

不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼生长及肠道健康的影响

吴心怡 徐一闯 席峰 张电光 翟少伟

YEAST CULTURE ON THE GROWTH AND INTESTINAL HEALTH OF JUVENILE AMERICAN EEL (*ANGUILLA ROSTRATA*) FED DIETS WITH VARYING PROPORTIONS OF LOW-QUALITY BROWN FISHMEAL

WU Xin-Yi, XU Yi-Chuang, XI Feng, ZHANG Dian-Guang, ZHAI Shao-Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0360>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

饲喂不同浓度黄曲霉毒素B<sub>1</sub>饲料对花鳗鲡幼鱼生长、抗氧化能力和毒素积累的影响

EFFECTS OF DIETARY AFLATOXIN B<sub>1</sub> ON GROWTH, ANTIOXIDANT CAPACITY AND TISSUE ACCUMULATION OF JUVENILE MARBLED EEL (*ANGUILLA MARMORATA*)

水生生物学报. 2021, 45(3): 566–572 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.136>

蝇蛆粉替代鱼粉对杂交黄颡鱼生长性能、体组成和抗氧化能力的影响

EFFECTS OF SUBSTITUTION OF FISH MEAL WITH MAGGOT MEAL ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF HYBRID YELLOW CATFISH

水生生物学报. 2021, 45(3): 573–581 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.012>

三种不同的铜源对珍珠龙胆石斑鱼生长、抗氧化酶活性及肠道形态的影响

EFFECTS OF THREE KIND CU SOURCES ON GROWTH PERFORMANCE, ANTIOXIDANT ENZYMES AND INTESTINAL MORPHOLOGY OF JUVENILE PEARL GENTIAN GROUPER (*EPINEPHELUS LANCELATUS* ♂ × *EPINEPHELUS FUSCOGUTTATUS* ♀)

水生生物学报. 2019, 43(4): 739–747 <https://doi.org/10.7541/2019.087>

日粮中添加桑叶提取物和1-脱氧野尻霉素对大鲵生长、消化、免疫能力和肠道菌群的影响

EFFECTS OF DIETARY MULBERRY LEAF EXTRACT AND 1-DEOXYNOJIRIMYCIN ON GROWTH, DIGESTION AND IMMUNITY CAPACITY, AND INTESTINAL MICROORGANISM OF CHINESE GIANT SALAMANDER (*ANDRIAS DAVIDIANUS*)

水生生物学报. 2021, 45(3): 582–592 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.116>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2023.0360

## 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对 美洲鳗鲡幼鱼生长及肠道健康的影响

吴心怡<sup>1</sup> 徐一闯<sup>1</sup> 席峰<sup>1</sup> 张电光<sup>2</sup> 翟少伟<sup>1</sup>

(1. 集美大学水产学院, 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心, 厦门 361021; 2. 福建农林大学海洋学院, 福州 350002)

**摘要:** 为研究在不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼生长、肠道组织形态、肠道抗氧化能力及肠道菌群的影响, 配制5种等氮等脂饲料, 分别是基础饲料及用0、10%、20%和30%低品质红鱼粉(二级)替代基础饲料中白鱼粉且均添加0.1%酵母培养物的实验饲料, 饲喂初始体重(13.52±0.05) g的美洲鳗鲡幼鱼8周。结果显示, 与基础饲料相比, 在基础饲料和使用10%低品质红鱼粉实验饲料中添加酵母培养物可显著促进美洲鳗鲡幼鱼生长、改善肠道组织形态和提高肠道抗氧化能力; 而使用20%低品质红鱼粉实验饲料中添加酵母培养物对以上指标均无显著影响; 酵母培养物添加在30%低品质红鱼粉饲料中未能改善生长性能下降及肠道损伤、菌群紊乱等问题。此外, 在基础饲料和20%低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物均有益于调节肠道菌群组成, 促进有益菌增殖并抑制潜在有害菌繁殖。以上研究结果表明, 添加0.1%酵母培养物在美洲鳗鲡幼鱼基础饲料中促生长和改善肠道健康作用明显, 可使低品质红鱼粉有效替代饲料中20%白鱼粉。研究结果可为有效降低鳗鲡饲料成本及促进酵母培养物在鱼类饲料中的科学应用提供依据。

**关键词:** 酵母培养物; 肠道健康; 生长性能; 抗氧化; 美洲鳗鲡

**中图分类号:** S963.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)06-1000-11



鳗鲡(*Anguilla* spp.) 是我国水产养殖业中重要的出口创汇水产品, 在我国养殖鳗鲡的种类主要有日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)、美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)、欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)及少量花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)<sup>[1]</sup>。在鳗鲡养殖中, 白鱼粉为鳗鲡饲料重要蛋白源, 但随着渔业资源的衰减和捕捞配额的限制, 白鱼粉供不应求的问题日益突出, 饲料成本不断增加<sup>[2]</sup>。为了减少饲料成本压力, 在鳗鲡饲料中可使用价格便宜但品质相对较低的红鱼粉替代优质白鱼粉<sup>[3]</sup>。但低品质红鱼粉可使鳗鲡饲料中的组胺水平增加, 对鳗鲡肠道健康和生长造成不利影响<sup>[4, 5]</sup>。因此, 缓解低品质红鱼粉对鳗鲡肠道健康的不利影响是解决红鱼粉应用限制和降低鳗鲡饲料成本的关键。

近年来, 后生元作为饲料添加剂改善水产动物

肠道健康的报道越来越多, 成为饲料添加剂领域研究的新方向和热点。后生元, 即“Postbiotics”, 指的是益生菌经过加工处理后的无生命菌体及其代谢物成分统称, 主要应用于调节肠道健康, 其成分稳定, 保质期长且安全性高<sup>[6, 7]</sup>。在诸多后生元制剂中, 酵母培养物(Yeast culture)在水产养殖中应用较早、报道较多且改善肠道健康效果显著<sup>[8]</sup>。它主要是在特定工艺条件下由高性能酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)在特定培养基上经过充分的厌氧发酵后生产, 其主要功能性成分包括氨基酸、多肽、有机酸、维生素、 $\beta$ -葡聚糖、甘露聚糖低聚糖等, 以及未知的生长促进因子<sup>[9, 10]</sup>。研究发现, 在斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)及草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的饲料中添加酵母培养物能促进生长和肠道健

收稿日期: 2023-11-05; 修订日期: 2024-01-10

**基金项目:** 国家现代农业产业技术体系专项资金(CARS-46); 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心开放基金(RE202312)资助 [Supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-46); the Open Fund of Engineering Research Center of the Modern Industry Technology for Eel, Ministry of Education of China (RE202312)]

**作者简介:** 吴心怡(1999—), 女, 硕士研究生; 主要从事鳗鲡饲料添加剂研究。E-mail: xinyiwu\_jmu@hotmail.com

**通信作者:** 翟少伟(1973—), 男, 博士, 研究生导师; 主要从事鳗鲡营养需求与饲料研究。E-mail: zhaisw@jmu.edu.cn

康<sup>[11,15]</sup>。值得注意的是, 酵母培养物还能缓解豆粕替代鱼粉饲料对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、高淀粉高棉酚蛋白饲料对大口黑鲈所造成的肠道损伤和肠道菌群紊乱<sup>[16,17]</sup>, 增强高淀粉高棉酚蛋白饲料胁迫下大口黑鲈和大豆凝集素胁迫下乌苏拟鲿(*Pseudobagrus ussuriensis*)的肠道抗氧化能力及减轻棉酚引起的乌苏拟鲿氧化应激<sup>[17-19]</sup>。这些研究表明酵母培养物可通过改善肠道菌群结构、提高肠道抗氧化能力及改善肠道组织形态等作用缓解上述饲料中胁迫因素带来的负面影响。目前, 酵母培养物在鳗鲡饲料中的应用效果还尚未见报道。

本实验通过在不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物, 通过美洲鳗鲡生长性能及肠道健康的变化, 评价酵母培养物对美洲鳗鲡饲料中使用低品质红鱼粉所带来的负面作用的缓解效果, 为有效利用鱼粉资源和降低饲料成本提供参考, 也可将酵母培养物在水产饲料中的应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

