聂宇康,张杰宁,李少赟,等.饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾生长性能和生理健康的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(3):272-281.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.025

饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾生长性能和生理健康的影响

聂宇康[1],张杰宁[1],李少赟[1],张学振[1,2]

1.华中农业大学水产学院/教育部长江经济带常规水产生物产业绿色发展工程研究中心,武汉 430070;
2.湖北洪山实验室,武汉 430070

摘要 为综合评价鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)在凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)养殖中的作用效果以及适宜的添加形式和添加量,以凡纳滨对虾幼虾[(1.60±0.15) g]为试验对象,设计7组饲料:对照组(CK组,基础饲料)、活菌组(LB1、LB2、LB3组,基础饲料中分别添加1×10^6、1×10^7、1×10^8 CFU/g鼠李糖乳杆菌活菌)、灭活组(DB1、DB2、DB3组,基础饲料中分别添加1×10^6、1×10^7、1×10^8 CFU/g热灭活鼠李糖乳杆菌),养殖周期为28 d,探索鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾生长性能和生理健康的影响。结果显示:(1)LB1、LB2、LB3、DB2组的增重率分别较CK组显著增加5.35%、14.40%、9.78%和6.11%;(2)各处理组肠道中的淀粉酶、脂肪酶活性均显著升高;(3)LB2和DB2组的肌肉中n-3与n-6多不饱和脂肪酸的比值显著提升,分别较CK组提高5.41%和11.49%,其中DB2组多不饱和脂肪酸的总含量较CK组显著升高;(4)所有鼠李糖乳杆菌添加组对虾血清中酚氧化酶和溶菌酶的活性均显著高于CK组,热灭活组凡纳滨对虾血清中总一氧化氮合成酶活性显著增加;(5)LB2、DB2、DB3组对虾的肝胰腺中酸性磷酸酶活性分别显著提高31.51%、28.44%和22.12%,除DB1组外,各添加组的碱性磷酸酶活性显著提高;(6)与CK组相比,各处理组中肝胰腺的肝小管管腔呈星型结构,细胞排列整齐,肝胰腺健康状态得到改善。以上结果表明,鼠李糖乳杆菌的添加显著提高了凡纳滨对虾的生长性能、肌肉品质、免疫性能和肠道消化酶的活性,改善了肝胰腺的健康状态,其中以1×10^7 CFU/g的活菌组和热灭活组效果最佳。

关键词 鼠李糖乳杆菌;凡纳滨对虾;生长性能;生理健康
中图分类号 S963.73;S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0272-10

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*),又称南美白对虾,原产于南太平洋中部海域,是目前全球最重要的商业养殖虾种之一,养殖量已占全球甲壳类养殖总量的50%以上[1]。然而,高密度集约化养殖模式在提高产量的同时,也导致了各种疾病频发[2]。长期以来,抗生素被广泛用于水产病害防治,但滥用抗生素不仅会导致耐药菌株的出现,抗生素还可能残留在虾体内,造成食品安全隐患[3]。因此,寻找安全、高效的抗生素替代品已成为水产养殖业健康发展的迫切需求。

近年来,益生菌因其安全、环保、高效的特点,被视为抗生素的理想替代品[4]。其中,乳酸菌因其耐酸性强、能稳定定植于肠道,并能通过竞争黏附位点、调节免疫反应、促进营养吸收等机制发挥益生作用,在水产养殖中展现出广阔的应用前景[5-6]。研究表明,添加乳酸菌的饲料能够激活对虾的先天免疫系统,提高杀菌能力,同时可以提高肠道消化和吸收的效率,从而增加营养物质的利用以促进生长[7-8]。鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)是其中一种常见的乳酸菌,已经被广泛用于健康补充剂和食品加工领域[9-10]。在目前的凡纳滨对虾养殖中,鼠李糖乳杆菌被证实能够提高其生长性能[11],但是对肌肉品质、生理健康等方面影响的研究相对缺乏。本研究通过在饲料中添加不同形式、不同浓度的鼠李糖乳杆菌,分析其对凡纳滨对虾生长性能、肌肉品质及生理健康的影响,旨在为凡纳滨对虾绿色健康养殖提

收稿日期:2025-05-05
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2400501)
聂宇康,E-mail:yukang-nie@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:张学振,E-mail:xuezhen@mail.hzau.edu.cn

供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验虾及试验菌种

试验所用对虾为同一批繁殖、健康无病害的凡纳滨对虾，由广东湛江正大水产有限公司提供。鼠李糖乳杆菌（1×10^{10} CFU/g），由山东中科嘉亿生物工程有限公司提供。将制备热灭活菌的菌悬液放入65 ℃水浴锅中加热30 min，冷却后保存于4 ℃冰箱备用。菌悬液在热灭活后立即取样，用无菌PBS（pH=7.4）稀释后在MRS琼脂平板上涂布，在37 ℃恒温培养箱厌氧培养48 h，如果平板中没有菌落长出，表明细菌成功被灭活。

1.2　试验设计及饲料制备

本研究所用基础饲料为卜蜂水产（阳江）有限公司凡纳滨对虾商用配合饲料（粗蛋白≥43.0%，粗脂肪≥6.0%，粗纤维≤3.0%，粗灰分≤15.0%，总磷≥1.0%，赖氨酸≥2.5%），除对照组（CK，基础饲料）外，配制6组试验饲料，其中3个试验组在基础饲料中以1×10^{6} CFU/g（LB1）、1×10^{7} CFU/g（LB2）、1×10^{8} CFU/g（LB3）的量添加鼠李糖乳杆菌活菌，另外3个试验组在基础饲料中以1×10^{6} CFU/g（DB1）、1×10^{7} CFU/g（DB2）、1×10^{8} CFU/g（DB3）的量添加经过热灭活处理的鼠李糖乳杆菌。制备方法为：将处理好的菌液加入到无菌喷壶中，用喷涂的方式均匀覆盖到饲料中，对照组则用等比例的纯水与饲料配合，随后将配合饲料放置在室温中自然晾干，保存于4 ℃冰箱备用，饲料隔天配制1次[12]。

