

不同复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长、生理生化及免疫的影响

刘佳奇¹, 夏苏东¹, 雷明荃¹, 王凤昂¹, 张丹¹, 于子雯¹, 李海鸣², 孙志新³, 张守庆^{4*}

¹天津农学院天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津

²北京科拓恒通生物技术股份有限公司, 北京

³天津市滨海新区农业农村发展服务中心, 天津

⁴中科蓝海测试(天津)科技有限公司, 天津

收稿日期: 2026年2月27日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年3月30日

摘要

本研究以珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀)为研究对象, 探究不同种类的复合益生菌对石斑鱼生长、生理生化、免疫的影响。本研究共设置3个实验组分别为对照组(基础饲料)、添加益菌邦(精品)成分为: 干酪乳杆菌、植物乳杆菌、地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和益菌邦(护肠)成分为: 干酪乳杆菌、植物乳杆菌、乳酸片球菌、丁酸梭菌进行60 d的养殖实验。研究发现添加益菌邦(精品)可以显著提高珍珠龙胆石斑鱼的增重率和特定生长率、有效提高石斑鱼的吸收消化能力, 显著提高酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)和溶菌酶(LZM)活性($P < 0.05$); 降低肝脏损伤程度, 提高鱼体免疫力。与添加益菌邦(精品)相比, 添加益菌邦(护肠)的生长及免疫效果不及益菌邦(精品)。综上所述, 乳杆菌与芽孢杆菌结合的复合益生菌更有利于珍珠龙胆石斑鱼的生长、提高鱼体抗病能力。本研究提出了复合益生菌作为饲料添加剂在石斑鱼养殖业中的应用潜力, 并为实际生产中珍珠龙胆石斑鱼规模化健康绿色养殖提供理论参考。

关键词

珍珠龙胆石斑鱼, 益生菌, 生长, 免疫

Effects of Different Compound Probiotics on Growth, Physiological, Biochemical and Immunity Changes of Perch Periwinkle Grouper

*通讯作者。

文章引用: 刘佳奇, 夏苏东, 雷明荃, 王凤昂, 张丹, 于子雯, 李海鸣, 孙志新, 张守庆. 不同复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长、生理生化及免疫的影响[J]. 水产研究, 2026, 13(1): 87-94. DOI: 10.12677/ojfr.2026.131011

Jiaqi Liu¹, Sudong Xia¹, Mingquan Lei¹, Feng'ang Wang¹, Dan Zhang¹, Ziwen Yu¹,
Haiming Li², Zhixin Sun³, Shouqing Zhang^{4*}

¹Tianjin Key Laboratory of Aquatic Ecology and Aquaculture, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²Beijing Scitop Bio-Tech Co., Ltd., Beijing

³Tianjin Binhai New Area Agricultural and Rural Development Service Center, Tianjin

⁴Zhongke Blue Ocean Testing (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin

Received: February 27, 2026; accepted: March 19, 2026; published: March 30, 2026

Abstract

This study investigated the effects of different types of compound probiotics on the growth, physiological and biochemical responses, and immunity of pearl gentian grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀). Three experimental groups were established, including a control group (basal diet), a Yijunbang (Premium) group containing *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum*, *Bacillus licheniformis*, and *Bacillus subtilis*, and a Yijunbang (Gut-care) group containing *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis*, and *Clostridium butyricum*, with a 60-day feeding trial. The results showed that supplementation with Yijunbang (Premium) significantly improved weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR), enhanced digestive and absorptive capacity, and markedly increased the activities of acid phosphatase (ACP), alkaline phosphatase (AKP), and lysozyme (LZM) ($P < 0.05$). Moreover, Yijunbang (Premium) reduced hepatic damage and enhanced immune capacity in the fish. In contrast, the growth performance and immune-enhancing effects of Yijunbang (Gut-care) were less pronounced than those of Yijunbang (Premium). In conclusion, compound probiotics combining *Lactobacillus* and *Bacillus* species were more effective in promoting growth and enhancing disease resistance in pearl gentian grouper. This study highlights the potential application of compound probiotics as functional feed additives in grouper aquaculture and provides theoretical support for large-scale, healthy, and environmentally friendly culture of pearl gentian grouper.

