Dong J F, Qi H S, Zhang C X, *et al*. Dietary fishmeal replacement with abalone viscera hydrolyzed protein on growth performance, hepatic antioxidant capacity, and intestinal health in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(6): 062603. [董俊峰, 齐海深, 张春晓, 等. 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈生长、肝脏抗氧化及肠道健康的影响 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(6): 062603.]

酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈生长、肝脏抗氧化及肠道健康的影响

董俊峰 齐海深 张春晓 王 玲 宋 凯 李学山 马瑞娟 鲁康乐

(集美大学水产学院海水养殖生物育种全国重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 为探究酶解鲍内脏蛋白替代花鲈饲料中鱼粉的适宜比例及其对鱼体健康的影响。以花鲈[(初始体重: 141.22±0.38) g]为研究对象, 分别用酶解鲍内脏蛋白替代0、10%、20%、30%、40%的鱼粉配制5种等氮等脂饲料, 进行8周的养殖实验, 测定生长性能、血清生化、肝脏抗氧化指标、肠道消化, 并用16S rRNA分析肠道菌群。结果表明: 30%组特定生长率最高, 与对照组无显著差异。40%组谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性显著升高, 肝脏丙二醛含量显著升高, 表明肝脏氧化损伤。血清免疫指标显示, 40%组补体C4含量升高, 而免疫球蛋白M水平显著降低, 表明免疫功能紊乱。肠道形态方面, 40%组绒毛高度显著降低且结构松散, D-乳酸与二胺氧化酶显著升高。胰蛋白酶活性随替代比例升高而降低, 而脂肪酶与淀粉酶活性无显著变化。肠道菌群分析表明, 鲸杆菌属(*Cetobacterium*)的相对丰度随替代比例呈先升后降趋势, 在20%替代组达到最高。研究表明, 酶解鲍内脏蛋白替代30%鱼粉不影响花鲈生长、肝脏与肠道健康; 替代40%则导致肝脏代谢紊乱、氧化应激及肠道结构损伤与消化功能降低。

关键词: 鲍内脏; 酶解蛋白; 鱼粉替代; 花鲈; 生长性能; 肠道健康

中图分类号: S965.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)06-062603-10

doi: 10.3724/1000-3207.2026.2026.0031 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2026.0031

随着全球水产养殖业的规模化、集约化发展, 优质蛋白源饲料的稳定供应已成为制约产业可持续发展的关键瓶颈之一。鱼粉因氨基酸组成均衡、适口性好、消化率高等特性, 长期被视为水产饲料中不可或缺的动物蛋白源[1]。然而, 受过度捕捞和气候波动等因素影响, 鱼粉产量日趋紧张、价格持续攀升, 极大地增加了养殖成本[2]。因此, 开发新型替代蛋白源, 以降低饲料对鱼粉的依赖, 已成为水产营养与饲料研究的重要方向。

我国鲍年产量达25.2万吨[3], 鲍在加工过程中会产生20%—30%的内脏副产物, 其富含蛋白质、微量元素及生物活性物质, 但通常被废弃或低值处理, 这不仅导致资源浪费, 还可能带来环境压力[4]。通过酶解技术处理动物产品副产物, 可将大分子蛋白分解为小肽和游离氨基酸, 不仅显著提高其消化吸收率、改善适口性, 还能产生增强免疫的活性物质, 从而有望成为一种极具潜力的蛋白原料[5]。目前, 酶解蛋白已在多种水产动物饲料中显示出良好的鱼粉替代潜力, 研究表明, 酶解鱿鱼蛋白可作为罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)饲料中鱼粉的部分替代物, 在维持生长性能的同时显著增强其对嗜水气单胞菌的抗病能力[6]; 酶解鱼蛋白可替代大西洋鲑(*Salmo salar*)饲料中的部分鱼粉, 不仅维持了生长表现, 还提高了营养物质的表观消化率并改善了肠道健康[7, 8]; 酶解羽毛粉可部分替代大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)饲料中的鱼粉促进生长并

收稿日期: 2026-01-24; **修订日期:** 2026-03-04

基金项目: 国家重点研发计划"低粮低鱼粉鱼油水产饲料高效利用技术与示范应用"(2024YFD2402001); 福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金(FJHYF-L-2023-6)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2024YFD2402001); The Special Fund Project for Promoting High-Quality Development of Marine and Fishery Industry of Fujian Province (FJHYF-L-2023-6)]

作者简介: 董俊峰(2001—), 男, 硕士研究生; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: 1320336150@qq.com

通信作者: 鲁康乐(1986—), 男, 教授; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: lukangle@jmu.edu.cn

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

调控其肝脏代谢与肠道菌群平衡[9]。这些研究提示, 酶解副产物蛋白因其富含小肽、氨基酸组成相对平衡, 在部分替代鱼粉时不仅能维持水产动物的生长性能, 还可能在一定程度上缓解植物蛋白源带来的抗营养问题, 并显示出调节机体代谢与免疫功能的潜力。

花鲈(*Lateolabrax maculatus*)是我国重要的海水经济鱼类, 其肉质鲜美、生长迅速、市场需求旺盛。作为典型的肉食性鱼类, 对饲料中蛋白质的含量要求较高[10]。寻找适宜的鱼粉替代蛋白源, 对于其养殖效益具有重要意义。基于此, 本研究通过酶解内脏蛋白替代不同比例鱼粉, 分析花鲈生长指标、血清生化参数、肠道结构与功能来验证以下科学假设: (1)在一定比例范围内(≤30%), AVH可有效替代鱼粉且不影响花鲈的生长与健康; (2)当替代比例过高(如40%)时, 可能因氨基酸失衡、抗营养因子累积或氧化应激加剧, 导致肝脏代谢紊乱、抗氧化能力下降及肠道屏障功能受损。通过验证上述假设, 本研究旨在为酶解鲍内脏蛋白在水产饲料中的安全高效应用提供科学依据, 并为水产副产物的资源化利用提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　实验饲料

