

DOI: 10.12264/JFSC2025-0133

## 长吻鮠幼鱼饲料中混合植物蛋白替代鱼粉的适宜比例研究

李建蔚<sup>1</sup>, 朱文欢<sup>2</sup>, 胡文广<sup>1</sup>, 张孝睿<sup>1</sup>, 黄天乐<sup>2</sup>, 陈见<sup>3</sup>, 谭青松<sup>1\*</sup>

1. 华中农业大学水产学院, 农业农村部淡水生物繁育重点实验室, 池塘健康养殖湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉市水产技术推广指导中心, 湖北 武汉 430012;
3. 武汉市农业科学院水产研究所, 湖北 武汉 430207

**摘要:** 为探究植物蛋白在长吻鮠(*Leriocassis longirostris*)饲料中应用的可行性及其适宜含量, 以长吻鮠幼鱼为研究对象, 用 0%、10%、20%、30%、40%和 50%的混合植物蛋白(发酵豆粕:菜粕=4:1)替代基础饲料中的鱼粉配制成 6 组等氮等脂饲料, 记为 V0、V10、V20、V30、V40 和 V50, 进行为期 8 周的生长实验, 测定幼鱼生长性能、血清生化指标、肝脏抗氧化性能和脂肪含量以及组织形态观测。植物蛋白添加至 50%时长吻鮠幼鱼特定生长率显著下降( $P<0.05$ ), V50 组饲料系数显著高于其他各组( $P<0.05$ ); 血液中胆固醇呈现先降低后上升趋势且在 V10 时达到最低( $P<0.05$ ); 谷草转氨酶与谷丙转氨酶呈现先降低后上升趋势, 分别在 V30 组和 V20 组达到最低( $P<0.05$ )。肝脏中丙二醛(MDA)呈现先下降后上升趋势, V10 和 V20 组显著低于其他各组( $P<0.05$ ); 总抗氧化能力(T-AOC)呈现先升高后降低趋势, 在 V10 时达到最高; 过氧化氢酶(CAT)呈下降趋势, V40 组显著高于 V50 组且显著低于其他组( $P<0.05$ )。肝脏组织学显示, 自 V30 开始, 脂肪变性逐渐加重, 肝细胞膜边界逐渐模糊; 脂滴量呈现先降低后升高趋势, 在 V20 时最低( $P<0.05$ )。在本实验条件下, 适量的混合植物蛋白添加对长吻鮠幼鱼肝脏组织健康有正向作用, 以长吻鮠幼鱼特定生长率为依据, 37.47%的混合植物蛋白替代鱼粉为最佳。

**关键词:** 混合植物蛋白; 长吻鮠; 生长性能; 肝脏抗氧化; 脂肪蓄积; 鱼粉替代

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)12-1775-11

鱼粉因氨基酸组成平衡、易被水产动物吸收、含有促生长因子等优点, 成为养殖水产动物最理想的蛋白源<sup>[1]</sup>。近年来, 全球鱼粉供不应求, 价格高昂<sup>[2]</sup>。为缓解市场压力, 降低养殖成本, 大量研究开始关注植物蛋白原料代替饲料中鱼粉<sup>[3]</sup>。发酵豆粕和菜籽粕在水产饲料中均具有良好的应用潜力。豆粕粗蛋白和必需氨基酸含量高, 是较为理想的鱼粉替代蛋白源, 但其含有抗营养因子, 且蛋氨酸含量低, 在一定程度上限制其在水产饲料中的应用。通过微生物发酵得到的发酵豆粕, 其常规营养成分含量升高, 抗营养因子含量大幅降低<sup>[4]</sup>。菜籽粕的蛋氨酸含量高, 必需氨基酸指数及钙、磷、镁、硒等营养盐也高于豆粕<sup>[5]</sup>, 因此推

测, 菜籽粕与发酵豆粕混合使用可以达到氨基酸互补的效果。以往研究多数关注发酵豆粕或菜籽粕在水产动物饲料中的适宜含量和应用效果<sup>[6-9]</sup>, 但两者混合后的应用效果还鲜有报道。

长吻鮠(*Leriocassis longirostris*)属硬骨鱼纲(Osteichthyes), 鲇形目(Siluriformes), 鲿科(Bagridae), 鮠属(*Leiocassis*), 俗称长江鲿鱼、江团、肥沱等, 是我国特有的名贵淡水肉食性鱼类, 近年来长吻鮠的养殖产量大幅提高, 2023 年较 2022 年增长 103.35%<sup>[10]</sup>。养殖量的增加也意味着长吻鮠配合饲料需求量增加, 这将增加鱼粉的消耗。关于长吻鮠的营养需要已有一些研究<sup>[11]</sup>。但关于长吻鮠饲料中的植物蛋白利用, 还未见文献

收稿日期: 2024-07-07; 修订日期: 2024-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072950); 武汉生物育种关键技术攻关及新品种培育科技重大专项(2022021302024854).

作者简介: 李建蔚, 女, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: 1207505672@qq.com

\*通信作者: 谭青松, 副教授, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: tanqs2000@163.com

报道。如何科学配伍不同植物蛋白源以实现鱼粉的有效替代,同时保障长吻鮠的生长性能和消化系统健康,是长吻鮠养殖中面临的核心难题。本研究在保障饲料等氮等脂的前提下,通过混合植物蛋白替代不同比例鱼粉配制 6 组饲料饲喂长吻鮠幼鱼,综合评价替代效果,为今后植物蛋白在长吻鮠幼鱼配合饲料中的应用提供理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

参考长吻鮠幼鱼的营养需求量<sup>[11]</sup>,以鱼粉、发酵豆粕和菜籽粕为蛋白源,豆油和鱼油为脂肪源,以玉米淀粉为糖源配制 6 种等氮等脂的实验饲料(表 1)。为满足长吻鮠作为肉食性鱼类对高优质蛋白需求及为替代评估提供稳定基准,V0 组

表 1 不同植物蛋白水平饲料组成及营养成分(风干状态)  
Tab. 1 Composition and nutrient levels of diets with different plant protein levels (air-dried)

项目 item	组别 group						%
	V0	V10	V20	V30	V40	V50	
原料 ingredient							
鱼粉(CP67%) fish meal	65.50	57.80	50.00	42.20	34.50	27.10	
发酵豆粕 fermented soybean meal	—	8.00	16.00	24.00	32.00	40.00	
菜籽粕 rapeseed meal	—	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	
玉米淀粉 corn starch	15.50	14.21	12.92	11.63	10.34	9.05	
鱼油 fish oil	1.60	1.83	2.06	2.29	2.52	2.73	
豆油 soya oil	2.40	2.74	3.08	3.43	3.77	4.10	
乙氧基喹啉 ethoxyquinoline (30%)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
防霉剂 mildew inhibitor	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	
矿物质预混料 <sup>a</sup> mineral premix <sup>a</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
维生素预混料 <sup>b</sup> vitamin premix <sup>b</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
氯化胆碱 choline chloride (50%)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	9.13	7.32	5.60	3.87	2.06	—	
羧甲基纤维素钠 sodium carboxymethylcellulose	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	
DL-蛋氨酸 DL-Met	—	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40	
L-苏氨酸 L-Thr	—	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	
L-赖氨酸盐酸盐 L-Lys•HCl	—	0.14	0.28	0.42	0.55	0.67	
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
营养水平 <sup>c</sup> nutrient level <sup>c</sup>							
水分 moisture	14.25	14.59	15.62	16.55	16.23	15.74	
粗蛋白质 crude protein	44.40	44.07	43.49	43.47	43.27	44.11	
粗脂肪 ether extract	12.08	12.11	11.91	11.73	12.03	12.05	
粗灰分 ash	12.38	12.37	11.48	10.80	10.13	9.61	