1.3　养殖管理

试验虾在室外400 cm×400 cm×150 cm的帆布池中暂养30 d，以适应新的环境，并于每日的08:00、12:00和16:00饱食投喂专用商业饲料，全天溶解氧保持在5 mg/L以上，虾池底部无沉积。暂养结束后，随机将700尾健康对虾[（1.60±0.15）g]放入28个水量为100 L的塑料泡沫桶（745 mm×540 mm×445 mm）中，每个水箱25尾，每组4个重复，饲养周期为28 d。在饲养期间，每4 d抽取部分虾称量体质量，以确定投饲量，日投饲量按对虾体质量的5%，于每日08:00、12:00和16:00分批投喂，并根据摄食情况进行调整。每次投饲前收集桶中饲料残渣及对虾粪便，经淡水冲洗2次去除盐分后，置于85 ℃烘箱中烘干并称质量。每天早晨换水（多级净化的海水）约33%～66%。隔天监测水质参数，确保温度（25±3）℃、盐度（3.1±0.1）g/L、pH（8.1±0.1）、溶解氧（5.6±0.3）mg/L、亚硝酸盐（0.020±0.015）mg/L。

1.4　样品采集

饲养试验结束后，禁食24 h，逐一对每个塑料泡沫桶中的对虾称质量和测量体长，样品采集全程在冰盘上进行。在生长指标测定结束后，用棉球蘸取75%的乙醇进行对虾体表消毒，立即用1 mL无菌注射器收集6尾虾的血淋巴，并将其放入1.5 mL无菌离心管中，置于4 ℃冰箱中24 h后以3 000 r/min离心10 min，吸取血清，迅速置于液氮中速冻。各处理组每个重复随机抽取6尾对虾进行组织解剖，取出肝胰腺和肠道组织，液氮冷冻处理后保存于－80 ℃，用于后续消化酶活性及各项免疫酶活性测定；每个重复选取3尾虾的肝胰腺，使用Bouin固定液固定，用于组织学观察。

1.5　指标测定及组织切片观察

1）生长指标测定。测定指标包括终末体质量（final body weight，FBW）、终末体长（final body length，FBL），并计算存活率（survival rate，SR）、增重率（weight gain rate，WGR）、特定生长率（specific growth rate，SGR）、饲料系数（feed conversion ratio，FCR）和肥满度（condition factor，CF）等指标，计算公式参照文献[13]进行。

2）肌肉营养成分测定。常规营养成分包括水分、灰分、粗蛋白和粗脂肪，测定方法参照文献[13]。所有成分均表示为每千克对虾肌肉中所含的相应成分的质量。

3）肌肉脂肪酸含量测定及评价。脂肪酸含量使用气相色谱仪（GC-2010 Plus，岛津，中国分公司）按照国标（GB 5009.168－2016）测定。测定指标包括饱和脂肪酸（saturated fatty acid，SFA）、单不饱和脂肪酸（monounsaturated fatty acid，MUFA）、多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acid，PUFA），n-3系列多不饱和脂肪酸（n-3 polyunsaturated fatty acid，n-3PUFA）、n-6系列多不饱和脂肪酸（n-6 polyunsaturated fatty acid，n-6PUFA），并参照文献[14]计算动脉粥样硬化指数（atherogenicity index，AI）和血栓形成指数（thrombogenicity index，TI）。

4）血清和肝胰腺相关酶活性及肠道消化酶活性测定。将肝胰腺和肠道组织从－80 ℃冰箱取出，放入－20 ℃冰箱逐级解冻，称质量后加入9倍质量的4 ℃预冷生理盐水，使用匀浆机充分混匀，制成组织匀浆，然后4 ℃、3 500 r/min离心10 min取上清液，重

复离心2次，分装保存以备后续相关酶活性的测定。

采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定以下指标：组织总蛋白（total protein，TP）、总一氧化氮合成酶（total nitric oxide synthase，T-NOS）、溶菌酶（lysozyme，LZM）、酸性磷酸酶（acid phosphatase，ACP）、碱性磷酸酶（alkaline phosphatase，AKP）、淀粉酶（amylase，AMS）、脂肪酶（lipase，LPS）。采用福建海联生物科技有限公司提供的Elisa检测试剂盒测定酚氧化酶（phenoloxidase，PO）活性。

5）肝胰腺组织形态学观察。取出对虾肝胰腺，置于4%多聚甲醛缓冲液中固定24～48 h，经过脱水、透明、包埋、切片等步骤处理后，用苏木精伊红（HE）染色，中性树脂封片后在光学显微镜（DM2500，德国莱卡公司）下观察肝胰腺组织形态并拍照记录。

1.6 统计学分析

采用SPSS 26（Chicago，United States）进行统计学分析。分别以Shapiro-Willks test和Levene's test对数据进行正态分布检验和方差齐性检验。对服从正态分布且方差齐性的数据进行单因素方差分析（one-way analysis of variance，ANOVA），同时以Duncan's test进行多重比较。本研究中所有数据均表示为平均值±标准误（mean ± SE）。所有统计分析中均以$P<0.05$作为显著性差异标准。

2 结果与分析

2.1 凡纳滨对虾的生长性能

饲喂不同形式不同浓度鼠李糖乳杆菌28 d后，不同组别凡纳滨对虾的生长性能如表1所示。活菌组的FBW和WGR均显著高于CK组（$P<0.05$），LB2组的FBW和WGR显著高于LB1组（$P<0.05$），其中，LB2组的FBW为6.24 g，WGR为290.64%，分别比CK组高10.44%和14.40%。相比于CK组，活菌组的LB2和LB3组SGR有显著提高。灭活的DB2组的FBW、WGR显著高于CK组（$P<0.05$）。其余指标各组间均无显著差异（$P>0.05$）。

表1 饲喂鼠李糖乳杆菌28 d后凡纳滨对虾的生长性能情况

Table 1 Growth performance of *L. vannamei* fed with *L. rhamnosus* for 28 days

组别 Group	初始体质量/g IBW	终末体质量/g FBW	增重率/% WGR	特定生长率/% SGR	肥满度/(g/cm³) CF	饲料系数 FCR	存活率/% SR
CK	1.60±0.15	5.65±0.10d	254.05±11.91d	4.11±0.12c	1.56±0.02	1.90±0.30	80.00±10.00
LB1	1.60±0.15	5.87±0.07bc	267.64±4.87bc	4.27±0.12bc	1.48±0.02	1.83±0.06	82.50±7.50
LB2	1.60±0.15	6.24±0.21a	290.64±19.16a	4.54±0.04a	1.48±0.03	1.89±0.40	83.75±11.25
LB3	1.60±0.15	6.05±0.05ab	278.90±3.34ab	4.36±0.44ab	1.53±0.04	1.76±0.23	85.00±15.00
DB1	1.60±0.15	5.79±0.13cd	262.83±10.58cd	4.21±0.14bc	1.49±0.04	1.95±0.24	82.50±7.50
DB2	1.60±0.15	5.90±0.14bc	269.57±8.74bc	4.22±0.13bc	1.46±0.03	1.79±0.45	88.75±13.75
DB3	1.60±0.15	5.85±0.10bcd	266.09±6.75bcd	4.21±0.03bc	1.48±0.04	1.98±0.23	82.50±2.50

注：同列数据中标有不同字母表示有显著差异（$P<0.05$），无字母标注或标有相同字母的表示无显著差异（$P>0.05$），下同。Note：Different letters in the same column of data indicate significant differences ($P<0.05$), and there is no significant difference in the data without letters or with the same letters ($P>0.05$). The same below.