实验以一级白鱼粉、二级红鱼粉、特级红鱼粉为主要蛋白源, 鱼油作为脂肪源, 配制5种等氮等脂的实验饲料。除对照组(LQBF0组)以外, 其他4组饲料中均添加0.1%的酵母培养物, 且分别用0(LQBF0+YC组)、10%(LQBF10+YC组)、20%(LQBF20+YC组)和30%(LQBF30+YC组)二级红鱼粉替代基础饲料中一级白鱼粉, 饲料具体组成见表1。所有原料粉碎、过筛(80目), 按照饲料配方比例采用逐级扩大法混合均匀, 最后加入鱼油混匀并将饲料放入搅拌机(WCS-2, Westing House公司, 美国)中搅拌30min。配好的饲料密封保存于-20℃冰箱中备用。酵母培养物(水产益康<sup>®</sup>)购自达农威生物发酵工程技术(深圳)有限公司, 是采用酿酒酵母液-固两次深度发酵工艺的浓缩型产品, 其添加量参考公司产品推荐值。实验饲料营养组成与组胺水平见表1。

### 1.2 饲养管理

实验所需美洲鳗鲡幼鱼购于福建省三明市明溪县凯润达渔业有限公司。暂养4周后开始正式实验, 选取600尾规格一致、体格健康且无畸形、平均体重为(13.52±0.05)g的幼鱼开展8周的正式实验。实验鱼随机分为5组, 每组120尾鱼, 分为4个重复, 每个重复30尾鱼。实验鱼养殖于室内循环水养殖缸(实际注水体积约为400 L), 实验期间24h不间断充氧, 保持微流水。在实验期间每天投喂2次(6:00和18:00), 每次投喂前将混合好5组实验饲料以料水比1:1.1制作成团状饲料, 日投喂量约为鱼体重

的1%—3%(根据实际饱食情况和天气变化等适当调整投喂量)。投喂20min后观察并记录吃料情况及鱼死亡状况。暂养和实验期间水温保持在25—26℃, 溶解氧浓度>7.6 mg/L, pH处于7.8—8.2, 氨氮浓度<0.25 mg/L。

### 1.3 样品采集及处理

8周养殖实验结束后, 对美洲鳗鲡幼鱼进行饥饿处理24h。采样时对每个养殖缸的鳗鲡进行称重和计数。每个缸中随机取10尾鱼。用100 mg/L的丁香酚麻醉5min后, 用无菌剪刀和镊子解剖取出内脏团, 分离出肠道。取2尾鱼的肠道放于装有多聚甲醛固定液的灭菌冻存管, 用于组织学分析; 其余8尾鱼的肠道用PBS缓冲液冲洗后, 放在液氮速冻后保存至-80℃超低温冰箱, 用于肠道抗氧化能力的测定以及菌群多样性分析的测定。

### 1.4 测定指标及方法

**鱼粉与饲料组胺水平** 鱼粉与饲料的组胺水平采用比色酶法测定, 使用组胺试剂盒(Histamine Test, Kikkoman公司, 日本)进行测定, 测定方法参照试剂盒说明书。

#### 生长性能

增重率(Weight gain rate, WGR; %)= $100 \times (W_t - W_0) / W_0$

特定生长率(Specific growth rate, SGR; %/d)= $100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$

摄食量(Feed intake, FI; g/尾)= $100 \times FC / N_f$

饲料效率(Feed efficiency, FE) (%)=( $W_t - W_0$ ) / FC

存活率(Survival rate, SR; %)= $100 \times N_f / N_i$

式中, FC(g)为每尾鱼摄食饲料总量(风干样重);  $t$ (d)为饲喂天数;  $W_0$ (g/尾)为平均每尾鱼初始体重;  $W_t$ (g/尾)为平均每尾鱼终末体重;  $N_i$ 为实验初始鱼尾数;  $N_f$ 为实验结束鱼尾数。

**肠道组织切片制作与观察** 将中肠样品固定至少24h再进行脱水, 处理后的样品放入石蜡包埋机(JB-L5, 武汉俊杰电子有限公司)包埋。样品制成蜡块后在石蜡切片机(LEICA RM201, 上海徕卡仪器有限公司)中切片3—5 μm, 再去除表面水分进行烤片。接着用HE(苏木精-伊红)染色, 封片。最后在正置荧光显微镜(BX80-JPA, Olympus, Japan)下观察并拍照。

**肠道抗氧化能力的测定** 采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定肠道总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-AOC)、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione per-

oxidase, GSH-Px)、还原性谷胱甘肽(Reduced glutathione, GSH)和丙二醛(Malondialdehyde, MDA), 测定方法参考说明书进行。

**肠道微生物菌群的测定** 使用 E.Z.N.A. Soil DNA Kit(Omega Bio-tek, Inc., USA)试剂盒提取所有肠道样本的基因组 DNA, 提取方法参照试剂盒说明书。之后使用 Nanodrop 2000 (ThermoFisher Scientific, Inc., USA)检测 DNA 质量和浓度。检验合格的样品送至北京奥维森基因科技有限公司在 Illumina Miseq/Novaseq 6000 (Illumina, Inc., USA)平台测序, 测序策略为 PE250/PE300。具体操作步骤和检测分析过程与Xu等<sup>[20]</sup>一致。

### 1.5 数据统计与分析

实验结果均以平均值±标准差表示。采用

SPSS 20.0软件对所得数据进行单因素方差分析(ANOVA), 然后进行Duncan's多重检验, 各个组之间的显著性水平设为 $P<0.05$ 。基于 OTU 及其丰度结果, 使用 QIIME (v1.8.0)软件计算Alpha多样性(Chao1、ACE、Shannon 以及 PD\_whole\_tree指数)和Beta多样性。用Kruskal Wallis法分析肠道菌群差异。

## 2 结果

### 2.1 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼生长性能的影响

不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼生长性能的影响见表2。可知, 与LQBF0组相比, LQBF0+YC组、LQBF10+YC组

表1 实验饲料组成、主要营养指标及组胺水平

Tab. 1 Ingredients, proximate composition and histamine levels of the experimental diets

| 项目Item                                                | 组别Group |          |           |           |           |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                       | LQBF0   | LQBF0+YC | LQBF10+YC | LQBF20+YC | LQBF30+YC |
| 原料及其比例Name and composition of ingredient (%)          |         |          |           |           |           |
| 白鱼粉(一级) White fish meal (Grade I) <sup>1</sup>        | 30.00   | 30.00    | 20.00     | 10.00     | 0         |
| 红鱼粉(二级) Brown fish meal (Grade II) <sup>2</sup>       | 0.00    | 0.00     | 10.00     | 20.00     | 30.00     |
| 红鱼粉(特级) Brown fish meal (Top grade) <sup>3</sup>      | 36.00   | 36.00    | 36.00     | 36.00     | 36.00     |
| α淀粉α-starch                                           | 24.5    | 24.4     | 24.88     | 25.39     | 25.88     |
| 膨化大豆Puffed soybean                                    | 3.00    | 3.00     | 3.00      | 3.00      | 3.00      |
| 酵母粉Beer yeast powder                                  | 4       | 4        | 3.83      | 3.66      | 3.49      |
| 鱼油Fish oil                                            | 0.5     | 0.5      | 0.34      | 0.19      | 0         |
| 甜菜碱Betaine                                            | 0.50    | 0.50     | 0.50      | 0.50      | 0.50      |
| 氯化胆碱Choline chloride                                  | 0.50    | 0.50     | 0.50      | 0.50      | 0.50      |
| 磷酸二氢钙Monocalcium phosphate                            | 0.50    | 0.50     | 0.35      | 0.16      | 0.03      |
| 维生素预混料Vitamin premix <sup>4</sup>                     | 0.40    | 0.40     | 0.40      | 0.40      | 0.40      |
| 矿物质预混料Mineral premix <sup>5</sup>                     | 0.10    | 0.10     | 0.10      | 0.10      | 0.10      |
| 酵母培养物Yeast culture                                    | 0.00    | 0.10     | 0.10      | 0.10      | 0.10      |
| 总计Total                                               | 100.00  | 100.00   | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 营养组成及组胺水平Nutritional composition and histamine levels |         |          |           |           |           |
| 粗蛋白Crude protein (%)                                  | 48.44   | 48.34    | 48.28     | 48.22     | 48.19     |
| 粗脂肪 Crude lipid (%)                                   | 5.88    | 5.88     | 5.87      | 5.87      | 5.88      |
| 灰分Ash (%)                                             | 12.14   | 12.19    | 12.09     | 12.65     | 13.09     |
| 组胺Histamine (mg/kg)                                   | 101     | 96       | 187       | 242       | 361       |