注: a. 矿物质预混料(g/kg): CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O (II), 4; ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 28.57; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O(II), 37.5; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, 8; Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, 40; MgSO<sub>4</sub>, 375; CoCl<sub>2</sub> 20; Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 20; 沸石粉, 506.93. b. 维生素预混料(/kg): 3000000 IU 维生素 A,1000000 IU 维生素 D<sub>3</sub>, 64000 mg 维生素 E, 34255 mg 维生素 K, 6061 mg 维生素 B<sub>1</sub>, 6122 mg 维生素 B<sub>2</sub>, 20408 mg 泛酸钙, 30303 mg 烟酰胺, 6250 mg 维生素 B<sub>6</sub>, 20000 mg 生物素, 2041 mg 叶酸, 2000 mg 维生素 B<sub>12</sub>, 228571 mg 35%维生素 C 磷酸酯, 32653 mg 肌醇. c. 营养水平为实测值.

Note: a. Mineral premix (g/kg): CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O (II), 4; ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 28.57; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O(II), 37.5; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, 8; Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, 40; MgSO<sub>4</sub>, 375; CoCl<sub>2</sub> 20; Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 20; zeolite powder, 506.93. b. Vitamin premix (/kg product): 3000000 IU vitamin A,1000000 IU vitamin D<sub>3</sub>, 64000 mg vitamin E, 34255 mg vitamin K, 6061 mg vitamin B<sub>1</sub>, 6122 mg vitamin B<sub>2</sub>, 20408 mg calcium pantothenate, 30303 mg nicotinamide, 6250 mg vitamin B<sub>6</sub>, 20000 mg biotin, 2041 mg folic acid, 2000 mg vitamin B<sub>12</sub>, 228571 mg 35% L-Ascorbate-2-Monophosphate, 32653 mg inositol. c. Nutrient levels were measured values.

饲料仅以鱼粉为蛋白源。实验组分别以 10%、20%、30%、40%、50% 的发酵豆粕与菜籽粕 4:1 混合的植物蛋白替代鱼粉, 分别记为 V10、V20、V30、V40 和 V50, 并补充晶体氨基酸使各组蛋氨酸、苏氨酸和赖氨酸含量与对照组饲料一致。矿物质预混料与维生素预混料来自北京英惠尔生物技术有限公司。全部饲料原料粉碎过 60 目筛后, 按配方称重, 微量成分采取逐级扩大法混合均匀, 最后加入鱼油、豆油以及水混合均匀, 用制粒机制成粒径为 2.0 mm 的颗粒饲料, 在阴凉通风处阴干后保存于 -20 °C 冰箱备用。饲料氨基酸组成见表 2。

表 2 实验饲料的氨基酸组成 (干物质基础)  
Tab. 2 Amino acid composition of experimental diets (DM basis)

项目 item	组别 group						%
	V0	V10	V20	V30	V40	V50	
必需氨基酸 EAA							
蛋氨酸 Met	1.77	1.76	1.73	1.79	1.79	1.76	
精氨酸 Arg	0.99	0.98	0.98	1.00	0.97	0.97	
组氨酸 His	1.03	1.03	1.04	1.01	1.01	0.98	
异亮氨酸 Ile	2.21	2.18	2.16	2.18	2.18	2.24	
亮氨酸 Lue	3.74	3.72	3.70	3.72	3.73	3.71	
赖氨酸 Lys	3.64	3.64	3.63	3.61	3.67	3.63	
苯丙氨酸 Phe	1.69	1.65	1.66	1.73	1.76	1.74	
苏氨酸 Thr	2.07	2.09	2.07	2.07	2.09	2.09	
缬氨酸 Val	1.90	1.92	1.93	1.91	1.96	1.88	
非必需氨基酸 NEAA							
天冬氨酸 Asp	4.81	4.82	4.86	4.99	4.82	5.01	
丝氨酸 Ser	2.01	2.05	2.04	2.07	2.03	2.07	
甘氨酸 Gly	2.88	2.87	2.84	2.83	2.75	2.84	
丙氨酸 Ala	2.94	2.94	2.96	2.93	2.92	2.89	
胱氨酸(Cys)	0.20	0.22	0.24	0.24	0.23	0.24	
谷氨酸 Glu	6.93	7.01	7.07	7.09	7.12	7.19	
酪氨酸 Tyr	1.41	1.38	1.36	1.40	1.38	1.37	
总氨基酸 TAA	40.22	40.26	40.27	40.57	40.41	40.61	

注: 表 2 均为实测值, 色氨酸被水解而未检测到。

Note: Values in tab. 2 are all measured values. Trp was not detected due to hydrolysis.

## 1.2 实验鱼的养殖和管理

长吻鮠幼鱼购自国家级湖北石首长吻鮠良种场, 用食盐浸泡消毒后在流水养殖系统中暂养 2

周, 期间饲喂混合实验饲料。暂养结束后, 选择体质健康、规格均匀、初始体重为(6.28±0.27) g 的幼鱼 288 尾随机分配到直径 80 cm, 高度 60 cm 的 18 个圆形玻璃纤维鱼缸, 每缸 16 尾。然后将 6 种饲料随机分配到各鱼缸, 每种饲料 3 个重复。

养殖期为 8 周, 期间每日 07: 00 和 15: 00 饱食投喂 2 次, 投饵 1 h 后收集残饵并烘干, 在实验结束后计算溶失率以校正摄食量。养殖采用曝气自来水, 每缸水流为 0.25 L/min。水温为(26±2) °C, 自然光照, 24 h 持续充气保证溶氧含量>5.0 mg/L, pH 为 7.0~7.4。本实验经华中农业大学实验动物管理和伦理委员会审查并批准。

## 1.3 样品采集

养殖实验开始时和结束后将鱼禁食 24 h, 对每缸鱼称重, 记录尾数。称重后每缸随机取 5 尾鱼用 0.01% MS-222 麻醉, 擦干体表水分, 逐尾测量体长、称重。用 1 mL 注射器尾静脉取血, 置于 1.5 mL 离心管中, 室温静置 4 h 后, 在 3500 r/min、4 °C 条件下离心 15 min, 取上清于 -80 °C 保存。再解剖内脏, 称量内脏团重、肝脏重和肠系膜脂肪重。取肝脏样品于液氮中速冻后转入 -80 °C 中保存, 用于后续指标测定; 另取肝脏用 4% 多聚甲醛固定, 观察其组织学变化。每缸另取 5 尾鱼保存于 -20 °C 冰箱, 用于全鱼体成分分析。