2.2 凡纳滨对虾的肌肉组成成分

如表2所示，饲喂鼠李糖乳杆菌28 d后，各组凡纳滨对虾肌肉的粗蛋白、粗脂肪、粗灰分和水分的含量并没有明显的差异（$P>0.05$）。

2.3 凡纳滨对虾的肠道消化酶活性

如图1所示，所有试验组的AMS活性都明显高于CK组（$P<0.05$），灭活组中，DB2的AMS活性最高，比CK组高73.30%，并且与DB1相比，其活性有显著提升（$P<0.05$）。除LB1和DB1组外，其他各组LPS活力均显著高于CK组（$P<0.05$），且DB2、DB3组显著高于DB1组（$P<0.05$）。

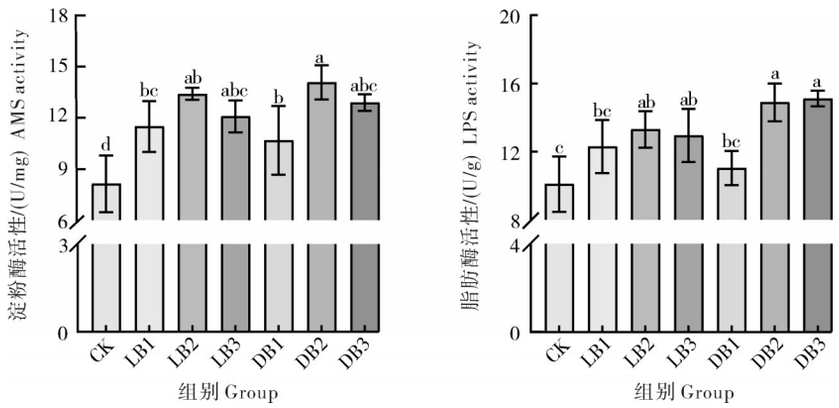
2.4 凡纳滨对虾的肌肉脂肪酸组成

如表3所示，从凡纳滨对虾肌肉样本中检测出17种脂肪酸，包括4种SFA、3种MUFA、3种n-6PUFA以及7种n-3PUFA。不同形式和不同浓度的鼠李糖乳杆菌处理对肌肉脂肪酸组成产生差异，DB2和

表2 凡纳滨对虾的肌肉组成成分

Table 2 Muscle composition of *L. vannamei* %

组别 Group	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	水分 Moisture	灰分 Ash
CK	20.64±0.44	1.43±0.46	77.06±0.46	1.34±0.25
LB1	21.04±0.55	1.30±0.15	75.80±0.66	1.24±0.11
LB2	20.43±1.14	1.23±0.24	77.00±1.17	1.14±0.13
LB3	20.43±1.59	1.72±0.54	76.94±1.46	1.05±0.15
DB1	20.28±1.41	1.31±0.01	77.53±0.84	1.24±0.07
DB2	20.96±1.02	1.51±0.54	75.81±0.74	1.18±0.11
DB3	20.59±1.01	1.73±0.40	75.61±1.06	1.24±0.28



柱上标有不同字母表示有显著差异($P<0.05$)；下图同。 Different letters on the column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

图1　凡纳滨对虾肠道中消化酶的活性

Fig. 1　Digestive enzyme activities in intestine of *L. vannamei*

表3　凡纳滨对虾的肌肉脂肪酸组成

Table 3　Muscle fatty acid composition of *L. vannamei*　　%

组别 Group	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	ΣSFA	C16:1	C18:1n	C20:1n-11	∑MUFA
CK	0.25±0.02	19.79±1.03	13.21±1.20	0.04±0.01	33.30±0.88	1.69±0.12	19.41±0.17a	0.58±0.05	21.67±0.13a
LB1	0.26±0.01	20.76±0.48	12.02±0.30	0.06±0.03	33.10±0.49	1.81±0.12	19.44±0.74a	0.56±0.05	21.81±0.81a
LB2	0.28±0.02	20.74±0.43	12.27±0.53	0.06±0.02	33.36±0.41	1.93±0.07	19.11±0.43a	0.58±0.02	21.62±0.49a
LB3	0.26±0.03	20.77±0.29	12.89±0.52	0.04±0.01	33.97±0.37	1.67±0.16	18.96±0.43a	0.60±0.01	21.23±0.52a
DB1	0.28±0.03	20.87±0.17	12.74±0.04	0.05±0.01	33.94±0.55	1.84±0.08	19.04±1.00a	0.62±0.06	21.51±0.97a
DB2	0.25±0.02	21.04±0.16	12.02±0.11	0.04±0.00	33.36±0.56	1.60±0.22	17.65±0.63b	0.56±0.03	19.81±0.84b
DB3	0.23±0.04	20.45±0.57	13.81±1.59	0.04±0.01	34.53±1.02	1.65±0.24	17.44±0.60b	0.61±0.02	19.70±0.41b

组别 Group	C18:2n-6(LA)	C20:2n-6	C20:4n-6 (ARA)	∑n-6PUFA	C18:3n-3	C18:4n-3	C20:3n-3	C20:5n-3 (EPA)	C20:4n-3
CK	13.45±0.0.16ab	1.13±0.06	3.57±0.12	18.15±.11ab	0.85±0.01	0.18±0.06	0.19±0.02	9.17±0.50b	0.20±0.02
LB1	13.93±0.32a	1.11±0.05	3.42±0.13	18.46±0.17a	0.90±0.02	0.13±0.02	0.20±0.02	9.30±0.72ab	0.22±0.04
LB2	13.03±0.08bc	1.05±0.03	3.54±0.32	17.62±0.34b	0.85±0.02	0.10±0.04	0.16±0.01	10.06±.28ab	0.17±0.01
LB3	13.87±0.16a	1.20±0.03	3.50±0.03	18.56±0.20a	0.91±0.06	0.15±0.03	0.23±0.05	9.69±0.34ab	0.25±0.07
DB1	13.39±0.33ab	1.17±0.10	3.68±0.24	18.25±.46ab	0.88±0.03	0.14±0.05	0.21±0.04	9.66±0.56ab	0.22±0.04
DB2	12.60±0.59c	1.19±0.10	3.88±0.11	17.68±0.42b	0.79±0.08	0.12±0.00	0.17±0.00	10.48±0.67a	0.17±0.02
DB3	14.06±0.46a	1.15±0.08	3.56±0.20	18.76±0.38a	0.90±0.02	0.16±0.03	0.23±0.00	9.29±1.03ab	0.22±0.01

