

不同种类复合益生菌对凡纳滨对虾生长、生理生化及免疫的影响

刘佳奇¹, 夏苏东¹, 张丹¹, 雷明荃¹, 蒋泽昊¹, 窦勇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

本文评估了饲料中以干酪乳杆菌和植物乳杆菌为主的不同复合益生菌对凡纳滨对虾生长、生理生化及免疫的影响。本研究共设置4个处理组, 对照组为基础饲料处理组, 其余三组在基础饲料的基础上添加酪乳杆菌和植物乳杆菌(虾益宝1)、在虾益宝1基础上添加地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌(虾益宝1+2)及在虾益宝1基础上添加乳酸片球菌和丁酸梭菌(益菌邦1)进行60 d的养殖实验。结果表明, 饲料中添加虾益宝1能够显著提高凡纳滨对虾的特定(SGR)生长率(BWG)和增重率并降低饵料系数(FCR) ($P < 0.05$)。虾益宝1和虾益宝1+2可以显著提高凡纳滨对虾血清中葡萄糖(Glu)、低密度蛋白胆固醇(LDL-C)、甘油三脂(TG)和总蛋白(TP)含量以及脂肪酶和胃蛋白酶的活性($P < 0.05$)。添加虾益宝1+2处理组的超氧化物歧化酶活性(SOD)、酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)和溶菌酶(LZM)活性达到最高($P < 0.05$)。综上所述, 饲料中添加虾益宝1可以显著提高凡纳滨对虾的营养吸收能力, 有利于对虾的生长, 饲料中添加虾益宝1+2可以显著提高凡纳滨对虾的抗氧化性, 提高对虾机体的抗病能力, 提高对虾免疫力。本研究提出了复合益生菌作为饲料添加剂在对虾养殖业中的应用潜力, 并为实际生产中对虾规模化健康绿色养殖提供理论参考。

关键词

凡纳滨对虾, 益生菌, 生长, 免疫

Effects of Different Kinds of Compound Probiotics on Growth, Physiological Biochemistry and Immunity of *Macrobrachium vannamei*

*通讯作者。

文章引用: 刘佳奇, 夏苏东, 张丹, 雷明荃, 蒋泽昊, 窦勇, 李海鸣, 孙志新, 张守庆. 不同种类复合益生菌对凡纳滨对虾生长、生理生化及免疫的影响[J]. 水产研究, 2026, 13(1): 95-103. DOI: 10.12677/ojfr.2026.131012

Jiaqi Liu¹, Sudong Xia¹, Dan Zhang¹, Mingquan Lei¹, Zehao Jiang¹, Yong Dou¹, 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 evaluated the effects of different compound probiotics, primarily composed of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum*, on the growth, nutrient metabolism, and immunity of *Litopenaeus vannamei*. Four dietary treatments were designed: a control group (basal diet), a group supplemented with *L. casei* and *L. plantarum* (Xiayibao 1), a group supplemented with *L. casei*, *L. plantarum*, *Bacillus licheniformis*, and *Bacillus subtilis* (Xiayibao 1 + 2), and a group supplemented with *L. casei*, *L. plantarum*, *Pediococcus acidilactici*, and *Clostridium butyricum* (Yijunbang 1) for a 60-day feeding trial. The results showed that dietary supplementation with Probiotic 1 significantly increased the specific growth rate (SGR) and body weight gain (BWG) of shrimp, while reducing the feed conversion ratio (FCR) ($P < 0.05$). Both Xiayibao 1 and Xiayibao 1 + 2 significantly enhanced serum glucose (Glu), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), triglyceride (TG), and total protein (TP) levels, as well as the activities of lipase and pepsin ($P < 0.05$). Moreover, shrimp in the Xiayibao 1 + 2 group exhibited the highest activities of superoxide dismutase (SOD), acid phosphatase (ACP), alkaline phosphatase (AKP), and lysozyme (LZM) ($P < 0.05$). In conclusion, the addition of Xia Yibao 1 to feed significantly enhances nutrient absorption capacity in *Macrobrachium vannamei*, promoting shrimp growth. The combination of Xia Yibao 1 and 2 in feed markedly improves antioxidant capacity, boosts disease resistance, and strengthens immune function in shrimp. This study demonstrates the application potential of composite probiotics as feed additives in shrimp aquaculture, providing theoretical references for large-scale, healthy, and sustainable shrimp farming practices.