根据花鲈的营养需求, 以鱼粉、鸡肉粉、豆粕为主要蛋白源, 鱼油、豆油、卵磷脂为主要脂肪源, 配制粗蛋白水平约为48%、粗脂肪水平为11%的基础饲料(表 1)。在基础饲料中以酶解鲍内脏蛋白(AVH, 碱性蛋白酶与中性蛋白酶47.6℃复合酶解3.3h)替代0、10%, 20%、30%、40%的鱼粉, 配制成5组等氮等脂的饲料, 分别为AVH0 (对照组)、AVH10、AVH20、AVH30和AVH40。饲料原料粉碎后过80目筛, 通过逐级混匀充分混合, 添加适量水后制成膨化饲料。饲料在干燥机中风干, 密封保存后备用。

1.2　实验鱼与饲养管理

在正式实验前, 花鲈暂养于池塘网箱中, 使用对照组饲料驯养2周。将225尾体格健壮、大小均匀的花鲈幼鱼(141.22±0.38) g随机分配至15个养殖桶中, 每桶15尾鱼。实验期间, 分别用5种饲料每天

表 1　实验饲料配方及营养成分(干物质, %)

Tab. 1　Formulation and nutrition composition of experimental diets (dry matter basis, %)

原料Ingredient (%)	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
鱼粉Fish meal	30.00	27.00	24.00	21.00	18.00
酶解鲍内脏蛋白Abalone viscera hydrolysate	0.00	3.81	7.61	11.42	15.23
豆粕Soybean meal	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00
鸡肉粉Poultry by-product meal	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00
面粉Wheat Flour	21.50	20.69	19.89	19.08	18.27
鱼油Fish oil	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
豆油Soybean oil	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
卵磷脂Lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙Monocalcium phosphate	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
维生素C Vitamin C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
预混料Premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氯化胆碱Choline chloride	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
营养成分Nutrition composition (%)					
水分Moisture	5.34	5.07	5.27	5.49	5.57
粗蛋白Crude protein	47.9	48.1	48.3	48.2	48.9
粗脂肪Crude lipid	11.25	11.15	11.21	11.14	11.38

注: 1. 预混料为每千克饲料提供, 维生素A 375000.0 IU, 维生素D_3 75000.0 IU, 维生素E 3000.0 mg, 维生素K_3 930.0 mg, 维生素B_1 600.0 mg, 维生素B_2 600.0 mg, 维生素B_6 600.0 mg, 维生素B_{12} 3.7 mg, 维生素C 10500.0 mg, D-泛素钙2400.0 mg, 烟酸胺4500.0 mg, 叶酸185.0 mg, D-生物素7.5 mg, 肌醇3000.0 mg, 镁3000.0 mg, 锌1840.0 mg, 锰1200.0 mg, 铜430.0 mg, 铁1400.0 mg, 钴63.0 mg, 碘53.0 mg, 硒16.0 mg; 2. 营养成分为实测值; 3. 鱼粉、豆粕、鸡肉粉、面粉购自广东省江门市昊昌生物科技有限公司

Note: 1. The premix provides per kilogram of feed: Vitamin A 375000.0 IU, Vitamin D_3 75000.0 IU, Vitamin E 3000.0 mg, Vitamin K_3 930.0 mg, Vitamin B_1 600.0 mg, Vitamin B_2 600.0 mg, Vitamin B_6 600.0 mg, Vitamin B_{12} 3.7 mg, Vitamin C 10500.0 mg, D-Calcium Pantothenate 2400.0 mg, Niacinamide 4500.0 mg, Folic Acid 185.0 mg, D-Biotin 7.5 mg, Inositol 3000.0 mg, Magnesium 3000.0 mg, Zinc 1840.0 mg, Manganese 1200.0 mg, Copper 430.0 mg, Iron 1400.0 mg, Cobalt 63.0 mg, Iodine 53.0 mg, Selenium 16.0 mg; 2. The nutritional composition values are measured values; 3. Fish meal, soybean meal, chicken meal, and wheat flour were purchased from Jiangmen Haochang Biotechnology Co., Ltd., Guangdong Province

投喂两次(6:30和17:30), 每次投喂至鱼摄食欲望不强烈且无残饵。饲养过程中每天保持自然光照、水温27.6—28.4℃、pH为8.0, 溶解氧≥6.0 mg/L, 氨氮<0.1 mg/L。

1.3 样品采集

在养殖8周后, 采集样品。首先, 将所有实验鱼禁食24h, 用丁香酚(1:10000)麻醉后称量并计数。每桶随机取2尾鱼置于自封袋, –20℃保存, 用于全鱼体组成分析。每桶随机取出12尾鱼称重后, 尾静脉取血后于1.5 mL离心管中静置12h后, 2500 r/min离心10min, 收集血清于–80℃保存。随后解剖出肝脏、肠道, 记录内脏、肝脏、腹腔脂肪重量。取中肠并用4%多聚甲醛固定后4℃下保存, 其余样本经液氮速冻后存储在–80℃。

1.4 指标测定

饲料营养成分与全体组成的测定 原料、饲料、鱼体等常规成分测定均采用AOAC[11]的方法进行。水分是在105℃烘箱中烘至恒重, 粗蛋白测定采用杜马斯燃烧法定氮, 测定仪器为全自动定氮仪。粗脂肪测定采用索氏抽提法(溶剂为乙醚)。

酶活性及生化指标测定 血清中谷丙转氨酶(GPT)、谷草转氨酶(GOT)、酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)、补体C4 (C4)、免疫球蛋白M (IgM)、总胆固醇(T-CHO)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C), 肝脏中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA), 肠道中脂肪酶(LPS)、淀粉酶(AMS)等指标均使用南京建成生物工程研究所有限公司的试剂盒测定。

肠道组织形态学分析 将甲醛固定12h的肠道组织样品经酒精逐级脱水、二甲苯透明、透蜡、包埋后, 6 μm切片, HE染色法染色(n=3)。染色后的切片使用正置光学显微镜(Nikon Eclipse CI, 日本尼康)及成像系统(FI3)进行观察、拍摄, 并通过ImageJ软件进行形态学分析, 包括肠绒毛高度(Villus height, VH)、绒毛宽度(Villus width, VW)和肌层厚度(Muscular thickness, MT)。