组别 Group	C22:5n-3	C22:6n-3(DHA)	∑n-3PUFA	∑PUFA	∑PUFA/ ∑SFA	∑n-3PUFA / ∑n-6PUFA	动脉粥样硬化指数 AI	血栓形成指数 TI
CK	1.01±0.04	15.23±0.71ab	26.84±1.04b	44.99±0.96b	1.35±0.06	1.48±0.07b	0.31±0.018	0.33±0.019
LB1	1.04±0.05	14.84±0.82b	26.64±1.09b	45.09±0.96ab	1.36±0.04	1.44±0.07b	0.33±0.009	0.33±0.012
LB2	1.01±0.05	15.04±0.76b	27.40±0.50ab	45.02±0.39b	1.35±0.02	1.56±0.05a	0.33±0.006	0.32±0.008
LB3	1.01±0.00	13.99±0.64b	26.24±0.47b	44.80±0.61b	1.32±0.03	1.41±0.02b	0.33±0.003	0.34±0.007
DB1	1.01±0.05	14.19±0.41b	26.31±0.79b	44.55±0.48b	1.31±0.01	1.44±0.08b	0.33±0.007	0.34±0.001
DB2	1.02±0.04	16.43±0.53a	29.18±1.03a	46.86±0.63a	1.40±0.01	1.65±0.10a	0.33±0.004	0.31±0.005
DB3	1.09±0.02	15.12±0.27b	27.01±1.30b	45.77±1.43ab	1.33±0.08	1.44±0.07b	0.33±0.004	0.34±0.022

DB3组的MUFA显著低于其他组($P<0.05$)，分别占比19.81%和19.70%。在n-6PUFA含量方面，LB2和DB2组显著低于LB1、LB3和DB3组($P<0.05$)，比例分别约为17.62%和17.68%。此外，DB2组的n-3PUFA含量约为29.18%，显著高于CK组、LB1组、LB3组、DB1组和DB3组($P<0.05$)。LB2和DB2组的n-3PUFA与n-6PUFA比值显著高于其他组($P<0.05$)。但AI和TI在各组间并无显著差异($P>0.05$)。

2.5 凡纳滨对虾的免疫防御

如图2所示，在饲料中添加活性和灭活的鼠李糖乳杆菌28 d后，各个处理组的PO活性显著高于CK组（$P<0.05$），特别是DB2组的活性最高，比CK组高77.94%。在灭活的3个处理组中，T-NOS的含量明显超过了CK组（$P<0.05$）。此外，所有处理组的LZM活性都显著高于CK组（$P<0.05$），其中DB2组活性最高，比CK组高96.25%。

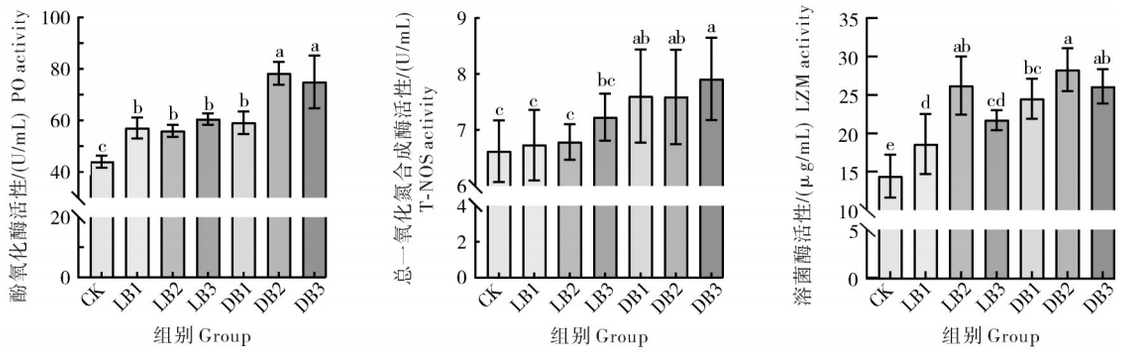


图2 凡纳滨对虾血清中相关酶活性

Fig.2 Related enzyme activities in serum of *L. vannamei*

2.6 凡纳滨对虾的肝胰腺健康评价

如图3所示，LB2、DB2、DB3的ACP活性显著高于CK组（$P<0.05$），活菌组间LB2显著高于LB1和LB3组（$P<0.05$），而灭活组间无显著性差异（$P>0.05$）。除DB1组外，各个处理组的AKP活性均显著高于CK组（$P<0.05$），其中活菌组显著高于整个灭活组（$P<0.05$）。LB2组ACP和AKP活性均最高，分别比CK组高31.51%和93.38%。