Keywords

Pearl Gentian Grouper, Probiotics, Growth, Immunity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 前言

珍珠龙胆石斑鱼是由雄性巨型石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)与雌性褐点石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus*)的杂交子一代。珍珠龙胆石斑鱼在水产养殖中具有许多优势:生长速度快、抗病性强、营养丰富、肉质优质,适合规模化养殖[1]。目前,珍珠龙胆石斑鱼作为主要的商业和经济鱼类在中国南方沿海养殖。在集约化养殖条件下,环境的快速恶化常导致疾病暴发风险增加,进而造成养殖失败,造成严重的经济损失。近年来,商业化鱼类养殖业屡次受到病毒和细菌性疾病的严重威胁,因此找到合适高效改善石斑鱼养殖现状的应用产品是水产养殖最为紧迫的任务之一。

益生菌是维持鱼类健康和养殖环境的有益细菌产品,是代替合成抗生素的安全产品[2]。近年来,益

生菌在生物修复中的应用已成为可持续水产养殖研究的热点, 并已广泛应用于多种水生动物的养殖实践中。添加不同的益生菌菌株具有多方面的益处, 包括分解有机物、去除过剩营养物质以及促进鱼类生长性能[3][4]。目前, 在益生菌应用中最具研究和应用潜力的候选菌株主要为芽孢杆菌和乳酸菌。芽孢杆菌属为革兰氏阳性、能形成内生孢子的需氧或兼性厌氧杆状细菌[5]。乳酸菌(*Lactic acid bacteria*)是一类人和动物消化道的有益微生物[6], 主要包括乳杆菌属(*Lactobacillus*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、链球菌属(*Streptococcus*)等, 具有调节肠道微生态平衡、促进机体生长、增强宿主免疫力、净化水质等多功能性, 目前已广泛用于水产养殖当中[7]。丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*), 属梭菌属(*Clostridium*), 在肠道内能分泌短链脂肪酸、B 族维生素、消化酶等生物活性物质, 对调节肠道健康产生积极的影响[8]-[10]。目前已有许多学者已经关注芽孢杆菌和乳杆菌作为石斑鱼饲料添加剂的有益功能, 但将其组合作为复合益生菌应用到珍珠龙胆石斑鱼的养殖过程中的研究较少。

本研究以珍珠龙胆石斑鱼为研究对象, 将不同芽孢杆菌、乳酸菌和丁酸梭菌不同组合的复合益生菌作为饲料添加剂到其日粮中。测定其生长性能、消化酶活力、生理生化指标、抗氧化酶活性和免疫酶活性。为珍珠龙胆石斑鱼的饲料添加剂的研制以及复合益生菌在水产健康养殖上的应用提供理论依据。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料及管理

本实验在天津农学院循环水重点实验室中进行, 将 240 尾鱼分配到 12 个水族箱(0.4 m × 0.2 m × 0.2 m)中, 每个水族箱 20 尾, 采用全封闭内循环淡水养殖系统。养殖期间水温为 28℃ ± 1℃, 盐度保持在 23‰~27‰, pH 7.0~7.5 溶解氧含量 5~7 mg/L, 试验期为 60 d。本实验所用饲料基础营养成分表如表 1 所示。

Table 1. Nutritional composition of basic feed (%)

表 1. 基础饲料营养成分表(%)

组分	质量分数	组分	质量分数
粗蛋白	≥48.0%	赖氨酸	≥16%
粗脂肪	≥10.0%	水分	≤10.0%
粗纤维	≤3.0%	总磷	≥1.0%~3.0%
粗灰分	≤16.0%		

2.2. 实验设计

试验共设 3 组, 每组设置 4 平行分别为对照组(基础饲料)。添加益菌邦(精品)处理组主要组成为干酪乳杆菌、植物乳杆菌、地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌; 添加益菌邦(护肠)主要组成为干酪乳杆菌、植物乳杆菌、乳酸片球菌、丁酸梭菌。试验使用的益菌邦(精品)和益菌邦(护肠)产品, 均由北京科拓恒通生物技术股份有限公司提供。每天上午八点和下午五点按鱼体质量 2%~3%日投喂量进行投喂, 复合益生菌按料重千分之五在投喂前半小时拌到饲料中, 每次投喂前用虹吸管吸除系统底部排泄物, 补入提前配制好的温度盐度相同的新水。根据石斑鱼摄食的欲望, 灵活调整投喂量。

2.3. 样品采集

开始与结束试验时, 分别对石斑鱼进行称重。养殖实验结束后, 禁食 24 h, 随后以每个平行组为单位, 使用丁香酚进行麻醉。麻醉后逐一测量每尾鱼的体长、体重, 并记录数量, 用于计算生长指标。称量