## 1.4 计算公式

生长性能和形体指标按下列公式计算。

成活率(SR, %)=100%×终末尾数/初始尾数;

特定生长率(SGR, %/d)=100%×

(ln 末重-ln 初重)/天数;

摄食率(FR, %体重/d)=100%×

饲料干物质摄入量/

[(末体重+初体重)×养殖周期/2];

增重率(WGR, %)=

100%×(末均重-初均重)/初均重;

饲料系数(FCR)=

干物质摄食量/(终末体重-初始体重);

蛋白质效率(PER)=增重量/蛋白质摄入量;

肝体比(HSI, %)=100%×肝脏质量/体重;

脏体比(VSI, %)=100%×内脏质量/体重;

肠系膜脂肪比(MFI, %)=  
 $100\% \times \text{肠系膜脂肪重量} / \text{体重}$ ;  
 肥满度(CF,  $\text{g}/\text{cm}^3$ )= $100 \times \text{体重} / \text{体长}^3$ 。

### 1.5 样品测定

饲料和全鱼营养成分均按标准方法测定。水分含量按 GB/T6435-2014 采用 105 °C 常压烘干法测定; 灰分按 GB/T6438-2007 采用箱式马弗炉 550 °C 灼烧法测定; 粗蛋白按 GB/T6432-2018 采用凯氏定氮法测定; 粗脂肪按 GB/T6433-2025 采用索氏抽提法测定。饲料氨基酸含量测定: 饲料样品经冷冻干燥后, 按 GB 5009.124-2016 方法测定氨基酸含量。肝脏脂肪含量经氯仿/甲醇法提取后采用重量分析法测定<sup>[12]</sup>。

血清中高密度脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)、葡萄糖(GLU)、胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、总蛋白(TP)含量采用迪瑞医疗 CS-T240 Plus 全自动生化分析仪测定。

肝脏超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)、总抗氧化能力(T-AOC)指标均采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 按产品说明书进行操作。

肝脏样品经石蜡包埋进行 H&E 染色, 同时制备冰冻切片进行油红 O 染色, 用显微镜观察, 油红

O 染色脂滴面积测量使用软件 Image Pro plus 6.0。

### 1.6 数据统计

用 SPSS Statistics Client 27 Win64 软件对实验数据进行统计分析。先对处理效果进行单因素方差分析, 若结果差异显著, 则采用 Duncan 氏法进行多重比较, 显著性水平为 0.05。实验数据表示为平均值±标准误( $\bar{x} \pm \text{SE}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼生长性能与形体指标的影响

如表 3 所示, 植物蛋白替代鱼粉会影响长吻鮠的生长, 50% 替代水平会显著降低 SGR 和 WGR。V0 组 FBW 显著低于 V10 组, 但显著高于 V50 组( $P < 0.05$ ); 各组间 SR 差异不显著( $P > 0.05$ ); 植物蛋白替代鱼粉会影响长吻鮠的摄食和饲料利用, 随着替代水平增加, FR 和 FCR 均呈上升趋势, 在 50% 替代水平时显著高于其他组, 而 PER 呈下降趋势, V50 组显著低于其他组( $P < 0.05$ )。

植物蛋白替代鱼粉会影响长吻鮠的形体, 50% 植物替代鱼粉会显著升高 HSI 和 MFI ( $P < 0.05$ ); 长吻鮠 VSI 在植物替代水平 20% 时显著低于后 3 个替代水平( $P < 0.05$ ); 各组间 CF 差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 3 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼生长性能与形体指标的影响

Tab. 3 Effects of replacement of fishmeal with mixed vegetable proteins on the growth performance and morphological indices of juvenile *Lerioscassis longirostris*

$n=9$ ;  $\bar{x} \pm \text{SE}$

项目 item	组别 group					
	V0	V10	V20	V30	V40	V50
初体重/g IBW	6.28±0.09	6.47±0.06	6.18±0.10	6.23±0.11	6.31±0.09	6.17±0.06
末体重/g FBW	25.65±0.62 <sup>b</sup>	26.95±0.46 <sup>a</sup>	26.16±0.26 <sup>ab</sup>	26.24±0.25 <sup>ab</sup>	26.24±0.21 <sup>ab</sup>	22.15±0.12 <sup>c</sup>
成活率/% SR	100.00±0.00	97.92±2.08	100.00±0.00	100.00±0.00	97.92±2.08	93.75±6.25
特定增长率/(%/d) SGR	2.51±0.07 <sup>a</sup>	2.51±0.07 <sup>a</sup>	2.58±0.02 <sup>a</sup>	2.57±0.03 <sup>a</sup>	2.51±0.02 <sup>a</sup>	2.16±0.13 <sup>b</sup>
增重率/% WGR	309.03±15.99 <sup>a</sup>	316.95±11.03 <sup>a</sup>	323.67±3.80 <sup>a</sup>	321.31±7.87 <sup>a</sup>	316.16±9.02 <sup>a</sup>	258.91±4.77 <sup>b</sup>
摄食率/(%/体重/d) FR	2.38±0.04 <sup>c</sup>	2.54±0.03 <sup>bc</sup>	2.69±0.02 <sup>b</sup>	2.59±0.02 <sup>b</sup>	2.68±0.06 <sup>b</sup>	2.95±0.11 <sup>a</sup>
饲料系数 FCR	1.10±0.04 <sup>c</sup>	1.16±0.02 <sup>bc</sup>	1.22±0.01 <sup>b</sup>	1.18±0.01 <sup>bc</sup>	1.22±0.03 <sup>b</sup>	1.48±0.04 <sup>a</sup>
蛋白质效率 PER	2.05±0.08 <sup>a</sup>	1.95±0.03 <sup>ab</sup>	1.88±0.02 <sup>b</sup>	1.94±0.02 <sup>ab</sup>	1.90±0.05 <sup>b</sup>	1.53±0.04 <sup>c</sup>
肝体比/% HSI	1.59±0.08 <sup>bc</sup>	1.53±0.03 <sup>bc</sup>	1.38±0.09 <sup>c</sup>	1.58±0.09 <sup>bc</sup>	1.66±0.07 <sup>b</sup>	1.98±0.10 <sup>a</sup>
脏体比/% VSI	7.94±0.45 <sup>ab</sup>	7.88±0.34 <sup>ab</sup>	7.01±0.20 <sup>b</sup>	8.44±0.26 <sup>a</sup>	8.57±0.61 <sup>a</sup>	8.88±0.22 <sup>a</sup>
肠系膜脂肪比/% MFI	0.99±0.05 <sup>bc</sup>	0.90±0.05 <sup>c</sup>	1.06±0.09 <sup>bc</sup>	1.02±0.09 <sup>bc</sup>	1.15±0.07 <sup>ab</sup>	1.35±0.07 <sup>a</sup>
肥满度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) CF	1.41±0.03	1.36±0.04	1.45±0.02	1.35±0.08	1.45±0.04	1.41±0.01

注: 同行数据肩标不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: In the same row, values with different superscripts in lower cases mean significant difference ( $P < 0.05$ ) between groups.