Keywords

Litopenaeus vannamei, 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

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)又名南美白对虾,属节肢动物门(*Arthropoda*)、甲壳纲(*Crustacea*)、十足目(*Decapoda*)、游泳亚目(*Natantia*)、对虾科(*Penaeidae*)、对虾属(*Litopenaeus*)。凡纳滨对虾是全球范围内重要的养殖品种,产量约占全球对虾总产量的70%,其具有营养需求低、生长速度快、市场需求量大等优点,现已是我国乃至全球对虾产量中最高品种,具较高的经济水产动物[1]。然而,随着集约化养殖模式的快速发展,养殖密度增加和环境压力加剧,使得病害频发成为制约南美白对虾养殖产业发展的主要瓶颈[2]。为控制疾病的发生,养殖过程中常大量使用抗生素,但其长期使用容易导致细菌耐药性增加、药物残留问题加重,以及对水产环境和人类健康带来潜在风险。因此,积极寻求抗生素替代品,研发绿色环保、高效无残留、安全无毒的新型饲料添加剂,已成为对虾养殖业关注的热点问题之一。

益生菌作为一种绿色、安全的饲料添加剂,因其具有调节机体肠道菌群平衡、促进生长发育、提高机体免疫力及改善养殖环境等作用,近年来在水产养殖领域得到了广泛关注。常见的益生菌包括乳杆菌、枯草芽孢杆菌、酵母菌及光合细菌等。这些益生菌通过在肠道内,抑制有害菌的生长,增强宿主消化能力及抗病能力,从而提高养殖动物的生长性能和健康水平[3]。此外,益生菌还能够通过分泌多种酶和代谢产物,增强消化酶活性和营养物质利用率,从而提高饲料转化效率[4] [5]。益生菌可分为单一益生菌、复合益生菌两大类,而复合益生菌指的是至少两种或两种以上的单一益生菌的混合物。益生菌既可以单独使用,也可组合使用,通常复合益生菌比单一菌株的效用更好[6]。有研究表明,复合益生菌相互协同后增强作用效果,可以更好地改善生物体的生长性能、存活率和抗病力等[7]。Daniels 等发现用复合芽孢杆菌和甘露寡糖(*Mannan oligosaccharides*)共同饲喂欧洲龙虾(*Homarus gammarus*),可以显著改善其生长、存活率和对低盐度的应激耐受性[8]。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料及管理

本实验在天津立达海水资源开发有限公司进行凡纳滨对虾养殖实验,每口养殖池 30 m³ 水体,每池投放 6 万尾虾苗,共 12 个养殖池,平均分为 4 组,每组 3 个重复。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。本实验所用饲料基础营养成分如表 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	≥44.0%	赖氨酸	≥2.3%
粗脂肪	≥4.0%	水分	≤10.0%
粗纤维	≤5.0%	总磷	≥1.0%
粗灰分	≤16.0%		

2.2. 实验设计

试验共设 4 组,分别为对照组(基础饲料)。添加虾益宝 1+2 处理组,主要成分为在基础饲料中添加干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)。添加虾益宝 1 处理组,主要成分为在基础饲料中添加干酪乳杆菌和植物乳杆菌。添加益菌帮处理组,主要组成为在基础饲料中添加干酪乳杆菌、植物乳杆菌、乳酸片球菌(*Pediococcus acidilactici*)和丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)。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 4 小时按虾体质量 5%日投喂量进行投喂,根据吃料情况调整,不可有剩料,共投喂 6 次,益生菌添加量为料重千分之五,每天早晚各换水一次,换水补入提前配制好的温度盐度相同的新水,养殖周期 60 d。