注: <sup>1</sup>一级白鱼粉: 粗蛋白含量68.46%; 粗脂肪含量7.14%; 灰分含量18.66%; 组胺水平22.24 mg/kg。 <sup>2</sup>低品质红鱼粉: 粗蛋白含量69.25%; 粗脂肪含量8.39%; 灰分含量21.28%; 组胺水平868.17 mg/kg。 <sup>3</sup>特级红鱼粉: 粗蛋白含量70.61%; 粗脂肪含量8.56%; 灰分含量15.08%; 组胺水平156.12 mg/kg。 <sup>4</sup>每千克维生素预混料含: 维生素 A 3300000 IU; 维生素D3 416000 IU; 维生素E 15000 mg; 维生素k3 1000 mg; 维生素B1 2667 mg; 维生素B2 5000 mg; 维生素B6 2000 mg; 维生素B12 10 mg; D-生物素 50 mg; D-泛酸 10000 mg; 叶酸 333 mg; 烟酰胺 23000 mg; 维生素C 30000 mg; 肌醇30000 mg; 乙氧基喹啉500 mg。 <sup>5</sup>每千克矿物质预混料含: 锌 95 g; 锰 38 g; 铜 12 g; 铁 175 g; 钴 0.8 g; 碘 5.0 g; 硒 0.8 g

Note: <sup>1</sup>S White fish meal (Grade I): crude protein 68.46%; crude fat 7.14%; ash 18.66%; histamine level 22.24 mg/kg; <sup>2</sup>Brown fish meal (Grade II): crude protein content 69.25%; crude fat content 8.39%; ash content 21.28%; histamine level 868.17 mg/kg; <sup>3</sup>Brown fish meal (Top grade): crude protein content 70.61%; crude fat content 8.56%; ash content 15.08%; histamine level 156.12 mg/kg; <sup>4</sup>Vitamins premixed per kg contains: Vitamin A 3300000 IU; Vitamin D3 416000 IU; Vitamin E 15000 mg; Vitamin k3 1000 mg; Vitamin B1 2667 mg; Vitamin B2 5000 mg; Vitamin B6 2000 mg; Vitamin B12 10 mg; D-Biotin 50 mg; D-Pantothenic Acid 10000 mg; Folic Acid 333 mg; Niacinamide 23000mg; Vitamin C 30000 mg; Inositol 30000 mg; Ethoxyquinoline 500 mg; <sup>5</sup>Each kg of mineral premix contains Zinc 95 g; manganese 38 g; copper 12 g; iron 175 g; cobalt 0.8 g; iodine 5.0 g; selenium 0.8 g per kg of mineral premix

的WGR、SGR、FI和FE显著提高( $P<0.05$ ); LQBF20+YC组的WGR、SGR、FI和FE无显著差异( $P>0.05$ ); LQBF30+YC组的WGR、SGR、FI和FE显著降低( $P<0.05$ )。与LQBF0组相比, LQBF0+YC组、LQBF10+YC组和LQBF20+YC组的SR无显著差异( $P>0.05$ ); LQBF30+YC组的SR显著降低( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道组织形态的影响

不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道组织形态的影响见表3和图1。由表3和图1可知, 与LQBF0组相比, LQBF0+YC组、LQBF10+YC组的绒毛高度显著提高( $P<0.05$ ); LQBF20+YC组的肠道绒毛高度无显著差异( $P>0.05$ ); LQBF30+YC组的绒毛高度显著降低( $P<0.05$ )。与LQBF0组相比, LQBF0+YC组、LQBF10+YC组、LQBF20+YC组的肌层厚度显著提高( $P<0.05$ ); LQBF30+YC组的绒毛高度显著降低( $P<0.05$ )。LQBF10+YC组和LQBF20+YC组之间的肌层厚度无显著差异( $P>0.05$ )。

## 2.3 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化能力的影响

不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化能力的影响见表4。由表4可知, 与LQBF0组相比, LQBF0+YC组的T-AOC水平及SOD、GSH-Px、GSH活性显著升高( $P<$

0.05), MDA含量显著降低( $P<0.05$ ), CAT活性无显著差异( $P>0.05$ ); LQBF10+YC组的SOD、GSH-Px活性显著升高( $P<0.05$ ), T-AOC水平及CAT、GSH活性无显著差异( $P>0.05$ ), MDA含量显著降低( $P<0.05$ ); LQBF20+YC组的T-AOC、MDA含量及SOD、CAT、GSH-Px、GSH活性无显著差异( $P>0.05$ ); LQBF30+YC组的T-AOC水平显著升高( $P<0.05$ ), SOD、CAT、GSH-Px、GSH活性显著降低( $P<0.05$ ), MDA含量显著升高( $P<0.05$ )。

## 2.4 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群的影响

由图2可知, LQBF0+YC组和LQBF20+YC的Chao1指数、物种数和谱系多样性显著低于LQBF0组( $P<0.05$ ), LQBF0+YC组和LQFM20+YC组之间的差异不显著( $P>0.05$ )。而在shannon指数上, LQBF0+YC组显著低于LQBF0组和LQBF20+YC组( $P<0.05$ ); LQBF0组和LQBF20+YC组之间的差异不显著( $P>0.05$ )。

由图3可知, LQBF0组与LQBF0+YC组和LQBF20+YC组的组间未出现交集。而LQBF0+YC组和LQBF20+YC组的菌群差异不明显。LQBF0+YC组和LQBF20+YC组的组内菌种数量分布均匀。

由图4可知, LQBF0组、LQBF0+YC组和LQBF20+YC组肠道菌群在门水平上的优势菌门组成类似, 优势菌群主要有变形菌门(Proteobacteria)、厚

表2 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effect of yeast cultures on the growth performance of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

| 项目Item         | 组别Group                  |                          |                          |                          |                          |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                | LQBF0                    | LQBF0+YC                 | LQBF10+YC                | LQBF20+YC                | LQBF30+YC                |
| 初始均重IBW (g/尾)  | 13.49±0.04 <sup>a</sup>  | 13.51±0.03 <sup>a</sup>  | 13.53±0.06 <sup>a</sup>  | 13.54±0.06 <sup>a</sup>  | 13.55±0.08 <sup>a</sup>  |
| 终末均重FBW (g/尾)  | 32.29±0.4 <sup>c</sup>   | 40.02±1.21 <sup>a</sup>  | 35.90±0.69 <sup>b</sup>  | 32.52±0.17 <sup>c</sup>  | 28.07±0.95 <sup>d</sup>  |
| 增重率WGR (%)     | 139.00±3.95 <sup>c</sup> | 196.01±9.02 <sup>a</sup> | 165.13±4.33 <sup>b</sup> | 140.37±2.16 <sup>c</sup> | 107.67±6.40 <sup>d</sup> |
| 特定生长率SGR (%/d) | 1.55±0.03 <sup>c</sup>   | 1.93±0.05 <sup>a</sup>   | 1.74±0.03 <sup>b</sup>   | 1.58±0.01 <sup>c</sup>   | 1.30±0.05 <sup>d</sup>   |
| 摄食量FI (g/尾)    | 24.15±0.48 <sup>c</sup>  | 30.47±1.18 <sup>a</sup>  | 27.31±0.84 <sup>b</sup>  | 25.08±0.35 <sup>c</sup>  | 20.20±1.25 <sup>d</sup>  |
| 饲料效率FE (%)     | 77.75±0.58 <sup>c</sup>  | 86.02±0.92 <sup>a</sup>  | 81.90±0.54 <sup>b</sup>  | 76.87±0.26 <sup>c</sup>  | 72.06±0.48 <sup>d</sup>  |
| 成活率SR (%)      | 98.75±1.59 <sup>a</sup>  | 97.78±1.57 <sup>a</sup>  | 97.79±1.57 <sup>a</sup>  | 97.50±1.67 <sup>a</sup>  | 88.85±1.60 <sup>b</sup>  |

