



南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长、免疫及肌肉品质的影响

谢凯¹, 石勇¹, 何慧^{1,2}, 马学坤², 李昭林²,
钟蕾¹, 吴桐强¹, 张俊智¹, 胡毅^{1*}

(1. 湖南农业大学, 湖南省特色水产资源利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410128;

2. 广东粤海饲料集团, 广东湛江 524000)

摘要: 为研究南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、血清免疫指标及肌肉品质的影响, 实验以初始体质量为 (10.51±0.13) g 的黄颡鱼为研究对象, 南极磷虾粉替代基础饲料 (30% 鱼粉) 中 0%(KM0, 对照组)、2.5%(KM2.5)、5.0%(KM5)、7.5%(KM7.5) 和 10%(KM10) 的鱼粉, 共配制 5 组等氮等脂的饲料, 每组 3 个重复, 养殖实验在水库网箱 (1.5 m×1.5 m×1.5 m) 中进行, 持续 8 周。结果显示, 南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长、存活率、肠道淀粉酶和脂肪酶活性无显著性影响, 但显著降低肠道胰蛋白酶活性。与 KM0 组相比, 各替代组血清中补体 3 含量显著上升, KM5 组免疫球蛋白 M 显著上升, 而替代水平超过 5% 时, 血清中碱性磷酸酶活性显著降低。随着磷虾粉替代比例的增加, 黄颡鱼肌肉黏附性、弹性、胶黏性呈下降趋势, 内聚性呈上升趋势, 硬度、咀嚼性呈先上升后下降趋势。与 KM0 组相比, KM10 组黄颡鱼肌肉黏附性、弹性、胶黏性显著降低, 内聚性显著升高。随着磷虾粉替代鱼粉比例的上升, 黄颡鱼肌肉水解氨基酸中呈味氨基酸和总非必需氨基酸含量呈先上升后下降趋势。研究表明, 在本实验条件下, 南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼的生长无负面影响, 适量添加南极磷虾粉能在一定程度上增强其免疫功能, 并影响黄颡鱼肌肉肉质构和呈味氨基酸含量。

关键词: 黄颡鱼; 南极磷虾粉; 生长性能; 血清免疫指标; 肌肉品质

中图分类号: S 963

文献标志码: A

中国水产养殖每年消耗 250 万 t 鱼粉, 其中进口鱼粉接近一半, 而全球鱼粉总产量基本维持在 450~500 万 t^[1], 随着集约化养殖的发展以及海洋资源的匮乏, 鱼粉供给不足的矛盾日趋严重。南极磷虾 (*Euphausia superba*) 是世界海洋中生物储备量最大的物种之一, 每年的捕获量超过 10 万 t^[2]。南极磷虾粉含有丰富的促摄食物质, 如核苷酸、谷氨酸、脯氨酸、甘氨酸等^[3], 并且富含磷脂^[4]以及虾青素^[5]。因此, 南极磷虾粉在水产

饲料中具有良好的应用前景。已有研究表明, 南极磷虾粉可部分或全部替代虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[6]、大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)^[7]、圆斑星鲷 (*Verasper variegatus*)^[8]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[9] 和凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)^[10] 等水产动物饲料中的鱼粉。

黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 隶属鲶形目 (Siluriformes) 鲶科 (Bagridae) 黄颡鱼属, 是我国重要的偏肉食性特种经济淡水养殖品种, 全国养

收稿日期: 2021-11-25 修回日期: 2022-01-05

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (32172986); 粤海产学研合作项目 (17066-1)

第一作者: 谢凯, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 903663818@qq.com;

石勇, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 1186472943@qq.com

通信作者: 胡毅 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: huyi740322@163.com



殖产量接近 54 万 t。黄颡鱼配合饲料中鱼粉占比高达 28%~35%^[11],降低黄颡鱼饲料中鱼粉含量已成为目前研究的热点。目前已有脱脂亮斑扁角水虻 (*Hermetia illucens*) 虫粉、未脱脂亮斑扁角水虻虫粉^[12-13]和酶解鱼溶浆^[14]等替代黄颡鱼饲料中鱼粉的研究,而以南极磷虾粉替代黄颡鱼饲料中鱼粉的研究还未见报道。因此,本实验通过研究南极磷虾粉替代饲料中鱼粉对黄颡鱼生长性能、肠道消化酶、血清免疫指标和肌肉品质的影响,为南极磷虾粉在黄颡鱼饲料中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以鱼粉、豆粕为主要蛋白质源,以南极磷虾粉分别替代基础饲料中 0%(KM0, 对照组)、2.5%(KM2.5)、5.0%(KM5)、7.5%(KM7.5)、10%(KM10) 的鱼粉,配制 5 种等氮等脂的实验饲料,南极磷虾粉和鱼粉营养成分见表 1,饲料配方见表 2,表 3。饲料制备前先将饲料原料粉碎,过 60 目筛,按配比从小到大逐级定量均匀混合;再将其放入 V 型搅拌机充分混合 25 min。随后将鱼油与已混好的干粉充分混匀,加入适量的水揉匀,将混合均匀的原料用单螺杆挤压式饲料膨化机,制成粒径为 1.5 和 2.0 mm 的颗粒饲料,比例为 3:7,在阴凉处风干后储存备用。前期投喂 1.5 mm 粒径饲料,后期投喂 2.0 mm 粒径饲料。

