

Huang Y, Lan Y F, Ye Z X, *et al.* Replacing fish meal protein with *Candida utilis* on growth performance, antioxidant capacity, and digestive system morphology of juvenile *Procambarus clarkii* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122513. [黄莹, 兰怡菲, 叶忠勋, 等. 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾生长性能、抗氧化能力和消化系统组织形态的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122513.]

产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾生长性能、抗氧化能力和消化系统组织形态的影响

黄莹¹ 兰怡菲¹ 叶忠勋¹ 邢鹏宇¹ 黄莉¹ 解绥启² 刘昊昆²
王子轩¹ 姜能座³ 陈新华¹

(1. 福建农林大学海洋学院, 海水养殖生物育种全国重点实验室, 福建省海洋生物技术重点实验室, 福州 350002; 2. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 福建省测试技术研究所, 福州 350003)

摘要: 以产朊假丝酵母替代饲料中不同比例[0 (C0)、25% (C25)、50% (C50)、75% (C75)和100% (C100)]的鱼粉蛋白, 配制成产朊假丝酵母含量分别为0、6.10%、12.20%、18.30%和24.40%的5种等氮等能饲料, 饲喂平均初始体重为(1.80±0.02) g的克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)幼虾42d, 探讨其对克氏原螯虾幼虾生长性能、体成分、消化酶活性、抗氧化功能及消化系统组织结构的影响。结果显示: (1) C0、C25、C50和C75组之间终末体重(FBW)、存活率(SR)、特定生长率(SGR)、饲料效率(FE)和肝体比(HSI)无显著差异($P>0.05$), C100组的FBW、SR、SGR、FE、HSI和蛋白质效率(PER)显著低于C0组($P<0.05$)。C25、C50和C75组克氏原螯虾幼虾的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分均与C0组无显著差异($P>0.05$), C100组的水分显著提高($P<0.05$), C100组的粗蛋白、粗脂肪和灰分显著低于C0组($P<0.05$); 与C0组相比, C100组克氏原螯虾幼虾肝胰腺胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶及肠道胰蛋白酶活性均显著降低($P<0.05$); C100组肝胰腺和肠道NPY和TRY基因表达量显著低于C0组($P<0.05$)。 (2) C25和C50组肝胰腺碱性磷酸酶(AKP)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性及丙二醛(MDA)与C0组无显著差异($P>0.05$), C75和C100组AKP活性比C0组显著升高($P<0.05$), C100组肝胰腺CAT、SOD和GPX活性显著降低($P<0.05$), C100组肝胰腺MDA含量显著高于C0组($P<0.05$); C75和C100组肝胰腺和肠道AKP基因表达量显著升高($P<0.05$), C100组肝胰腺和肠道CAT和SOD基因表达量显著下降($P<0.05$)。 (3) C25和C50组克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道组织结构与C0组无显著差异; C100组克氏原螯虾幼虾肝胰腺肝小管管腔扩张明显, R细胞数量减少, B细胞增大且出现空泡化现象; C100组幼虾肠道上皮细胞萎缩, 肠绒毛明显变短。综上结果, 产朊假丝酵母替代50%鱼粉蛋白不会对克氏原螯虾幼虾生长性能、消化酶活性、抗氧化能力和消化系统组织结构等造成不良影响, 产朊假丝酵母在克氏原螯虾幼虾饲料中的添加比例以不超过12.20%为宜。

关键词: 产朊假丝酵母; 生长性能; 抗氧化能力; 基因表达; 克氏原螯虾幼虾

中图分类号: S963.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)12-122513-13

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0201 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0201



收稿日期: 2025-06-13; **修订日期:** 2025-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2402000); 福建省自然科学基金(2023J01494和2023R1006002); 福建农林大学校级大学生创新训练项目(202410389133和202510389373); 福建省本科高校研究生教改研究项目(FBJY20240241)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2023YFD2402000); Natural Science Foundation of Fujian Province (2023J01494 and 2023R1006002); Fujian Agriculture and Forestry University Students' Innovation and Entrepreneurship Project (202410389133 and 202510389373); Research Project on Graduate Education Reform in Undergraduate Universities of Fujian Province (FBJY 20240241)]

作者简介: 黄莹(1982—), 女, 博士; 研究方向为鱼类营养与饲料。E-mail: huangying19822@163.com

通信作者: 陈新华, E-mail: chenxinhua@tio.org.cn

鱼粉(FM)是水产饲料优质的蛋白源,具有蛋白质含量高、氨基酸(AA)含量丰富且组成平衡、抗营养因子含量低、适口性好等优点^[1]。然而,由于全球渔业资源的衰竭及水产养殖规模的不断增长,鱼粉资源紧缺,需求与价格不断上涨。此外,过度使用鱼粉还会导致一系列的环境问题^[2,3]。面对这一严峻现状,寻找替代鱼粉的新型蛋白源,降低饲料中鱼粉的使用量,已成为促进水产养殖可持续发展的重要方向。

酵母菌蛋白质含量高,且拥有多种酶类和B族维生素,具有营养丰富、成本低、适口性好及安全性高等优势^[4,5]。产朊假丝酵母(*Candida utilis*)也称为产朊圆酵母或者食用圆酵母,是一种安全的微生物,其可利用农业和工业中的廉价副产品或非传统饲料资源合成蛋白质,具有强大的蛋白质合成能力,是目前开发蛋白饲料的理想菌种^[6]。产朊假丝酵母富含多种酶类,可将蛋白质分解为氨基酸等小分子物质,有利于动物对营养物质的消化吸收,提高对饲料的利用率,促进动物的生长发育。此外,该菌种含有 β -葡聚糖和甘露寡糖(MOS),能增强动物的免疫力和抗氧化能力。因此,产朊假丝酵母可作为优质蛋白质的替代源或功能性添加剂^[7]。已有研究表明,产朊假丝酵母可按一定比例添加到动物饲料中而不会影响其生长性能,如蛋鸡^[8]和湖羊^[9]。当产朊假丝酵母替代鱼粉比例达45%时,对莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)全鱼的水分无显著影响,而粗蛋白和粗脂肪含量显著下降^[10]。在断奶仔猪饲料中添加 1.2×10^9 CFU产朊假丝酵母可保护肠道黏膜结构完整,促进仔猪回肠黏膜绒毛高度,并促进抗菌肽及相关蛋白的正常分泌^[11]。

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),俗称小龙虾,具有生长速度快、肉质鲜美,营养价值高的特点,是我国重要的淡水养殖虾类^[12]。自20世纪30年代引入我国后,该虾养殖的总面积和总产量持续增长^[13],2023年,全国该虾养殖的总面积达到了 1.97×10^4 km²,总产量为316.10万吨^[14]。随着克氏原螯虾养殖规模的扩大,对其饲料的需求也相应增加。因此研究克氏原螯虾饲料中鱼粉的替代蛋白,对降低饲养成本和提高克氏原螯虾的养殖综合效益具有重要意义。目前,鲜有关于产朊假丝酵母在水产饲料上的研究报道。本研究旨在通过在克氏原螯虾饲料中添加不同水平的产朊假丝酵母蛋白,探究其对克氏原螯虾生长性能、组织结构及抗氧化能力等方面的影响,为产朊假丝酵母应用于水产饲料提供理论依据,促进克氏原螯虾养殖业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 实验饲料与实验分组

根据克氏原螯虾的营养需求^[15-17],配制5种等氮等能实验饲料。以0、6.10%、12.20%、18.30%和24.40%产朊假丝酵母蛋白分别替代基础饲料中0、25%、50%、75%和100%的鱼粉蛋白。实验饲料原料购买于福建大昌生物科技实业有限公司。实验饲料基础配方及常规化学成分见表1,氨基酸组成见表2。将所有饲料原料完全粉碎过40目筛,严格依照配方设计的比例依次添加并混匀,使用上海华夏渔业机械仪器工贸公司生产的SLP-45型制粒机将其压制成直径为1 mm的颗粒饲料,饲料颗粒在60℃下烘干,并置于-20℃冰箱中密封保存。

1.2 实验动物与养殖管理

本实验在15个矩形塑料养殖箱(100 cm×50 cm×50 cm)中进行,采用净水养殖的方式。实验用克氏原螯虾虾苗来自四川省自贡市富顺小龙虾养殖场。在养殖实验开始前,提前对室内循环水养殖系统进行检查和消毒,进水曝气7d。先将克氏原螯虾虾苗暂养于室内养殖系统中,用实验基础饲料投喂。3周后挑取体质健康、规格均匀、平均体重为 (1.80 ± 0.02) g的克氏原螯虾幼虾240尾,随机放入15个矩形塑料养殖箱中,实验共设置5个实验组,每组3个平行,每箱放养16尾,每个养殖箱水深维持在15 cm。

实验期间,克氏原螯虾每日定时投喂3次(9:00、12:00和17:00),投喂结束后用虹吸管清除缸内残饵和排泄物,每日换水1/3,记录饲料摄食量和死虾情况,如有死亡及时捞出。实验一共持续42d。光照周期为12L/12D。水温为20—24℃,溶氧含量 ≥ 6 mg/L,氨氮含量 <0.4 mg/L。每日于8:30和16:00各测1次水温和室温,每周测1次水体溶氧和氨氮含量。