完成后立即进行尾静脉采血,采集血样用于后续生理生化分析。采血后解剖,从每个平行组中随机选取8尾鱼,分别取出全肠和肝胰脏。肠道样品需剥离外附脂肪组织,将肠道与肝胰脏样品分别置于液氮中速冻,并于实验室内转移至 -80°C 超低温冰箱保存,供后续抗氧化酶活性等指标测定使用。

2.4. 指标测定

2.4.1. 生长

生长性能指标计算公式如下:

增重率(*body weight gain, BWG*)% = [终末平均体重(g) - 初始平均体重(g)]/初始平均体重(g) × 100,

饲料系数(*feed conversion ratio, FCR*) = 平均饲料消耗量(g)/[平均终末体重(g) - 平均初始体重(g)],

肥满度(*condition factor, CF*) = [终末质量(g)/终末体长(cm)³] × 100,

特定生长率(*specific growth rate, SGR*%) = [ln 终末质量(g) - ln 初始质量(g)]/实验时间(d) × 100。

2.4.2. 血清生理生化

采用预装10%枸橼酸钠抗凝剂的一次性注射器采血,立即于 4°C 下以 $4000 \times \text{g}$ 离心10 min,分离获得血清样品,用于后续生化指标测定。

血清中葡萄糖(Glucose, Glu)、丙氨酸氨基转移酶(Alanine Aminotransferase, ALT)、天冬氨酸氨基转移酶(Aspartate Aminotransferase, AST)、高密度脂蛋白胆固醇(High-Density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)、甘油三酯(Triglycerides, TG)、总胆固醇(T-CHO, Total Cholesterol)、总蛋白(Total Protein, TP)、白蛋白(Albumin, ALB)及球蛋白(Globulin, GLB)指标均采用南京建成生物工程研究所(中国,南京)提供的试剂盒,按照说明书操作步骤进行测定。

2.4.3. 肝胰脏非特异性免疫酶活性

肝胰脏中的碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)、酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)、溶菌酶(lysozyme, ZM)、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)、过氧化氢酶活性(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶活性(superoxide dismutase, SOD)活性和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用南京建成生物工程研究所(中国,南京)提供的试剂盒,按照说明书操作步骤进行测定。

2.4.4. 肠道消化酶活性测定

肠道中脂肪酶(Lipase)、淀粉酶(Amylase)和胃蛋白酶(Pepsin)活性使用南京建成生物工程研究所的试剂盒测量。

2.5. 数据统计分析

试验数据以平均值 ± 标准误(mean ± standard error, SEM)表示,使用统计学软件 SPSS 26.0 进行分析,所有数据采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行分析,然后进行 Duncan's 多重比较分析, $P < 0.05$ 时被视为存在显著差异。

3. 结果

3.1. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长的影响

不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长的影响如表2所示。添加益菌邦处理组的增重率显著高于对照组,添加益菌邦处理组的特定生长率显著高于对照组,添加益菌邦(精品)石斑鱼的特定生长率显著高于添加益菌邦(护肠)处理组($P < 0.05$)。

Table 2. Effects of different probiotics on growth of *Perca platensis*
表 2. 添加不同种类益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长的影响

	对照	益菌邦(精品)	益菌邦(护肠)
增重率%	329.02 ± 21.33 ^a	424.23 ± 24.62 ^b	365.43 ± 26.47 ^{ab}
饵料系数	1.58 ± 0.07 ^a	1.50 ± 0.08 ^a	1.54 ± 0.07 ^a
特定增长率%	2.42 ± 0.21 ^a	3.2 ± 0.12 ^c	2.76 ± 0.08 ^b
肥满度%	03.75 ± 0.19 ^a	3.94 ± 0.03 ^a	3.995 ± 0.09 ^a

注：同一处理组数据上标不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)，上标相同字母表示差异无显著($P > 0.05$)，下同。

3.2. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼血清生理生化的影响

不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长的影响如表 3 所示。添加益菌邦(精品)组的葡萄糖和白蛋白含量显著高于益菌邦(护肠)组和对照组($P < 0.05$)。益菌邦(精品)的丙氨酸氨基转移酶活性和天冬氨酸氨基转移酶(U/L)显著低于对照组和益菌邦(护肠)组($P < 0.05$)。