表 1 南极磷虾粉和鱼粉营养成分(干物质)

营养水平 nutrient levels	磷虾粉 krill meal	鱼粉 fish meal
粗蛋白质/% crude protein	61.91	71.32
粗脂肪/% crude lipid	10.46	9.65
粗灰分/% crude ash	14.92	16.40
氟/(mg/kg) fluorine	945.63	65.68

注:粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分和氟含量均为实测值,下同
Notes: Crude protein, crude lipid, crude ash and the content of fluorine were measured values, the same below

1.2 饲养与管理

养殖实验在湖南省娄底市车田江水库的实验网箱中进行,将驯化好的黄颡鱼饥饿 24 h 后,挑选大小均匀、体质健康的黄颡鱼 [(10.51±0.13) g],进行随机分组。共 5 个处理组,每个处理组设置 3 个重复,共 15 个网箱 (1.5 m×1.5 m×1.5 m),每个网箱放养 50 尾。每天投喂 2 次 (6:30, 18:30),

表 2 饲料组成及营养水平(干物质)

Tab. 2 Composition of the diets and nutrition

项目 items	level (dry matter)					%
	组别 groups					
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10	
原料 ingredients						
鱼粉 fish meal	30.00	27.50	25.00	22.50	20.00	
磷虾粉 krill meal	0.00	2.88	5.76	8.64	11.52	
豆粕 soybean meal	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	
棉籽粕 cottonseed meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
菜籽粕 rapeseed meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
玉米蛋白粉 corn gluten meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
啤酒酵母 brewer yeast	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
鱼油 fish oil	1.85	1.79	1.73	1.67	1.61	
胆碱 choline	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
预混料 vitamin and mineral premix ¹	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	
α-淀粉 α-starch	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	
面粉 wheat flour	10.41	10.09	9.77	9.45	9.13	
抗氧化剂 antioxidant ²	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
防霉剂 mould inhibitor ³	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
营养水平 nutrient levels						
粗蛋白质 crude protein	37.50	37.61	37.73	37.84	37.95	
粗脂肪 crude lipid	4.76	4.74	4.73	4.71	4.69	
粗灰分 crude ash	7.71	7.73	7.75	7.79	7.78	

注:1. 预混料为每千克饲料提供氯化钾 200 mg, 碘化钾(1%) 60 mg, 六水氯化钴(1%) 50 mg, 五水硫酸铜 30 mg, 一水硫酸亚铁 400 mg, 一水硫酸锌 400 mg, 一水硫酸锰 150 mg, 五水亚硒酸钠(1%) 65 mg, 一水硫酸镁 2 000 mg, 沸石粉 3 645.85 mg, 维生素B₁ 12 mg, 核黄素 12 mg, 维生素B₆ 8 mg, 维生素B₁₂ 0.05 mg, 维生素K₃ 8 mg, 肌醇 100 mg, 泛酸 40 mg, 烟酸 50 mg, 叶酸 5 mg, 生物素 0.8 mg, 维生素A 25 mg, 维生素D 35 mg, 维生素E 50 mg, 维生素C 100 mg, 乙氧基喹啉 150 mg, 面粉 2 434.15 mg; 2. 抗氧化剂主要成分是乙氧基喹啉; 3. 防霉剂主要成分是丙酸钙

Notes: 1. The premix provided the following per kg of diets KCl 200 mg, KI (1%) 60 mg, CoCl₂·6H₂O (1%) 50 mg, CuSO₄·5H₂O 30 mg, FeSO₄·H₂O 400 mg, ZnSO₄·H₂O 400 mg, MnSO₄·H₂O 150 mg, Na₂SeO₃·5H₂O (1%) 65 mg, MgSO₄·H₂O 2 000 mg, zeolite power 3 645.85 mg, VB₁ 12 mg, riboflavin 12 mg, VB₆ 8 mg, VB₁₂ 0.05 mg, VK₃ 8 mg, inositol 100 mg, pantothenic acid 40 mg, niacin acid 50 mg, folic acid 5 mg, biotin 0.8 mg, VA 25 mg, VD 35 mg, VE 50 mg, VC 100 mg, ethoxyquin 150 mg, wheat flour 2 434.15 mg; 2. The main component of antioxidant is ethoxyquin; 3. The main component of mould inhibitor is calcium propionate