肠道菌群16S rRNA测序 使用CTAB法提取微生物总DNA。用带Barcode的通用引物338F对细菌16S rRNA基因V3—V4区进行PCR扩增。扩增产物经纯化、定量后, 在Illumina NovaSeq 6000平台上进行PE250双端测序。测序工作由北京诺禾致源科技股份有限公司完成。对下机原始数据, 首先根据Barcode拆分样本, 使用FLASH进行序列拼接, 并利用fastp进行质控, 获得有效标签(Clean Tags)。随后使用QIIME2 (2022.02版本)中的DADA2模块进行降噪, 生成扩增子序列变异(ASVs)。基于Silva 138.1数据库, 利用Mothur方法对代表性序列进行物种分类学注释。对所有样本的序列进行均一化处理, 在此基础上计算Alpha多样性指数(Shannon、Simpson、Chao1)。使用Bray-Curtis距离进行主坐标分析(PCoA), 评估组间群落结构差异(Beta多样性)。通过LEfSe分析(LDA得分>2)识别组间具有统计学差异的标志性物种(Biomarker)。

1.5 数据处理与统计分析

实验数据以“平均值±标准误差”(mean±SE)表示, 采用SPSS 26.0进行单因素方差分析, 组间差异通过Duncan多重比较检验, P<0.05为差异显著。

2 结果

2.1 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈生长的影响

由表 2可知, 随着酶解鲍内脏蛋白(AVH)替代比例的增加, 生长呈现先升后降的趋势。AVH30组的末均重与特定生长率均达到最高值, 与对照组无显著差异(P>0.05)。AVH40组的末体重显著低于AVH30组(P<0.05), 其增重率与特定生长率均为各组最低。各组饲料系数无显著差异, AVH30组的日摄食量显著高于其他各组(P<0.05)。AVH40组的肥满度显著低于对照组(P<0.05), 而各组肝体比、脏体比及腹脂率均无显著差异。

2.2 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈体组成的影响

由表 3可知, AVH40组的粗脂肪含量显著高于其他所有处理组(P<0.05), 而水分与粗蛋白含量在各组间无显著差异。肌肉成分分析表明, 各处理组的肌肉粗蛋白与粗脂肪含量均无显著差异; AVH40组水分含量显著高于AVH10与AVH30组(P<0.05), 但与对照组相比差异不显著。

2.3 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈血清生化的影响

由表 4可知, AVH40组谷丙转氨酶(GPT)与谷草转氨酶(GOT)活性显著高于对照组及其他替代组(P<0.05)。同时, AVH30组与AVH40组的血清葡萄糖(GLU)含量均显著高于其他3组(P<0.05)。AVH40组血清甘油三酯(TG)含量显著高于对照组(P<0.05), 而其总胆固醇(T-CHO)含量则显著低于其他组(P<0.05)。AVH20组低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量显著高于对照组与AVH40组(P<0.05)。

与对照组相比, 各替代组的血清酸性磷酸酶(ACP)活性均显著降低(P<0.05)。AVH20组碱性磷酸酶(AKP)活性最高且显著高于其他组。AVH40组补体C4含量显著高于其他组别(P<0.05), 免疫球蛋白M (IgM)含量则显著低于对照组与AVH20组

(P<0.05)。

2.4　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肝脏抗氧化的影响

由表 5可知, AVH40组丙二醛(MDA)含量显著高于其他组(P<0.05)。然而, 各替代组超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性及总抗氧化能力(T-AOC)与对照组均无显著差异(P>0.05)。

2.5　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道组织形态的影响

如图 1所示, 对照组与AVH30组的花鲈肠道绒

表 2　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈生长性能的影响

Tab. 2　Effects of different replacement levels of abalone viscera hydrolysate on the growth performance of *Lateolabrax maculatus*

项目Item	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
初体重IBW (g/fish)	141.98±0.49	140.58±0.14	142.57±0.54	141.43±0.45	139.53±1.16
末体重FBW (g/fish)	402.26±1.89^{ab}	386.77±1.60^{ab}	393.34±9.00^{ab}	413.13±16.29^{a}	377.48±7.37^{b}
增重率WGR (%)	183.32±1.23	175.12±1.04	175.91±6.45	192.09±11.32	170.64±7.10
特定生长率SGR (%/d)	1.77±0.01	1.72±0.01	1.72±0.04	1.81±0.07	1.69±0.05
饲料系数FCR	1.16±0.01	1.20±0.01	1.22±0.03	1.20±0.05	1.24±0.02
摄食量FI [g/(fish·d)]	5.10±0.02^{b}	5.01±0.01^{b}	5.18±0.06^{b}	5.49±0.14^{a}	5.01±0.11^{b}
肥满度CF (g/cm^3)	1.92±0.03^{a}	1.86±0.01^{ab}	1.87±0.02^{ab}	1.87±0.03^{ab}	1.84±0.02^{b}
腹脂率AFR (%)	7.56±0.53	8.03±0.12	7.75±0.18	7.90±0.17	8.41±0.19
肝体比HSI	1.66±0.05	1.54±0.04	1.64±0.04	1.60±0.05	1.61±0.01
脏体比VSI	13.04±0.26	13.24±0.16	12.86±0.28	12.76±0.23	13.08±0.16
存活率SR (%)	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	97.78±2.22

注: 表中数据为3个重复的平均值; 同行数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05); 下同

Note: Data are means of triplicates; Values in the same row with different superscript letters indicate significant differences (P<0.05); the same applies below

表 3　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈体组成的影响

Tab. 3　Effects of different replacement levels of abalone viscera hydrolysate on the body composition of *Lateolabrax maculatus*

成分Composition (%)	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
全鱼Whole body					
水分 Mositure	65.56±0.16	63.62±1.49	64.76±0.34	64.53±0.33	62.89±1.08
粗蛋白 Crude protein	22.11±0.83	21.12±1.40	19.67±0.11	20.11±0.42	20.56±0.42
粗脂肪 Crude lipid	12.46±0.09^{c}	13.41±0.63^{bc}	14.01±0.14^{b}	14.09±0.37^{b}	16.09±0.74^{a}
肌肉Muscle					
水分 Mositure	76.86±0.03^{ab}	76.77±0.00^{b}	76.91±0.05^{ab}	76.73±0.09^{b}	77.02±0.09^{a}
粗蛋白 Crude protein	21.29±0.03	21.27±0.10	21.27±0.07	21.41±0.06	21.35±0.03
粗脂肪 Crude lipid	1.67±0.08	1.79±0.05	1.69±0.11	2.02±0.32	1.74±0.15

表 4　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈血清生化的影响

Tab. 4　Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on serum biochemical parameters of *Lateolabrax maculatus*