Table 3. Effects of different kinds of compound probiotics on physiological and biochemical characteristics of Perch
表 3. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生理生化的影响

	对照	益菌邦(精品)	益菌邦(护肠)
葡萄糖(mmol/L)	0.60 ± 0.00 ^a	0.86 ± 0.06 ^b	0.76 ± 0.09 ^a
丙氨酸氨基转移酶(U/L)	58.25 ± 2.87 ^b	39.00 ± 4.00 ^a	54.75 ± 6.83 ^b
天冬氨酸氨基转移酶(U/L)	697.00 ± 12.59 ^c	417.75 ± 27.33 ^a	648.25 ± 25.93 ^b
高密度脂蛋白胆固醇(mmol/L)	2.42 ± 0.15 ^a	2.45 ± 0.05 ^a	2.26 ± 0.13 ^a
低密度脂蛋白胆固醇(mmol/L)	1.56 ± 0.10 ^c	1.08 ± 0.03 ^a	1.32 ± 0.04 ^b
甘油三酯(mmol/L)	2.57 ± 0.37 ^b	1.80 ± 0.07 ^a	1.84 ± 0.07 ^a
胆固醇(mmol/L)	4.95 ± 0.05 ^a	4.61 ± 0.27 ^a	4.42 ± 0.15 ^a
总蛋白(g/L)	52.93 ± 3.36 ^a	58.25 ± 2.21 ^b	56.98 ± 1.80 ^b
白蛋白(g/L)	16.60 ± 0.80 ^a	17.28 ± 1.19 ^{ab}	19.08 ± 1.30 ^b
球蛋白(g/L)	37.70 ± 0.88 ^a	39.73 ± 1.10 ^a	40.10 ± 1.58 ^a

3.3. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼肠道消化酶活性的影响

不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼生长的影响如表 4 所示。益菌邦(精品)和益菌邦(护肠)组的脂肪酶、淀粉酶和胃蛋白酶活性显著高于对照组($P < 0.05$)。

Table 4. Effects of the same type of compound probiotics on intestinal digestive enzyme activity in Perch goby
表 4. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼肠道消化酶活性的影响

	对照	益菌邦(精品)	益菌邦(护肠)
脂肪酶(U/gprot)	0.85 ± 0.14 ^a	2.42 ± 0.99 ^b	2.62 ± 0.38 ^b
淀粉酶(U/mgprot)	0.02 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.02 ^{ab}
胃蛋白酶(U/mgprot)	8.65 ± 1.01 ^a	10.28 ± 0.42 ^b	10.47 ± 0.59 ^b

3.4. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼免疫的影响

不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼抗氧化酶活性的影响如表 5 所示。益菌邦(精品)的总抗氧化能力显著高于对照组, 丙二醛(MDA)含量显著低于对照组($P < 0.05$)。添加益菌邦处理组的超氧化物歧化酶的活性和过氧化氢酶活性不存在显著差异($P > 0.05$)。

Table 5. Effects of different types of composite probiotics on immune enzyme activities in liver and pancreas of Perch dactylo-melanac

表 5. 不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼肝胰脏免疫酶活性的影响

	对照	益菌邦(精品)	益菌邦(护肠)
超氧化物歧化酶活性(U/mgprot)	7.11 ± 1.59 ^a	7.30 ± 1.07 ^a	7.25 ± .01 ^a
过氧化氢酶活性(U/mgprot)	3.00 ± 0.68 ^a	3.11 ± 0.44 ^a	2.99 ± 0.41 ^a
丙二醛含量(nmol/mgprot)	1.05 ± 0.27 ^b	1.97 ± 0.45 ^a	1.63 ± 0.24 ^{ab}
总抗氧化能力(mM)	4.95 ± 4.02 ^a	5.83 ± 1.60 ^b	5.58 ± 2.38 ^{ab}
溶菌酶(μg/mgprot)	0.04 ± 0.02 ^a	0.03 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.00 ^a
酸性磷酸酶(U/mgprot)	30.80 ± 1.67 ^a	42.67 ± 9.67 ^b	38.39 ± 2.79 ^b
碱性磷酸酶(U/mgprot)	0.74 ± 0.02 ^a	2.24 ± 1.26 ^b	0.90 ± 0.20 ^a