2.3. 样品采集

开始试验和结束试验分别称取对虾重量,将对虾饥饿 24 h 后处于空腹状态进行。在养殖实验结束后,将对虾禁食 24 h,使用丁香酚进行麻醉,随后逐一称量体重、测量体长并计数,以用于生长指标的计算。称量后,立即进行血淋巴采集。采集完毕后再进行解剖,分别取出肝胰脏,样品一同置于液氮中速冻,随后转移至-80℃超低温冰箱保存,用于后续抗氧化酶活等指标的测定。

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,

饵料系数(*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℃ 下以 4000 × g 离心 10 min, 分离获得血浆样品, 用于后续生化指标测定。

血清中葡萄糖含量(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测定

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, LZM)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凡纳滨对虾生长的影响

不同益生菌对凡纳滨对虾生长的影响如表 2 所示。添加虾益宝 1+2、虾益宝 1 和益菌邦 1 的处理组的增重率、特定生长率和肥满度均显著高于对照组, 其中虾益宝 1 处理组的增重率和特定生长率最高($P < 0.05$)。添加益生菌的各处理组的饵料系数显著低于对照组($P < 0.05$)。

3.2. 不同种类复合益生菌对凡纳滨对虾生理生化的影响

不同益生菌对凡纳滨对虾生长的影响如表 3 所示。添加虾益宝 1+2、虾益宝 1 和益菌邦 1 的各处理组丙氨酸氨基转移酶、天冬氨酸氨基转移酶活性, 高密度脂蛋白胆固醇、球蛋白和白蛋白含量无显著差异($P > 0.05$)。添加益生菌的处理组的葡萄糖和总蛋白含量显著高于对照组, 其中添加虾益宝 1+2 益生菌

的处理组显著高于其他添加益生菌的处理组($P < 0.05$)。

Table 2. Effects of different probiotics on growth of *Litopenaeus vannamei*

表 2. 不同益生菌对凡纳滨对虾生长的影响

	对照	虾益宝 1 + 2	虾益宝 1	益菌邦 1
增重率%	509.51 ± 17.41 ^a	659.94 ± 4.8 ^b	715.86 ± 29.79 ^c	622.35 ± 33.1 ^b
饵料系数	1.70 ± 0.06 ^b	1.46 ± 0.01 ^a	1.39 ± 0.06 ^a	1.47 ± 0.08 ^a
特定增长率%	5.17 ± 0.08 ^a	5.80 ± 0.02 ^b	6.00 ± 0.10 ^c	5.65 ± 0.13 ^b
肥满度%	0.64 ± 0.01 ^a	0.72 ± 0.01 ^b	0.7 ± 0.03 ^b	0.71 ± 0.02 ^b

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不显著($P > 0.05$)，下同。

Table 3. Effects of different probiotics on physiological and biochemical characteristics of *Litopenaeus vannamei*