项目Item	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
谷丙转氨酶GPT (U/L)	4.11±0.54^{b}	3.34±0.45^{b}	3.09±0.22^{b}	4.45±0.53^{b}	6.58±0.66^{a}
谷草转氨酶GOT (U/L)	2.25±0.32^{b}	2.34±0.24^{ab}	2.89±0.28^{ab}	3.06±0.42^{ab}	4.34±1.05^{a}
葡萄糖GLU (mmol/L)	10.55±0.74^{b}	11.92±1.19^{b}	13.68±1.56^{b}	23.35±2.22^{a}	22.55±1.44^{a}
甘油三酯TG (mmol/L)	1.29±0.03^{bc}	1.17±0.03^{c}	1.29±0.05^{bc}	1.36±0.06^{b}	1.51±0.04^{a}
总胆固醇T-CHO (mmol/L)	6.32±0.29^{a}	6.01±0.29^{a}	5.88±0.37^{a}	6.24±0.46^{a}	3.94±0.17^{b}
低密度脂蛋白胆固醇LDL-C (mmol/L)	2.78±0.04^{b}	3.15±0.29^{b}	3.83±0.06^{a}	2.94±0.04^{b}	2.13±0.04^{c}
高密度脂蛋白胆固醇HDL-C (mmol/L)	3.88±0.35	4.28±0.23	4.39±0.60	4.51±0.57	4.35±0.51
酸性磷酸酶ACP (金氏单位/100 mL)	9.49±0.30^{a}	8.11±0.14^{b}	8.03±0.34^{b}	7.44±0.14^{b}	8.19±0.37^{b}
碱性磷酸酶AKP (金氏单位/100 mL)	4.10±0.06^{b}	4.33±0.06^{b}	5.03±0.27^{a}	3.15±0.11^{c}	3.50±0.15^{c}
补体C4 (μg/mL)	68.89±4.03^{b}	58.42±2.56^{b}	71.08±5.17^{b}	100.17±4.98^{b}	590.77±46.78^{a}
免疫球蛋白M IgM (μg/mL)	350.84±36.96^{a}	331.99±18.91^{ab}	361.66±34.31^{a}	324.64±20.80^{ab}	248.76±21.29^{b}

毛结构完整、排列整齐, AVH40组肠道绒毛出现排列松散。如表 6所示, 肠道绒毛高度随替代比例增加呈下降趋势, 对照组绒毛高度显著高于替代组。

2.6 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道消化酶的影响

如表 7所示, 替代组肠道脂肪酶(LPS)与淀粉酶(AMS)活性与对照组相比均无显著差异(P>0.05)。AVH30组与AVH40组胰蛋白酶活性显著低于对照组(P<0.05), 且AVH40组的活性最低。

2.7 酶解鲍内脏蛋白对花鲈肠道屏障功能的影响

如表 8所示, AVH40组血清D-乳酸含量与二胺氧化酶(DAO)活性均显著高于对照组(P<0.05); 其他替代组的D-乳酸与DAO水平虽呈升高趋势, 但与对照组相比差异不显著。

2.8 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道组织微生物菌群多样性的影响

花鲈肠道菌群在门水平上(图 2), 梭杆菌门(Fusobacteriota)和变形菌门(Pseudomonadota)为优势菌

表 5 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肝脏抗氧化功能的影响

Tab. 5 Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on hepatic antioxidant capacity of *Lateolabrax maculatus*

项目Item	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
丙二醛MDA (nmol/mg prot)	0.38±0.01^{a}	0.44±0.08^{a}	0.50±0.06^{a}	0.46±0.02^{a}	0.73±0.03^{b}
超氧化物歧化酶SOD (U/mg prot)	88.47±5.32	95.34±7.65	95.51±19.08	108.53±14.44	74.10±9.07
过氧化氢酶CAT (U/mg prot)	50.33±5.25	35.33±0.91	38.42±0.77	48.63±8.67	36.13±7.63
总抗氧化能力T-AOC (mmol/g prot)	0.20±0.03	0.18±0.01	0.21±0.03	0.22±0.02	0.17±0.04

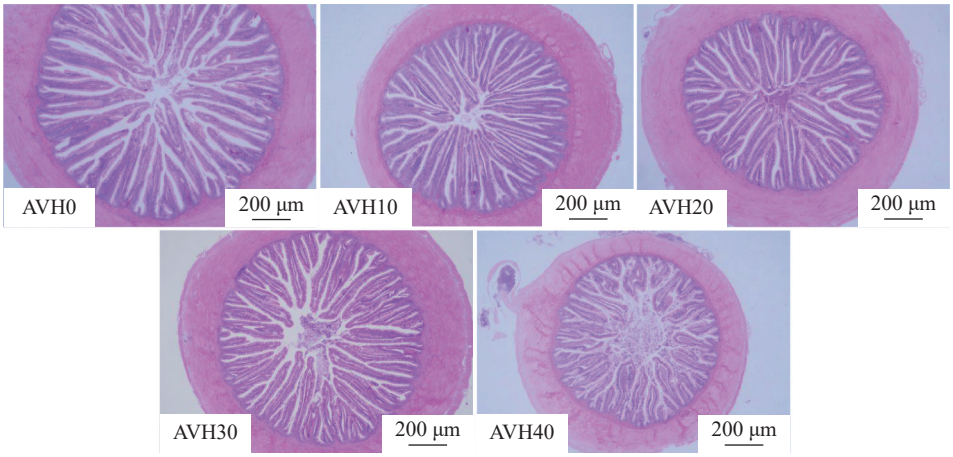


图 1 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道组织学的影响(HE染色, 200×)

Fig. 1 Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on the intestinal histomorphology of *Lateolabrax maculatus* (HE staining, 200×)

表 6 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道组织形态的影响

Tab. 6 Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on intestinal morphology of *Lateolabrax maculatus* (μm)

项目Item	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
肌层厚度MT	431.33±29.70	419.43±15.14	403.22±71.35	418.30±35.93	338.54±11.15
绒毛高度VH	825.59±18.25^{a}	665.25±23.22^{b}	662.49±64.38^{b}	528.90±24.29^{bc}	443.68±76.55^{c}
绒毛宽度VW	108.62±21.29	103.79±6.76	100.96±22.08	114.83±11.40	105.56±14.47