以黄颡鱼体质量的 2%~5% 投喂, 10 min 内吃完为宜, 每 3 天调整投饵量, 养殖实验持续 8 个星期。每天做好养殖记录(水温、死鱼等情况)。

1.3 样本采集与测定方法

养殖实验结束时, 禁食 24 h, 对各网箱中黄颡鱼进行记数、称重, 计算生长指标。从各实验箱随机取 8 尾黄颡鱼, 用丁香油进行麻醉, 1 mL

表3 实验饲料氨基酸组成

Tab. 3 Amino acids composition of the experimental diets mg/g

氨基酸 amino acid	组别 groups				
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10
丝氨酸 Ser	11.22	11.59	11.95	12.32	12.68
酪氨酸 Tyr	8.64	9.09	9.54	9.98	10.43
脯氨酸 Pro	12.68	12.88	13.08	13.28	13.49
甘氨酸 Gly	17.31	17.22	17.13	17.04	16.94
天冬氨酸 Asp	16.98	17.60	18.23	18.85	19.48
谷氨酸 Glu	50.32	50.61	50.90	51.19	51.47
丙氨酸 Ala	15.24	15.43	15.63	15.83	16.02
半胱氨酸 Cys	2.15	2.64	3.14	3.64	4.13
赖氨酸 Lys	18.95	19.48	20.01	20.54	21.08
苏氨酸 Thr	12.30	12.57	12.84	13.12	13.39
蛋氨酸 Met	4.68	4.74	4.80	4.87	4.93
缬氨酸 Val	13.55	13.87	14.18	14.50	14.81
异亮氨酸 Ile	12.45	12.77	13.10	13.42	13.75
亮氨酸 Leu	22.78	23.21	23.64	24.07	24.50
苯丙氨酸 Phe	12.99	13.35	13.72	14.09	14.46
色氨酸 Trp	0.53	0.76	0.99	1.22	1.45
组氨酸 His	6.91	7.16	7.42	7.67	7.93
精氨酸 Arg	19.16	19.66	20.16	20.66	21.16
ΣAA	258.83	264.65	270.47	276.29	282.10
ΣEAA	124.29	127.58	130.87	134.16	137.46
ΣNEAA	134.54	137.07	139.59	142.12	144.65
ΣDAA	99.85	100.87	101.88	102.90	103.92

注: ΣAA. 氨基酸总量; ΣEAA. 必需氨基酸总量; ΣNEAA. 非必需氨基酸总量; ΣDAA. 呈味氨基酸总量, 下同

Notes: ΣAA. total amino acids; ΣEAA. total essential amino acids; ΣNEAA. total noessential amino acids; ΣDAA. total delicious amino acids, the same below

注射器尾静脉取血, 将血液混合并置于无菌离心管中, 4 °C 静置过夜, 3 000 r/min 离心 10 min, 取上层血清置于-80 °C 冰箱保存备用。每箱随机选取 6 尾黄颡鱼测体长、体质量, 在冰盘上迅速解剖并分离内脏团、肝脏, 肠道, 称量肝重、内脏重, 并用冷冻的去离子水冲洗剔除肠道周围脂肪和内容物, 取中肠放入 1.5 mL 离心管中, 编号并标记, 放入-80 °C 冰箱保存备用, 同时取 3 尾鱼的背部肌肉 (0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm) 测定肉质, 另取 3 尾鱼的肌肉放入-20 °C 冰箱冰冻用于测定水解氨基酸含量。每箱取 3 尾黄颡鱼置于-20 °C 冰箱冰冻作全鱼样品, 用于体成分的测定。

1.4 检测指标与方法

生长指标

存活率 (survival rate, SR, %)= $N_t/N_0 \times 100\%$

增重率 (weight gain rate, WGR, %)= $(W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$

饲料系数 (feed conversion ratio, FCR)= $W_f / (W_t - W_0)$

肥满度 (condition factor, CF, g/cm³)= $W/L^3 \times 100$
肝体比 (hepatosomatic index, HSI, %)= $W_h / W \times 100\%$

脏体比 (viscerosomatic index, VSI, %)= $W_v / W \times 100\%$

式中, N_t 为终末尾数, N_0 为初始尾数, W_0 为初始体质量 (g), W_t 为终末体质量 (g), t 为饲喂天数 (d), W_f 为摄入饲料量 (g), W_h 为实验鱼肝脏重 (g), W_v 为实验鱼内脏重 (g), L 为实验鱼体长 (cm)。