不同种类复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼免疫酶活性的影响如表 2 所示。益菌邦(精品)和益菌邦(护肠)组的酸性磷酸酶的活性显著高于对照组, 益菌邦(精品)的碱性磷酸酶和溶菌酶的活性显著高于对照组($P < 0.05$)。

4. 讨论

本研究结果表明, 与对照组相比益菌邦处理组的增重率和特定生长率均显著提高, 添加两种复合益生菌制剂对珍珠龙胆石斑鱼的生长及营养消化能力产生了积极影响。鱼体内的消化酶种类繁多, 其中包括胃蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶等, 多种酶共同催化鱼类体内各项生物化学反应, 共同完成鱼体内的消化吸收过程。复合益生菌可能通过改变肠道 pH 值促进胃蛋白酶分泌, 从而增强蛋白质消化作用。相关研究表明在饲料中加入乳杆菌和芽孢杆菌复合益生菌会增加鱼体内消化酶活性[11][12]。乳杆菌属能够产生乳酸和多种有机酸, 降低肠道 pH 值, 有利于蛋白酶类发挥其最适活性, 芽孢杆菌属则具有较强的外源酶分泌能力, 可产生蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶等, 直接参与饲料中大分子营养物质的分解。二者的协同作用可能是益菌邦(精品)显著提升消化酶活性的关键原因[13]-[16]。表明复合乳酸菌可以提高水产动物的消化和吸收能力、改善饲料利用效率促进水产动物的生长。本研究中加入益菌邦制剂后珍珠龙胆石斑鱼体内消化酶活性显著高于对照组, 低密度胆固醇和甘油三脂含量显著降低, 血糖、蛋白质含量显著升高。已有研究表明, 摄食后葡萄糖水平和蛋白质水平的显著升高反映了饲料中营养物质的高效消化与吸收[13]。同时鱼类在快速生长期会优先利用脂质作为能量来源, 以支持肌肉和组织的生长[14]。加入复合益生菌后可以有效促进石斑鱼对饲料的消化吸收, 促进石斑鱼的生长发育。添加益菌邦(精品)与益菌邦(护肠)相比珍珠龙胆石斑鱼的特定生长率显著升高, 低密度胆固醇和甘油三脂含量显著降低, 表明乳杆菌与芽孢杆菌能够更好地促进石斑鱼的生长发育并改善营养吸收。类似的研究也在其他鱼类中得到了验证。如在银鲟日粮中添加枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌和丁酸梭菌的研究中发现, 枯草芽孢杆菌表现出最佳的促生长效果, 被认为是银鲟的理想膳食益生菌[15]。在云龙石斑鱼饲料中添加一定量的植物乳杆菌可以显著提高云龙石斑鱼的终末均重、增重率、特定生长率, 有利于云龙石斑鱼的生长[16]。由乳杆菌和芽孢杆菌组成

的复合益生菌, 可以通过菌株间的功能互补在促进珍珠龙胆石斑鱼生长和营养代谢表现出显著的协同效应, 其效果优于乳杆菌与乳酸片球菌和丁酸梭菌组成的复合益生菌。

益生菌在水产养殖中应用益生菌不仅有助于优化肠道微生态环境, 还能通过竞争营养和黏附位点、产生抗菌物质以及激活宿主免疫反应, 从而提高水产动物的健康水平与抗病能力[17] [18]。酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(AKP)是溶酶体的标志酶, 参与病原体的消化和杀灭, 同时也是反映水产动物健康状况、营养代谢和抗病力的关键指标[19][20]。溶菌酶(LZM)能够破坏细菌细胞壁的 β -1, 4-糖苷键, 从而发挥杀菌作用, 常被用作评估水产动物免疫状态的指标[21]。本研究中由乳杆菌和芽孢杆菌组成的复合益生菌能够显著提高珍珠龙胆石斑鱼的 ACP、AKP、LZM 活性, 在增强石斑鱼非特异性免疫功能方面发挥了积极作用。同时, LZM 活性的显著提高进一步验证了复合益生菌在增强机体抗菌防御中的重要作用。丙氨酸氨基转移酶(ALT)和天冬氨酸氨基转移酶(AST)的降低也可反映出水产动物肝脏受损伤程度, 活性越高表明肝脏受损伤的程度越高[22][23]。而在本研究中由乳杆菌和芽孢杆菌组成复合益生菌——益菌邦(精品)可以显著降低 ALT 和 AST 活性。丙二醛(MDA)是评估鱼体氧化应激水平和细胞膜损伤程度的最常用、最关键的生物标志物[24]。添加益菌邦(精品)与添加益菌邦(护肠)和对照组相比可以显著降低珍珠龙胆石斑鱼的 MDA 含量, 显著提高机体的总抗氧化能力(T-AOC), 减少机体的脂质过氧化和肝脏受损程度, 提高机体免疫能力。当在饲料中分别添加植物乳杆菌和枯草芽孢杆菌可以提高石斑鱼的免疫酶和抗氧化酶活性[25][26]。由乳杆菌、乳酸片球菌和丁酸梭菌组成的益菌邦(护肠)在本试验条件下仅显著提高了 ACP 活性, 而对其他免疫酶和抗氧化指标的影响不显著, 表明其在增强珍珠龙胆石斑鱼免疫和抗氧化能力方面的效果相对有限, 整体效果不及由乳杆菌和芽孢杆菌组成的复合益生菌(精品)。这种差异可能与不同菌株在肠道内的定植能力、代谢产物类型及其与宿主生理互作方式不同有关。本研究主要基于生长性能、生理生化指标和免疫相关酶活性的变化来探究复合益生菌的作用机制, 后续将采用肠道菌群结构分析和肠道组织等手段探究复合益生菌对珍珠龙胆石斑鱼的作用机制, 从微生态结构和组织形态学层面进一步验证不同益生菌组合对珍珠龙胆石斑鱼肠道功能和健康状态的影响。