1.3 实验取样

在养殖实验结束后,克氏原螯虾禁食24h,然后对每缸虾进行称重、计数并做好记录。每缸随机解剖3尾虾取肝胰腺,称重,用于计算肝体比,此3尾虾的肝胰腺和中肠采用中性甲醛固定,并进行组织切片制作。另取3尾虾用于体成分分析。此外,再取3尾虾于冰盘上对其肝胰腺和肠道组织进行解剖,解剖后立即放入冻存管,液氮保存,以备后续酶活性检测及相关基因表达分析。

1.4 样品的测定

实验饲料及虾中的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分的含量测定参照AOAC^[18]的方法。饲料及

表 1 实验饲料配方及化学组成(%干物质)

Tab. 1 Diet formulation and chemical composition of experimental diets (% in dry matter)

原料Ingredient	替代水平Replacing level (%)				
	0 (C0)	25 (C25)	50 (C50)	75 (C75)	100 (C100)
鱼粉Fish meal ¹	20.00	15.00	10.00	5.00	0
产朊假丝酵母 <i>Candida utilis</i>	0.00	6.10	12.20	18.30	24.40
豆粕Soybean meal ²	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
花生粕Peanut meal	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
血粉Blood meal	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
虾粉Shrimp meal	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
鱿鱼粉Squid Power	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
鱼油:豆油:磷脂油1:1:1 Fish oil:Soybean oil: Phospholipid oil 1:1:1	3.00	3.34	3.69	4.03	4.37
玉米淀粉Corn starch	24.70	22.75	20.80	18.90	16.95
纤维素Cellulose	3.00	3.51	4.01	4.47	4.98
维生素和矿物质预混物Vitamin and Mineral premix ³	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
膨润土Bentonite	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
磷酸二氢钙Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
羧甲基纤维Carboxymethyl cellulose	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
饲料化学成分Chemical composition (% in dry matter)					
粗蛋白Crude protein	34.09	34.81	34.05	34.76	34.15
粗脂肪Crude lipid	5.88	5.73	6.10	5.95	6.19
能量Gross energy (kJ/g in dry matter)	17.23	17.52	16.89	17.40	17.03

注:¹由秘鲁塔萨鱼制品有限公司提供。²由福建康宏股份有限公司提供。其余饲料原料由福建大昌生物科技实业有限公司提供。鱼粉、产朊假丝酵母、豆粕、花生粕、血粉和虾粉的粗蛋白含量分别为65.14%、53.38%、47.15%、46.12%、86.29%和46.12%。鱼粉、产朊假丝酵母、豆粕、花生粕、血粉和虾粉的粗脂肪含量分别为9.39%、2.10%、0.91%、1.67%、0.78%和4.75%。³维生素和矿物质预混物(mg/kg diet): 维生素A, 300000 IU; 维生素D₃, 75000 IU; 维生素E, 2500 IU; 维生素K₃, 500; 维生素B₁, 500; 维生素B₂, 500; 维生素B₆, 450; 维生素B₁₂, 5; D-生物素, 15; D-泛酸, 1500; 叶酸, 150; 烟酰胺, 1500; 维生素C, 5000; 肌醇, 5000; FeSO₄, 7000; CuSO₄·5H₂O, 7.5; MnSO₄·H₂O, 30; ZnSO₄·7H₂O, 3500; MgSO₄·7H₂O, 5000; CoSO₄·6H₂O, 12.5; KI, 5; Na₂SeO₃, 15

Note: ¹Provided by TASA Fish Product Co., Ltd., Peru; ²Provided by Fujian Kanghong Co., Ltd., China. The remaining feed raw materials are provided by Fujian Dachang Biotechnology Industry Co., Ltd.; The protein contents of fish meal, *Candida utilis*, soybean meal, peanut meal, blood meal, and shrimp meal are 65.14%, 53.38%, 47.15%, 46.12%, 86.29%, and 46.12%; The crude lipid contents of fish meal, *Candida utilis*, soybean meal, peanut meal, blood meal, and shrimp meal are 9.39%, 2.10%, 0.91%, 1.67%, 0.78%, and 4.75%; ³Vitamin and Mineral premix (mg/kg diet): Vitamin A, 300000 IU; Vitamin D₃, 75000 IU; Vitamin E, 2500 IU; Vitamin K₃, 500; Vitamin B₁, 500; Vitamin B₂, 500; Vitamin B₆, 450; Vitamin B₁₂, 5; D-biotin, 15; D-pantothenic acid, 1500; Folic acid, 150; Nicotinamide, 1500; Vitamin C, 5000; inositol, 5000; FeSO₄, 7000; CuSO₄·5H₂O, 7.5; MnSO₄·H₂O, 30; ZnSO₄·7H₂O, 3500; MgSO₄·7H₂O, 5000; CoSO₄·6H₂O, 12.5; KI, 5; Na₂SeO₃, 15

虾体样品采用一恒公司的DHG-9075A型恒温干燥箱105℃烘干至恒重后测定水分。粗蛋白采用凯氏定氮法,用FOSS公司的Kjeltec8400型全自动凯氏定氮仪进行测定。粗脂肪用索氏抽提法,采用FOSS公司的ST24型索氏抽提仪进行测定。粗灰分采用一恒公司的SX2-2.5-10NP型马弗炉550℃灼烧进行测定。

使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒检测克氏原螯虾肝胰腺和肠道中的消化酶(胰蛋白酶TRY、脂肪酶LPS、淀粉酶AMS)活性,碱性磷酸酶AKP,肝胰腺中的抗氧化酶(过氧化氢酶CAT、超氧化物歧化酶SOD、谷胱甘肽过氧化物酶GPX和谷胱甘肽S转移酶GST)活性及丙二醛MDA含量,具体测定方法参照试剂盒说明书进行。

按照常规组织切片流程,取肝胰腺和肠道组织样品,将其放于常规梯度酒精中脱水,用石蜡包埋,切片厚度为7 μm,脱蜡后进行苏木精-伊红(HE)染色和脱水封片,使用显微镜(Nikon ECLIPSE Si, 东京,日本)获取图像。

取-80℃冰箱中保存的各待测组织样本,从虾的肝胰腺和肠道组织样本提取总RNA。使用

表 2 实验饲料氨基酸组成(%干物质)

Tab. 2 Amino acid composition of experimental diets (% in dry matter)

氨基酸 Amino acid	替代水平Replacing level				
	0 (C0)	25% (C25)	50% (C50)	75% (C75)	100% (C100)
必需氨基酸Essential amino acid					
苏氨酸Thr	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16
组氨酸His	0.92	0.85	0.85	0.80	0.76
赖氨酸Lys	2.20	2.08	2.08	2.02	1.97
缬氨酸Val	1.70	1.64	1.57	1.51	1.46
蛋氨酸Met	0.74	0.63	0.53	0.45	0.38
异亮氨酸Ile	1.43	1.36	1.28	1.22	1.15
亮氨酸Leu	2.41	2.35	2.29	2.23	2.17
苯丙氨酸Phe	1.57	1.53	1.48	1.45	1.40
精氨酸Arg	2.37	2.29	2.23	2.16	2.08
非必需氨基酸Nonessential amino acid					
天冬氨酸Asp	3.41	3.29	3.18	3.06	2.94
酪氨酸Tyr	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76
丝氨酸Ser	1.40	1.37	1.33	1.29	1.26
谷氨酸Glu	6.13	5.99	5.87	5.74	5.61
甘氨酸Gly	2.09	1.99	1.89	1.79	1.69
丙氨酸Ala	1.67	1.62	1.59	1.56	1.52
胱氨酸Cys	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40
脯氨酸Pro	1.94	1.95	1.96	1.97	1.97
总氨基酸 Total amino	32.50	31.51	30.56	29.62	28.68

Analytik Jena公司生产的Scandrop100型超痕量核酸蛋白测定仪检测RNA浓度并按A260/A280的比例进行计算。使用逆转录试剂盒对RNA进行逆转录以获得cDNA, 实验以18S作为内参基因, 所需引物(正向和反向)序列、解链温度、产物大小见表3。本实验所用引物。所有qPCR反应均在荧光定量PCR仪 (Analytickjenaq-tower 2.2, Germany)中进行, PCR反应体系: cDNA模板9 μL, SYBR Green Real-time PCR Master Mix10 μL及正向和反向定量引物 (10 μmol/L)各0.5 μL。PCR扩增程序: 95℃ 15s, 60℃ 1min, 进行40个循环。样品于荧光定量PCR仪中扩增。分析熔融曲线。采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算各组的基因表达水平。

1.5 数据处理

计算公式:

表3 本实验所用引物

Tab. 3 Primer pairs used for RT-qPCR analysis of related genes in this study

基因名称 Gene name	引物序列 Primer sequence (5'—3')	溶解温度 T_m (°C)	登录编号 GenBank number
18S	GCAATAACAGGTCTGTGATGCC AGGGACGTAATCAGCGCAA	60	X90672.1
AKP	CTACAGTGCCCCACACTACG GGGTATGAAGGCGTTCTCGT	60	KC007367.1
CAT	GGAGAAGGCCGACGACTTAG GTGCTTCTCAGCCTCTTCGT	60	KM068092.1
SOD	CGTAGGTACGGTGTATGGGC TGCTACGCCTTGGTAGTTGG	60	K04565
GPX	CCGCTCTTCACCTTCTTG GCGAGTGTATGGCTTACC	60	JN835259.1
NPY	TCCGAGACAGAGAGGCGTAT AGGTGGGTGAGAGGTGACA	60	AB036713.1
TRY	CCTGCATGAGGACTTCGACT GGACCGACGTTCTCGTTGAA	60	AY596942.1