本实验条件下, 以 SGR 为评价指标进行回归分析表明, 饲料中可含有 37.47% 植物蛋白代替鱼粉(图 1)。

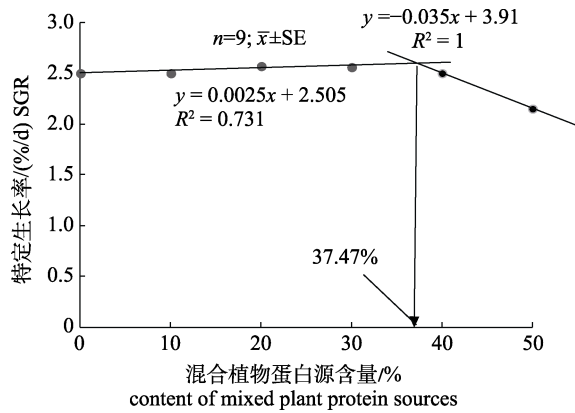


图 1 混合植物蛋白水平与长吻鮠幼鱼特定生长率之间的关系

Fig. 1 Relationship between levels of mixed plant proteins and specific growth rates of juvenile *Leriocassis longirostris*

### 2.2 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼全鱼体成分的影响

由表 4 所示, 植物蛋白代替鱼粉会影响长吻鮠的体成分, 其中鱼体粗脂肪在替代水平为 30% 时显著低于其他组; V0 组粗灰分显著低于 V20 和 V50 组 ( $P < 0.05$ )。全鱼水分与粗蛋白各组间差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼血清生化指标的影响

由表 5 所示, 植物蛋白代替鱼粉会影响长吻鮠的血清生化指标, 其中 50% 植物替代水平会显著升高 LDL 和 TG ( $P < 0.05$ ); V0 组的 HDL 显著高

于其他组 ( $P < 0.05$ ); TC 随植物替代水平的增加呈先降后升趋势, V10 组最低, V40 与 V0 组显著低于 V50 组并显著高于 V10 组 ( $P < 0.05$ )。血清葡萄糖浓度随植物替代水平的增加呈先降后升趋势, V20 与 V30 组最低, V50 组最高 ( $P < 0.05$ )。各替代水平间 TP 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。AST 和 ALT 随植物替代水平的增加呈先降后升趋势, AST 在 V20 和 V30 组显著低于 V0 与 V50 组; ALT 在 V20 组最低, V0 和 V50 组最高 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼肝脏抗氧化指标的影响

如表 6 所示, 植物蛋白代替鱼粉会影响长吻鮠肝脏的抗氧化能力。随着植物蛋白替代水平增加, MDA 呈先降后升趋势, 在 V10 和 V20 组最低, V0 与 V30 组其次, V50 组最高 ( $P < 0.05$ ); T-AOC 在 10% 替代组显著高于 30%、40% 和 50% 替代组 ( $P < 0.05$ ); CAT 呈下降趋势, V50 组最低, V40 组其次, 两者均显著低于其他组 ( $P < 0.05$ ); SOD 在各组间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.5 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼肝脏组织形态与脂肪含量的影响

植物蛋白代替鱼粉会影响长吻鮠的肝脏组织形态和脂肪含量。如图 2a 所示, V0 组肝细胞存在体积变大、肿胀的现象; 植物蛋白替代水平为 20% 时, 长吻鮠肝细胞形态较为正常, 排列均匀、规则; 但当植物蛋白水平更高时, 肝细胞肿胀, 空泡化加重, 胞内充斥大量脂滴, 表现出脂肪肝的症状。图 2b 中可见, 随着饲料中混合植物蛋白增加, 肝脏中脂滴面积呈先降后升趋势,

表 4 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼全鱼体成分的影响(湿重基础)

Tab. 4 Effect of replacement of fishmeal with mixed vegetable proteins on whole fish body composition of juvenile *Leriocassis longirostris* (fresh weight basis)

项目 item	组别 group					
	V0	V10	V20	V30	V40	V50
水分 moisture	70.17±0.11	69.52±0.32	69.10±0.33	70.24±0.11	69.94±0.90	70.34±0.14
粗蛋白 crude protein	16.98±0.36	16.91±0.15	17.87±0.19	17.16±0.32	17.41±0.21	16.66±0.24
粗脂肪 ether extract	10.26±0.09 <sup>a</sup>	10.16±0.16 <sup>a</sup>	10.35±0.04 <sup>a</sup>	9.76±0.15 <sup>b</sup>	10.19±0.05 <sup>a</sup>	10.41±0.13 <sup>a</sup>
粗灰分 ash	2.35±0.29 <sup>b</sup>	2.40±0.16 <sup>b</sup>	2.43±0.06 <sup>a</sup>	2.40±0.15 <sup>ab</sup>	2.38±0.10 <sup>ab</sup>	2.59±0.07 <sup>a</sup>

注: 同行数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: In the same row, values with different superscripts in lower cases mean significant difference ( $P < 0.05$ ) between groups.

表 5 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼血清生化指标的影响

Tab. 5 Effect of replacement of fishmeal with mixed vegetable proteins on serum biochemical indices of juvenile *Leriocassis longirostris*n=3;  $\bar{x} \pm SE$ 

项目 item	组别 group					
	V0	V10	V20	V30	V40	V50
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	0.59±0.02 <sup>a</sup>	0.51±0.03 <sup>b</sup>	0.48±0.01 <sup>b</sup>	0.46±0.01 <sup>b</sup>	0.44±0.03 <sup>b</sup>	0.45±0.03 <sup>b</sup>
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	2.04±0.10 <sup>b</sup>	1.95±0.10 <sup>b</sup>	1.70±0.19 <sup>b</sup>	1.92±0.14 <sup>b</sup>	2.14±0.10 <sup>b</sup>	2.61±0.14 <sup>a</sup>
胆固醇/(mmol/L) TC	4.34±0.08 <sup>b</sup>	4.04±0.08 <sup>c</sup>	4.13±0.11 <sup>bc</sup>	4.24±0.03 <sup>bc</sup>	4.32±0.07 <sup>b</sup>	4.78±0.10 <sup>a</sup>
甘油三酯/(mmol/L) TG	5.67±0.63 <sup>b</sup>	5.37±0.45 <sup>b</sup>	5.40±0.21 <sup>b</sup>	5.73±0.14 <sup>b</sup>	5.96±0.06 <sup>ab</sup>	7.09±0.39 <sup>a</sup>
葡萄糖/(mmol/L) GLU	4.04±0.18 <sup>ab</sup>	3.83±0.08 <sup>bc</sup>	3.56±0.09 <sup>c</sup>	3.53±0.04 <sup>c</sup>	3.83±0.08 <sup>bc</sup>	4.27±0.03 <sup>a</sup>
总蛋白/(g/L) TP	29.78±0.80	29.37±0.75	28.86±1.00	28.70±1.41	27.60±0.85	27.29±0.75
谷草转氨酶/(U/L) AST	422.09±21.98 <sup>a</sup>	386.85±14.20 <sup>ab</sup>	350.49±9.88 <sup>b</sup>	346.45±21.95 <sup>b</sup>	373.73±28.77 <sup>ab</sup>	434.35±23.58 <sup>a</sup>
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	10.07±0.48 <sup>bc</sup>	8.74±0.77 <sup>cd</sup>	6.59±0.62 <sup>d</sup>	9.34±0.35 <sup>bcd</sup>	12.02±0.71 <sup>ab</sup>	13.67±1.68 <sup>a</sup>

注: 同行数据肩标不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ ).Note: In the same row, values with different superscripts in lower cases mean significant difference ( $P<0.05$ ) between groups.