表 3. 不同益生菌对凡纳滨对虾生理生化的影响

	对照	虾益宝 1 + 2	虾益宝 1	益菌邦 1
葡萄糖(mmol/L)	1.63 ± 0.18 ^a	5.42 ± 0.48 ^c	3.78 ± 1.75 ^b	1.4 ± 0.53 ^a
丙氨酸氨基转移酶(U/L)	507.75 ± 13.35 ^a	426 ± 93.26 ^a	469 ± 79.76 ^a	536 ± 80.28 ^a
天冬氨酸氨基转移酶(U/L)	277.75 ± 39.85 ^a	213.75 ± 50.89 ^a	242.8 ± 57.95 ^a	289.5 ± 59.52 ^a
高密度脂蛋白胆固醇(mmol/L)	0.07 ± 0.03 ^a	0.08 ± 0.03 ^a	0.05 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.02 ^a
低密度脂蛋白胆固醇(mmol/L)	0.6 ± 0.11 ^a	0.83 ± 0.19 ^{bc}	0.89 ± 0.09 ^c	0.63 ± 0.15 ^{ab}
甘油三酯(mmol/L)	0.82 ± 0.14 ^a	1.1 ± 0.24 ^b	1.19 ± 0.15 ^b	0.93 ± 0.27 ^{ab}
胆固醇(mmol/L)	1.15 ± 0.2 ^a	1.58 ± 0.34 ^{bc}	1.70 ± 0.17 ^c	1.22 ± 0.29 ^{ab}
总蛋白(g/L)	82.08 ± 7.12 ^b	88.33 ± 4.82 ^c	82.3 ± 10.83 ^b	77.9 ± 10.43 ^a
白蛋白(g/L)	7.83 ± 0.57 ^a	8.28 ± 0.95 ^a	7.30 ± 1.35 ^a	7.70 ± 1.12 ^a
球蛋白(g/L)	74.25 ± 6.60 ^a	80.05 ± 3.95 ^a	75.04 ± 9.54 ^a	70.28 ± 9.32 ^a
脂肪酶(U/gprot)	0.16 ± 0.09 ^a	3.15 ± 0.85 ^b	0.69 ± 0.08 ^a	0.75 ± 0.34 ^a
淀粉酶(U/mgprot)	0.14 ± 0.06 ^c	0.05 ± 0.02 ^{ab}	0.10 ± 0.01 ^{bc}	0.03 ± 0.01 ^a
胃蛋白酶(U/mgprot)	7.20 ± 2.80 ^a	12.34 ± 0.9 ^b	10.42 ± 0.67 ^b	6.96 ± 1.39 ^a

3.3. 不同种类复合益生菌对凡纳滨对虾消化酶活性的影响

不同益生菌对凡纳滨对虾生长的影响如表 4 所示。添加虾益宝 1 + 2 和虾益宝 1 处理组的胃蛋白酶活性、低密度脂蛋白胆固醇和胆固醇显著高于对照组和添加益菌邦 1 处理组，添加虾益宝 1 + 2 和虾益宝 1 处理组的甘油三酯的含量显著高于其他处理组，添加虾益宝 1 + 2 的脂肪酶活性显著高于其他处理组，添加益菌邦 1 的淀粉酶活性显著低于其他处理组($P < 0.05$)。

Table 4. Effects of different probiotics on digestive enzymes of *Litopenaeus vannamei*

表 4. 不同益生菌对凡纳滨对虾消化酶活性的影响

	对照	虾益宝 1 + 2	虾益宝 1	益菌邦 1
脂肪酶(U/gprot)	0.16 ± 0.09 ^a	3.15 ± 0.85 ^b	0.69 ± 0.08 ^a	0.75 ± 0.34 ^a
淀粉酶(U/mgprot)	0.14 ± 0.06 ^c	0.05 ± 0.02 ^{ab}	0.10 ± 0.01 ^{bc}	0.03 ± 0.01 ^a
胃蛋白酶(U/mgprot)	7.20 ± 2.80 ^a	12.34 ± 0.9 ^b	10.42 ± 0.67 ^b	6.96 ± 1.39 ^a

3.4. 不同种类复合益生菌对凡纳滨对虾免疫指标的影响

不同益生菌对凡纳滨对虾的抗氧化酶活性的影响如表 5 所示。添加益生菌的处理组的抗氧化能力显著高于对照组, 添加虾益宝 1+2 处理组的 SOD 活性显著高于其他处理组, 添加益菌邦 1 的处理组 MDA 含量显著高于其他各处理组, 添加虾益宝 1 处理组的 CAT 活性显著高于其他处理组($P < 0.05$)。添加虾益宝 1+2 处理组的 ACP 活性显著高于其他 3 个处理组, 添加虾益宝 1+2 和添加虾益宝 1 处理组的 AKP 活性显著高于添加益菌邦 1 处理组和对照组($P < 0.05$)。添加益菌邦 1 处理组的 ACP、AKP 和 LZM 活性显著低于其他各组。添加虾益宝 1 处理组的 LZM 活性显著低于对照组和虾益宝 1+2 处理组($P < 0.05$)。