存活率(SR, %)=100×(终末尾数/初始尾数);
摄食率(FR, %BW/d)=100×F/[(W₂+W₁)/2]/t;
特定生长率(SGR, %/d)=100×(LnW₂-LnW₁)/t;
饲料效率(FE, %)=100×(W₂-W₁)/F;
蛋白质效率(PER)=(W₂-W₁)/F×P;
肝体比(HSI)=100×(W_H/W₀)。

式中, W₁为平均初始体重(g), W₂则为平均终末体重(g), F代表饲料干重摄入量(g), t代表实验天数(d), P代表饲料中粗蛋白质含量(%), W₀表示虾体的质量(g), W_H则表示肝胰脏质量(g)。

用Excel 2019进行数据统计, 以SPSS 20.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 所有实验数据以平均值±标准误(mean±SE)表示, 采用Duncan's法进行多重比较, 检验不同组间的差异是否显著, 以P<0.05为显著性判断标准。

2 结果

2.1 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾生长性能的影响

如表4所示, 在实验结束时, C25、C50和C75组的FBW、SR、SGR、FE及HSI均与C0组无显著差异(P>0.05), 而当产朊假丝酵母替代比例达到100%时, 克氏原螯虾幼虾的FBW、SR、SGR、FE及HSI均显著降低(P<0.05)。各处理组间的FR无显著差异(P>0.05)。C25和C50组的PER与C0组相比无显著差异(P>0.05), 当产朊假丝酵母替代比例≥75%时, 克氏原螯虾幼虾的PER显著低于C0组(P<0.05)。

2.2 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾体成分的影响

如表5所示, C25、C50和C75组的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分均与C0组无显著差异(P>0.05), 当产朊假丝酵母替代比例为100%时, 克氏原螯虾

表4 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾生长性能的影响

Tab. 4 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on growth performance of juvenile *P. clarkii* (mean±SE)

指标Index	替代水平Replacing level (%)				
	0	25	50	75	100
初始体重IBW (g)	1.80±0.02	1.79±0.01	1.81±0.02	1.80±0.03	1.81±0.03
终末体重FBW (g)	6.09±0.27 ^a	6.25±0.20 ^a	6.07±0.33 ^a	5.55±0.28 ^{ab}	4.77±0.32 ^b
存活率SR (%)	75.56±4.44 ^a	73.33±3.85 ^a	68.89±5.88 ^a	73.33±3.85 ^a	55.56±2.22 ^b
摄食率FR (%BW/d)	2.81±0.11	2.78±0.07	2.82±0.11	3.04±0.08	3.07±0.18
特定生长率SGR (%/d)	2.89±0.08 ^a	2.97±0.07 ^a	2.87±0.15 ^a	2.68±0.11 ^{ab}	2.30±0.16 ^b
饲料效率FE (%)	69.30±4.23 ^a	71.20±2.89 ^a	68.67±5.51 ^a	60.06±3.60 ^{ab}	52.80±3.32 ^b
蛋白质效率PER	1.86±0.05 ^a	1.82±0.04 ^{ab}	1.79±0.08 ^{ab}	1.70±0.00 ^b	1.69±0.01 ^b
肝体比HSI (%)	5.17±0.17 ^a	5.11±0.19 ^a	5.33±0.29 ^a	4.91±0.23 ^{ab}	4.27±0.16 ^b

注: 同行数据后面英文字母不同者表示各组之间差异显著(P<0.05); 下同

Note: Different superscript letters within each column represent significant differences (P<0.05); The same applies below

幼虾的水分与C0组相比显著提高($P<0.05$), 而粗蛋白、粗脂肪和灰分显著低于C0组($P<0.05$)。

2.3 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道消化酶活性的影响

如表 6 所示, C25和C50组的肝胰腺胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶及肠道胰蛋白酶活性与C0组相比均无显著差异($P>0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例 $\geq 75\%$ 时, 克氏原螯虾幼虾的肝胰腺脂肪酶活性显著低于C0组($P<0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例达100%时, 克氏原螯虾幼虾的肝胰腺胰蛋白酶和淀粉酶及肠道胰蛋白酶活性均显著降低($P<0.05$)。饲料中产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例的增加对克氏原螯虾幼虾的肠道脂肪酶活性和肠道淀粉酶活性均无显著影响($P>0.05$)。

2.4 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺抗氧化及免疫指标的影响

如表 7 所示, C25和C50组克氏原螯虾幼虾肝胰

腺AKP、CAT、SOD、GPX活性及MDA含量与C0组相比无显著差异($P>0.05$)。与C0组相比, 当产朊假丝酵母替代比例 $\geq 75\%$ 时, 克氏原螯虾幼虾肝胰腺AKP活性显著升高($P<0.05$), CAT和GPX活性显著降低($P<0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例为100%时, 克氏原螯虾幼虾肝胰腺SOD活性比C0组显著降低($P<0.05$), MDA含量显著升高($P<0.05$)。饲料中添加产朊假丝酵母对克氏原螯虾幼虾肝胰腺GST活性无显著影响($P>0.05$)。

2.5 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道组织学的影响

如图 1 所示, C0组克氏原螯虾的肝胰腺组织结构完整, 肝细胞形态正常, 肝小管界限清晰, 管腔呈星形, 基底膜和上皮细胞连接紧密。C25、C50和C0组相比肝胰腺组织结构无显著差异, 无明显病变。C75组部分B细胞增大。C100组肝小管管腔扩张明显, 管腔畸形, R细胞数量减少, B细胞出现肿

表 5 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾体成分的影响

Tab. 5 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on body composition of juvenile *P. clarkii* (mean $\pm$ SE)

指标Index (%)	替代水平Replacing level (%)				
	0	25	50	75	100
水分Moisture	73.15 $\pm$ 1.30 ^b	73.94 $\pm$ 1.17 ^b	73.40 $\pm$ 0.43 ^b	75.90 $\pm$ 1.27 ^{ab}	78.18 $\pm$ 1.00 ^a
粗蛋白Crude protein	12.40 $\pm$ 0.41 ^a	11.89 $\pm$ 0.34 ^a	12.37 $\pm$ 0.45 ^a	11.44 $\pm$ 0.65 ^{ab}	10.30 $\pm$ 0.33 ^b
粗脂肪Crude lipid	2.69 $\pm$ 0.19 ^a	2.52 $\pm$ 0.23 ^a	2.59 $\pm$ 0.18 ^a	2.29 $\pm$ 0.18 ^{ab}	1.81 $\pm$ 0.11 ^b
灰分Ash	8.66 $\pm$ 0.22 ^a	8.35 $\pm$ 0.30 ^{ab}	8.88 $\pm$ 0.08 ^a	8.62 $\pm$ 0.20 ^a	7.74 $\pm$ 0.26 ^b

表 6 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾消化酶活性的影响

Tab. 6 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on digestive enzyme in juvenile *P. clarkii* (mean $\pm$ SE)

指标Index	替代水平Replacing level (%)				
	0	25	50	75	100
肝胰腺胰蛋白酶Hepatopancreatic trypsin (U/mg)	13.65 $\pm$ 1.87 ^a	12.57 $\pm$ 0.78 ^a	12.89 $\pm$ 1.25 ^a	11.16 $\pm$ 0.55 ^{ab}	8.33 $\pm$ 0.40 ^b
肝胰腺脂肪酶Hepatopancreatic lipase (U/g prot)	19.71 $\pm$ 2.22 ^a	17.58 $\pm$ 2.39 ^{ab}	20.60 $\pm$ 0.83 ^a	14.10 $\pm$ 1.22 ^{bc}	11.55 $\pm$ 0.68 ^c
肝胰腺淀粉酶Hepatopancreatic amylase (U/mg prot)	1.29 $\pm$ 0.19 ^a	1.21 $\pm$ 0.07 ^a	1.20 $\pm$ 0.10 ^a	1.28 $\pm$ 0.06 ^a	0.79 $\pm$ 0.06 ^b
肠道胰蛋白酶Intestinal trypsin (U/mg prot)	17.45 $\pm$ 0.91 ^{ab}	19.14 $\pm$ 0.71 ^a	13.89 $\pm$ 1.27 ^{bc}	14.72 $\pm$ 1.66 ^b	10.78 $\pm$ 0.73 ^c
肠道脂肪酶Intestinal lipase (U/g prot)	17.65 $\pm$ 2.57	20.52 $\pm$ 2.48	17.13 $\pm$ 2.08	19.10 $\pm$ 1.28	14.91 $\pm$ 2.22
肠道淀粉酶Intestinal amylase (U/mg prot)	1.24 $\pm$ 0.11	1.47 $\pm$ 0.20	1.29 $\pm$ 0.25	1.47 $\pm$ 0.20	0.94 $\pm$ 0.05

表 7 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺抗氧化及免疫指标的影响

Tab. 7 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on the antioxidant and immune indexes in hepatopancreas of juvenile *P. clarkii* (mean $\pm$ SE)