表 6 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼肝脏抗氧化指标的影响

Tab. 6 Effect of replacement of fishmeal with mixed vegetable proteins on liver antioxidant indexes of juvenile *Leriocassis longirostris*n=3;  $\bar{x} \pm SE$ 

项目 item	组别 group					
	V0	V10	V20	V30	V40	V50
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	0.60±0.05 <sup>c</sup>	0.24±0.05 <sup>d</sup>	0.24±0.05 <sup>d</sup>	0.49±0.05 <sup>c</sup>	0.76±0.02 <sup>b</sup>	0.92±0.04 <sup>a</sup>
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	1838.28±98.53	1838.76±102.11	1710.37±216.91	1516.40±218.60	1583.73±155.48	1579.68±70.46
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	419.13±12.69 <sup>a</sup>	407.83±26.79 <sup>a</sup>	391.47±30.82 <sup>a</sup>	384.21±22.88 <sup>a</sup>	316.87±11.42 <sup>b</sup>	182.62±1.29 <sup>c</sup>
总抗氧化能力/(U/mg prot) T-AOC	1132.97±77.10 <sup>ab</sup>	1295.63±121.51 <sup>a</sup>	1086.55±145.77 <sup>ab</sup>	980.34±54.82 <sup>b</sup>	931.55±48.98 <sup>b</sup>	852.60±27.48 <sup>b</sup>

注: 同行数据肩标不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ ).Note: In the same row, values with different superscripts in lower cases mean significant difference ( $P<0.05$ ) between groups.

在 V20 组最低, 显著低于其他实验组( $P<0.05$ ); 图 3 同样显示, 长吻鮠幼鱼肝脏脂肪呈显著的先降后升趋势, V20 组最低显著低于其他实验组( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼生长性能、形体与全鱼体成分的影响

养殖动物的生长与饲料利用是评价饲料营养价值的重要依据。本实验中, 混合植物蛋白替代不高于 40% 时, 对长吻鮠的生长无影响, 这说明混合植物蛋白替代鱼粉是可行的; 而 50% 替代水平对长吻鮠生长产生了抑制, 大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)<sup>[6]</sup> 中也存在发酵豆粕过量

替代鱼粉导致生长下降的现象, 这可能是受其中抗营养因子影响, 如植酸和蛋白酶抑制剂, 均会阻碍蛋白质的消化吸收, 降低鱼的生长<sup>[13]</sup>。本研究中, 50% 植物替代水平时长吻鮠摄食最高, 生长却最慢, 在大口黑鲈<sup>[8]</sup>与金头鲷 (*Sparus aurata*)<sup>[14]</sup> 中也有相同发现, 这可能是植物中的低聚糖和非淀粉多糖增加了肠道食糜黏度, 阻碍营养物质的消化吸收<sup>[13]</sup>, 从而可吸收养分和能量摄入不足, 需要提高摄食。本研究中, 长吻鮠饲料系数与蛋白效率的变化均表明超 40% 的植物替代会显著降低饲料利用效率, 在金头鲷<sup>[14]</sup>、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[9]</sup> 和大口黑鲈<sup>[8]</sup> 中也有类似结果。当然也有与之不同的结果, 如大口黑鲈<sup>[6]</sup> 在整个研究中饲料利用效率都未降低, 但这可能是其植物替代水平不足 20% 所致。