Table 5. Effects of different probiotics on antioxidant and Non-specific immune enzyme activities of *Macrobrachium vannamei*

表 5. 不同益生菌对凡纳滨对虾抗氧化酶及非特异性免疫酶活性的影响

	对照	虾益宝 1+2	虾益宝 1	益菌邦 1
超氧化物歧化酶活性(U/mgprot)	3.04 ± 0.89 ^a	6.20 ± 0.83 ^b	4.51 ± 0.31 ^a	4.52 ± 0.50 ^a
过氧化氢酶活性(U/mgprot)	0.24 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.01 ^{ab}	0.47 ± 0.04 ^b	0.26 ± 0.06 ^{ab}
丙二醛含量(nmoL/mgprot)	1.13 ± 0.14 ^a	1.44 ± 0.26 ^{ab}	1.19 ± 0.23 ^{ab}	2.06 ± 0.07 ^b
总抗氧化能力(mM)	1.29 ± 0.11 ^a	6.85 ± 0.73 ^b	8.13 ± 0.05 ^c	8.29 ± 0.18 ^c
溶菌酶(μg/mgprot)	0.04 ± 0.00 ^c	0.05 ± 0.02 ^c	0.04 ± 0.00 ^b	0.02 ± 0.00 ^a
酸性磷酸酶(U/mgprot)	12.62 ± 0.54 ^b	16.31 ± 0.93 ^c	13.12 ± 0.53 ^b	6.72 ± 0.87 ^a
碱性磷酸酶(U/mgprot)	10.09 ± 0.75 ^c	11.37 ± 0.20 ^c	6.06 ± 0.80 ^b	3.70 ± 0.61 ^a

4. 讨论

本研究结果表明, 饲料中添加不同类型的益生菌作为凡纳滨对虾饲料添加剂能显著促进了凡纳滨对虾的生长, 其中虾益宝 1 处理组的增重率和特定生长率最高, 淀粉酶和胃蛋白酶的活性显著高于益菌邦 1, 这两种这种复合益生菌作为对虾饲料添加剂的效果不及虾益宝 1。虾益宝 1 处理组的葡萄糖、低密度蛋白胆固醇和甘油三酯水平平均显著升高饵料系数则显著降低表明虾益宝 1 所含两种益生菌干酪乳杆菌和植物乳杆菌会刺激胰岛素的生物学作用, 提高机体对葡萄糖的转运和利用, 从而促进机体生长[9]。表明干酪乳杆菌和植物乳杆菌能够显著改善对虾的糖脂代谢平衡, 促进能量分配的优化, 从而提升生长性能。同样类似研究发现, 凡纳滨对虾饲料中添加乳杆菌, 能够增强对虾对营养的吸收, 可以显著提高其生长性能[10]。在饲料中添加植物乳杆菌增加了尼罗罗非鱼肠道中乳杆菌的含量, 减少了弧菌科的丰度, 显著提高了增重率、特定生长率和饲料利用率[11]。枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌可促进脂肪酶的表达, 加速脂肪分解, 从而提高能量利用率[12]。在饲料中添加虾益宝 1+2 还额外添加添加以枯草芽孢杆菌和地衣芽孢菌, 这两种复合益生菌可通过提升脂肪酶和胃蛋白酶活性、增强脂肪和蛋白质的吸收利用, 显著促进凡纳滨对虾的生长。因此添加虾益宝 1+2 处理组的脂肪酶显著高于其他处理组。但不同种类的益生菌对于饲喂凡纳滨对虾之后产生的影响也会所有不同。添加的虾益宝 1 和 1+2 组主要以干酪乳杆菌和植物乳杆菌为主, 这些菌群可能偏向增强对虾脂类和蛋白质的吸收利用, 而对碳水化合物利用有限。乳杆菌主要通过产生乳酸等有机酸降低肠道 pH 值, 从而抑制条件致病菌并改善肠道微生态稳定性, 但其代谢模式以发酵为主, 对外源消化酶的直接贡献有限[13]。芽孢杆菌具有较强的胞外酶分泌能力, 可产生蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等, 直接参与饲料中大分子营养物质的降解, 其形成芽孢的特性使其能够耐受饲料加工及消化道环境, 有利于其在肠道中的存活和功能发挥[14]。此外, 芽孢杆菌还能产生多种抗菌肽, 通过与