5. 结论

本研究表明在日粮中添加复合益生菌对龙胆石斑鱼的生长性能、消化生理、免疫相关酶活性和抗氧化状态有积极影响。在两种益生菌配方中, 由乳杆菌属和芽孢杆菌属组成的益菌邦(精品)在提高特定增长率、消化酶活性、脂质代谢以及几个免疫和抗氧化相关指标方面比益君邦表现出更明显的效果。这些结果表明, 乳杆菌和芽孢杆菌的结合可能提供功能互补性, 有助于提高龙胆石斑鱼的营养利用率, 改善其生理状态。本研究为复合益生菌作为功能性饲料添加剂在可持续和健康的石斑鱼养殖中提供了潜在应用。

基金项目

国家重点研发计划(2022YFD2401204); 天津市科技计划项目(25YFKFYS00040; 25KPXNRC00050; 24YDTPJC00930); 天津市教委科研计划项目(2022ZD004); 天开高教科创园企业研发专项项目(23YFZXYC00017)。

参考文献

- [1] 张旭. 不同养殖模式下珍珠龙胆石斑鱼的品质比较[J]. 河北渔业, 2017(8): 5-8, 17.
- [2] Dawood, M.A.O., Koshio, S., Abdel-Daim, M.M. and Van Doan, H. (2018) Probiotic Application for Sustainable Aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, **11**, 907-924. <https://doi.org/10.1111/raq.12272>
- [3] EL-Haroun, E.R., Goda, A.M.A. and Kabir Chowdhury, M.A. (2006) Effect of Dietary Probiotic Biogen Supplementation as a Growth Promoter on Growth Performance and Feed Utilization of Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (L.).