注: 表中数值为4个重复的平均值±标准差; 每一行数据右上角字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ); 下同

Note: Values are means±SD ( $n=4$ ). Different letters in the upper right corner of each row indicate significant differences ( $P<0.05$ ); The same applies below

表3 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼绒毛高度和肌层厚度的影响

Tab. 3 Effect of yeast cultures on the height of chorionic villi and thickness of muscle layers in juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

| 项目Item (μm)            | 组别Group                   |                            |                           |                           |                           |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                        | LQBF0                     | LQBF0+YC                   | LQBF10+YC                 | LQBF20+YC                 | LQBF30+YC                 |
| 绒毛高度Villus height      | 609.03±20.32 <sup>c</sup> | 1055.69±26.04 <sup>a</sup> | 924.80±34.77 <sup>b</sup> | 617.55±22.58 <sup>c</sup> | 506.80±24.25 <sup>d</sup> |
| 肌层厚度Muscular thickness | 127.53±11.68 <sup>c</sup> | 227.78±8.59 <sup>a</sup>   | 191.69±18.90 <sup>b</sup> | 179.14±18.88 <sup>b</sup> | 89.84±5.94 <sup>d</sup>   |

壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidota)、放线菌门(Actinobacteriota)和梭杆菌门(Fusobacteriota)。LQBF0组、LQBF0+YC组和LQBF20+YC组的变形菌门占比分别为83.57%、84.18%和81.60%,厚壁菌门占比分别为12.54%、15.21%和17.37%。其他优势菌门相对丰度小于5%,如拟杆菌门(1.18%、

0.06%和0.32%)、放线菌门(0.80%、0.21%和0.35%)和梭杆菌门(0.35%、0.00%和0.05%)。

由图5可知,LQBF0组、LQBF0+YC组及LQBF20+YC组美洲鳗肠道主要存在大肠杆菌-志贺菌属(*Escherichia-Shigella*)、寡养单胞菌属(*Stenotrophomonas*)、短小芽孢杆菌属(*Lysinibacillus*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、食酸菌属(*Acidovorax*)、草螺菌属(*Herbaspirillum*)。与对照组相比,LQBF0+YC组的大肠杆菌-志贺菌属和短小芽孢杆菌属相对丰度呈上升趋势,而寡养单胞菌属、不动杆菌属、食酸菌属及草螺菌属相对丰度呈下降趋势;LQBF20+YC组的大肠杆菌-志贺菌属和短小芽孢杆菌属相对丰度呈上升趋势,寡养单胞菌属的相对丰度无显著差异,不动杆菌属、食酸菌属及草螺菌属相对丰度呈下降趋势。

3 讨论

3.1 美洲鳗幼鱼生长性能

在本实验中,基础饲料中直接添加酵母培养物显著提高了WGR、SGR、FE及FI,说明饲料中添加0.1%酵母培养物对美洲鳗幼鱼具有促生长作用。这与在松浦镜鲤(*Songpu mirror carp*)<sup>[21]</sup>饲料中添加0.03%的浓缩型酵母培养物促进生长;在饲料中添加2%的酵母培养物提高斑点叉尾鲴<sup>[11-13]</sup>、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)<sup>[22]</sup>及团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)<sup>[23]</sup>生长性能的结果类似。由此可见,饲料中添加酵母培养物可以显著提高鱼类的生长性能,不同鱼类饲料中适宜的酵母培养物的添加水平存在差异。

本实验用10%、20%和30%的低品质红鱼粉替代白鱼粉后,饲料组胺水平分别为187、242和361 mg/kg。关于饲料组胺水平影响鳗鲡生长的报道仅见于许琪娅<sup>[5]</sup>在49 mg/kg鱼粉源组胺的美洲鳗幼鱼饲料中添加不同水平外源组胺的研究,发现饲料组胺总水平超过200 mg/kg组美洲鳗幼鱼的生长性

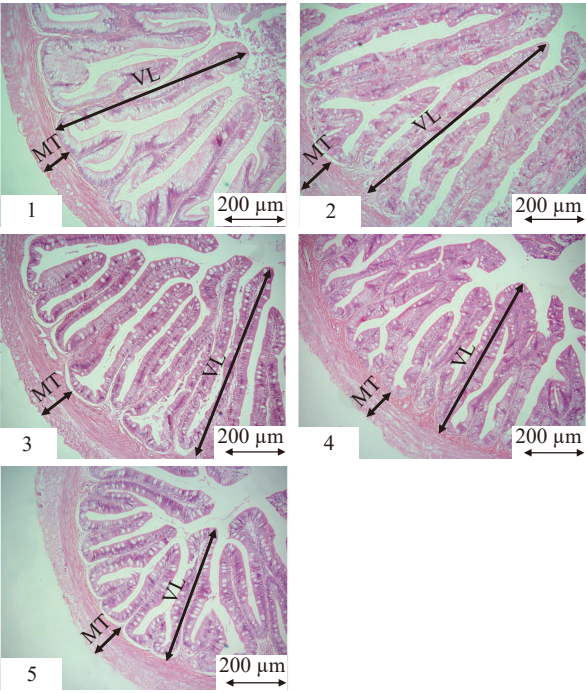


图1 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗幼鱼肠道组织形态的影响

Fig. 1 Effect of yeast cultures on the intestinal histomorphology of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

图中1—5分别表示LQBF0+YC组、LQBF 10+YC组、LQBF 20+YC组、LQBF 30+YC组中美洲鳗的在组织形态结构,VL. 绒毛长度,MT. 肌层厚度

The graphs 1—5 represent the morphological structure of American eels in LQBF0+YC, LQBF 10+YC, LQBF 20+YC, and LQBF 30+YC groups, respectively, VL. villus length, MT. thickness of the muscle layer

表4 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗幼鱼肠道抗氧化能力的影响

Tab. 4 Effects of yeast cultures on the intestinal antioxidant capacity of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

| 项目Item                      | 组别Group                  |                           |                          |                           |                          |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                             | LQBF0                    | LQBF0+YC                  | LQBF10+YC                | LQBF20+YC                 | LQBF30+YC                |
| 丙二醛MDA (nmol/g)             | 187.72±8.03 <sup>b</sup> | 57.49±13.15 <sup>d</sup>  | 81.03±3.70 <sup>c</sup>  | 174.15±13.65 <sup>b</sup> | 357.71±8.25 <sup>a</sup> |
| 抗氧化能力T-AOC (mmol/g prot)    | 0.37±0.03 <sup>b</sup>   | 0.56±0.02 <sup>a</sup>    | 0.46±0.02 <sup>b</sup>   | 0.47±0.02 <sup>b</sup>    | 0.46±0.01 <sup>c</sup>   |
| 超氧化物歧化酶SOD (U/mg prot)      | 200.74±3.73 <sup>c</sup> | 231.13±3.15 <sup>a</sup>  | 215.68±2.26 <sup>b</sup> | 195.69±3.29 <sup>c</sup>  | 174.19±4.67 <sup>d</sup> |
| 过氧化氢酶CAT (U/mg prot)        | 11.61±0.74 <sup>a</sup>  | 11.24±0.60 <sup>a</sup>   | 11.85±0.58 <sup>a</sup>  | 11.09±0.75 <sup>a</sup>   | 10.06±0.69 <sup>b</sup>  |
| 谷胱甘肽过氧化物酶GSH-Px (U/mg prot) | 36.45±1.61 <sup>b</sup>  | 46.14±2.75 <sup>a</sup>   | 44.32±0.71 <sup>a</sup>  | 35.32±1.32 <sup>b</sup>   | 26.45±2.07 <sup>c</sup>  |
| 谷胱甘肽GSH (μmol/gprot)        | 117.12±3.56 <sup>b</sup> | 143.10±11.34 <sup>a</sup> | 114.72±0.92 <sup>b</sup> | 115.75±2.79 <sup>b</sup>  | 86.73±3.05 <sup>c</sup>  |