表 7 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道消化酶的影响

Tab. 7 Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on intestinal digestive enzyme activities of *Lateolabrax maculatus*

项目Item (U/g prot)	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
脂肪酶LPS	6.60±0.62	6.32±1.48	6.79±0.73	6.78±1.17	5.89±1.51
淀粉酶AMS	0.06±0.01	0.07±0.02	0.06±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01
胰蛋白酶TPS	55.63±1.49^{a}	59.21±2.41^{a}	53.82±1.25^{a}	46.11±3.08^{b}	28.88±0.65^{c}

群, AVH替代组中梭杆菌门相对丰度有所增加。在属水平上(图 3), 鲸杆菌属(*Cetobacterium*)的相对丰度随替代比例呈先上升后下降的趋势, AVH20组达到最高, 且AVH30与AVH40组仍高于对照组(AVH0)。

3　讨论

3.1　AVH替代鱼粉对花鲈生长性能、体组成及肝脏健康的影响

在本实验中, AVH替代10%—40%的鱼粉时花鲈的生长与对照组无显著差异, 说明在此替代水平下, AVH能够满足花鲈对蛋白质和必需氨基酸的营养需求, 维持其正常生长。这可能源于酶解蛋白中富含的小肽与游离氨基酸, 更易被鱼类肠道直接吸收[12]。此外, 酶解过程中可能释放出的牛磺酸、氧化三甲胺等生物活性物质[13], 不仅增强了饲料的诱食性[14], 也可能在调节鱼体代谢、促进蛋白质合成中发挥作用。然而, 当替代比例增至40%时, 尽管增重率与对照组相比未出现显著下降, 但已呈降低趋势, 且肥满度显著低于对照组, 说明高比例替代可能开始影响鱼体的能量储存与形体发育, 反映出AVH在完全替代鱼粉方面存在一定的限制。生长下降可能是体内蛋白质和小肽氨基酸的吸收利用过程不同步, 进而部分氨基酸利用率下降所致。已有研究表明, 鱼蛋白水解物对花鲈非特异性免疫的促进作用存在明确的最适添加范围, 超出该范围后免疫增益效果下降, 提示肽段的代谢利用效率可能存在生理上限[14]。在本研究中, 随着酶解鲍内脏蛋白替代比例升高, 饲料中小肽含量持续增加, 若超出机体对小肽与完整蛋白质的同步代谢能力, 可能导致氨基酸吸收竞争或利用延迟, 从而抑制生长性能。此外, 高比例替代也可能引起饲料氨基酸模式失衡, 进一步降低蛋白质的整体沉积效率。

血清生化是反映鱼类健康状况的重要指标, 能够指示代谢状态、免疫应答与应激水平。在本实验中, 替代组ACP活性均显著低于对照组, 而AKP活性则呈现先升后降的趋势。这表明适宜的替代或对非特异性免疫有正向调节作用。40%替代组IgM含量显著降低, 这说明高比例替代可能导致免疫受到抑制。AVH40组血清中GPT和GOT活性显

表 8　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道屏障功能的影响

Tab. 8　Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on intestinal barrier function of *Lateolabrax maculatus*

项目Item	组别Group				
	AVH0	AVH10	AVH20	AVH30	AVH40
D-乳酸D-Lac (μmol/mL)	0.048±0.002^{b}	0.067±0.016^{b}	0.079±0.024^{ab}	0.076±0.015^{ab}	0.108±0.002^{a}
二胺氧化酶DAO (U/L)	5.590±0.541^{bc}	5.383±0.143^{c}	5.903±0.231^{abc}	6.443±0.104^{ab}	6.823±0.240^{a}

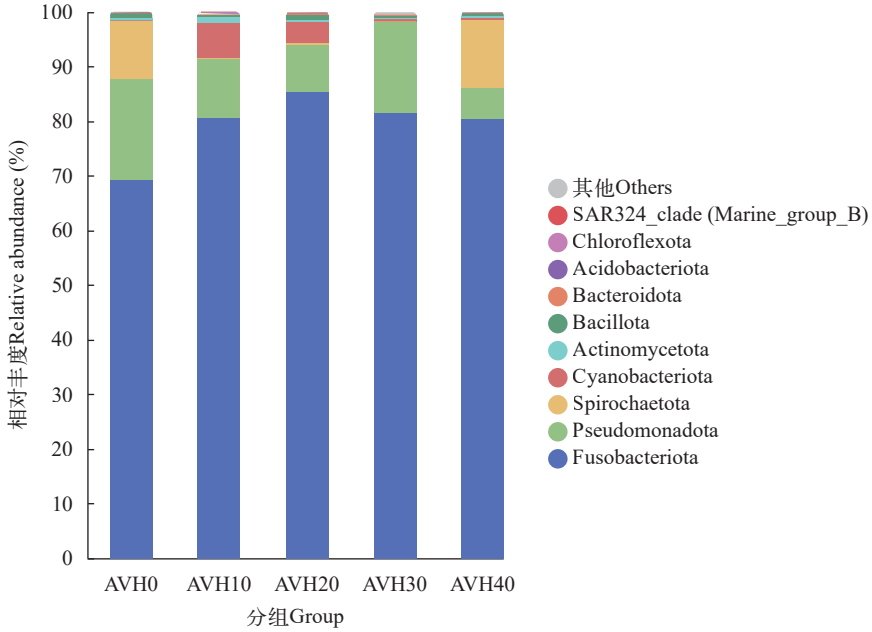


图 2　酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道微生物门水平相对丰度的影响

Fig. 2　Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on the relative abundance of intestinal microbiota at phylum level in *Lateolabrax maculatus*