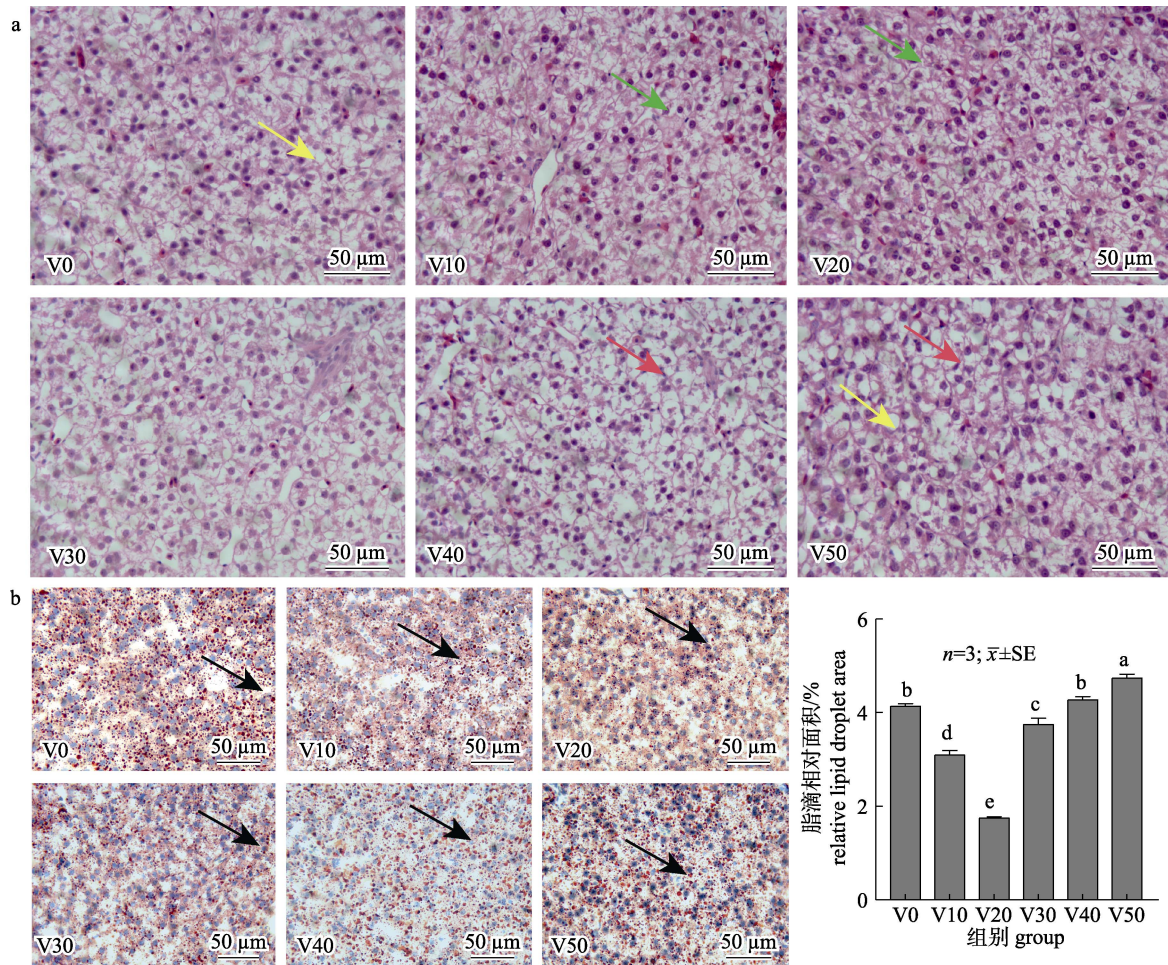


图 2 不同混合植物蛋白替代鱼粉时长吻鲮的肝脏组织 H&E 染色结果(a)和油红 O 染色及其定量结果(b)  
 绿色箭头示正常细胞核; 黄色箭头示脂肪空泡; 红色箭头示细胞核偏移; 黑色箭头代表脂肪滴;  
 数据柱形标注不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ ).

Fig. 2 Results of H&E staining (a) and oil red O staining with quantification (b) of liver tissues of juvenile *Leriocassis longirostris* fed with diets containing different level mixed vegetable proteins replacing fish meal  
 Green arrow shows normal nucleus; yellow arrow shows fat vacuole; red arrow shows nucleus shift; black arrow shows lipid droplet. Value columns with different lowercase letters mean significant difference between groups ( $P<0.05$ ).

植物替代量的增多也意味着饲料中的抗体营养因子增多, 如植酸和蛋白酶抑制剂, 会阻碍蛋白质的消化吸收。而低聚糖和非淀粉多糖会增加肠道食糜黏度, 阻碍营养物质的消化吸收<sup>[13]</sup>, 这些都是降低饲料利用效率与蛋白质效率的重要因素。另外, 蛋白质效率在 V20 与 V40 组时显著低于 V0 组, 而这两组的特定生长率与增重率均与 V0 组无显著差异, 这可能是短期内机体通过代谢调节, 如提高蛋白质周转效率维持了鱼体生长, 若长期处于此状态, 可能导致因能量消耗过高或氮蓄积不足, 导致生长性能滞后<sup>[15]</sup>。肝脏是储存脂肪的重要场所, 脂肪在肝脏中蓄积会使肝体比升高,

与青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)类似<sup>[7]</sup>, 长吻鲮在 50%植物蛋白替代鱼粉时 HSI 和 MFI 显著高于未替代组, 这可能是高水平植物蛋白对脂代谢造成了影响<sup>[16]</sup>, 导致了脂肪在肝脏和肠系膜上堆积, 此结果与肝脏中脂肪含量相互印证。在大口黑鲈<sup>[8]</sup>和褐牙鲈<sup>[17]</sup>的研究中, 发酵豆粕替代 50%以上鱼粉仍未对鱼体粗脂肪产生影响。但长吻鲮鱼体粗脂肪在 30%植物蛋白替代鱼粉时显著低于其他组, 与之类似的是花生粕替代 44%鱼粉时, 珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂)体脂肪显著低于未替代组<sup>[18]</sup>, 造成不同趋势的原因可能是由于鱼种、蛋白源种类以

及配比等多方面原因。基于植物蛋白替代鱼粉对长吻鮠生长性能的影响, 37.47%替代水平较为合适。

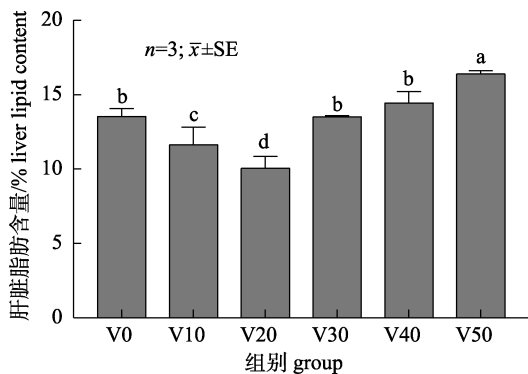


图 3 摄食混合植物蛋白替代鱼粉饲料的长吻鮠肝脏脂肪含量

数据柱形标注不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 3 Liver lipid content of *Leriocassis longirostris* fed with diets containing mixed vegetable proteins replacing fish meal Value columns with different lowercase letters indicates significant difference between groups ( $P<0.05$ ).

### 3.2 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼血清生化指标的影响

血清的生化指标与机体物质的转运、代谢与吸收等生理活动有着密切联系, 在一定程度上反映鱼体的健康状况<sup>[19]</sup>。此外, 长吻鮠的 TC 与 GLU 均随着植物蛋白替代水平的增加呈先降后升趋势, 大口黑鲈中也有类似趋势<sup>[6]</sup>。但珍珠龙胆石斑鱼血清中 TC 水平随花生粕的添加而降低<sup>[18]</sup>, 这种变化差异可能是因为不同的植物蛋白源引起。发酵豆粕中的生物活性肽等对糖脂代谢的促进作用使 TC 与 GLU 降低, 以及植物蛋白饲料含有大量非淀粉多糖, 导致一定程度的发酵豆粕添加可降低胆固醇水平<sup>[20]</sup>。但添加超量时, 这种降血糖和 TC 的作用则不复存在, 因此 GLU 和 TC 表现为升高。HDL 和 LDL 是一对运转 TC 的脂蛋白, 前者将 TC 由外周组织运往肝脏, 后者将其从肝脏运至全身, LDL 的增多会降低 HDL 的含量<sup>[7]</sup>。本实验中, 植物蛋白替代会显著降低 HDL 水平, 且 50%替代时 LDL 会显著升高, 从而影响血清 TC 的含量, 使得 TC 呈现先降后升的趋势。但与本研究不一致的是, 青鱼血清中 LDL 和 HDL 均随植物蛋白的增加而

降低<sup>[7]</sup>, 这可能是植物蛋白源不同和鱼种不同所致。在替代量至 50%时长吻鮠血清中 TG 显著高于未替代组, 可能是外源添加的晶体氨基酸与蛋白原料的吸收效率不同, 降低了其利用效率, 而游离氨基酸促进肝脏合成脂肪酸的效率是葡萄糖的两倍, 肝脏将游离脂肪酸转化为 TG 储存, 增加了其在肝脏和血清中的累积<sup>[21]</sup>。