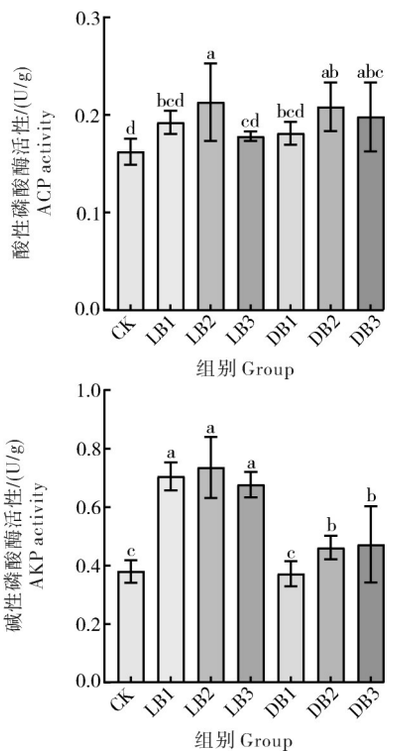


图3 凡纳滨对虾肝胰腺的相关酶活性

Fig.3 Related enzyme activities in hepatopancreas of *L. vannamei*

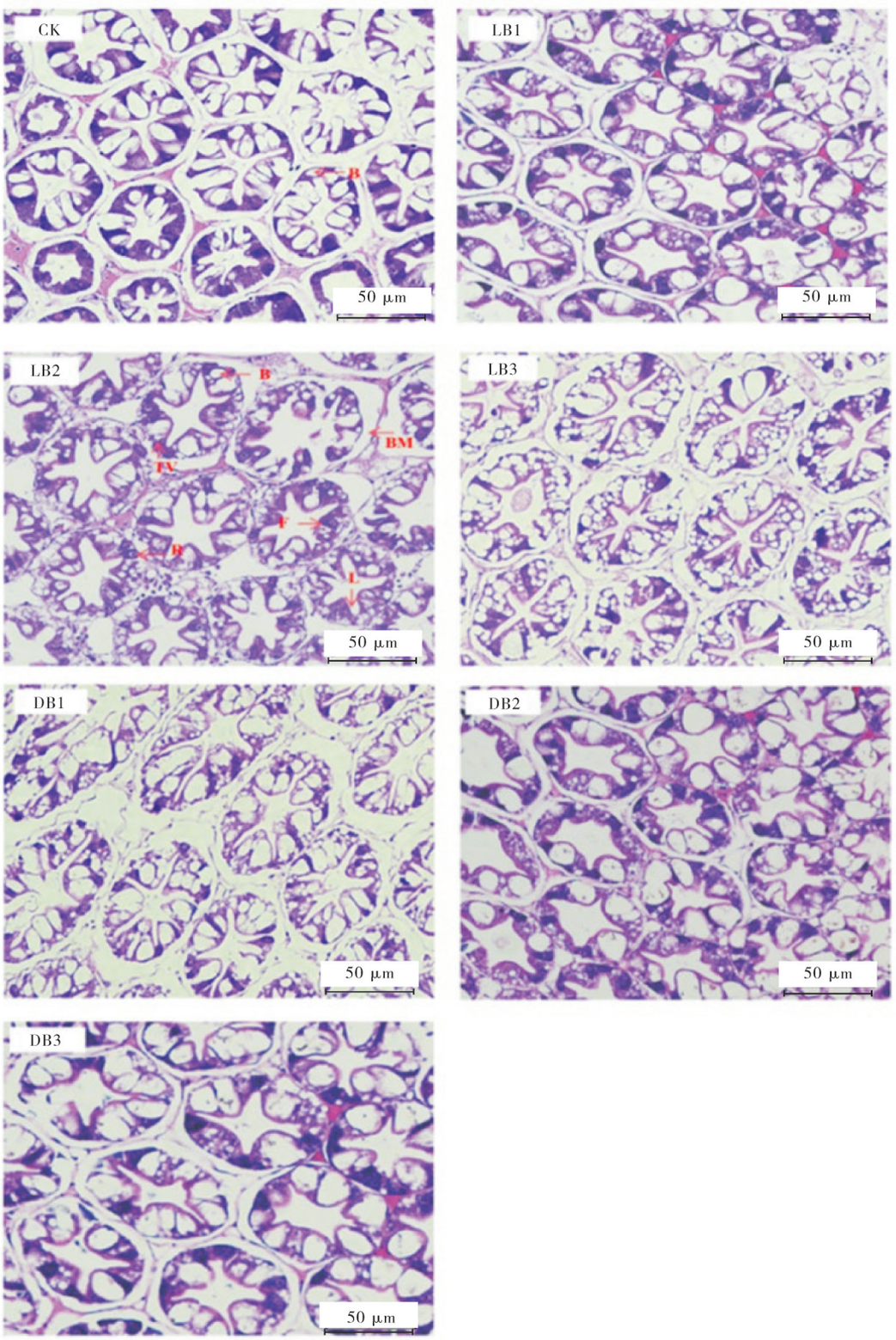
如图4所示，各处理组凡纳滨对虾肝胰腺外观正常，细胞核和细胞质较为清晰，转运泡数量正常，肝胰腺小管的管腔大体呈星形结构，且基膜和上皮细胞连接紧密，细胞排列较为整齐，部分或有间隙或紧凑。在CK组中，肝小管结构呈现出松散排列，其基底区的膜结构出现脱落现象，分泌细胞遭受损害，同时储存细胞、纤维细胞以及转运泡的数量均有所减少，其他各组分泌细胞整体偏大，星状结构偏模糊，但未出现明显病理变化特征。

3 讨 论

3.1 饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾生长性能的影响

生长性能是评价饲料添加剂作用效果的重要指标。Swapna等[11]的研究表明，与对照组相比，凡纳滨对虾在用鼠李糖乳杆菌饲喂120 d后，其终末体质量和特定生长率均显著增加。同样的研究指出，给凡纳滨对虾饲喂经过热灭活处理的益生菌后，其生长指标如增重率、特定生长率等都得到了显著的提升[4]。与上述结果类似，本研究的结果表明，在饲料中加入鼠李糖乳杆菌能显著促进凡纳滨对虾的生长，具体效果与乳杆菌的处理方式和添加的浓度密切相关。当添加中到高浓度的活菌以及中等浓度的热灭活菌时，对虾的最终体质量和周增长率均显著高于对照组，这表明乳酸菌的不同处理方法和不同浓度是其使用效果的决定性因素。

对虾的生长与对营养物质的消化吸收能力密切



B：分泌细胞（B 细胞）；R：存储细胞（R 细胞）；F：纤维细胞；BM：基膜；L：管腔；TV：转运泡。 B: Secretory cell (B cell); R: Storage cell (R cell); BM: Basement membrane; F: Fibrocyte; L: Lumen; TV: Transferred vacuole.

图 4　凡纳滨对虾肝胰腺组织学病理切片（H&E）

Fig. 4　Histopathological sections of the hepatopancreas of *L. vannamei* (H&E)

相关，消化吸收能力常常通过消化道产生的消化酶活性来评估[15-16]。研究表明，乳酸杆菌释放的酸性代谢产物能够使肠道环境的pH值下降，这对于大部分消化酶来说是有利的，因为它们的最佳活性pH值通常是偏酸性的[17]。在产生有机酸的过程中，也能刺激肠道蠕动以及消化酶的生成和释放，这有助于增强生物体对营养物质的吸收效率，从而促进对虾的生长[8]。研究发现，在饲料中添加鼠李糖乳杆菌饲喂鲤(*Cyprinus carpio*)180 d，可以显著改善其肠道的微生物组成，显著增强了肠道中的脂肪酶、胰蛋白酶、淀粉酶等消化酶的活性[18]。研究表明，添加热灭活的益生菌饲料，可以明显增强凡纳滨对虾肝胰腺和肠道中淀粉酶、脂肪酶和胃蛋白酶的活性[4]。与上述结果类似，本研究结果显示，通过向对虾饲喂特定浓度的活性和热灭活鼠李糖乳杆菌，可以显著提升其肠道内的淀粉酶与脂肪酶活性。这种增强效果可能是益生菌与对虾肠道内的微生物群体相互作用的结果，这种相互作用有助于促进消化酶的释放，使对虾对营养物质的吸收能力得到了提升，进而促进了其生长。