著升高, 提示肝细胞膜通透性增加或肝细胞受损[15]。同时, 该组血清TG含量显著升高, T-CHO含量则显著下降, 表明脂质代谢出现紊乱。结合肝脏抗氧化指标, AVH40组MDA含量显著高于其他各组, 表明肝脏过氧化损伤。这些结果共同说明, AVH替代花鲈饲料中40%的鱼粉已超出花鲈肝脏的正常代谢代偿能力, 导致肝脏负荷加重、氧化应激增强。本研究中, AVH40组全鱼粗脂肪含量显著高于其他各组, 这种“生长减缓而体脂升高”的现象说明机体可能将更多的摄入能量导向脂肪合成与储存, 而非用于蛋白质沉积与肌肉生长。这种氧化损伤与代谢紊乱协同发生的特定模式, 为进一步揭示其机制提供了线索。该模式与斑马鱼*(Danio rerio)*在重金属(砷、铬、铅)复合暴露下诱发的肝脏毒性反应高度相似[16, 17]。现有研究表明, 此类复合胁迫可激活并持续干扰Nrf2-Keap1-ARE等核心抗氧化与代谢调控通路, 最终导致氧化应激与脂质沉积的恶性循环[16, 17]。本研究结果提示, 高比例AVH替代可能对花鲈肝脏产生了类似“复合毒物”的叠加效应。因此, 未来在推广此类新型蛋白源时, 不仅需关注营养配比, 也需将原料的潜在安全性风险(如重金属本底、抗营养因子等)纳入系统评估框架, 以确保其应用的长期健康效应。

3.2 AVH替代鱼粉对花鲈肠道健康的影响

肠道是鱼类消化吸收营养和维持免疫稳态的关键器官, 其结构、功能和微生物组成的完整性直接影响宿主的健康与生长[18]。本研究表明, AVH30和AVH40组肠道TPS活性显著降低。TPS是蛋白质消化的关键酶[19], 其活性下降可能与饲料中蛋白质来源改变有关[20], 说明高比例AVH替代可能对蛋白质的消化吸收效率产生负面影响。肠道形态和结构完整性对营养物质的消化和吸收至关重要[21]。肠道组织形态的完整性是消化功能的基础。本研究发现, 随着AVH替代水平的升高, 花鲈前肠绒毛高度呈现显著的下降趋势。特别是AVH40组, 其绒毛高度较对照组萎缩了近46%, 且伴随绒毛结构的断裂与稀疏。这种形态的退化直接削弱了吸收表面积和消化能力。这与欧洲鲈(*Dicentrarchus labrax*)[22]、尖吻鲈(*Lates calcarifer*)[23]和团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)[24]等鱼类在高比例鱼粉替代或不适宜原料下出现绒毛缩短、黏膜折皱减少和肠炎的结果一致。其原因可能归咎于高比例贝类内脏原料中潜在累积的重金属或生物胺, 这些抗营养因子在高剂量下对肠上皮细胞产生了细胞毒性作用, 抑制了细胞骨架蛋白的表达与细胞增殖[25—27]。肠道屏障的生化指标支持了上述观察。AVH40组血清D-乳酸含量和DAO活性均显著升高, 这两种指标均是评价肠道黏膜通透性和屏障损伤的标志物[28]。结果表明, AVH替代40%的鱼粉可能导致肠道屏障受损、肠道通透性增加。

肠道微生物菌群被视为一个参与宿主消化、营养吸收、免疫调节及健康维持的关键“功能性器官”, 其生态稳定性对宿主的生理稳态至关重要[29]。在本实验中, 在门水平上, Fusobacteriota、Spirochaetota和Pseudomonadota为主要菌门。随着酶解鲍内脏蛋白替代水平提升, Fusobacteriota在AVH20和AVH30组中的相对丰度升高。在属水平上, *Cetobacterium*是主要菌属。*Cetobacterium*作为

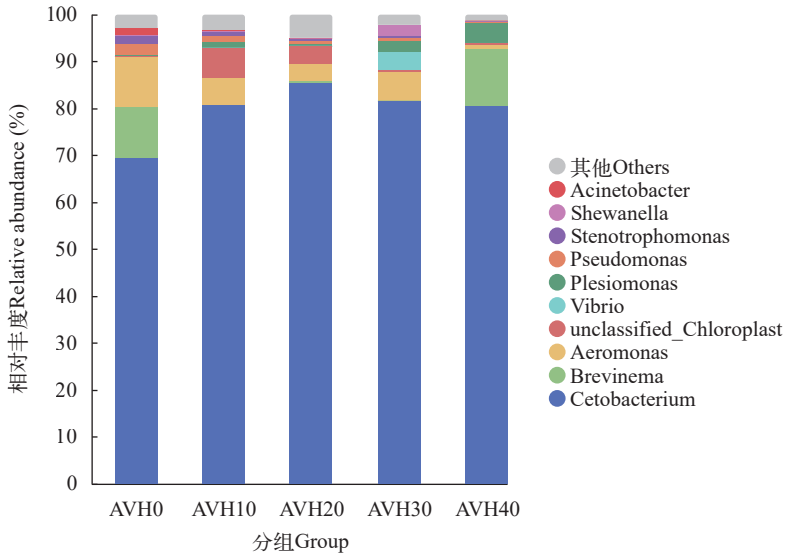


图 3 酶解鲍内脏蛋白替代鱼粉对花鲈肠道微生物属水平相对丰度的影响

Fig. 3 Effects of abalone viscera hydrolysate replacement for fish meal on the relative abundance of intestinal microbiota at genus level in *Lateolabrax maculatus*

肉食性鱼类肠道中关键蛋白质发酵菌, 能将肽类高效降解。因此本研究提出一种“功能代偿”假说来解释AVH30组的表型悖论。尽管AVH30组肠道绒毛出现萎缩导致物理吸收面积减少, 但*Cetobacterium*的显著富集可能通过强化对AVH水解肽段的利用, 诱导宿主代谢重编程。具体而言, *Cetobacterium*发酵产生的乙酸和维生素B12不仅可作为肠上皮细胞的直接能源, 还可能优化宿主的脂质代谢与胰岛素敏感性[30, 31]。这种微生物介导的能量获取效率提升, 有效弥补了形态学缺陷, 从而支撑了该组在饲料系数无显著差异的情况下实现最佳生长性能。然而, 这种微生态代偿机制存在明确的生理阈值[32, 33]。当替代水平达到40%时, 尽管*Cetobacterium*依然维持较高丰度, 但肠道肌层厚度发生急剧的病理性变薄, 导致生长性能显著回落。这表明, 当组织损伤超越宿主自我修复阈值时, 单纯的微生物群落稳态已不足以缓冲严重的器官损伤[34]。由此可见, 30%的AVH替代水平可能为“微生物–宿主”互作的关键稳态平衡点。

4　结论

本研究结果表明, 在鱼粉用量为30%的饲料中, 酶解鲍内脏蛋白替代30%的鱼粉不影响花鲈生长, 且对鱼体肝脏及肠道健康无不利影响; 当替代40%时肝脏与肠道出现一定程度的损伤。因此, 在实际饲料配方中, 建议将酶解鲍内脏蛋白的替代水平控制在30%范围内, 可在不影响花鲈生长与健康的条件下, 有效降低饲料对鱼粉的依赖, 并促进水产加工副产物的资源化利用。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

[1] Hussain S M, Khurram F, Naeem A, *et al*. A review on the prospects and potentials of fishmeal replacement with different animal protein sources [J]. *International Aquatic Research*, 2024, **16**(1): 7-16.

