当减少饵料投喂,可以增强水体微生物的碳源代谢能力,减少 10% 的饵料投喂既能节约养殖成本,又能增强养殖水体微生物对不同碳源的整体利用能力。本研究是在试验条件下完成,与实际生产中池塘养殖情况还具有一定差距,还需酌情考虑具体的饵料替代比例,同时在选择添加益生菌强化的过程中,要注意菌种的选择。

#### 参考文献:

- [1] Dey M M, Gupta M V. Socioeconomics of disseminating genetically improved Nile tilapia in Asia: an introduction [J]. *Aquaculture Economics & Management*, 2000, 4 (1/2): 5 – 11.
- [2] Fierer N, Bradford M A, Jackson R B. Toward an ecological classification of soil bacteria [J]. *Ecology*, 2007, 88 (6): 1354 – 1364.
- [3] Konopka A, Oliver L, Turco R F. The use of carbon substrate utilization patterns in environmental and ecological microbiology [J]. *Microbial Ecology*, 1998, 35 (2): 103 – 115.
- [4] 郑耀通, 胡开辉, 高树芳, 等. 高效净化水产养殖水域紫色非硫光合细菌的分离和筛选 [J]. *福建农业大学学报*, 1998, 27 (3): 257 – 260.
- [5] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community – level sole – carbon – source utilization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57 (8): 2351 – 2359.
- [6] Garland J L. Analysis and interpretation of community – level physiological profiles in microbial ecology [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, 24 (4): 289 – 300.
- [7] 沈锦玉, 尹文林, 刘 问, 等. 光合细菌 HZPSB 对水产养殖水质的改良和对鱼类促生长作用 [J]. *科技通报*, 2004, 20 (6): 481 – 484.
- [8] Vratil S. Single cell protein production by photosynthetic bacteria grown on clarified effluents of biogas plants [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1984, 19 (3): 199 – 202.
- [9] 杨章武, 张 哲, 葛 辉, 等. 几种不同碳源对凡纳滨对虾生物絮团技术育苗效果的影响 [J]. *福建水产*, 2015, 37 (5): 347 – 352.
- [10] 刘克明, 尤宏争, 马 林, 等. 不同碳源培养生物絮团对南美白对虾养殖影响试验 [J]. *河北渔业*, 2019 (4): 28 – 30.

- [11] 王潮辉. 添加葡萄糖对凡纳滨对虾零水交换养殖系统中水环境调控的研究[D]. 上海:上海海洋大学,2016.
- [12] 王 娇,马灌楠,邓元告,等. 葡萄糖和盐度对卤虫生长、养殖系统生物絮团形成及其微生物多样性的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015,46(2):372–380.
- [13] 陈家长,胡庚东,吴 伟,等. 有益微生物在中华绒螯蟹养殖中应用的研究[J]. 上海水产大学学报,2003,12(3):271–273.
- [14] 闫法军,田相利,董双林,等. 刺参养殖池塘水体微生物群落功能多样性的季节变化[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1499–1505.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李朝兵,李志斐,韩林强,等. 生物絮团技术对室内培育小规格罗非鱼种的影响[J]. 水产养殖,2015,36(7):29–35.
- [18] 刘文畅,罗国芝,谭洪新. 无碳源投加对水体重复使用的罗非鱼生物絮团养殖系统中水质、生长性能和微生物群落的影响[C]//2017 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 北京:中国水产学会,2017.
- [19] Crab R,Chielens B,Mathieu W,et al. The effect of different carbon sources on the nutritional value of bioflocs, a feed for *Macrobrachium rosenbergii* postlarvae[J]. Aquaculture Research, 2010,41(5):559–567.
- [20] 徐武杰. 生物絮团在对虾零水交换养殖系统中功能效应的研究与应用[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [21] 唐汇娟,张轩豪,孔重敏,等. 零换水条件下枯草芽孢杆菌和糖蜜对水质和罗非鱼生长的影响[J]. 华中农业大学学报,2018,37(3):82–86.
- [22] McIntosh D, Samocha T M, Jones E R, et al. The effect of a commercial bacterial supplement on the high – density culturing of *Litopenaeus vannamei* with a low – protein diet in an outdoor tank system and no water exchange[J]. Aquacultural Engineering, 2000,21(3):215–227.
- [23] Choi K H, Dobbs F C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities[J]. Journal of Microbiological Methods,1999,36(3):203–213.
- [24] Martínez – Córdova L R, Martínez – Porchas M, Emerenciano M G C, et al. From microbes to fish the next revolution in food production[J]. Critical Reviews in Biotechnology,2017,37(3):287–295.
- [25] 卢炳国,王海英,谢 骏,等. 不同 C/N 水平对草鱼池生物絮团的形成及其水质的影响[J]. 水产学报,2013,37(8):1220–1228.
- [26] 李 彦,刘利平,赵广学,等. 养殖水体中添加碳源对水质及罗非鱼生长的影响[J]. 大连海洋大学学报,2013,28(1):55–60.
- [27] 尚 谦. 木薯渣在生物絮团处理养殖废水技术中的应用性研究[D]. 南宁:广西大学,2017.
- [28] 唐肖峰,刘利平,帅 滇,等. 碳源对花鳉养殖系统水质及生产性能的影响[J]. 大连海洋大学学报,2019,34(1):70–79.
- [29] 王 涛,刘青松,段亚飞,等. 低 C/N 驯化生物絮团的自养和异养硝化性能研究[J]. 海洋渔业,2018,40(5):614–624.
- [30] Schneider O, Sereti V, Eding E H, et al. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering,2005,32(3/4):379–401.
- [31] Garland J L. Analytical approaches to the characterization of samples of microbial communities using patterns of potential C source utilization[J]. Soil Biology & Biochemistry,1996,28(2):213–221.
- [32] 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[J]. 上海海洋大学学报,2015,24(4):503–512.
- [33] 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.
- [34] 李 娟. 长期不同施肥制度土壤微生物学特性及其季节变化[D]. 北京:中国农业科学院,2008.
- [35] Wilén B M, Onuki M, Hermansson M, et al. Microbial community structure in activated sludge floc analysed by fluorescence *in situ* hybridization and its relation to floc stability[J]. Water Research, 2008,42(8/9):2300–2308.
- [36] Verma N M, Mehrotra S, Shukla A, et al. Prospective of biodiesel production utilizing microalgae as the cell factories: a comprehensive discussion[J]. African Journal of Biotechnology, 2010,9(10):1402–1411.
- [37] Bodík I, Blstáková Á, Sedláček S, et al. Biodiesel waste as source of organic carbon for municipal WWTP denitrification[J]. Bioresource Technology,2009,100(8):2452–2456.
- [38] 张 哲,杨章武,葛 辉,等. 不同碳源对凡纳滨对虾育苗标粗水体生物絮团的结构、营养成分、细菌群落及其水质的影响[J]. 水产学报,2019,43(3):639–649.
- [39] Ballester E, Abreu P C, Cavalli R O, et al. Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system[J]. Aquaculture Nutrition, 2010,16(2):163–172.
- [40] 范立民,吴 伟,胡庚东,等. 主成分分析法评价多级生物系统对集约化池塘修复效果研究[J]. 中国农学通报,2010,26(23):392–396.