致病菌竞争营养和黏附位点,进一步优化肠道微生态环境[15]。添加这两种益生菌处理组对虾的葡萄糖和总蛋白含量显著高于对照组,而虾益宝 1 处理组在脂肪酶活性和低密度脂蛋白胆固醇水平上表现尤为突出。这可能与益生菌调节脂质代谢和能量分配的机制相关。复合益生菌可以改善生物体的生长性能、存活率和抗病力等,可能是单一菌种相互协同后增强作用效果[16],复合益生菌影响对凡纳滨对虾的生长以及营养代谢的相关研究还有待进一步探究。

甲壳动物(虾、蟹类)依赖固有免疫系统抵御病毒与微生物侵染,抗氧化酶活性和非特异性免疫酶活性可以反应出机体免疫功能和抗病力的强弱。饲料中添加不同类型的益生菌制剂均能有效提高凡纳滨对虾的抗氧化酶活性与非特异性免疫酶活性,显著优于对照组,说明益生菌在增强对虾机体抗氧化与免疫防御能力方面具有积极作用。添加虾益宝 1 + 2 处理组(含干酪乳杆菌、植物乳杆菌、地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌)的 SOD 活性显著高于其他处理组,表明其在清除体内超氧阴离子自由基方面具有更强的能力,而虾益宝 1 处理组的 CAT 活性最高,与其他处理组相比具有更高有助于分解 H_2O_2 , 减缓机体氧化损伤[17]。MDA 是脂质过氧化的主要终产物,其含量通常被用作氧化应激水平的指标,机体在面对氧化应激时,过量的活性氧(ROS)会攻击细胞膜上的多不饱和脂肪酸,导致脂质过氧化反应,并产生 MDA 等氧化产物[18]。当 MDA 水平升高时,说明机体未能有效清除过量 ROS,可能与抗氧化酶系统活性不足或功能失调有关。添加益菌邦 1 处理组的 MDA 含量显著高于其他处理组,说明该组脂质过氧化程度相对较高。干酪乳杆菌与植物乳杆菌虽具一定调节肠道功能的作用,但若其与乳酸片球菌或丁酸梭菌的协同作用不佳,可能难以有效建立肠道屏障或促进抗氧化相关信号通路,进而导致抗氧化酶表达不足[19]。虾益宝 1 + 2 处理组的 ACP 活性显著高于其他组,与沈文英等报道的重组 VP28 枯草芽孢杆菌对 ACP 和 AKP 活性的提升效果相符[20],表明复合菌株协同作用可能更有效激活虾体免疫系统。溶菌酶(LZM)是水产动物非特异性免疫系统中的重要组成部分,主要通过水解细菌细胞壁中的 β -1, 4-糖苷键来发挥广谱抗菌作用[21]。丁酸梭菌、乳酸片球菌等菌株在某些条件下产生的代谢物可能调节肠道免疫微环境,但不一定直接上调 LZM 相关基因的表达,甚至可能因促进抗炎因子如 IL-10 上调,而抑制溶菌酶等炎症相关分子的表达。本研究结果添加虾益宝 1 处理组的 LZM 活性显著低于对照组和虾益宝 1 + 2 处理组。表明这两种复合维生素并不会产生协调左右还可能会影响对虾的肠道微生物环境,影响机体溶菌酶的活性。本研究表明,益生菌可通过提高抗氧化酶和非特异性免疫酶活性增强凡纳滨对虾的免疫力。不同菌株组合效应存在差异,部分菌株间可能缺乏协同作用,反而降低相关免疫酶活性,但添加益生菌的处理组的总抗氧化酶活性显著高于对照组,表明复合维生素会提高凡纳滨对虾的抗氧化性,增强机体免疫力。