AST 和 ALT 在血清中含量很少, 肝细胞膜通透性升高时, AST 和 ALT 会从肝脏进入血液<sup>[19]</sup>, 本研究中 AST 和 ALT 含量呈先降后升趋势, 这说明本实验中过量植物蛋白替代鱼粉增加了长吻鮠肝细胞膜通透性, 这与肝脏 H&E 染色结果相互印证, 大口黑鲈也呈同样趋势<sup>[8]</sup>。但在青鱼中, 血清 AST 和 ALT 含量随着发酵豆粕的增加而升高<sup>[7]</sup>, 这可能是由于基础饲料配方结构不同所致。豆类中的一些物质, 如胞外多糖等确实对维持细胞膜的完整有益<sup>[22-23]</sup>, 由此认为在本实验中一定量的植物蛋白添加改善了肝脏健康, 减少了血清中的 AST 和 ALT 含量。而青鱼基础饲料中用了多种植物蛋白源, 再额外添加发酵豆粕时, 饲料中抗营养因子的含量则可能超过了动物的耐受量, 从而导致肝脏受损<sup>[7]</sup>。

### 3.3 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼肝脏抗氧化性能的影响

肝脏是鱼体重要的代谢器官, 机体内自由基作用于脂质发生过氧化反应, 其终产物为 MDA, 因而 MDA 的量可反映机体脂质过氧化的程度<sup>[24]</sup>, SOD、T-AOC、CAT 则反映机体的抗氧化能力<sup>[25]</sup>。本实验 MDA 水平随着混合植物蛋白的增加呈先降后升趋势, 而 T-AOC、CAT 水平则在高替代量时降低。这表明过高比例的植物蛋白替代鱼粉会降低鱼体的抗氧化能力。黄颡鱼中肝脏 MDA 水平随着棉籽粕和菜籽粕替代量的增加而升高, T-SOD、CAT 和 T-AOC 水平则降低<sup>[9]</sup>, 虽然这与本研究结果不完全相符, 但都表明高水平的植物蛋白替代量会降低鱼类肝脏抗氧化能力。这可能是由于植物中大量的抗营养因子, 如菜籽粕中的硫甙会分解形成腈类化合物等会使肝脏解毒负担过重, 抗氧化能力降低<sup>[13]</sup>。但豆类中的酚类物质、胞外多糖和维生素等可以提高鱼体的抗氧化能力<sup>[22-23]</sup>, 因此

使得本研究中在一定量的植物蛋白替代鱼粉时不出现肝脏抗氧化能力的降低。另外, 本研究中未替代组 MDA 含量过高的原因可能是鱼粉中的高不饱和脂肪酸含量较高, 易产生脂质过氧化物<sup>[1]</sup>。

### 3.4 混合植物蛋白代替鱼粉对长吻鮠幼鱼肝脏组织形态和脂肪含量的影响

植物蛋白替代鱼粉会影响长吻鮠的肝脏形态, 20%植物蛋白替代时, 长吻鮠的肝脏损伤最轻, 进一步提高替代量则损伤加重, 这与上述长吻鮠血清中 AST 和 ALT 含量变化相符。这可能是由于豆类中的异黄酮能通过调控过氧化物酶体增殖物激活受体调控脂代谢, 减轻肝脏损伤<sup>[20]</sup>。这种肝脏损伤先减轻后加重的趋势与大多数植物蛋白替代鱼粉的研究结果不同, 如青鱼<sup>[7]</sup>和黄颡鱼<sup>[9]</sup>中, 均发现适量添加发酵豆粕对肝脏无影响, 过量添加则对肝脏的损伤加重。这可能是由于基础饲料中用了多种植物蛋白源, 再额外添加发酵豆粕时, 饲料中抗营养因子的含量则可能超过了动物的耐受量, 从而导致肝脏受损, 即使异黄酮可促进脂代谢, 发酵豆粕也不宜过多用于替代鱼粉, 菜籽粕中的硫甙会分解形成腈类化合物, 也会损伤鱼类肝脏<sup>[7]</sup>。

肝脏油红 O 染色和脂肪含量均表明植物蛋白替代鱼粉会影响长吻鮠的肝脏脂肪蓄积, 这与 H&E 染色结果相符, 20%植物替代鱼粉时, 长吻鮠肝脏损伤最轻, 脂肪含量最低, 进一步替代肝脏脂肪含量会提高。金头鲷<sup>[14]</sup>的脂肪累积趋势与本研究相似, 但在珍珠龙胆石斑鱼的研究中, 22%以下花生粕替代鱼粉对其脂肪积累无影响, 若进一步提升替代量, 则会增加脂肪积累, 但没有出现本研究中适量植物蛋白替代降低肝脏脂肪现象<sup>[18]</sup>。这可能是由于植物蛋白源的不同所致, 豆类中的异黄酮和其中的低饱和脂肪就有降低胆固醇的作用<sup>[20]</sup>。另外, 本实验血清中脂蛋白含量的变化说明植物替代过量会影响长吻鮠脂蛋白合成, 这将影响脂肪运转, 使脂肪在胞内堆积<sup>[21]</sup>, 但本研究中未能对植物蛋白中所含有的抗营养因子进行单独研究, 无法确定其具体的分子触发因素, 因此在机制解释上存在一定局限性。结合肝脏形态、脂肪含量与抗氧化能力考虑, 长吻鮠 20%植

物蛋白替代鱼粉时, 对肝脏健康较好。

## 4 结论

本研究表明, 发酵豆粕和菜籽粕可作为长吻鮠幼鱼的饲料原料, 在一定程度上替代鱼粉不会对长吻鮠生长、血清生化、肝脏抗氧化及肝脏组织结构造成不良影响。在本实验条件下, 以特定生长率回归分析判断, 在以全鱼粉为蛋白源的饲料中添加 37.47%的混合植物蛋白替代适量鱼粉可行, 但若考虑长吻鮠肝脏健康, 可适当降低替代比例。

## 参考文献:

- [1] Ween O, Stangeland J K, Fylling T S, et al. Nutritional and functional properties of fishmeal produced from fresh by-products of cod (*Gadus morhua* L.) and saithe (*Pollachius virens*)[J]. *Heliyon*, 2017, 3(7): e00343.
- [2] Hua K, Cobcroft J M, Cole A, et al. The future of aquatic protein: Implications for protein sources in aquaculture diets[J]. *One Earth*, 2019, 1(3): 316-329.
- [3] Pratiwy F M, Triyani D A. Replacement of fish meal with fermented soybean meal in fish feed: A review[J]. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 2022: 71-77.
- [4] Cao Y, Lu J, & Cai G. Quality improvement of soybean meal by yeast fermentation based on the degradation of anti-nutritional factors and accumulation of beneficial metabolites [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(3): 1441-1449.
- [5] Li S J, Zhang Z, Li Z, et al. Study on nutritional component difference of rapeseed meals in different producing areas of Sichuan[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(7): 4751-4760. [李双江, 张朕, 李哲, 等. 四川不同产区菜籽粕营养成分差异研究[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(7): 4751-4760.]
- [6] Guo B B, Huang L L, Li X Q, et al. Effects of fermented soybean meal substituting plant protein and fish meal on growth, flesh quality, and intestinal microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 2023: 6649754.
- [7] Lin Y F, Shao X P, Jin Y, et al. Effects of replacing fish meal with compound animals and plants from protein on body shape index, fatty acid composition, serum biochemical index and liver tissue morphology of juvenile black carp[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(2): 732-745. [林一帆, 邵仙萍, 金燕, 等. 复合动植物蛋白质源替代鱼粉对青鱼幼鱼形体指标、组织脂肪酸组成、血清生化指标