指标Index	替代水平Replacing level (%)				
	0	25	50	75	100
碱性磷酸酶AKP (金氏单位/mg prot)	17.12 $\pm$ 1.07 ^c	18.96 $\pm$ 1.71 ^{bc}	20.07 $\pm$ 1.76 ^{bc}	24.33 $\pm$ 1.71 ^{ab}	25.73 $\pm$ 2.05 ^a
过氧化氢酶CAT (U/mg prot)	13.96 $\pm$ 1.48 ^a	14.64 $\pm$ 1.00 ^a	11.41 $\pm$ 0.85 ^{ab}	10.03 $\pm$ 1.24 ^b	9.05 $\pm$ 1.27 ^b
超氧化物歧化酶SOD (U/mg prot)	83.93 $\pm$ 6.30 ^{ab}	92.31 $\pm$ 7.99 ^a	77.40 $\pm$ 9.54 ^{abc}	62.27 $\pm$ 4.30 ^{bc}	55.44 $\pm$ 7.45 ^c
谷胱甘肽过氧化物酶GPX (U/mg prot)	126.69 $\pm$ 6.83 ^a	105.07 $\pm$ 9.26 ^{ab}	107.46 $\pm$ 12.93 ^{ab}	88.93 $\pm$ 6.91 ^b	82.10 $\pm$ 8.98 ^b
谷胱甘肽巯基转移酶GST (U/mg prot)	69.84 $\pm$ 9.82	83.92 $\pm$ 8.42	74.81 $\pm$ 4.70	71.08 $\pm$ 11.50	72.90 $\pm$ 6.37
丙二醛MDA (nmol/mg prot)	9.50 $\pm$ 0.84 ^b	9.34 $\pm$ 0.98 ^b	10.26 $\pm$ 0.92 ^b	11.16 $\pm$ 1.15 ^b	14.46 $\pm$ 1.15 ^a

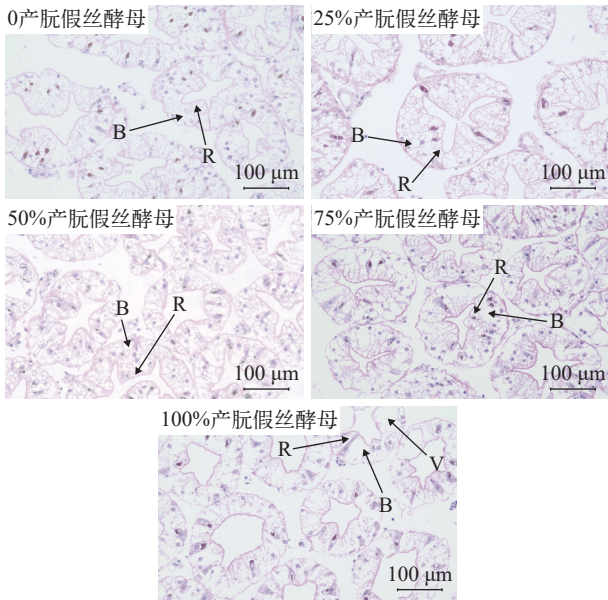


图1 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺组织学的影响(HE染色, 200×)

Fig. 1 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on hepatopancreas histology of juvenile *P. clarkii* (HE staining, 200×)

B. B细胞(分泌细胞); R. R细胞(吸收细胞); V. 空泡化

B. B cell (blasenzellen cell); R. R cell (restzellen cell); V. vacuolation

胀、空泡化现象,基膜部分区域溶解。

如图2所示, C0组克氏原螯虾幼虾的肠道组织结构完整清晰, 上皮细胞排列有序, 固有层结构紧密, 可见较多杯状细胞。C25、C50与C0组的组织结构相比无明显病理变化, 肠道结构完整。C75组杯状细胞减少, 部分上皮细胞高度变矮。C100组肠道上皮细胞和固有层萎缩, 肠道结构不完整, 肠绒毛变短, 排列稀疏。

2.6 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道相关基因表达的影响

如图3所示, C25和C50组的克氏原螯虾幼虾肝胰腺AKP、CAT、SOD、GPX、NPY和TRY基因表达量与C0组相比无显著差异($P>0.05$)。然而, 当产朊假丝酵母替代比例 $\geq 75\%$ 时, 与C0组相比, 克氏原螯虾幼虾肝胰腺AKP基因表达量显著升高($P<0.05$), CAT基因表达量显著降低($P<0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例达到100%时, 克氏原螯虾幼虾肝胰腺SOD、GPX、NPY和TRY基因表达量均显著低于C0组($P<0.05$)。

如图3所示, C25和C50组的克氏原螯虾幼虾肠道AKP、CAT、SOD、NPY和TRY基因表达量与C0组无显著差异($P>0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例 $\geq 75\%$ 时, 与C0组相比, 克氏原螯虾幼虾肠道

AKP基因表达量显著升高($P<0.05$), TRY基因表达量显著降低($P<0.05$)。当产朊假丝酵母替代比例达到

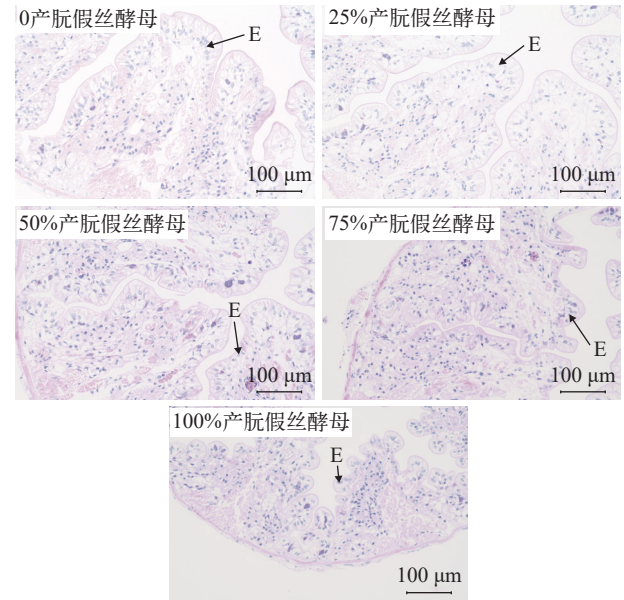


图2 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾中肠组织学的影响(HE染色, 200×)

Fig. 2 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on midgut histology of juvenile *P. clarkii* (HE staining, 200×)

E. 上皮细胞Epithelial cell

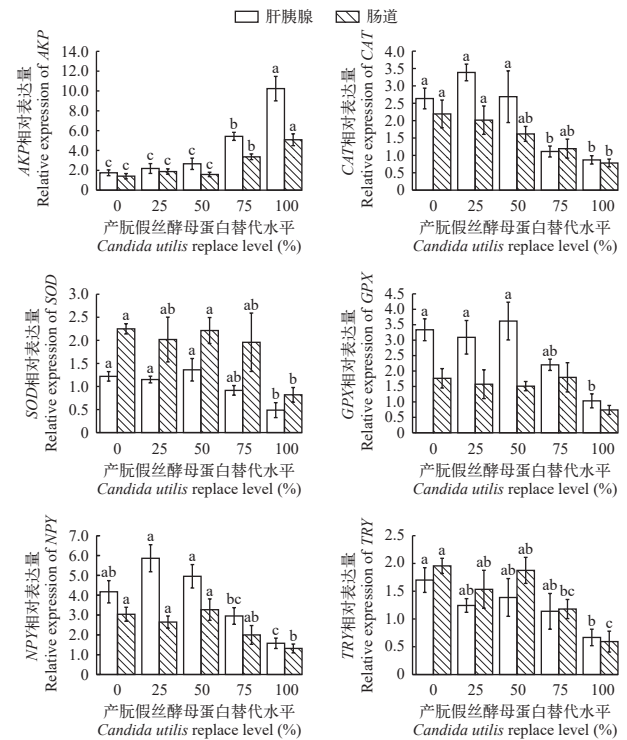


图3 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道基因表达的影响

Fig. 3 Effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on gene expression in hepatopancreas and intestines of juvenile *P. clarkii*

100%时,克氏原螯虾幼虾肠道 CAT 、 SOD 和 NPY 基因表达量显著低于C0组($P<0.05$)。各组间的克氏原螯虾肠道 GPX 基因表达量无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾生长性能的影响

产朊假丝酵母具有丰富的B族维生素和矿物质等营养物质,并且其含有的活性物质能促进动物对养分的吸收^[7, 19, 20]。用产朊假丝酵母替代饲料中66%大豆时,对猪终末体重和存活率无显著影响^[21]。大西洋鲑(*Salmo salar*)饲料中产朊假丝酵母蛋白可替代30%鱼粉蛋白而不显著影响鱼体的特定生长率和饲料转化率^[22]。用产朊假丝酵母替代饲料中45%肉粉时,对莫桑比克罗非鱼终末体重、存活率、特定生长率和蛋白质效率无显著影响^[10]。本实验结果与上述结果相似,产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白 $\leq 50\%$ 时对克氏原螯虾幼虾终末体重、存活率、特定生长率、饲料效率、蛋白质效率和肝体比均无显著影响。然而,当饲料中产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白达到100%时,克氏原螯虾幼虾的上述指标显著降低。生长性能受到抑制可能是随着产朊假丝酵母替代比例的增加,饲料中酵母细胞壁含量升高,水产动物对酵母细胞壁的分解能力有限,无法有效利用酵母细胞中的营养成分,消化率降低,以致生长受阻^[23]。此外,当饲料中替代鱼粉蛋白比例较低时,酵母中的核苷酸等活性成分的促生长作用可弥补必需氨基酸的不足,但随着替代鱼粉蛋白比例的增加,必需氨基酸含量不足(如蛋氨酸含量相对较低),从而降低了蛋白质的消化和吸收^[24]。同时,饲料中鱼粉含量降低会导致牛磺酸、羟脯氨酸、胆固醇和一些未知生长因子缺乏^[25]。