5. 结论

本研究表明,在饲料中添加不同类型的复合益生菌制剂可显著提升凡纳滨对虾的生长、消化酶活性、抗氧化能力及非特异性免疫酶活性。以干酪乳杆菌和植物乳杆菌为主的虾益宝 1 在增重率、特定生长率以及消化酶性方面表现最优,能有效促进对虾营养吸收,在凡纳滨对虾生长发育方面更具优势。虾益宝 1 基础上加入地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌的虾益宝 1 + 2 在增强机体抗氧化能力和非特异性免疫反应方面更具有优势。虾益宝 1 基础上乳酸片球菌和丁酸梭菌的益菌邦 1 的综合效果不及前两者。合理配比的复合益生菌具有提升对虾健康状况和生产性能的潜力,可作为凡纳滨对虾健康养殖的有效饲料添加策略。

基金项目

国家重点研发计划(2024YFD2401803); 天津市科技计划项目(24YDTPJC00930; 25YFKFYS00040; 25KPNRC00050); 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] Naiel, M.A.E., Farag, M.R., Gewida, A.G.A., Elnakeeb, M.A., Amer, M.S. and Alagawany, M. (2021) Using Lactic Acid Bacteria as an Immunostimulants in Cultured Shrimp with Special Reference to *Lactobacillus* Spp. *Aquaculture International*, **29**, 219-231. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00620-2>
- [2] Walker, P.J. and Winton, J.R. (2010) Emerging Viral Diseases of Fish and Shrimp. *Veterinary Research*, **41**, Article 51. <https://doi.org/10.1051/vetres/2010022>
- [3] Feodorova, V.A., Sayapina, L.V., Corbel, M.J. and Motin, V.L. (2014) Russian Vaccines against Especially Dangerous Bacterial Pathogens. *Emerging Microbes & Infections*, **3**, 1-17. <https://doi.org/10.1038/emi.2014.82>
- [4] Irianto, A. and Austin, B. (2002) Probiotics in Aquaculture. *Journal of Fish Diseases*, **25**, 633-642. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2761.2002.00422.x>
- [5] 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>
- [6] Verschuere, L., Rombaut, G., Sorgeloos, P. and Verstraete, W. (2000) Probiotic Bacteria as Biological Control Agents in Aquaculture. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **64**, 655-671. <https://doi.org/10.1128/mmr.64.4.655-671.2000>
- [7] Timmerman, H.M., Koning, C.J.M., Mulder, L., Rombouts, F.M. and Beynen, A.C. (2004) Monostrain, Multistain and Multispecies Probiotics—A Comparison of Functionality and Efficacy. *International Journal of Food Microbiology*, **96**, 219-233. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.05.012>
- [8] Daniels, C.L., Merrifield, D.L., Boothroyd, D.P., Davies, S.J., Factor, J.R. and Arnold, K.E. (2010) Effect of Dietary Bacillus Spp. and Mannan Oligosaccharides (MOS) on European Lobster (*Homarus gammarus* L.) Larvae Growth Performance, Gut Morphology and Gut Microbiota. *Aquaculture*, **304**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.03.018>
- [9] Zhai, L., Wu, J., Lam, Y.Y., Kwan, H.Y., Bian, Z. and Wong, H.L.X. (2021) Gut-Microbial Metabolites, Probiotics and Their Roles in Type 2 Diabetes. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article 12846. <https://doi.org/10.3390/ijms222312846>
- [10] Li, E., Xu, C., Wang, X., Wang, S., Zhao, Q., Zhang, M., et al. (2018) Gut Microbiota and Its Modulation for Healthy Farming of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, **26**, 381-399. <https://doi.org/10.1080/23308249.2018.1440530>