能显著下降。研究表明, 鱼粉源组胺的毒性效应高于外源添加组胺, 鱼粉中的其他生物胺(如尸胺、腐胺和酪胺等)还可能通过发挥协同作用或抑制组胺的代谢而使组胺毒性增强<sup>[3]</sup>。因此, 本实验中使

用20%和30%低品质鱼粉饲料的两个处理组, 都存在着高水平饲料组胺对美洲鳗鲡幼鱼生长性能带来负面影响的可能性, 而使用10%低品质鱼粉饲料对美洲鳗鲡幼鱼生长的影响程度还有待查明。在本实验条件下, 与饲喂基础饲料组相比, 添加酵母培养物使10%低品质红鱼粉饲料组美洲鳗鲡的生长性能显著提高, 对20%低品质红鱼粉饲料组各生长指标无显著影响, 未改善30%低品质红鱼粉饲料组生长性能。添加酵母培养物后不同低品质红鱼粉组美洲鳗鲡幼鱼生长性能变化的差异, 可能是不同组饲料组胺水平导致的危害程度不同所致。总体上看添加酵母培养物可在一定程度上提高鳗鲡

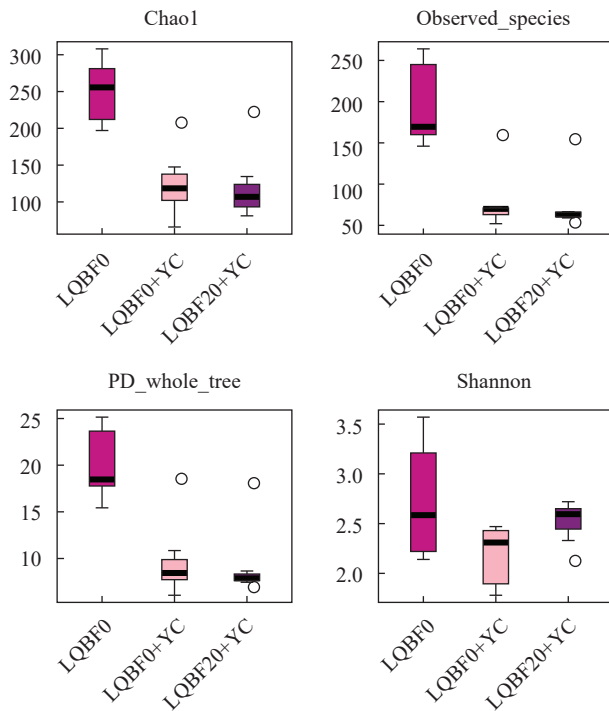


图2 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼Alpha多样性的影响

Fig. 2 Effect of yeast cultures on the intestinal microbial alpha diversity of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

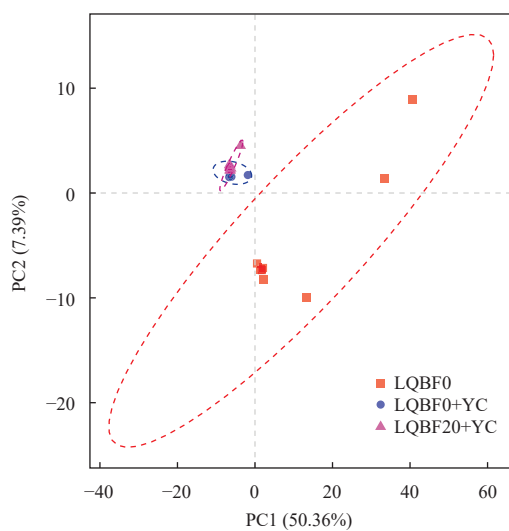


图3 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群Beta多样性的影响

Fig. 3 Effect of yeast cultures on the intestinal microbial beta diversity of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal

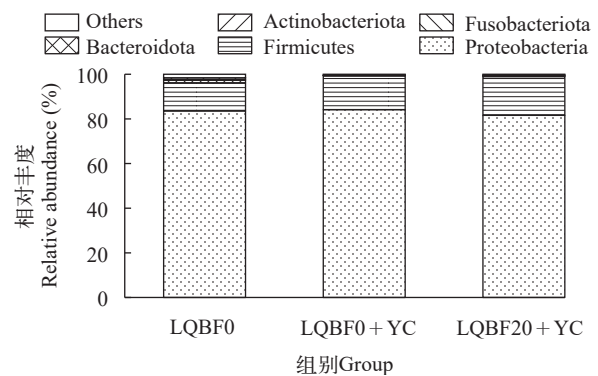


图4 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群组成的影响(门水平)

Fig. 4 Effect of yeast cultures on the intestinal microbiota composition of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal (phylum level)

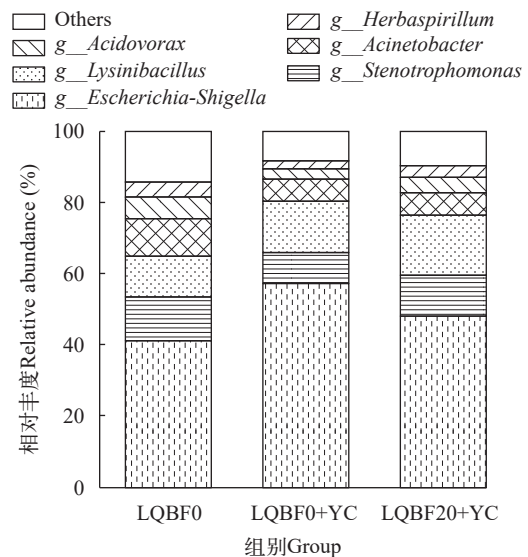


图5 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群组成的影响(属水平)

Fig. 5 Effect of yeast cultures on the intestinal microbiota composition of juvenile American eel fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal (genus level)

饲料中低品质红鱼粉比例,这与饲料中添加酵母培养物能够显著缓解饲料中高比例浓缩棉籽蛋白对大口黑鲈生长的不利影响<sup>[17]</sup>的结果类似。此外,提高酵母培养物添加水平是否能进一步缓解,其适宜添加水平与饲料组胺水平间的关系还需要进一步研究。

### 3.2 美洲鳗鲡幼鱼肠道组织形态

肠道是鱼类对营养物质进行消化吸收营养物质的主要器官。肠道肌层厚度、肠道绒毛高度增加能提高肠道收缩能力并增大肠道与食物的接触面积,可以提高肠道对饲料中营养物质的消化率和吸收率<sup>[24, 25]</sup>。本实验结果显示,在基础饲料中直接添加酵母培养物能够增加肠道肌层厚度和绒毛高度,说明酵母培养物可以促进美洲鳗鲡消化吸收。这与酵母培养物提高鲤(*Cyprinus carpio*)和草鱼的肠道绒毛高度的结果类似<sup>[15, 26]</sup>。与饲喂基础饲料组相比,添加酵母培养物显著提高10%低品质红鱼粉饲料组美洲鳗鲡幼鱼的肠道肌层厚度和绒毛高度,显著提高20%低品质红鱼粉饲料组肠道肌层厚度,对绒毛高度无显著影响。考虑到以往研究<sup>[5]</sup>饲料中高水平组胺对美洲鳗鲡肠道造成的损伤情况,本实验添加酵母培养物可能显著改善低品质红鱼粉饲料引起的美洲鳗鲡肠道结构损伤,促进肠道绒毛和肌层的生长修复,使肠皱襞完整性一定程度上得到恢复<sup>[25, 27]</sup>。这与酵母培养物改善大豆凝集素引起乌苏拟鲮肠道黏膜脱落、刷状边界膜边界损伤以及绒毛破裂问题<sup>[18]</sup>,修复高豆粕饲料对黄颡鱼造成的肠道损伤情况<sup>[16]</sup>的结果类似。酵母培养物已被证明可通过增加紧密连接蛋白的表达来改善肠道上皮完整性和屏障功能,减轻应激对鱼体肠道黏膜的伤害<sup>[28]</sup>。这可能与酵母培养物中含有核苷酸有关,已有研究表明快速生长的动物因肠道细胞周转较快且肠道上皮细胞不能从头合成核苷酸,因此更需要食物中的游离核苷酸来促进肠道黏膜细胞的增殖和分化,尤其是处于应激状态或者动物生长的特殊阶段<sup>[29]</sup>。而本实验酵母培养物对饲料中30%低品质红鱼粉引起美洲鳗鲡肠道损伤的修复效果不明显,也与该组生长性能降低的结果相对应。可能是该比例的低品质红鱼粉引起的肠道损伤强度过大,0.1%酵母培养物不足以缓解产生的肠道损伤所致,进一步提高酵母培养物添加水平是否有效果,也有待于查明。