3.2 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾体成分的影响

机体营养成分是反映水产动物营养价值高低的重要依据,也是体现水产动物营养品质的主要指标^[26, 27]。用产朊假丝酵母蛋白替代40%断奶仔猪饲料蛋白显著提高了其粗蛋白和灰分含量^[28]。当饲料中酵母培养物替代15%鱼粉时,对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)全鱼水分含量无显著影响^[24]。在本实验中,当产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例 $\leq 75\%$ 时,对克氏原螯虾幼虾全虾的水分、粗蛋白和粗脂肪含量无显著影响。当饲料中产朊假丝酵母替代比例达到100%时,显著升高了克氏原螯虾幼虾的水分含量,而降低了幼虾的粗蛋白和粗脂肪含量,

表明其蛋白质和脂肪合成受到抑制。这可能是高比例的产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白饲料中氨基酸配比失衡,最终导致蛋白质沉积量减少^[29]。产朊假丝酵母中的 β -葡聚糖在动物肠道中可通过产生短链脂肪酸来抑制胆固醇的合成,影响脂肪酸代谢^[30]。此外,酵母中富含的小肽也起到了阻碍脂肪吸收和促进脂质代谢的作用^[31]。

3.3 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾消化的影响

消化酶活性是反映动物对饲料消化能力的重要指标,其直接影响动物对饲料中营养物质的吸收与利用程度^[32]。目前未见关于产朊假丝酵母对动物消化酶影响的研究报道。使用酵母水解物可替代24%鱼粉,不会显著影响凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)肝胰腺蛋白酶活性。但酵母培养物替代32%的鱼粉时,凡纳滨对虾肝胰腺胰蛋白酶活性显著下降^[33]。在饲料中添加沼泽生海洋红酵母对凡纳滨对虾的肝胰腺淀粉酶活性无不良影响^[34]。在本实验中,当饲料中产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例 $\leq 50\%$ 时,对克氏原螯虾幼虾肝胰腺及肠道消化酶活性均无显著影响,而当产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例达到100%时,肝胰腺胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶及肠道胰蛋白酶活性显著降低,可能是饲料中的酵母细胞壁不易被机体消化吸收,其存在还会阻碍消化过程,从而影响水产动物对饲料中营养成分的有效利用^[35]。

神经肽Y(NPY)是一种促食欲肽,广泛分布于中枢神经系统,其主要功能是促进机体摄食, npv 相对表达量高低是评判对食欲影响的重要指标^[36, 37]。胰蛋白酶(TRY)作为一种关键的消化酶,在营养物质的消化过程中发挥着重要作用,TRY基因表达的下调会抑制动物的消化功能^[38]。在克氏原螯虾饲料中,以双低菜粕替代75%鱼粉时显著降低了其NPY基因表达量,抑制了幼虾摄食和消化能力^[17]。当饲料中脱脂黑水虻虫粉完全替代鱼粉时,大黄鱼(*Larimichthys crocea*)幼鱼肝脏TRY基因的表达式显著降低并对其消化功能产生负面影响^[39]。在本实验中,当产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例达100%时,克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道NPY和TRY基因表达量显著下降,表明饲料中高水平的产朊假丝酵母会抑制克氏原螯虾幼虾的食欲,这可能是产朊假丝酵母中酵母细胞壁含量的增加对幼虾的消化吸收产生了负面影响,进而导致幼虾的摄食行为受到抑制。此外,产朊假丝酵母中组氨酸、蛋氨酸和缬氨酸含量较低,也可能导致养殖动物出现厌食反应,降低消化性能^[40, 41]。

3.4 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道抗氧化及免疫指标的影响

AKP是一种重要的非特异性磷酸水解酶,具备水解微生物、参与细胞内解毒及吞噬活动的能力,在免疫应激反应中发挥重要作用^[42-44]。在饲料中添加10%酵母培养物可显著提高乌苏里鲌(*Pseudobagrus ussuriensis*)血浆中的AKP活性^[45]。用酵母培养物替代饲料中30%鱼粉时,凡纳滨对虾攻毒后的肝胰腺AKP活性出现显著上升^[46]。在本实验中,克氏原螯虾幼虾肝胰腺AKP活性随着饲料中产朊假丝酵母替代比例的增加而升高,推测这可能与产朊假丝酵母中的 β -葡聚糖、甘露寡糖和核苷酸有关,这些活性成分可刺激体内免疫系统,激发机体免疫功能^[47,48]。酵母高比例替代鱼粉可能会过度刺激免疫系统,导致更多的营养或能量用于免疫反应,而不是用于生长^[49]。此外,肝胰腺和肠道组织受损会引起炎症反应,致使氧化应激增强,从而引起AKP活性的上升。

常见的抗氧化酶包括CAT、SOD、GPX和GST,能够催化清除自由基,从而减少氧化应激对细胞的损伤^[50]。CAT广泛分布于多种组织中,可保护细胞免受抗氧化系统中 H_2O_2 引起的损伤^[51,52]。SOD可通过歧化反应把超氧化物转化为 H_2O_2 ,抵御氧化损伤,维持细胞内的氧化还原平衡^[53]。GPX是谷胱甘肽系统的关键抗氧化酶,它可利用谷胱甘肽为底物,催化 H_2O_2 分解为水,或是将过氧化脂质还原至正常状态,从而防止细胞膜和其他生物组织氧化破坏^[54,55]。GST是启动谷胱甘肽结合反应的关键酶^[56]。MDA是脂质过氧化的主要产物,其含量可间接反映活性氧自由基的含量及细胞受自由基攻击的严重程度^[57]。饲料中酵母培养物替代15%鱼粉对大口黑鲈血清CAT和SOD活性未产生显著影响^[24]。用产朊假丝酵母替代大西洋鲑饲料中40%鱼粉蛋白时,对其血清GPX活性无显著影响^[22]。15%饲料酵母替代鱼粉对大菱鲆SOD活性无显著影响,但添加量高于15%时,饲料酵母会抑制其SOD活性^[19]。在本实验中,当产朊假丝酵母替代比例 $\geq 75\%$ 时,幼虾肝胰腺CAT、SOD和GPX的活性降低,表明饲料中高比例产朊假丝酵母会降低克氏原螯虾幼虾的抗氧化能力。酵母培养物对机体抗氧化功能的影响很大程度上取决于酵母蛋白源的品质和用量及水产动物的种类^[24]。

在幼建鲤(*Cyprinus carpio* var Jian)的日粮中添加1.0%—1.5%的酶解大豆蛋白,中肠AKP基因的表达量显著提高^[58]。在本实验中,随着产朊假丝酵母替代比例的升高,克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道

AKP基因表达量呈显著上升趋势,推测这种变化可能是机体为维持体内环境稳态的主动防御机制^[59]。投喂高水平豆粕饲料的克氏原螯虾肝胰腺*cat*、*mmnsod*、*gpx*和*gst*基因表达量显著下调^[60]。红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)肝胰腺中CAT、SOD和GPX1基因的相对表达量均随着饲料中海洋红酵母添加量的升高,呈先上升后降低的趋势^[61]。在本实验中,当产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白比例 $\geq 75\%$ 时,克氏原螯虾幼虾肝胰腺和肠道CAT、SOD和GPX基因表达量均随着产朊假丝酵母替代比例的增加而显著降低。有报道表明,抗氧化酶的活性与其相应的基因表达存在密切关联^[62]。饲料中产朊假丝酵母含量处于较高水平时,可能通过抑制抗氧化基因的表带来降低肝胰腺和肠道内的抗氧化酶活性,从而减弱了克氏原螯虾幼虾的抗氧化性能。

3.5 产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾幼虾肝脏和肠道组织学的影响

肝胰腺是甲壳动物对营养物质进行消化、吸收、储存的重要器官,同时承担着体内代谢、排泄和解毒等重要的生理功能,是最能反映动物机体的营养生理和病理状态的器官^[63,64]。用酵母培养物替代25%—75%鱼粉,黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的肝胰脏结构较为正常,随着酵母培养物替代水平的升高,黄颡鱼的肝胰脏开始出现病变,当酵母培养物替代水平为100%时,黄颡鱼肝细胞出现严重空泡化,表明酵母培养物100%替代鱼粉下可能无法满足黄颡鱼肝胰腺正常生理功能的营养需求,从而导致肝细胞显著退化^[65]。使用酵母培养物替代凡纳滨对虾饲料中20%—40%的鱼粉对其肝胰腺结构无显著影响,但替代60%以上的鱼粉时,其肝胰腺组织发生改变,肝小体出现明显萎缩,管腔形状扭曲不规则^[25]。在本实验中,C25和C50组未发现明显的病理变化。当产朊假丝酵母替代比例达100%时,观察到幼虾肝胰腺管腔扩张明显,R细胞数量减少,B细胞体积增大,基膜破裂。R细胞在甲壳动物肝脏中主要负责营养物质吸收、分解代谢和脂质储存,是监测其营养状况的重要指标,R细胞数量的减少意味着肝脏中营养物质的沉积受到抑制^[66]。而B细胞的主要功能是分泌消化酶类,B细胞肿胀和空泡化可能会降低消化酶活性从而影响营养物质的分解与吸收^[67-69]。这些变化表明高水平产朊假丝酵母替代鱼粉蛋白对克氏原螯虾肝胰腺功能造成了影响,可能是产朊假丝酵母中蛋氨酸缺乏导致肝脏代谢紊乱,从而引起肝脏损伤,进而影响肝脏的抗氧化功能^[70]。