- [11] Yamashita, M.M., Pereira, S.A., Cardoso, L., de Araujo, A.P., Oda, C.E., Schmidt, É.C., et al. (2017) Probiotic Dietary Supplementation in Nile Tilapia as Prophylaxis against Streptococcosis. *Aquaculture Nutrition*, **23**, 1235-1243. <https://doi.org/10.1111/anu.12498>
- [12] Zokaiefar, H., Balcázar, J.L., Saad, C.R., Kamarudin, M.S., Sijam, K., Arshad, A., et al. (2012) Effects of *Bacillus Subtilis* on the Growth Performance, Digestive Enzymes, Immune Gene Expression and Disease Resistance of White Shrimp, *Litopenaeus Vannamei*. *Fish & Shellfish Immunology*, **33**, 683-689. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.05.027>
- [13] Kuebutornye, F.K.A., Abarike, E.D., Lu, Y., Hlordzi, V., Sakyi, M.E., Afriyie, G., et al. (2020) Mechanisms and the Role of Probiotic *Bacillus* in Mitigating Fish Pathogens in Aquaculture. *Fish Physiology and Biochemistry*, **46**, 819-841. <https://doi.org/10.1007/s10695-019-00754-y>
- [14] 唐晓丽, 倪学勤, 邝声耀, 等. 动物微生态营养的特性及应用[J]. 四川畜牧兽医, 2007(4): 29-30.
- [15] 李连彬, 陈秀丽. 抗菌肽在饲用枯草芽孢杆菌中表达的研究进展[J]. 中国饲料, 2015(20): 11-13, 17.
- [16] 胡毅, 谭北平, 麦康森, 等. 饲料中益生菌对凡纳滨对虾生长、肠道菌群及部分免疫指标的影响[J]. 中国水产科学, 2008, 15(2): 244-251.
- [17] Chiu, C., Guu, Y., Liu, C., Pan, T. and Cheng, W. (2007) Immune Responses and Gene Expression in White Shrimp, *Litopenaeus Vannamei*, Induced by *Lactobacillus Plantarum*. *Fish & Shellfish Immunology*, **23**, 364-377. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2006.11.010>
- [18] Li, J., Cen, J., Zhou, Q., Zheng, X., Wu, Z., Li, Z., et al. (2025) Dietary Probiotic Intervention Strategies of *Lactobacillus Acidophilus* and *Bacillus Subtilis* Co-Cultured in *Litopenaeus Vannamei* with Low Fishmeal Diet: Insights from Immune Enhancement, Anti-Vibrio and Ammonia Nitrogen Stress. *Fish & Shellfish Immunology*, **164**, Article 110414. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110414>
- [19] Xue, J., Shen, K., Hu, Y., Hu, Y., Kumar, V., Yang, G., et al. (2020) Effects of Dietary *Bacillus Cereus*, *B. Subtilis*, *Paracoccus Marcusii*, and *Lactobacillus Plantarum* Supplementation on the Growth, Immune Response, Antioxidant Capacity, and Intestinal Health of Juvenile Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*). *Aquaculture Reports*, **17**, Article 100387. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100387>

-
- [20] 沈文英, 傅玲琳, 李卫芬. 枯草芽孢杆菌表达的 VP28 对凡纳滨对虾免疫力和抗病毒感染的影响[J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 375-378.
- [21] Liao, J., Cai, Y., Wang, X., Shang, C., Zhang, Q., Shi, H., *et al.* (2021) Effects of a Potential Host Gut-Derived Probiotic, *Bacillus Subtilis* 6-3-1, on the Growth, Non-Specific Immune Response and Disease Resistance of Hybrid Grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀ × *Epinephelus lanceolatus*♂). *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, **13**, 1119-1137. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09768-6>