3.2 饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾肌肉脂肪酸组成的影响

虾肉品质受其肌肉脂肪酸组成的直接影响，一方面，脂肪酸在脂肪氧化酶的催化下生成挥发性物质，增加虾肉的香味；另一方面，脂质过氧化会损害生物膜的结构完整性，生成的醇和醛类化合物可能导致虾肉变质，散发难闻的气味[19]。研究表明，鱼类在长期投喂某种饲料后，鱼体自身的脂肪酸组成会越来越接近该饲料的脂肪酸组成[20-22]。EPA和DHA已被证实对人体有多种有益效果，例如可以降低心血管疾病风险，调节脂质代谢等[23-24]。在本研究中，对虾肌肉中饱和脂肪酸在各组中无显著差异，而在不饱和脂肪酸中，中等浓度热灭活菌的EPA含量显著高于对照组，且其DHA含量同样为各组最优，可见DB2组的脂肪酸结构为各组最优。大多数动物的n-3和n-6脂肪酸只能从食物中获取合成的前体，所以n-3和n-6脂肪酸会受到饲料的影响[25]。此外，与单一的n-3PUFA和n-6PUFA含量相比，n-3和n-6PUFA的比例更为重要。在本研究中，添加中等浓度的活菌与热灭活菌能够显著提升n-3PUFA/n-6PUFA的比值，表明脂肪酸的营养价值显著提高，可见，通过不同形式添加一定浓度的鼠李糖乳杆菌，可以改善凡纳滨对虾肌肉中脂肪酸的组成。动脉粥样硬化指数与血栓形成指数不仅作为评估脂肪酸品质的标准，还能指示摄入这些脂肪酸可能带来的人体健康风险[14]。在本研究中，这2个指标的值都相对较低，表明不太可能对人体健康造成不良影响。这可能是因为鼠李糖乳杆菌可以促进脂肪酸代谢和β氧化[26]，从而改善对虾的脂肪酸组成。

3.3 饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾免疫防御的影响

PO可有效催化动物体内过氧化物的分解，在甲壳类动物的免疫防御过程中发挥重要作用[27]。LZM通过特异性水解细菌细胞壁中N-乙酰氨基葡糖与N-乙酰胞壁酸间的糖苷键，从而抑制病原微生物增殖，提升宿主的免疫防御能力[28]。T-NOS能够催化生成一氧化氮，并具有抗病毒、抗细菌和抗寄生虫的功能[29]。合适的益生菌有助于调整水生生物的非特异性免疫反应，但根据益生菌的种类和动物的种类，不同的参数对益生菌的作用可能会有所差异[30]。例如，在饲料中加入1×10^8 CFU/g鼠李糖乳杆菌可以显著提高尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的非特异性免疫能力[31]。在本研究中，饲料中加入适量浓度的鼠李糖乳杆菌可以在不同程度上提高凡纳滨对虾免疫防御能力，且在不同的添加浓度下表现出显著差异。中高浓度的热灭活鼠李糖乳杆菌处理比低浓度组的血清中PO活性有显著提高，中等浓度的活菌处理比低浓度组以及高浓度组的LZM活性同样有显著提高。热灭活组的T-NOS活性显著高于对照组，而活菌组的活性并没有显著提高。这可能是因为在热灭活过程中产生了热休克蛋白(HSP)，提高了免疫调节活性[32]；另一方面也可能是因为灭活菌直接提供了脂磷壁酸和肽聚糖等细胞成分，提高了促炎细胞因子和Toll样受体的表达，激活了先天免疫系统[33]。总之，将不同形式鼠李糖乳杆菌添加到饲料中可提高凡纳滨对虾非特异性免疫的能力，也表明热灭活益生菌应用于水产养殖具有潜在意义。

3.4 饲喂鼠李糖乳杆菌对凡纳滨对虾肝胰腺健康的影响

ACP与AKP是可以分解有机磷脂的关键磷酸酶，在水生生物非特异性免疫中发挥重要作用[34]。本研究的结果显示，LB2、DB2、DB3组的这2种肝胰腺免疫酶的活性均显著高于对照组，且热灭活组的AKP活性整体显著高于非灭活组，不论活菌或热灭活菌，饲料中添加的鼠李糖乳杆菌均显著改善了凡纳滨对虾肝胰腺的健康状态。此结果与牙鲆(*Para-*

lichthys olivaceus)摄食含有热灭活益生菌饲料的结果[35]相似。凡纳滨对虾的肝胰腺能够分泌消化酶和储存营养,同时还具备解毒的作用[36]。分泌细胞主要负责吸收营养和合成消化酶;而存储细胞则参与营养的吸收与储存,此外,它在脂蛋白的新陈代谢中也起到了关键作用[37]。本研究结果表明,添加鼠李糖乳杆菌的饲料能够促进凡纳滨对虾肝胰腺的健康,试验组显示其肝胰腺管腔布局密集,各管腔的基膜保持完好,且分泌细胞、存储细胞以及纤维细胞的数量明显增多,这表明这种饲料的添加对提升虾的生长表现有积极作用,推测可能是鼠李糖乳杆菌通过激活肝胰腺的免疫酶活性来增强免疫防御能力,从而促进肝胰腺健康。

综上所述,在本研究的条件下,1×10^7 CFU/g非灭活与热灭活的鼠李糖乳杆菌添加到饲料中,均显著提高了凡纳滨对虾的生长性能,肌肉中n-3/n-6多不饱和脂肪酸的比例均得到显著改善,非特异性免疫能力和消化能力也有显著提升,促进了肝胰腺健康。

参考文献 References

[1] JIN M, XIONG J, ZHOU Q C, et al. Dietary yeast hydrolysate and brewer's yeast supplementation could enhance growth performance, innate immunity capacity and ammonia nitrogen stress resistance ability of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Fish & shellfish immunology, 2018, 82: 121-129.