肠道是水产动物机体消化和吸收营养物质的

主要器官,其生长发育状况直接关系机体对营养物质的消化吸收效率,而正常的肠道形态是保证肠道功能和维持肠道内稳态的基础^[71]。随着酵母培养物替代鱼粉比例的升高,大口黑鲈肌层厚度及肠绒毛高度呈先上升后下降的趋势^[24]。当饲料酵母替代大菱鲂饲料中68%的鱼粉时,大菱鲂的前肠、中肠和后肠道皱襞高度显著下降,肠道完整性被破坏,肠道吸收面积减少^[19]。在本实验中,当饲料中产阮假丝酵母替代鱼粉蛋白比例 $\leq 50\%$ 时,克氏原螯虾幼虾的肠道形态与C0组相比未出现明显病变。但当产阮假丝酵母替代比例达到100%时,幼虾出现上皮细胞受损,杯状细胞减少和肠绒毛稀疏且变短等现象。肠道组织结构的变化可能与酵母中的甘露聚糖诱导肠上皮细胞分泌的炎症细胞因子有关^[72]。促炎因子的释放会破坏肠道完整性和其屏障功能^[73]。肠道损伤也可能与抗氧化能力的下降有关。氧化应激产生的代谢物破坏了肠道结构屏障,增加了肠道通透性,导致肠炎。此外,肠道绒毛高度变短可能与鱼粉含量低导致牛磺酸等生物活性物质减少有关^[65]。

4 结论

本研究结果表明,饲料中产阮假丝酵母替代25%和50%鱼粉蛋白时,不会对克氏原螯虾的生长性能、消化酶活性、抗氧化能力和消化系统组织结构等造成不良影响。在本实验条件下,综合生长性能、体成分、生理生化指标及组织结构等结果,克氏原螯虾幼虾饲料中产阮假丝酵母蛋白含量以不超过12.20%为宜。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ai C X, Tao Q Y. Fish meal replacement-expensive fish meal is run with aquatic feed research and development of technical countermeasures [J]. *Feed Industry*, 2013, **34**(10): 1-7. [艾春香, 陶青燕. 鱼粉替代——鱼粉高价运行下水产配合饲料研发的技术对策 [J]. 饲料工业, 2013, **34**(10): 1-7.]
- [2] Liao H P, Liu P Q, Deng Y Y, *et al.* Feeding effects of low-level fish meal replacement by algal meals of *Schizochytrium limacinum* and *Nannochloropsis salina* on largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2022(557): 738311.
- [3] Cheng Z, Mo W Y, Lam C L, *et al.* Replacing fish meal by food waste to produce lower trophic level fish containing acceptable levels of polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk assessments [J]. *Science of the Total Environment*, 2015(523): 253-261.
- [4] Luo X H, Liu Z, Xiao K Y, *et al.* Feed yeast and its application in aquatic animal nutrition [J]. *Journal of Beijing Fisheries*, 2008(2): 49-53. [罗小华, 刘臻, 肖克宇, 等. 饲料酵母及其在水产动物营养中的应用 [J]. 北京水产, 2008(2): 49-53.]
- [5] Ma J Y, Long S F, Piao X S, *et al.* Effects of *Candida utilis* on growth performance, serum immune and antioxidant indices and nutrient apparent digestibility of weaned piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(4): 2260-2271. [马嘉瑜, 龙沈飞, 朴香淑, 等. 产阮假丝酵母对断奶仔猪生长性能、血清免疫和抗氧化指标以及养分表观消化率的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, **34**(4): 2260-2271.]
- [6] Qi H Y, Wang R, Sheng K Y, *et al.* Review on research of *Candida utilis* protein feed [J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2023, **43**(4): 844-848. [齐慧宇, 王瑞, 盛开彦, 等. 产阮假丝酵母蛋白饲料的研究进展 [J]. 中国兽医学报, 2023, **43**(4): 844-848.]
- [7] Guo Z Z, Xu L M, Song J L, *et al.* Functional exploration and application of *Candida utilis* [J]. *Feed Review*, 2016(3): 33-35, 39. [郭照宙, 许灵敏, 宋建楼, 等. 产阮假丝酵母功能的探究及应用 [J]. 饲料博览, 2016(3): 33-35, 39.]
- [8] Rentsenkhand J, Togtokhbayer N. Effect of yeast (*Candida utilis*) on the commercial layer hen's live weight and egg production [J]. *Mongolian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, **13**(2): 114-116.
- [9] Qiu W S, Wang Y L, Zhang Z W, *et al.* Effects of dietary *Candida utilis* and *Bacillus subtilis* addition on growth performance and nutrient digestibility of hu sheep [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, **53**(2): 106-109. [仇武松, 王彦芦, 张振威, 等. 日粮添加产阮假丝酵母与枯草芽孢杆菌对湖羊生长性能及养分消化率的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2017, **53**(2): 106-109.]
- [10] Olvera-Novoa M, Marti Nez-Palacios C, Olivera-Castillo L. Utilization of torula yeast (*Candida utilis*) as a protein source in diets for tilapia (*Oreochromis mossambicus* Peters) fry [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2002, **8**(4): 257-264.
- [11] Wang Y. Study on the effect of *Yucca shidigero* extract and *Candida utilis* on growth performance and intestinal health in weaned piglets [D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 34. [王瑶. 丝兰提取物和产阮假丝酵母对断奶仔猪生长性能与肠道健康的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2018: 34.]
- [12] Mu F, Cheng Y X, Wu X G. Distribution and industrial development of crayfish in the world [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, **16**(1): 64-72. [慕峰, 成永旭, 吴旭干. 世界淡水螯虾的分布与产业发展 [J]. 上海水产大学学报, 2007, **16**(1): 64-72.]
- [13] Qin L R, Li W, Rong K, *et al.* Effects evaluation of in vitro incubation and maternal incubation of *Procambarus clarkii* embryos [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, **48**(10): 130-138. [覃丽蓉, 李为, 荣宽, 等. 克氏原螯虾胚胎离体孵化与抱卵孵化的效果评估 [J]. 水产学报, 2024, **48**(10): 130-138.]

- [14] National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China crayfish industry development report (2024) [J]. *China Fisheries*, 2024(7): 14-20. [全国水产技术推广总站、中国水产学会. 中国小龙虾产业发展报告(2024) [J]. 中国水产, 2024(7): 14-20.]
- [15] Jin H H, Li Y, Li Z, *et al.* A review: research progress in nutritional requirements and feed in red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Fisheries Science*, 2023, **42**(5): 891-900. [金鸿浩, 李雨, 李哲, 等. 克氏原螯虾营养需求与饲料研究进展 [J]. 水产科学, 2023, **42**(5): 891-900.]
- [16] Hu Y J, Yun B, Han D, *et al.* A review: The nutritional requirements of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *China Feed*, 2024(15): 90-96. [胡亚军, 负彪, 韩冬, 等. 克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)营养需求研究进展 [J]. 中国饲料, 2024(15): 90-96.]
- [17] Huang Y, Lou G G, Liu X Y, *et al.* Replacing fish meal with rapeseed meal on growth performance, antioxidant capacity and digestive system morphology of juvenile *Procambarus clarkii* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(12): 1918-1931. [黄莹, 娄格格, 刘轩宇, 等. 双低菜粕替代鱼粉对克氏原螯虾幼虾生长性能、抗氧化能力和消化系统组织形态的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(12): 1918-1931.]
- [18] AOAC (Association of Official Analytical Chemists) [M]. Animal Feed/Williams S (Eds.), Official Methods of Analysis, 14th edn AOAC, Inc., Arlington, VA, Washington, DC, 1984: 152-161.
- [19] Cui M. Effects of feed yeast on growth performance, immunity and intestinal microscopic structure of turbot *Scophthalmus maximus* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012: 31-36. [崔敏. 饲料酵母替代鱼粉对大菱鲆生长、免疫及肠道显微结构的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2012: 31-36.]
- [20] Abu-Elala N M, Ali T E, Ragaa N M, *et al.* Analysis of the productivity, immunity, and health performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodstock-fed dietary fermented extracts sourced from *Saccharomyces cerevisiae* (Hilyses): a field trial [J]. *Animals*, 2021, **11**(3): 815.
- [21] Mora L, Lezcano P, Hidalgo K, *et al.* Torula yeast (*Candida utilis*) on distiller's vinasse in growing pig diets [J]. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 2012, **46**(1): 63-65.
- [22] Øverland M, Karlsson A, Mydland L T, *et al.* Evaluation of *Candida utilis*, *Khuyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as protein sources in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture*, 2013(402-403): 1-7.
- [23] Carlberg H, Lundh T, Cheng K, *et al.* In search for protein sources: Evaluating an-alternative to the traditional fish feed for Arctic charr (*Salvelinus alpinus*, L.) [J]. *Aquaculture*, 2018(486): 253-260.
- [24] Bian Y H, Xu X Y, Duan Z P, *et al.* Effects of replacing fish meal with yeast culture on growth performance, serum biochemical indices and intestinal morphology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, **33**(9): 5182-5192. [卞宇豪, 许晓莹, 段志鹏, 等. 酵母培养物替代鱼粉对大口黑鲈生长性能、血清生化指标和肠道形态结构的影响 [J]. 动物营养学报, 2021, **33**(9): 5182-5192.]
- [25] Zhang X. The replacement of fish meal with yeast culture and cottonseed protein concentrate in diets of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 18. [张鑫. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)饲料中酵母培养物和棉籽浓缩蛋白替代鱼粉的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 18.]
- [26] Xu L X, He C J, Liu Y Q, *et al.* Fermented soybean meal and soybean meal replace partial fish meal on the growth performance, hematology, liver antioxidant activities and immune related genes mRNA expression of juvenile coho salmon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(9): 1374-1385. [徐粒潇, 何楚景, 刘永强, 等. 发酵豆粕和豆粕替代部分鱼粉对银鲑幼鱼生长性能、血清生化指标、肝脏抗氧化能力和免疫相关基因表达量的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(9): 1374-1385.]
- [27] Feng H, Peng D, Liang X F, *et al.* Effect of dietary hydroxyproline supplementation on Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) fed with fish meal partially replaced by fermented soybean meal [J]. *Aquaculture*, 2022(547): 737454.
- [28] Cruz A, Håkenåsen I M, Skugor A, *et al.* *Candida utilis* yeast as a protein source for weaned piglets: Effects on growth performance and digestive function [J]. *Livestock Science*, 2019(226): 31-39.
- [29] Xie F, Zeng W, Zhou Q, *et al.* Dietary lysine requirement of juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture*, 2012(358-359): 116-121.
- [30] El Khoury D, Cuda C, Luhovyy B L, *et al.* Beta glucan: health benefits in obesity and metabolic syndrome [J]. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2012, **2012**(1): 851362.
- [31] Zeng B H, Xiang X, Yang W J, *et al.* Effects of yeast hydrolyzate on growth and body composition of juvenile *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Feed Industry*, 2015, **36**(16): 16-19. [曾本和, 向泉, 杨文娇, 等. 酵母水解物对草鱼生长性能和体成分的影响 [J]. 饲料工业, 2015, **36**(16): 16-19.]
- [32] Cao J M, Yan J, Wang G X, *et al.* Effects of replacement of fish meal with housefly maggot meal on digestive enzymes, transaminases activities and hepatopancreas histological structure of *Litopenaeus vannamei* [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, **8**(5): 72-79. [曹俊明, 严晶, 王国霞, 等. 家蝇蛆粉替代鱼粉对凡纳滨对虾消化酶、转氨酶活性和肝胰腺组织结构的影响 [J]. 南方水产科学, 2012, **8**(5): 72-79.]
- [33] Chi S Y, Nie Q, Huang W W, *et al.* Study on suitable proportion of yeast hydrolyzate replacement of fishmeal in feed of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(4): 728-735. [迟淑艳, 聂琴, 黄吴