[2] Mai K S, Lu M D, He G. The issue of protein sources of aquafeed-A new approach to improve utilization efficiency of feed protein [J]. *Feed Industry*, 2021, **42**(1): 2-6. [麦康森, 吕美东, 何艮. 水产饲料的蛋白源问题——提高饲料蛋白质利用率新思路 [J]. 饲料工业, 2021, **42**(1): 2-6.]

[3] Fishery Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Products Technology Extension and Promotion Center, Chinese Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook 2024 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 27. [农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴-2024 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 27.]

[4] Lei S B, Chen Y C, Li Z L, *et al*. Research progress on high value utilization of abalone viscera waste [J]. *Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine Fujian*, 2024, **46**(5): 60-65. [雷松波, 陈永聪, 李兆龙, 等. 鲍鱼内脏废弃物的高值化应用研究进展 [J]. 福建畜牧兽医, 2024, **46**(5): 60-65.]

[5] Xiang Q, Zhang J N, Luo Y, *et al*. Application of enzymatic hydrolysed protein ingredients replacing fish meal in aquaculture [J]. *Feed Research*, 2023, **46**(24): 148-153. [向倩, 张蕉南, 罗悦, 等. 酶解蛋白原料替代鱼粉在水产中的应用 [J]. 饲料研究, 2023, **46**(24): 148-153.]

[6] S T C, Anliya G, K L R G, *et al*. Evaluation of cuttlefish protein hydrolysate as partial fishmeal replacement in diet for tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings: Influence on growth and disease resistance [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2025(327): 116434.

[7] Sandbakken I S, Five K K, Bardal T, *et al*. Salmon hydrolysate as a protein source for Atlantic salmon; prion content and effects on growth, digestibility and gut health [J]. *Aquaculture*, 2023(576): 739863.

[8] Sandbakken I S, Su H, Johansen L, *et al*. Replacing fishmeal with salmon hydrolysate reduces the expression of intestinal inflammatory markers and modulates the gut microbiota in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024(11): 1376516.

[9] Xu Y H, Zhang L, Liu M, *et al*. Evaluation of the effects of Keratinase-treated feather meal as a replacement for fishmeal on growth performance, liver function, and intestinal health in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2025(40): 102636.

[10] Zhao Y, Liu C D, Zhou H H, *et al*. Effects of adding mTOR activators to low-fishmeal diets on growth, antioxidant capacity, and intestinal health of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2025, **49**(9): 56-69. [赵垚, 刘成栋, 周慧慧, 等. 低鱼粉饲料中添加mTOR激活剂对中国花鲈幼鱼生长、抗氧化能力和肠道健康的影响 [J]. 水产学报, 2025, **49**(9): 56-69.]

[11] AOAC. Official Methods of Analysis 16th Ed. Association of Official Analytical Chemists [M]. Washington: AOAC, 1995.

[12] Zhang T T, Chen X R, Liang M Q, *et al*. Effects of different protein hydrolysates on growth performance and nonspecific immunity of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, **38**(3): 96-105. [张婷婷, 陈效儒, 梁萌青, 等. 不同蛋白水解物对花鲈(*Lateolabrax japonicus*)生长性能及非特异性免疫的影响 [J]. 渔业科学进展, 2017, **38**(3): 96-105.]

[13] Jiang H, Wang X, Liu C D, *et al*. Dietary fish protein hydrolysate modulates growth performance and free amino acid profile in plasma and muscle and posterior

intestinal morphology of juvenile turbot [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, **52**(3): 40-51. [蒋昊, 王旋, 刘成栋, 等. 不同含量水解鱼蛋白添加对大菱鲆幼鱼生长、血浆和肌肉游离氨基酸含量及后肠组织形态的影响 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, **52**(3): 40-51.]

[14] Liang M, Wang J, Chang Q, *et al*. Effects of different levels of fish protein hydrolysate in the diet on the nonspecific immunity of Japanese sea bass, *Lateolabrax japonicus* (Cuvieret Valenciennes, 1828) [J]. *Aquaculture Research*, 2006, **37**(1): 102-106.

[15] Han L Q, Yu W, Zhou Z T, *et al*. Effects of replacing fishmeal with mixed protein source on growth performance, plasma biochemical index and liver health of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Feed Industry*, 2024, **45**(24): 54-62. [韩丽琴, 虞为, 周增太, 等. 混合蛋白源替代鱼粉对花鲈(*Lateolabrax maculatus*)生长性能、血浆生化指标和肝脏健康的影响 [J]. 饲料工业, 2024, **45**(24): 54-62.]

[16] Kamila S, Dey K K, Islam S, *et al*. Arsenic and chromium induced hepatotoxicity in zebrafish (*Danio rerio*) at environmentally relevant concentrations: Mixture effects and involvement of Nrf2-Keap1-ARE pathway [J]. *Science of the Total Environment*, 2024(921): 171221.

[17] Liu M, Song J, Liu H, *et al*. Combined heavy metals (As and Pb) affects antioxidant status and lipid metabolism in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Toxicology & Pharmacology*, 2025(292): 110160.

[18] Li P, Liu J, Hu J, *et al*. Neuropeptide FF enhances antimicrobial defense by promoting intestinal barrier function in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2026(169): 111052.

[19] Liu Y H, Qin Z Q, Wang X X, *et al*. Effects of inulin on the growth performance, digestive enzyme activity, metabolic function and non-specific immunity of juvenile *Siniperca scherzeri* [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2025: 1-9. [刘银华, 秦志清, 王鑫鑫, 等. 菊粉对斑鳜幼鱼生长性能、消化酶活性、代谢功能及非特异性免疫的影响 [J]. 渔业研究, 2025: 1-9.]