### 3.3 美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化能力

鱼类的抗氧化系统在修复氧化应激对机体所造成的损伤中起着重要作用。当处于应激状态时,会产生过多的活性氧和自由基,破坏电位平衡。抗氧化酶系统可以修复合活性氧和自由基所造成的损

伤,鱼类的抗氧化系统由非酶类化合物和抗氧化酶组成,包括SOD、CAT和GSH-Px、GSH<sup>[28]</sup>。丙二醛是不饱和脂质过氧化的主要产物,其含量与机体氧化应激水平呈正相关<sup>[30]</sup>。本实验结果显示,在基础饲料直接添加酵母培养物可以提高美洲鳗鲡肠道的T-AOC水平,增强SOD、GSH-Px、GSH活性,降低MDA水平,这说明饲料中添加酵母培养物可以增强美洲鳗鲡肠道抗氧化能力,降低氧化应激损伤。在本实验中,与饲喂基础饲料组相比,添加酵母培养物可使10%低品质红鱼粉饲料中使美洲鳗鲡肠道SOD、GSH-Px活性显著升高,MDA水平降低;对饲喂20%低品质红鱼粉饲料美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化各指标无显著影响;未改善30%低品质红鱼粉饲料组美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化能力。这些实验结果总体上与添加酵母培养物显著降低饲喂高水平大豆凝集素饲料乌苏拟鲮肠道MDA含量,提高肠道中CAT、SOD和T-AOC活性<sup>[18]</sup>;显著提高饲喂高棉籽饲料大口黑鲈肠道SOD、CAT活性<sup>[17]</sup>的报道类似。上述众多研究说明,酵母培养物对抗氧化酶系统具有正向调节作用,可减轻低品质红鱼粉对肠道氧化应激损伤,有助于恢复红鱼粉中组胺胁迫下美洲鳗鲡幼鱼肠道抗氧化能力。

### 3.4 美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群

鱼类肠道中庞大且复杂的微生物菌群结构受食物组成、环境因素及生理状态等影响,对维持肠道健康起着至关重要的作用<sup>[31]</sup>。Alpha多样性分析可以反映肠道菌群物种丰富度和多样性<sup>[32]</sup>。本实验结果显示,在基础饲料和低品质红鱼粉替代比例20%的饲料中添加酵母培养物均能显著降低美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群的alpha多样性,这与Zhao等<sup>[33]</sup>研究发现高脂饲料中添加酵母培养物后造成斑马鱼(*Danio rerio*)肠道菌群多样性下降、Zhou等<sup>[14]</sup>在饲料中添加0.1%和0.2%酵母培养物均降低了大口黑鲈肠道菌群的alpha多样性的结果一致。这可能是因为酵母培养物中的有机酸对有害菌发挥了抗菌作用从而影响了肠道菌群的结构和多样性<sup>[11]</sup>。而在高淀粉高棉籽蛋白饲料中添加酵母培养物能显著提高大口黑鲈肠道微生物区系的相对丰度<sup>[17]</sup>。也有研究发现酵母培养物对草鱼的肠道菌群多样性无显著差异<sup>[34]</sup>。因此,酵母培养物对肠道菌群多样性影响的差异与酵母培养物添加量、鱼的种类有关。

通过PLS-DA分析结果,可以发现在饲料中添加酵母培养物可以显著改变美洲鳗鲡幼鱼的肠道菌群结构。在本实验中,美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群主要组成为变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门、放线

菌门和梭杆菌门, 在基础饲料和使用20%低品质红鱼粉的饲料中添加酵母培养物降低了美洲鳗鲡幼鱼肠道中的拟杆菌门、放线菌门和梭杆菌门的相对丰度。拟杆菌门中的部分菌种为条件致病菌, 当肠道微生态失调时将导致内源性感染<sup>[35, 36]</sup>。研究发现放线菌门相对丰度的增加会损伤罗非鱼的肠道上皮组织以及造成肠道代谢功能失调, 进而提高了感染病原菌的可能性<sup>[37]</sup>。梭杆菌门与肠炎紧密相关, 多种梭杆菌菌株可引起宿主的促炎反应, 提高病原菌在肠道上皮细胞的吸附力<sup>[38]</sup>。以上结果说明, 酵母培养物可以调整肠道微生物结构, 有利于美洲鳗鲡肠道健康。这与50%豆粕含量饲料中添加酵母培养物降低了黄颡鱼肠道梭杆菌门相对丰度<sup>[16]</sup>、饲料中添加酵母培养物降低了大口黑鲈鱼肠道放线菌门相对丰度<sup>[13]</sup>的结果相似。

在本实验中, 大肠杆菌-志贺菌属、寡养单胞菌属、短小芽孢杆菌属、不动杆菌属、食酸菌属、草螺菌属是美洲鳗鲡幼鱼肠道的主要菌属。在本实验中, 大肠杆菌-志贺菌属在各组肠道菌群中占比例最高。大肠杆菌-志贺菌属是常见的传统致病菌, 但近来的研究认为大肠杆菌-志贺菌在动物氨基酸利用中起着重要作用, 可促进机体对蛋白质的消化吸收<sup>[39, 40]</sup>。在养殖实验过程中未观察到鳗鲡发病情况, 说明该条件下酵母培养物可能降低肠道中大肠杆菌-志贺菌的致病风险, 其在美洲鳗鲡肠道中的具体作用还有待于进一步研究。短小芽孢杆菌属可通过产生多种具有抗菌活性的化合物有效改善动物肠道的感染程度, 且具有一定的生物降解功能, 可应用于养殖水质调节<sup>[41]</sup>。本实验在基础饲料和使用20%低品质红鱼粉的饲料中, 添加酵母培养物均提高了美洲鳗鲡肠道中的短小芽孢杆菌属、大肠杆菌-志贺菌属的相对丰度, 这表明酵母培养物可以通过增加肠道中的益生菌来改善红鱼粉诱导的美洲鳗鲡肠道损伤。在本实验中, 酵母培养物降低了寡养单胞菌属、不动杆菌属、食酸菌属及草螺菌属的相对丰度。寡养单胞菌属为是鱼类的致病菌, 该属仅有的菌种嗜麦芽寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*)可引发斑点叉尾鲟的传染性细菌病, 死亡率极高<sup>[42]</sup>。不动杆菌属里存在许多鱼类潜在病原菌, 大多数对抗生素耐药性高, 其中鲍曼不动杆菌(*Acinetobacter baumannii*)可引起斑点叉尾鲟和线鳢(*Channa striatus*)的严重病害<sup>[43]</sup>。食酸菌属与鱼类炎症密切相关, 斑马鱼肠道中食酸菌属的过度表达与促炎因子TNF的上调呈正相关, 进而加剧了肠道炎症<sup>[44]</sup>。草螺菌属为条件病菌, 常见感染囊性纤维化和免疫功能低下的癌症

患者, 易引发菌血症和败血症, 在鱼类上尚未见到相关报道<sup>[45]</sup>。本实验中添加酵母培养物降低了美洲鳗鲡肠道中上述潜在病原菌的丰度, 有助于减少发病几率。酵母培养物中含有多种功能性成分可调节肠道菌群, 如甘露寡糖、有机酸。甘露寡糖主要通过与病原菌表面的外源凝集素结合, 减少致病菌对肠道黏膜的结合, 阻碍其在肠道内的定植, 进而改善动物肠道微生物区<sup>[46]</sup>。有机酸可通过抑制消化道内有害细菌增殖发挥抑菌作用, 促进多种益生菌的生长代谢<sup>[11]</sup>。由此可见, 饲料中添加酵母培养物可增加美洲鳗鲡肠道中有益菌的丰度, 抑制肠道有害菌增殖, 有助于维持肠道菌群稳态, 一定程度缓解了品质相对较低的红鱼粉对美洲鳗鲡幼鱼肠道菌群的负面影响, 但详细作用机制有待进一步研究。