- 文,等.凡纳滨对虾饲料中酵母水解物替代鱼粉适宜比例的研究[J].*水生生物学报*,2016,40(4):728-735.]
- [34] Yang S P, Wu Z H, Jian J C. Effects of dietary yeast *Rhodospiridium paludigenum* on digestive enzyme activities and intestinal microbes in Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(7): 391-394. [杨世平,吴灶和,简纪常.饲料中添加沼泽生红冬孢酵母对凡纳滨对虾消化酶及肠道微生物的影响[J].*水产科学*,2011,30(7):391-394.]
- [35] Zhao D H, Gao T T. Effects of dietary addition of yeast enzymatic digest on lipid metabolism in *Micropterus salmoides* [J]. *Northern Chinese Fisheries*, 2023, 42(4): 273-275. [赵大虎,高恬恬.日粮添加酵母酶解物对大口黑鲈脂代谢的影响[J].*黑龙江水产*,2023,42(4):273-275.]
- [36] Jung E Y, Kang D H, Suh H J, et al. Effects of yeast hydrolysate on neuropeptide Y (NPY) and tryptophan hydroxylase (TPH) immunoreactivity in rats [J]. *Phytotherapy Research*, 2009, 23(5): 619-623.
- [37] Pulido-Rodriguez L F, Cardinaletti G, Secci G, et al. Appetite regulation, growth performances and fish quality are modulated by alternative dietary protein ingredients in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) culture [J]. *Animals*, 2021, 11(7): 1919.
- [38] Nian Y Y, Chen B K, Wang J J, et al. Transcriptome analysis of *Procambarus clarkii* infected with infectious hypodermal and haematopoietic necrosis virus [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(98): 766-772.
- [39] Han X X. Study on the application of defatted black soldier fly larvae meal in the formulated diets for juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [D]. Xiamen: Jimei University, 2019: 53-55. [韩星星.脱脂黑水虻虫粉在大黄鱼幼鱼配合饲料中的应用研究[D].厦门:集美大学,2019:53-55.]
- [40] Molinari G S, Wojno M, Kwasek K. Effects of dietary indispensable amino acid deficiencies on feed intake in stomachless fish [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2024(298): 111742.
- [41] Maurin A, Bruhat A, Jousse C, et al. Cellular adaptation to amino acid availability: mechanisms involved in the regulation of gene expression [J]. *Bulletin de l'Académie vétérinaire de France*, 2006, 159(4): 92-105.
- [42] Zhu L, Wang X Y, Hou L B, et al. The related immunity responses of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) following infection with *Aeromonas veronii* [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(21): 100849.
- [43] Li Q P, Yi P H, Zhang J Z, et al. Bioconversion of food waste to crayfish feed using solid-state fermentation with yeast [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(6): 15325-15334.
- [44] Zhao L L, Yang X Z, Cheng Y X, et al. Effects of histamine on survival and immune parameters of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2012, 31(3): 827-834.
- [45] Bu X Y, Lian X Q, Wang Y, et al. Dietary yeast culture modulates immune response related to TLR2-MyD88-NF- κ B signaling pathway, antioxidant capability and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* for Ussuri catfish (*Pseudobagrus ussuriensis*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(84): 711-718.
- [46] Gui L C, Mai H B, Chi S Y, et al. Effects of yeast culture on growth performance, hematological parameters, immunity and disease resistance of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(3): 30-37. [桂良超,麦浩彬,迟淑艳,等.酵母培养物替代鱼粉对凡纳滨对虾生长性能、血清生化指标、免疫力和抗病力的影响[J].*广东海洋大学学报*,2019,39(3):30-37.]
- [47] Chen J, Dai B T, Wang H M, et al. Effects of adding β -glucan to feed on the growth performance, immune indexes, transcriptome and intestinal flora of *Epinephelus fuscoguttatus* $\times$ *Epinephelus lanceolatus* $\times$ [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(5): 1434-1447. [陈俭,代冰涛,王红明,等.饲料中添加 β -葡聚糖对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、免疫指标、转录组及肠道菌群的影响[J].*南方农业学报*,2022,53(5):1434-1447.]
- [48] Ren Z L, Wang S F, Cai Y, et al. Effects of dietary mannan oligosaccharide supplementation on growth performance, antioxidant capacity, non-specific immunity and immune-related gene expression of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* $\times$ *Epinephelus fuscoguttatus*) [J]. *Aquaculture*, 2020(523): 735195.
- [49] Zhang X, Yao W X, Sun Z C, et al. Effects of yeast culture substituting fishmeal on growth, nonspecific immunity, intestinal, and hepatopancreatic histology of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2022, 53(6): 1155-1168.
- [50] El-Bab A F F, Saghir S A M, Abu El-Naser I A, et al. The effect of dietary *Saccharomyces cerevisiae* on growth performance, oxidative status, and immune response of sea bream (*Sparus aurata*) [J]. *Life*, 2022, 12(7): 1013.
- [51] Wang W, Liu M, Fawzy S, et al. Effects of dietary *Phaffia rhodozyma* astaxanthin on growth performance, carotenoid analysis, biochemical and immune-physiological parameters, intestinal microbiota, and disease resistance in *Penaeus monodon* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021(12): 762689.
- [52] Zhang Y, Sun K, Li Z Y, et al. Effects of acute diclofenac exposure on intestinal histology, antioxidant defense, and microbiota in freshwater crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Chemosphere*, 2021(263): 128130.
- [53] Shen X L, Zhou J, Wang Y H, et al. Effects of TMP on expression of SOD1, SOD2 and SOD3 in cochlea of guinea pigs with gentamycin-induced hearing loss [J]. *Chinese Journal of Otolaryngology*, 2016, 14(3): 408-413. [沈晓丽,周静,王永华,等.川芎嗪对庆大霉素耳聋豚鼠SOD同工酶蛋白表达的调控[J].*中华耳科学杂志*,2016,14(3):408-413.]
- [54] Xia R, Hao Q, Xie Y, et al. Effects of dietary *Saccha-*