[2] 余达勇,陈碧秀,钟永军,等.对虾急性肝胰腺坏死致病菌HY3鉴定及耐药分析[J].水产科学,2020,39(6):844-851. YU D Y, CHEN B X, ZHONG Y J, et al. Identification and drug resistance of pathogenic bacteria HY3 in acute hepatopancreatic necrosis disease from pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J].Fisheries science, 2020, 39(6): 844-851(in Chinese with English abstract).

[3] 冷更生. 水产用抗生素替代品研究[J]. 科学养鱼,2015(9):52-53. LENG G S. Study on antibiotic substitutes for aquatic products[J]. Scientific fish farming, 2015(9): 52-53 (in Chinese).

[4] YANG W Q, LI J, YAO Z L, et al. A review on the alternatives to antibiotics and the treatment of antibiotic pollution: current development and future prospects[J/OL]. Science of the total environment, 2024, 926: 171757 [2025-05-05]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171757.

[5] LEE Y K, PUONG K Y, OUWEHAND A C, et al. Displacement of bacterial pathogens from mucus and Caco-2 cell surface by lactobacilli[J]. Journal of medical microbiology, 2003, 52(10): 925-930.

[6] DU Y, ZHOU S H, LIU M, et al. Understanding the roles of surface proteins in regulation of *Lactobacillus pentosus* HC-2 to immune response and bacterial diversity in midgut of *Litopenaeus vannamei*[J]. Fish & shellfish immunology, 2019, 86: 1194-1206.

[7] ADEL M, EL-SAYED A M, YEGANEH S, et al. Effect of potential probiotic *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* on growth performance, intestinal microbiota, digestive enzyme activities, and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*[J]. Probiotics and antimicrobial proteins, 2017, 9(2): 150-156.

[8] MATHAN M C M, VICKRAM A S, BHAVANI S B, et al. A comprehensive review on the utilization of probiotics in aquaculture towards sustainable shrimp farming[J/OL]. Fish & shellfish immunology, 2024, 147: 109459 [2025-05-05]. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109459.

[9] LIU Y, CHEN Y, LIAO H J, et al. Research progress on the application of *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG in pediatric respiratory diseases[J/OL]. Frontiers in nutrition, 2025, 12: 1553674 [2025-05-05]. https://doi. org/10.3389/fnut. 2025.1553674.

[10] GUIMARÃES A P, ULIANA D S, SANT'ANA M R, et al. *Lacticaseibacillus rhamnosus*: an overview of the viability in fruit and vegetable juices and their potential effects on human health[J/OL]. Probiotics and antimicrobial proteins, 2025: 1-16 [2025-05-05]. https://doi. org/10.1007/s12602-025-10454-0.

[11] SWAPNA B, VENKATRAYULU C, SWATHI A V. Effect of probiotic bacteria *Bacillus licheniformis* and *Lactobacillus rhamnosus* on growth of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931)[J]. European journal of experimental biology, 2015, 5(11): 31-36.

[12] ABIDIN Z, HUANG H T, HU Y F, et al. Effect of dietary supplementation with *Moringa oleifera* leaf extract and *Lactobacillus acidophilus* on growth performance, intestinal microbiota, immune response, and disease resistance in whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. Fish & shellfish immunology, 2022, 127: 876-890.

[13] ZHANG F, TENG Z L, WANG L, et al. Dietary selenium deficiency and excess accelerate ubiquitin-mediated protein degradation in the muscle of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) via Akt/FoxO3a and NF-κB signaling pathways[J]. Biological trace element research, 2022, 200(3): 1361-1375.

[14] ULBRICHT T L V, SOUTHGATE D A T. Coronary heart disease: seven dietary factors[J]. The lancet, 1991, 338 (8773): 985-992.

[15] SOLEIMANI N, HOSEINIFAR S H, MERRIFIELD D L, et al. Dietary supplementation of fructooligosaccharide (FOS) improves the innate immune response, stress resistance, digestive enzyme activities and growth performance of Caspian roach (*Rutilus rutilus*) fry[J]. Fish & shellfish immunology, 2012, 32(2): 316-321.

[16] MOHAPATRA S, CHAKRABORTY T, PRUSTY A K, et al. Use of different microbial probiotics in the diet of rohu, *Labeo rohita* fingerlings: effects on growth, nutrient digestibility and retention, digestive enzyme activities and intestinal microflora[J]. Aquaculture nutrition, 2012, 18(1): 1-11.

[17] COLLINGTON G K, PARKER D S, ARMSTRONG D G. The influence of inclusion of either an antibiotic or a probiotic in the diet on the development of digestive enzyme activity in the pig[J]. British journal of nutrition, 1990, 64(1): 59-70.

[18] MOHAMMADIAN T, MONJEZI N, PEYGHAN R, et al. Effects of dietary probiotic supplements on growth, digestive enzymes activity, intestinal histomorphology and innate immunity of common carp (*Cyprinus carpio*): a field study[J/OL]. Aquaculture, 2022, 549: 737787[2025-05-05]. https://doi.org/ 10.1016/j.aquaculture.2021.737787.

[19] WOOD J D, RICHARDSON R I, NUTE G R, et al. Effects of fatty acids on meat quality: a review[J]. Meat science, 2004, 66(1): 21-32.

[20] CASTELL J D, SINNHUBER R O, WALES J H, et al. Essential fatty acids in the diet of rainbow trout (*Salmo gairdneri*): growth, feed conversion and some gross deficiency symptoms[J]. The journal of nutrition, 1972, 102(1): 77-85.

[21] HARDY R W, SCOTT T M, HARRELL L W. Replacement of herring oil with menhaden oil, soybean oil, or tallow in the diets of Atlantic salmon raised in marine net-pens[J]. Aquaculture, 1987, 65(3/4): 267-277.

[22] KALOGEROPOULOS N, ALEXIS M N, HENDERSON R J. Effects of dietary soybean and cod-liver oil levels on growth and body composition of gilthead bream (*Sparus aurata*)[J]. Aquaculture, 1992, 104(3/4): 293-308.

[23] KENNISH J M, SHARP-DAHL J L, CHAMBERS K A, et al. The effect of a herring diet on lipid composition, fatty acid composition, and cholesterol levels in the muscle tissue of pen-reared Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. Aquaculture, 1992, 108(3/4): 309-322.

[24] NARAYAN B, MIYASHITA K, HOSAKAWA M. Physiological effects of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA): a review[J]. Food reviews international, 2006, 22(3): 291-307.

[25] ZHAO Y, LI J Y, YIN L, et al. Effects of dietary glutamate supplementation on flesh quality, antioxidant defense and gene expression related to lipid metabolism and myogenic regulation in Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. Aquaculture, 2019, 502: 212-222.