## 4 结论

在本实验条件下, 添加0.1%酵母培养物可通过提高肠道抗氧化能力、改善肠道组织结构、降低肠道菌群多样性、有益调节肠道菌群结构从而促进美洲鳗鲡幼鱼生长, 使20%低品质红鱼粉等比例替代饲料中白鱼粉且对美洲鳗鲡健康无负面影响。在高比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物的适宜水平还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Zhang X, Ye H, Wang H R, *et al.* Analysis on the development of eel industry in China [J]. *China Fisheries*, 2022(11): 40-45. [张翔, 叶翬, 王虹人, 等. 中国鳗鲡产业发展情况探析 [J]. *中国水产*, 2022(11): 40-45.]
- [2] Jannathulla R, Rajaram V, Kalanjiam R, *et al.* Fishmeal availability in the scenarios of climate change: Inevitability of fishmeal replacement in aquafeeds and approaches for the utilization of plant protein sources [J]. *Aquaculture Research*, 2019, **50**(12): 3493-3506.
- [3] Lu W Q, Yu H X, Liang Ying, *et al.* Effects of White fish meal replaced by low-quality brown fish meal with compound additives on growth performance and intestinal health of juvenile American eel (*Anguilla rostrata*) [J]. *Animals*, 2023, **13**(18): 2873.
- [4] Wang S, He Y X, Xi F, *et al.* Oligomeric proanthocyanidins alleviate the detrimental effects of dietary histamine on intestinal health of juvenile American eels (*Anguilla rostrata*) [J]. *Fishes*, 2023, **8**(8): 413.
- [5] Xu Q Y. Preliminary study of toxic effects of dietary histamine on American eel (*Anguilla rostrata*) juveniles [D]. Xiamen: Jimei University, 2021: 4-15. [许琪娅. 饲料组胺对美洲鳗鲡幼鱼毒性效应的初步研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2021: 4-15.]
- [6] Sudhakaran G, Guru A, Haridevamuthu B, *et al.* Molecu-

- lar properties of postbiotics and their role in controlling aquaculture diseases [J]. *Aquaculture Research*, 2022, **53**(9): 3257-3273.
- [7] Naheed M, Maryam D. Probiotic Bacteria and Postbiotic Metabolites: Role in Animal and Human Health [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021: 85-90.
- [8] del Valle J C, Bonadero M C, Fernández-Gimenez A V. *Saccharomyces cerevisiae* as probiotic, prebiotic, synbiotic, postbiotics and parabiotics in aquaculture: an overview [J]. *Aquaculture*, 2023(569): 739342.
- [9] Wang W P, Zhang H Y, Wang L, *et al.* Nutritional efficacy of yeast culture and its application in animal breeding [J]. *Feed Research*, 2020, **43**(5): 152-155. [王文盼, 张红艳, 王亮, 等. 酵母培养物的营养功效及其在动物养殖中的应用进展 [J]. 饲料研究, 2020, **43**(5): 152-155.]
- [10] Zhang X, Zhang T Z, Qu M R. Research progress and application of active dry yeast and yeast culture in ruminants [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(1): 20-29. [张弦, 章亭洲, 瞿明仁. 活性干酵母及酵母培养物在反刍动物中的研究进展与应用 [J]. 动物营养学报, 2022, **34**(1): 20-29.]
- [11] Lei Y J, Liu K F, Li Z, *et al.* Effect of yeast culture on growth performance, nutrient digestibility, immunity and intestinal flora of juvenile channel catfish [J]. *Feed Research*, 2020, **43**(7): 52-57. [雷宇杰, 刘开放, 李峥, 等. 饲料添加酵母培养物对斑点叉尾鲟幼鱼生长性能、营养物质消化率、免疫性能和肠道菌群的影响 [J]. 饲料研究, 2020, **43**(7): 52-57.]
- [12] Xia R, Hao Q, Xie Y, *et al.* Effects of dietary *Saccharomyces cerevisiae* on growth, intestinal and liver health, intestinal microbiota and disease resistance of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(24): 101157.
- [13] Robinette H, Young C, Meng F Y. Effect of yeast cultures on the growth performance of juvenile channel catfish [J]. *Feed Industry Magazine*, 2011, **32**(6): 25-27. [Robinette H, Young C, 孟繁伊. 酵母培养物对斑点叉尾鲟幼鱼生长性能的影响 [J]. 饲料工业, 2011, **32**(6): 25-27.]
- [14] Zhou M, Liang R, Mo J, *et al.* Effects of brewer's yeast hydrolysate on the growth performance and the intestinal bacterial diversity of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2018(484): 139-144.
- [15] Liu L H, Zhang H, Nie W, *et al.* Effects of grass carp feed added yeast culture on growth performance, the function of liver and bowel of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2014, **33**(1): 34-39. [刘立鹤, 张恒, 聂伟, 等. 草鱼配合饲料添加酵母培养物对草鱼生长性能、肝肠功能的影响 [J]. 武汉轻工大学学报, 2014, **33**(1): 34-39.]
- [16] Sun F. The study on the damage of the growth and health of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) by the content of soybean meal in diet and on the repairing effect of two additives [D]. Suzhou: Soochow University, 2020: 42-43. [孙飞. 日粮豆粕含量对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)生长和健康的损伤以及二种添加剂对其修复作用的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2020: 42-43.]
- [17] Xv Z C, Zhong Y F, Wei Y X, *et al.* Yeast culture supplementation alters the performance and health status of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed a high-plant protein diet [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, **27**(6): 2637-2650.
- [18] Bai Y, Liao Y, Song Y, *et al.* Dietary yeast culture alleviates intestinal-hepatic damage related to TLR2-MyD88-NF- $\kappa$ B signaling pathway and antioxidant capability in *Pseudobagrus ussuriensis* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(130): 428-435.
- [19] Bu X Y, Huang J S, Tao S Q, *et al.* Yeast cultures alleviate gossypol induced inflammatory response in liver tissue of Ussuri catfish (*Pseudobagrus ussuriensis*) [J]. *Aquaculture*, 2020(538): 732828.
- [20] Xu G, Xing W, Li T, *et al.* Dietary grape seed proanthocyanidins improved growth, immunity, antioxidant, digestive enzymes activities, and intestinal microbiota of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser baeri* Brandt ♀  $\times$  *A. schrenckii* Brandt ♂) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, **27**(6): 1983-1995.
- [21] Yan B R, Duan Y C, Chen J, *et al.* Effect of dietary yeast culture supplementation on growth and biochemical indices of songpu mirror carp [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2022, **39**(3): 59-66. [严冰荣, 段雨池, 陈洁, 等. 饲料中添加酵母培养物对松浦镜鲤生长及生化指标的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, **39**(3): 59-66.]
- [22] Owatari M S, da Silva L R, Ferreira G B, *et al.* Body yield, growth performance, and haematological evaluation of Nile tilapia fed a diet supplemented with *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2022(293): 115453.
- [23] Li G F, Ye Y T, Lin B X, *et al.* Effect of fermentation mother culture on the growth of bream [J]. *Feed Industry Magazine*, 2009, **30**(22): 17-22. [李高峰, 叶元土, 林炳贤, 等. 酵母培养物对团头鲂生长的影响 [J]. 饲料工业, 2009, **30**(22): 17-22.]
- [24] Li Y F, Chen T, Hu Y, *et al.* Effects of adding sanguinarine in low protein diet on growth performance, serum biochemical indices and intestinal health of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(11): 7332-7341. [李宜芳, 陈团, 胡毅, 等. 低蛋白质饲料中添加血根碱对草鱼生长性能、血清生化指标和肠道健康的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, **34**(11): 7332-7341.]
- [25] Dawood M A O, Eweedah N M, Elbially Z I, *et al.* Dietary sodium butyrate ameliorated the blood stress biomarkers, heat shock proteins, and immune response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to heat stress [J]. *Jour-*