- 及肝脏组织形态的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 732-745.]
- [8] He M, Yu Y F, Li X Q, et al. An evaluation of replacing fish meal with fermented soybean meal in the diets of largemouth bass (*Micropterus salmoides*): Growth, nutrition utilization and intestinal histology[J]. Aquaculture Research, 2020, 51(10): 4302-4314.
- [9] Han Y K, Xu Y C, Luo Z, et al. Fish meal replacement by mixed plant protein in the diets for juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*: Effects on growth performance and health status[J]. Aquaculture Nutrition, 2022: 2677885.
- [10] Administrative Department for Fisheries the Ministry for Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024. [王丹, 高宏泉, 宋丹丹, 等. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.]
- [11] Li Y P, Sheng X S, Quan H. Review on nutritional requirements of *Coilia elata*[J]. China Fisheries, 2008(3): 68-69. [李育培, 盛晓洒, 权衡. 长吻鲮营养需求研究综述[J]. 中国水产, 2008(3): 68-69.]
- [12] Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [13] Francis G, Makkar H P S, Becker K. Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish[J]. Aquaculture, 2001, 199(3-4): 197-227.
- [14] Martínez-Llorens S, Baeza-Ariño R, Nogales-Mérida S, et al. Carob seed germ meal as a partial substitute in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) diets: Amino acid retention, digestibility, gut and liver histology[J]. Aquaculture, 2012, 338-341: 124-133.
- [15] Hu J B, Zhang Y Y, Yan K H, et al. Change and regulation of nutritional metabolism in silver pomfret during compensatory growth[J]. Marine Biotechnology, 2023, 25(6): 1085-1098.
- [16] Liu H, Zhou M L, Dong X H, et al. Transcriptomic analysis of liver in silver *Sillago*, *Sillago sihama* fed with high-level low-gossypol cottonseed meal in replacement of fishmeal diet[J]. Animals, 2023, 13(7): 1194.
- [17] Back S I, Jeong H S, Cho S H. Replacement effect of fish meal by plant protein sources in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) feeds with an addition of jack mackerel meal on growth, feed availability, and biochemical composition[J]. Aquaculture Nutrition, 2023, 2023: 7965258.
- [18] Zhu Z H, Yi Y M, Zhang X M, et al. The growth performance, antioxidant capacity, liver fat metabolism and intestinal flora composition responsiveness to fish meal replacement by peanut cake for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) [J]. Aquaculture Reports, 2022, 23: 101060.
- [19] Bojarski B, Witeska M, Kondera E. Blood biochemical biomarkers in fish toxicology—a review[J]. Animals, 2025, 15(7): 965.
- [20] Qin P X, Wang T R, Luo Y C. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 7: 100265.
- [21] Liao Y L, Chen Q S, Liu L, et al. Amino acid is a major carbon source for hepatic lipogenesis[J]. Cell Metabolism, 2024, 36(11): 2437-2448.e8.
- [22] Verni M, Verardo V, Rizzello C G. How fermentation affects the antioxidant properties of cereals and legumes[J]. Foods, 2019, 8(9): 362.
- [23] Zhang Z, Ran C, Ding Q W, et al. Ability of prebiotic polysaccharides to activate a HIF1 $\alpha$ -antimicrobial peptide axis determines liver injury risk in zebrafish[J]. Communications Biology, 2019, 2: 274.
- [24] Robinett N G, Peterson R L, Culotta V C. Eukaryotic copper-only superoxide dismutases (SODs): A new class of SOD enzymes and SOD-like protein domains[J]. Journal of Biological Chemistry, 2018, 293(13): 4636-4643.
- [25] Melo N, de Souza S P, König I, et al. Sensitivity of different organs and tissues as biomarkers of oxidative stress in juvenile tambaqui (*Colossoma macropomum*) submitted to fasting[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2024, 291: 111595.

## Dietary replacement of fishmeal with mixed vegetable proteins in juvenile Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris*)

LI Jianwei<sup>1</sup>, ZHU Wenhuan<sup>2</sup>, HU Wenguang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaorui<sup>1</sup>, HUANG Tianle<sup>2</sup>, CHEN Jian<sup>3</sup>, TAN Qingsong<sup>1\*</sup>

1. Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Hubei Provincial Engineering Laboratory for Pond Aquaculture; College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Wuhan Fisheries Technology Extension and Instruction Center, Wuhan 430012, China;
3. Fisheries Research Institute, Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430207, China

**Abstract:** In recent years, fishmeal supply has surpassed market demand, leading to consistently high prices. To alleviate market pressure and reduce farming costs, it is crucial to investigate economical plant protein alternatives in feed. In this study, we examined the feasibility of incorporating mixed plant proteins into diets for juvenile Chinese longsnout catfish and determined appropriate inclusion levels. Six isonitrogenous and isolipidic diets were formulated using a mixed plant protein source (fermented soybean meal to rapeseed meal ratio of 4 : 1) to replace fishmeal in a basal diet at levels of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% (V0, V10, V20, V30, V40, and V50, respectively). Juvenile catfish were fed these diets for 8 weeks, after which growth performance, serum biochemistry, liver antioxidant activity, lipid content, and liver morphology were assessed. The results showed that substituting 50% of dietary protein with vegetable protein sources significantly reduced ( $P<0.05$ ) the specific growth rate (SGR), whereas the V50 group exhibited a significantly higher feed conversion ratio than that of other groups ( $P<0.05$ ). Blood total cholesterol initially decreased and subsequently increased, reaching its lowest level in V10 ( $P<0.05$ ). Similarly, both aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase displayed decreasing-then-increasing trends, with lowest levels in V30 and V20, respectively ( $P<0.05$ ). Liver malondialdehyde showed a decreasing-then-increasing trend, with significantly lower values in V10 and V20 groups than those of other groups ( $P<0.05$ ). Total antioxidant capacity demonstrated an increasing-then-decreasing pattern, peaking at V10. Catalase activity showed a decreasing trend, with the V40 group showing significantly higher activity than that of the V50 group but lower than that of other groups ( $P<0.05$ ). Histological analysis revealed progressive hepatic steatosis beginning at V30, accompanied by blurred hepatocyte membrane boundaries. Lipid droplet quantity exhibited a decreasing-then-increasing trend, reaching its lowest level at V20 ( $P<0.05$ ). Under experimental conditions, moderate mixed vegetable protein supplementation improved juvenile Chinese longsnout catfish liver health. SGR was achieved with 37.47% fishmeal replacement by mixed vegetable protein; however, based on liver health indicators, a lower replacement level may be warranted.

**Key words:** mixed vegetable proteins; *Leiocassis longirostris*; growth performance; hepatic antioxidants; lipid accumulation; replacement of fish meal

\***Corresponding author:** TAN Qingsong. E-mail: tanqs2000@163.com