- Aquaculture Research*, **37**, 1473-1480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01584.x>
- [4] Yun, L., Wang, W., Li, Y., Xie, M., Chen, T., Hu, C., *et al.* (2021) Potential Application Values of a Marine Red Yeast, *Rhodospiridium sphaerocarpum* YLY01, in Aquaculture and Tail Water Treatment Assessed by the Removal of Ammonia Nitrogen, the Inhibition to *Vibrio* spp., and Nutrient Composition. *PLOS ONE*, **16**, e0246841. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246841>
- [5] Soltani, M., Ghosh, K., Hoseinifar, S.H., Kumar, V., Lymbery, A.J., Roy, S., *et al.* (2019) Genus *Bacillus*, Promising Probiotics in Aquaculture: Aquatic Animal Origin, Bio-Active Components, Bioremediation and Efficacy in Fish and Shellfish. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, **27**, 331-379. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1597010>
- [6] 杨红玲, 孙云章, 马如龙, 等. 斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)肠道乳酸菌 MM1 和 MM4 抑菌特性研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(4): 543-548.
- [7] 曲木, 唐子鹏, 赵子续, 等. 乳酸菌在水产养殖中的应用[J]. 生物化工, 2021, 7(3): 131-134.
- [8] 艾春香. 丁酸菌的研发及其在水产配合饲料中的应用[J]. 饲料工业, 2018, 39(24): 1-7.
- [9] Foyals, M.J., Nguyen, T.T.T., Chaklader, M.R., Siddik, M.A.B., Tay, C., Fotedar, R., *et al.* (2019) Marked Variations in Gut Microbiota and Some Innate Immune Responses of Fresh Water Crayfish, Marron (*Cherax cainii*, Austin 2002) Fed Dietary Supplementation of *Clostridium butyricum*. *PeerJ*, **7**, e7553. <https://doi.org/10.7717/peerj.7553>
- [10] De Schrijver, R. and Ollevier, F. (2000) Protein Digestion in Juvenile Turbot (*Scophthalmus maximus*) and Effects of Dietary Administration of *Vibrio proteolyticus*. *Aquaculture*, **186**, 107-116. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00372-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00372-5)
- [11] 程远, 黄凯, 黄秀芸, 等. 饲料中添加枯草芽孢杆菌对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、免疫力和抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(6): 1503-1512.
- [12] 李佳徽, 王明阳, 田相利, 等. 三种不同乳酸菌对凡纳滨对虾生长、抗病力及肠道菌群结构的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2021, 51(4): 44-54.
- [13] Song, M., Yun, B., Moon, J., Park, D., Lim, K. and Oh, S. (2015) Characterization of Selected Lactobacillus Strains for Use as Probiotics. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, **35**, 551-556. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.4.551>
- [14] Emkani, M., Oliete, B. and Saurel, R. (2022) Effect of Lactic Acid Fermentation on Legume Protein Properties, a Review. *Fermentation*, **8**, Article 244. <https://doi.org/10.3390/fermentation8060244>
- [15] 徐亚飞. 地衣芽孢杆菌在水产养殖中的应用研究进展[J]. 渔业研究, 2018, 40(1): 83-88.
- [16] 刘波, 刘文斌, 王恬. 地衣芽孢杆菌对异育银鲫消化机能和生长的影响[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 80-84.
- [17] 胡琴, 李铁军, 康萍, 等. 新生仔猪蛋白质合成的调控机制[J]. 生命科学, 2008(1): 131-137.
- [18] Tocher, D.R. (2003) Metabolism and Functions of Lipids and Fatty Acids in Teleost Fish. *Reviews in Fisheries Science*, **11**, 107-184. <https://doi.org/10.1080/713610925>
- [19] Gao, Q., Xiao, C., Min, M., Zhang, C., Peng, S. and Shi, Z. (2016) Effects of Probiotics Dietary Supplementation on Growth Performance, Innate Immunity and Digestive Enzymes of Silver pomfret, *Pampus argenteus*. *Indian Journal of Animal Research*, **50**, 936-941. <https://doi.org/10.18805/ijar.9640>
- [20] 李忠琴, 邹文政, 张光明, 等. 植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)对云龙石斑鱼生长、抗氧化性能及血清生化水平的影响[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(2): 457-465.
- [21] Skjermo, J. and Vadstein, O. (1999) Techniques for Microbial Control in the Intensive Rearing of Marine Larvae. *Aquaculture*, **177**, 333-343. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00096-4)
- [22] Gatesoupe, F.J. (1999) The Use of Probiotics in Aquaculture. *Aquaculture*, **180**, 147-165. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00187-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00187-8)
- [23] Zhao, J., Yu, L., Zhai, Q., Tian, F., Zhang, H. and Chen, W. (2020) Effects of Probiotic Administration on Hepatic Antioxidative Parameters Depending on Oxidative Stress Models: A Meta-Analysis of Animal Experiments. *Journal of Functional Foods*, **71**, Article ID: 103936. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103936>
- [24] 林艳华. 鱼类血液学指标的影响因素[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8657-8659.
- [25] Kong, X., Wang, S., Jiang, H., Nie, G. and Li, X. (2012) Responses of Acid/Alkaline Phosphatase, Lysozyme, and Catalase Activities and Lipid Peroxidation to Mercury Exposure during the Embryonic Development of Goldfish *Carassius auratus*. *Aquatic Toxicology*, **120**, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.05.005>
- [26] Ringø, E., Olsen, R.E., Gifstad, T.Ø., Dalmo, R.A., Amlund, H., Hemre, G., *et al.* (2010) Prebiotics in Aquaculture: A Review. *Aquaculture Nutrition*, **16**, 117-136. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2009.00731.x>