[20] Tan T T, Li D L, Xi B, *et al*. Nutritional characteristics of Chlorella powder and its effects as a new nongrain protein source on growth performance, digestion, metabolism and immune function of aquaculture animal [J]. *Feed Industry*, 2025, **46**(15): 34-40. [谭彤彤, 李登来, 席贝, 等. 小球藻粉的营养特性及作为新型非粮蛋白源对水产养殖动物生长性能、消化代谢及免疫功能的影响 [J]. 饲料工业, 2025, **46**(15): 34-40.]

[21] Huang J, Zhou C, Xu F, *et al*. Effects of partial replacement of fish meal with porcine meat meal on growth performance, antioxidant status, intestinal morphology, gut microflora and immune response of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Aquaculture*, 2022(561) 738646.

[22] Leduc A, Zatylny-Gaudin C, Robert M, *et al*. Dietary aquaculture by-product hydrolysates: impact on the transcriptomic response of the intestinal mucosa of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) fed low fish meal diets [J]. *BMC Genomics*, 2018, **19**(1): 396.

[23] Chaklader M R, Howieson J, Foysal M J, *et al*. Fish waste to sustainable additives: Fish protein hydrolysates alleviate intestinal dysbiosis and muscle atrophy induced by poultry by-product meal in *Lates calcarifer* juvenile [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023(10): 1145068.

[24] Yuan X Y, Jiang G Z, Cheng H H, *et al*. Replacing fish meal with cottonseed meal protein hydrolysate affects growth, intestinal function, and growth hormone/insulin-like growth factor I axis of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2020, **51**(5): 1235-1249.

[25] Ghosh S, Nukavarapu S P, Jala V R. Effects of heavy metals on gut barrier integrity and gut microbiota [J]. *Microbiota and Host*, 2023, **2**(1): e230015.

[26] Elysain P A, Zalavina S V, Samatova I M, *et al*. Stereological study of Parenchyma and Stroma cells of the small intestine of prepubertal rats under heavy metal exposure [J]. *Ulyanovsk Medico-biological Journal*, 2025(2): 121-132.

[27] Rio D B, Redruello B, Linares D M, *et al*. The biogenic amines putrescine and cadaverine show in vitro cytotoxicity at concentrations that can be found in foods [J]. *Scientific Reports*, 2019(9): 120.

[28] Wu D, Zhang Y, Li J, *et al*. Assessment of chicken intestinal hydrolysates as a new protein source to replace fishmeal on the growth performance, antioxidant capacity and intestinal health of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(125): 161-170.

[29] Diwan A D, Harke S N, Panche A N. Host-microbiome interaction in fish and shellfish: an overview [J]. *Fish and Shellfish Immunology Reports*, 2023(4): 100091.

[30] Wang S, Li X, Zhang M, *et al*. Dietary sodium propionate optimizes intestinal microbiota and promotes growth performance, lipid metabolism and ammonia tolerance in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Animal Nutrition*, 2026(24): 17-31.

[31] Qi X, Zhang Y, Zhang Y, *et al*. Vitamin B12 produced by *Cetobacterium somerae* improves host resistance against pathogen infection through strengthening the interactions within gut microbiota [J]. *Microbiome*, 2023, **11**(1): 135.

[32] Truant A, Giacometti F, Losasso C, *et al*. First metataxonomic characterisation of gut microbiota of swordfish (*Xiphias gladius*) [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2025, **17**(6): e70199.

[33] Xiang Z, Zhu H, Yang B, *et al*. A glance at the gut microbiota of five experimental animal species through fecal

samples [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 16628.
[34] Montalvo-Fernandez G, Ortiz-Alcantara J M, Durruty-Lagunes C, *et al*. Composition and structure of gut microbiota of wild and captive *Epinephelus morio* via 16S rRNA analysis and functional prediction [J]. *Microorganisms*, 2025, **13**(8): 1792.

DIETARY FISHMEAL REPLACEMENT WITH ABALONE VISCERA HYDROLYZED PROTEIN ON GROWTH PERFORMANCE, HEPATIC ANTIOXIDANT CAPACITY, AND INTESTINAL HEALTH IN SPOTTED SEA BASS (*LATEOLABRAX MACULATUS*)

DONG Jun-Feng, QI Hai-Shen, ZHANG Chun-Xiao, WANG Ling, SONG Kai, LI Xue-Shan, MA Rui-Juan and LU Kang-Le

(*State Key Laboratory of Mariculture Breeding*, *Fisheries College*, *Jimei University*, *Xiamen* 361021, *China*)

Abstract: To investigate the optimal replacement level of fishmeal with abalone viscera hydrolysate (AVH) in the diet of spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*) and its effect on fish health, a feeding trial was conducted for 8 weeks. Juvenile spotted sea bass [initial body weight: (141.22±0.38) g] were fed five isonitrogenous and isolipidic diets with AVH replacing 0, 10%, 20%, 30%, and 40% of fishmeal, respectively. Growth performance, serum biochemistry, hepatic antioxidant parameters, intestinal digestion, and gut microbiota (via 16S rRNA sequencing) were analyzed. Results showed that the specific growth rate was the highest in 30% replacement group, with no significant difference compared to the control. In the 40% replacement group, the activities of alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase were significantly increased, and hepatic malondialdehyde content was significantly elevated, indicating liver oxidative damage. Serum immune parameters showed that complement C4 content was increased while immunoglobulin M (IgM) level was significantly decreased in the 40% group, suggesting immune dysfunction. Intestinal morphology analysis revealed significantly reduced villus height with loose structure, along with significant increases in D-lactate and diamine oxidase levels in the 40% group. Trypsin activity decreased with increasing replacement level, whereas lipase and amylase activities showed no significant changes. Gut microbiota analysis indicated that the relative abundance of the genus *Cetobacterium* first increased and then decreased with increasing AVH inclusion, peaking in the 20% replacement group. This study demonstrates that replacing 30% of fishmeal with AVH does not adversely affect the growth, liver function, or intestinal health in spotted sea bass. However, replacement at 40% leads to liver metabolic disorders, oxidative stress, intestinal structural damage, and impaired digestive function.

Key words: Abalone viscera; Enzymatic hydrolysate; Fishmeal replacement; Spotted sea bass; Growth performance; Intestinal health