[26] SUNTORNSARATOON P, FERRARIS R P, AMBAT J, et al. Metabolomic and transcriptomic correlative analyses in germ-free mice link *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG-associated metabolites to host intestinal fatty acid metabolism and β-oxidation[J/OL]. Laboratory investigation, 2024, 104(4): 100330 [2025-05-05]. https://doi.org/10.1016/j.labinv.2024.100330.

[27] AMPARYUP P, CHAROENSAPSRI W, TASSANAKAJON A. Prophenoloxidase system and its role in shrimp immune responses against major pathogens[J]. Fish & shellfish immunology, 2013, 34(4): 990-1001.

[28] BAYNE C J, GERWICK L. The acute phase response and innate immunity of fish[J]. Developmental & comparative immunology, 2001, 25(8/9): 725-743.

[29] 夏美文, 吕孙建, 李逸群, 等. 中华鳖诱导型一氧化氮合酶(iNOS)基因的表达分析[J]. 淡水渔业, 2024, 54(6): 64-70. XIA M W, LYU S J, LI Y Q, et al. Expression analysis of the inducible nitric oxide synthase (iNOS) gene of the *Pelodiscus sinensis*[J]. Freshwater fisheries, 2024, 54(6): 64-70 (in Chinese with English abstract).

[30] CHENG T C. Immunodeficiency diseases in marine mollusks: measurements of some variables[J]. Journal of aquatic animal health, 1989, 1(3): 209-216.

[31] XIA Y, LU M X, CHEN G, et al. Effects of dietary *Lactobacillus rhamnosus* JCM1136 and *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* JCM5805 on the growth, intestinal microbiota, morphology, immune response and disease resistance of juvenile Nile *Tilapia*, *Oreochromis niloticus*[J]. Fish & shellfish immunology, 2018, 76: 368-379.

[32] FUJIKI T, HIROSE Y, YAMAMOTO Y, et al. Enhanced immunomodulatory activity and stability in simulated digestive juices of *Lactobacillus plantarum* L-137 by heat treatment[J]. Bioscience, biotechnology, and biochemistry, 2012, 76(5): 918-922.

[33] DE ALMADA C N, ALMADA C N, MARTINEZ R C R, et al. Paraprobiotics: evidences on their ability to modify biological responses, inactivation methods and perspectives on their application in foods[J]. Trends in food science & technology, 2016, 58: 96-114.

[34] BLASCO J, PUPPO J, SARASQUETE M C. Acid and alkaline phosphatase activities in the clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Marine biology, 1993, 115(1): 113-118.

[35] 王帅, 赵琳, 韩雨哲, 等. 饲喂热灭活复合益生菌对牙鲆生长、免疫等指标的影响[J]. 饲料工业, 2020, 41(6): 37-42. WANG S, ZHAO L, HAN Y Z, et al. Effects of heat killed compound probiotics on growth and immunity of *Paralichthys olivaceus*[J]. Feed industry, 2020, 41(6): 37-42 (in Chinese with English abstract).

[36] 朱孟凯, 姚翠鸾. 温度胁迫对凡纳滨对虾肝胰腺氧代谢及能量代谢的影响[J]. 水产学报, 2015, 39(5): 669-678. ZHU M K, YAO C L. The impact of temperature stress on the oxygen metabolism and energy metabolism in the hepatopancreas of shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of fisheries of China, 2015, 39(5): 669-678 (in Chinese with English abstract).

[37] CACECI T, NECK K F, LEWIS D D H, et al. Ultrastruc-

ture of the hepatopancreas of the Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* (Crustacea: Decapoda)[J]. Journal of the marine biological association of the United Kingdom, 1988, 68(2): 323-337.

Effects of dietary *Lactobacillus rhamnosus* on growth performance and physical health of *Litopenaeus vannamei*

NIE Yukang[1], ZHANG Jiening[1], LI Shaoyun[1], ZHANG Xuezhen[1,2]

1. *College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China*;
2. *Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China*

Abstract To comprehensively evaluate the effects of *Lactobacillus rhamnosus* on the culture of *Litopenaeus vannamei*, as well as to determine the optimal form and dosage of its supplementation, seven experimental diets were formulated for juvenile *L. vannamei* [(1.60±0.15) g]. These included control group (group CK, basal diet), three live bacteria groups (LB1, LB2, LB3, with the diet supplemented with 1×10^6, 1×10^7, 1×10^8 CFU/g of *L. rhamnosus*, respectively), and three heat-inactivated bacteria groups (DB1, DB2, DB3, with the diet supplemented with 1×10^6, 1×10^7, 1×10^8 CFU/g of heat-inactivated *L. rhamnosus*, respectively). A 28-day culture trial was conducted to investigate the effects of *L. rhamnosus* on the growth performance and physiological health of *L. vannamei*. The results revealed the following: (1) Compared to the CK group, the weight gain rates of the LB1, LB2, LB3, and DB2 groups increased by 5.35%, 14.40%, 9.78%, and 6.11%, respectively ($P<0.05$). (2) Intestinal amylase and lipase activities were significantly enhanced in all treatment groups ($P<0.05$). (3) The ratio of n-3 to n-6 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) in the muscles of the LB2 and DB2 groups increased significantly by 5.41% and 11.49%, respectively, compared with the CK group ($P<0.05$). Furthermore, the total PUFA content in the DB2 group demonstrated a significant increase compared with the CK group ($P<0.05$). (4) All *L. rhamnosus* supplemented groups exhibited enhanced serum phenoloxidase and lysozyme activities relative to the control ($P<0.05$). Notably, the heat-inactivated groups exhibited a significant increase in total nitric oxide synthase activity ($P<0.05$). (5) Acid phosphatase activity in the hepatopancreas of shrimp in the LB2, DB2, and DB3 groups increased significantly by 31.51%, 28.44%, and 22.12%, respectively ($P<0.05$), while alkaline phosphatase activity increased in all groups except DB1 ($P<0.05$). (6) Histological analysis revealed improved hepatopancreatic health in treatment groups, characterized by organized cellular arrangements and distinctive stellate luminal structures in hepatic tubules. In conclusion, dietary supplementation with *L. rhamnosus* significantly enhances growth performance, muscle quality, immune responses, and digestive enzyme activity in *L. vannamei*, while also improving hepatopancreatic histomorphology. Optimal effects were achieved at a concentration of 1×10^7 CFU/g for both viable and heat-inactivated formulations.

Keywords *Lactobacillus rhamnosus*; *Litopenaeus vannamei*; growth performance; physical health

(责任编辑：边书京)