- romyces cerevisiae* on growth, intestinal and liver health, intestinal microbiota and disease resistance of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(24): 101157.
- [55] Liu F, Qu Y K, Geng C, *et al.* Effects of hesperidin on the growth performance, antioxidant capacity, immune responses and disease resistance of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(99): 154-166.
- [56] Chi C, Zhang C Y, Liu J D, *et al.* Effects of domoic acid on immunity and antioxidant capacity in the hemolymph of the bay scallop (*Argopecten irradians*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(11): 1371-1378. [迟骋, 张彩艳, 刘佳岱, 等. 软骨藻酸对海湾扇贝(*Argopecten irradians*)血淋巴免疫力和抗氧化力的影响研究[J]. 中国水产科学, 2020, **27**(11): 1371-1378.]
- [57] Cheng Y B, Zhang Y X, Dong Z Y, *et al.* Effects of dietary replacement of fish meal and soy protein by wheat gluten on plasma biochemical indices and liver antioxidative indices of *Nibea japonica* and *Sparus macrocephalus* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, **38**(3): 106-114. [成艳波, 张月星, 董智勇, 等. 小麦蛋白替代鱼粉及大豆蛋白对日本黄姑鱼(*Nibea japonica*)和黑鲷(*Sparus macrocephalus*)血清生化指标及肝脏抗氧化指标的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, **38**(3): 106-114.]
- [58] Xiao W W. Supplementation of enzyme-treated soy protein to save dietary protein of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) and the mechanism studies [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019: 33. [肖伟伟. 酶解大豆蛋白在幼建鲤日粮中节约蛋白的作用及机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019: 33.]
- [59] Tian L L, Wan J J, Meng X L, *et al.* Effects of acute and chronic high pH stress on non-specific immunity and antioxidant capacity in *Procambarus clarkii* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, **51**(4): 101-107. [田立立, 万金娟, 孟祥龙, 等. 高pH急性和慢性胁迫对克氏原螯虾非特异性免疫和抗氧化能力的影响[J]. 淡水渔业, 2021, **51**(4): 101-107.]
- [60] Cai M L, Qiu X Y, Zhang H J, *et al.* Effects of replacing fishmeal with soybean meal on the immune and antioxidant capacity, and intestinal metabolic functions of red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2024(149): 109600.
- [61] Qin M L. The effects of *Rhodotorula mucilaginosa* on the growth, immunity, metabolism, and related signaling pathways of red crayfish (*Cherax quadricarinatus*) [D]. Nanning: Guangxi Minzu University, 2024: 39-40. [覃美兰. 海洋红酵母对红螯螯虾生长、免疫、代谢及相关信号通路的影响[D]. 南宁: 广西民族大学, 2024: 39-40.]
- [62] Bergquist J, Ohlsson B, Tarkowski A. Nuclear factor- κ B is involved in the catecholaminergic suppression of immunocompetent cells [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, **917**(1): 281-289.
- [63] Wei K Q, Wei Y, Song C X. The response of phenoloxidase to cadmium-disturbed hepatopancreatic immune-related molecules in freshwater crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(99): 190-198.
- [64] Zhou X L, Li Q Y, Zhu J W, *et al.* Effects of hypoxic stress on tissue structure and gut bacterial community of *Exopalaemon carinicauda* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(6): 167-177. [周心磊, 李青洋, 朱加伟, 等. 低氧胁迫对脊尾白虾组织结构及肠道菌群的影响[J]. 渔业科学进展, 2024, **45**(6): 167-177.]
- [65] Huang H, Li X, Guo B, *et al.* The substitution of fishmeal with yeast culture in the yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) diet: growth, serum biochemical indices, and intestinal and hepatopancreatic histology [J]. *Animals*, 2024, **14**(6): 869.
- [66] Xiao X C, Han D, Zhu X M, *et al.* Effect of dietary cornstarch levels on growth performance, enzyme activity and hepatopancreas histology of juvenile red swamp crayfish, *Procambarus clarkii* (Girard) [J]. *Aquaculture*, 2014(426-427): 112-119.
- [67] Pan K W, Wang L, Guo Q, *et al.* Analysis of cloning and expression characteristics of lysophosphatidylglycerol acyltransferase during ovarian development of *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(1): 28-40. [潘柯伍, 王琳, 郭勃, 等. 中华绒螯蟹溶血磷脂酰甘油酰基转移酶的基因克隆及其在卵巢发育过程中的表达特征[J]. 中国水产科学, 2022, **29**(1): 28-40.]
- [68] Huang Y, Guo Y Z, Lou G G, *et al.* Dietary aflatoxin B₁ on growth, antioxidant capacity and histology in hepatopancreas of juvenile red swamp crawfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(2): 279-289. [黄莹, 郭雅哲, 娄格格, 等. 饲料中黄曲霉毒素B₁对克氏原螯虾幼虾生长、饲料利用和肝胰腺组织结构的影响[J]. 水生生物学报, 2023, **47**(2): 279-289.]
- [69] Han X L, Gao B Q, Wang H F, *et al.* Effects of low salinity stress on microstructure of gill and hepatopancreas and family survival rate of *Portunus trituberculatus* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, **35**(1): 104-110. [韩晓琳, 高保全, 王好锋, 等. 低盐胁迫对三疣梭子蟹鳃和肝胰腺显微结构及家系存活的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, **35**(1): 104-110.]
- [70] Li S Y, Chen X Y, Liang H H, *et al.* Effects of dietary methionine levels on growth performance, antioxidant capacity and intestinal development of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2025, **34**(4): 749-759. [李诗洋, 陈晓瑛, 梁浩辉, 等. 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长性能、消化能力和免疫抗氧化能力的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2025, **34**(4): 749-759.]
- [71] Li M, Chen B, Peng K, *et al.* Effects of cottonseed protein on growth performance, serum biochemical indexes, antioxidant enzyme activities, and intestinal and liver morphology of *Micropterus salmoides* [J]. *Chinese Jour-*

- nal of Animal Nutrition*, 2024, **36**(12): 7915-7929. [李敏, 陈冰, 彭凯, 等. 棉籽蛋白对大口黑鲈生长性能、血清生化指标、抗氧化酶活性及肠道和肝脏形态结构的影响 [J]. *动物营养学报*, 2024, **36**(12): 7915-7929.]
- [72] Chen H T, Li J S Xu Z C, *et al.* Roles of intestinal mucosa, intestinal immunity and microbiota in enterogenic *Candida albicans* infection [J]. *Chinese Journal of*
- Infection Control*, 2024, **23**(5): 631-637. [陈慧婷, 李家生, 徐志昌, 等. 肠道黏膜、肠道免疫和微生物群在肠源性白念珠菌感染中的作用 [J]. *中国感染控制杂志*, 2024, **23**(5): 631-637.]
- [73] Luetig J, Rosenthal R, Barmeyer C, *et al.* Claudin-2 as a mediator of leaky gut barrier during intestinal inflammation [J]. *Tissue Barriers*, 2015, **3**(1-2): e977176.

REPLACING FISH MEAL PROTEIN WITH *CANDIDA UTILIS* ON GROWTH PERFORMANCE, ANTIOXIDANT CAPACITY, AND DIGESTIVE SYSTEM MORPHOLOGY OF JUVENILE *PROCAMBARUS CLARKII*

HUANG Ying¹, LAN Yi-Fei¹, YE Zhong-Xun¹, XING Peng-Yu¹, HUANG Li¹, XIE Shou-Qi², LIU Hao-Kun², WANG Zi-Xuan¹, JIANG Neng-Zuo³ and CHEN Xin-Hua¹

(1. State Key Laboratory of Mariculture Breeding, Key Laboratory of Marine Biotechnology of Fujian Province, College of Oceanology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Fujian Institute of Testing Technology, Fuzhou 350003, China)

Abstract: To elucidate the effects of replacing fish meal protein with *Candida utilis* on growth performance, body composition, digestive activity, antioxidant capacity, and digestive system histology of juvenile red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*), five isonitrogenous and isocaloric diets were formulated to feed crayfish with the average initial body weight of (1.80±0.02) g for 42d. *Candida utilis* was used to replace fish meal protein at different proportions [0 (C0), 25% (C25), 50% (C50), 75% (C75), and 100% (C100)], with its addition levels being 0, 6.10%, 12.20%, 18.30%, and 24.40% respectively. The results showed that: (1) No significant differences in FBW, SGR, FE, and HSI were observed among the C0, C25, C50, and C75 groups ($P>0.05$), however, the FBW, SR, SGR, FE, HSI, and PER in the C100 group significantly decreased than those of the C0 group ($P<0.05$). The moisture, crude protein, crude lipid, and ash content of juvenile crayfish in the C25, C50, and C75 groups showed no significant differences compared to those in the C0 group ($P>0.05$). The moisture content in the C100 group significantly increased compared with the C0 group ($P<0.05$), while the crude protein, crude lipid contents, and ash content significantly decreased ($P<0.05$). Compared with the C0 group, the activities of hepatopancreatic trypsin, hepatopancreatic lipase, hepatopancreatic amylase, and intestinal trypsin of juvenile crayfish in the C100 group were significantly reduced ($P<0.05$). *NPY* and *TRY* genes expressions levels in hepatopancreas and intestine of the C100 group were significantly lower than those of the C0 group ($P<0.05$). (2) The activities of hepatopancreatic alkaline phosphatase (AKP), catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GPX), and the content of malondialdehyde (MDA) in the C25 and C50 groups showed no significant differences from the C0 group ($P>0.05$). The AKP activity in the hepatopancreas of the C75 and C100 groups significantly increased compared with the C0 group ($P<0.05$). Moreover, in the C100 group, the CAT, SOD, and GPX activities in the hepatopancreas significantly decreased ($P<0.05$), while the MDA content significantly increased compared to those in the C0 group ($P<0.05$). The expression levels of *AKP* gene in hepatopancreas and intestine of the C75 and C100 groups were significantly increased ($P<0.05$), while the expression levels of *CAT* and *SOD* of the C100 group were markedly down-regulated ($P<0.05$). (3) The structures of hepatopancreas and intestine in the C25 and C50 groups of juvenile crayfish showed no significant differences compared with the C0 group. However, in the C100 group, the lumen of hepatic tubules of juvenile crayfish was enlarged, the number of R-cells decreased, and the B-cells appeared swelling and vacuolization. The intestinal epithelial cells of the C100 group atrophied, and the intestinal villi became shorter. In conclusion, up to 50% of fish meal can be replaced by *Candida utilis* in juvenile *Procambarus clarkii* diets without negative impacts on growth performance, antioxidant capacity, or digestive system morphology, with the recommended *Candida utilis* content not exceeding 12.20%.

Key words: *Candida utilis*; Growth performance; Antioxidant capacity; Gene expression; Juvenile *Procambarus clarkii*