- nal of Thermal Biology*, 2020(88): 102500.
- [26] Huang L, Ran C, He S, *et al.* Effects of dietary *Saccharomyces cerevisiae* culture or live cells with *Bacillus amyloliquefaciens* spores on growth performance, gut mucosal morphology, *hsp70* gene expression, and disease resistance of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Aquaculture*, 2015(438): 33-38.
- [27] Liu H Y, Li L X, Stephen A, *et al.* Effects of dietary yeast culture supplementation on growth, intestinal morphology, immunity, and disease resistance in *Epinephelus fuscoguttatus*♀ × *Epinephelus lanceolatus*♂ [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, **41**(3): 1-11. [刘泓宇, 李立贤, Stephen A, 等. 酵母培养物对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、肠道形态、免疫功能和抗病力的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2021, **41**(3): 1-11.]
- [28] Feng Z, Zhong Y, He G, *et al.* Yeast culture improved the growth performance, liver function, intestinal barrier and microbiota of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-starch diet [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(120): 706-715.
- [29] Burrells C, Williams P D, Southgate P J, *et al.* Dietary nucleotides: a novel supplement in fish feeds [J]. *Aquaculture*, 2001, **199**(1/2): 171-184.
- [30] Jia B Y, Zou F Y, Xu J J, *et al.* Fermented rapeseed meal on apparent digestibility, liver and intestinal health of yellow catfish (*Tachysurus fulvidraco*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(1): 34-43. [贾冰玉, 邹峰余, 徐杰杰, 等. 发酵菜籽粕对黄颡鱼表观消化率、肝脏及肠道健康的影响 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(1): 34-43.]
- [31] Meng X L, Li W J, Nie G X. Effect of different factors on the fish intestinal microbiota [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(1): 143-155. [孟晓林, 李文均, 聂国兴. 鱼类肠道菌群影响因子研究进展 [J]. 水产学报, 2019, **43**(1): 143-155.]
- [32] Ruan C L, Lai Z L, Xiao W, *et al.* Comparative study on intestinal flora structure of wild and cultured *Silurus lanzhouensi* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(11): 1734-1744. [阮超岭, 赖章龙, 肖伟, 等. 野生和养殖兰州鲇肠道菌群结构的比较 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(11): 1734-1744.]
- [33] Zhao Y, Hao Q, Zhang Q, *et al.* Nuclease treatment enhanced the ameliorative effect of yeast culture on epidermal mucus, hepatic lipid metabolism, inflammation response and gut microbiota in high-fat diet-fed zebrafish [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2022(131): 1182-1191.
- [34] Liu H, Li J, Guo X, *et al.* Yeast culture dietary supplementation modulates gut microbiota, growth and biochemical parameters of grass carp [J]. *Microb Biotechnology*, 2018, **11**(3): 551-565.
- [35] Wei M S, Zheng T, Lu S Q, *et al.* Ammonia-n stress on tissue structure, enzyme activity and intestinal microbiota of *Macropterus salmoides* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(1): 10-22. [魏孟申, 郑涛, 路思琪, 等. 氨氮胁迫对大口黑鲈幼鱼组织结构、酶活及肠道微生物的影响 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(1): 10-22.]
- [36] Wu Y B, Li Y D, Li X J, *et al.* The study and application on *Bacteroides* [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2007(1): 66-69. [吴彦彬, 李亚丹, 李小俊, 等. 拟杆菌的研究及应用 [J]. 生物技术通报, 2007(1): 66-69.]
- [37] Liu Z, Liu W, Ran C, *et al.* Abrupt suspension of probiotics administration may increase host pathogen susceptibility by inducing gut dysbiosis [J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 23214.
- [38] Kostic A D, Gevers D, Pedamallu C S, *et al.* Genomic analysis identifies association of *Fusobacterium* with colorectal carcinoma [J]. *Genome Research*, 2012, **22**(2): 292-298.
- [39] Fan P, Liu P, Song P, *et al.* Moderate dietary protein restriction alters the composition of gut microbiota and improves ileal barrier function in adult pig model [J]. *Scientific Reports*, 2017(7): 43412.
- [40] Gao R, Zhu C L, Li H, *et al.* Dysbiosis signatures of gut microbiota along the sequence from healthy, young patients to those with overweight and obesity [J]. *Obesity*, 2018, **26**(2): 351-361.
- [41] Liu B H, Luo Y X, Tao X M, *et al.* Screening and identification of *Bacillus pumilus* producing double active protein of anticoagulation and thrombolysis [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2014, **54**(3): 345-351. [刘冰花, 罗亚雄, 陶雪梅, 等. 产高活性抗凝溶栓双活性蛋白的短小芽孢杆菌的筛选及鉴定 [J]. 微生物学报, 2014, **54**(3): 345-351.]
- [42] Geng Y, Wang K Y, Xiao D, *et al.* Pathological studies on channel catfish induced by extracellular products of *Stenotrophomonas maltophilia* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(2): 345-352. [耿毅, 汪开毓, 肖丹, 等. 嗜麦芽寡养单胞菌胞外产物对斑点叉尾鲷损伤的病理学研究 [J]. 水生生物学报, 2010, **34**(2): 345-352.]
- [43] Cao S, Geng Y, Yu Z, *et al.* *Acinetobacter lwoffii*, an emerging pathogen for fish in *Schizothorax* genus in China [J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2018, **65**(6): 1816-1822.
- [44] Arias-Jayo N, Abecia L, Alonso-Sáez L, *et al.* High-fat diet consumption induces microbiota dysbiosis and intestinal inflammation in zebrafish [J]. *Microbial Ecology*, 2018, **76**(4): 1089-1101.
- [45] Dhital R, Paudel A, Bohra N, *et al.* *Herbaspirillum* infection in humans: a case report and review of literature [J]. *Case Reports in Infectious Diseases*, 2020(2020): 9545243.
- [46] Torrecillas S, Makol A, Benítez-Santana T, *et al.* Reduced gut bacterial translocation in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed mannan oligosaccharides (MOS) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2011, **30**(2): 674-681.

## YEAST CULTURE ON THE GROWTH AND INTESTINAL HEALTH OF JUVENILE AMERICAN EEL (*ANGUILLA ROSTRATA*) FED DIETS WITH VARYING PROPORTIONS OF LOW-QUALITY BROWN FISHMEAL

WU Xin-Yi<sup>1</sup>, XU Yi-Chuang<sup>1</sup>, XI Feng<sup>1</sup>, ZHANG Dian-Guang<sup>2</sup> and ZHAI Shao-Wei<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Modern Industry Technology for Eel, College of Fisheries, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. College of Marine Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the effects of dietary yeast culture (YC) supplementation on the growth and intestinal health of juvenile American eels (*Anguilla rostrata*) fed with varying proportions of low-quality brown fishmeal replacing high-quality white fishmeal. The experimental diets consisted of a basal diet devoid of low-quality brown fishmeal (Grade II) and four trial diets in which low-quality brown fishmeal (Grade II) replaced high-quality white fishmeal (Grade I) at levels of 0, 10%, 20%, and 30%. All trial diets containing low-quality brown fishmeal were supplemented with 0.10% YC. Over an eight-week period, American eels [initial weight of (13.52±0.05) g per fish] were administered the experimental diets. The results revealed that dietary YC supplementation significantly enhanced the growth performance, intestinal tissue morphology, and intestinal antioxidant capacity of juvenile American eels fed the basal diet and the diet with 10% low-quality brown fishmeal. Compared to the basal diet group, YC supplementation had no discernible impact on the growth performance, intestinal tissue morphology, and intestinal antioxidant capacity of eels fed the diet with 20% low-quality brown fishmeal. However, YC supplementation failed to mitigate the growth inhibition, intestinal injury, and disruption in intestinal flora induced by the 30% low-quality brown fishmeal diet in juvenile American eels. Furthermore, YC supplementation promoted the proliferation of probiotics and inhibited the growth of pathogenic bacteria in the intestines of eels fed the basal diet and the diet with 20% low-quality brown fishmeal. In conclusion, this study demonstrates that the inclusion of 0.1% YC in the diet promotes the growth performance and intestinal health of juvenile American eels, providing effective alternative to replacing 20% white fishmeal with low-quality red fishmeal. This research establishes a scientific foundation for reducing eel feed costs and the judicious utilization of YC in fish feed.

**Key words:** Yeast culture; Intestinal health; Growth performance; Antioxidant; *Anguilla rostrata*