体成分测定 鱼体水分测定采用在 105 °C 的温度下于烘箱烘干至恒重的方法 (GB/T 6435—2006); 粗脂肪是使用索式抽提法将样品包在滤纸中用乙醚抽提的方法 (GB/T 6433—2006); 粗灰分采用马弗炉 550 °C 灼烧至恒重的方法 (GB/T 6438—2007); 粗蛋白质是使用福斯消煮仪将样品消煮后再用福斯 8400 全自动凯氏定氮仪进行蛋白质测定; 氟含量的测定采用电极法, 取 1 g 样品用 10 mL 1 mol/L 高氯酸在烧瓶中消化 2 h, 随后将所有反应溶液转移到 50 mL 容量瓶中, 加入 25 mL TISAB 缓冲液, 最后用去离子水固定其体积, 最后用氟离子选择复合电极 (INESA, PXSJ, 中国上海) 测定样品中的氟含量。

肠道消化酶测定 测定前将样品解冻, 淀粉酶和脂肪酶用生理盐水进行匀浆, 胰蛋白酶用匀浆介质进行匀浆, 用离心机 3 500 r/min, 离心 10 min。取上清液保存待测, 然后用南京建成生物有限公司试剂盒进行测定, 仪器为分光光度计 UV-5200 型。

血清免疫指标测定 黄颡鱼血清中的碱性磷酸酶 (AKP)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和丙二醛 (MDA) 按照南京建成生物工程研究所试剂盒上的要求进行检测。免疫球蛋白 M (IgM)、补体 3 (C3)、补体 4 (C4) 指标按照浙江伊利康生物技术有限公司试剂盒的要求进行检测。

肌肉质构测定 使用 TPA 软件 (TMS-PRO, FTC, USA) 测量肌肉硬度、黏附性、凝聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性等质构参数。测试条件包括连续 2 次以 30 mm/min 的恒速压缩, 变形为原始长度的 60%, 初始力为 0.1 N。

肌肉水解氨基酸测定 参照国标 (GB/5009.124—2003) 食品中氨基酸的测定方法。将待

测肌肉样品干燥, 取 100 mg 样品置于水解管, 加入 5 mL 盐酸 (6 mg/L), 封住水解管管口, 在 110 °C 恒温下干燥水解 22 h 后, 取出冷却, 打开水解管, 将水溶液过滤, 定容至 100 mL 后, 取 1 mL 稀释至 10 mL, 取样上机分析 (氨基酸自动分析仪, A300, 德国)。

1.5 统计与分析

实验利用 Excel 2019 进行统计数据, 使用 SPSS 19.0 统计软件做单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 如果组间差异显著 ($P < 0.05$), 则作 Duncan 氏多重比较分析, 实验数据用平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示。

2 结果

2.1 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、全鱼体成分及肠道消化酶的影响

磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼增重率、饲料系数、存活率以及肝体比和肥满度均没有显著影响 ($P > 0.05$), 但 KM2.5 组脏体比显著升高 ($P < 0.05$)。饲料中磷虾粉替代鱼粉, 对黄颡鱼鱼体水分、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分无显著影响 ($P > 0.05$)。各饲料组黄颡鱼肠道淀粉酶和脂肪酶活性无显著影响 ($P > 0.05$), 但磷虾粉替代鱼粉显著降低了肠道胰蛋白酶活性 ($P < 0.05$) (表 4~表 6)。

表 4 南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能的影响

Tab. 4 Effects of fish meal replaced with krill meal on growth performance of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

指标 indexes	组别 groups				
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10
初始均重/g IBW	10.53 \pm 0.01	10.51 \pm 0.01	10.47 \pm 0.02	10.52 \pm 0.03	10.51 \pm 0.01
终末均重/g FBW	53.08 \pm 3.13	56.79 \pm 2.44	52.95 \pm 6.43	52.44 \pm 7.20	51.12 \pm 6.13
存活率/% SR	99.00 \pm 1.00	98.00 \pm 0.00	100.00 \pm 0.00	99.00 \pm 1.00	98.00 \pm 0.00
增重率/% WGR	404.70 \pm 22.63	440.46 \pm 22.85	405.63 \pm 61.88	398.90 \pm 69.71	386.54 \pm 52.14
饲料系数 FCR	1.38 \pm 0.13	1.29 \pm 0.12	1.36 \pm 0.36	1.51 \pm 0.46	1.49 \pm 0.29
肝体比/% HSI	1.95 \pm 0.14	2.07 \pm 0.11	1.93 \pm 0.12	1.88 \pm 0.09	2.09 \pm 0.13
脏体比/% VSI	13.64 \pm 0.82 ^a	16.80 \pm 0.37 ^b	14.91 \pm 0.67 ^{ab}	12.61 \pm 1.72 ^a	12.94 \pm 0.52 ^a
肥满度/(g/cm ³) CF	1.83 \pm 0.08	1.86 \pm 0.03	1.78 \pm 0.10	1.79 \pm 0.04	1.69 \pm 0.06

注: 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Notes: In the same row, values with different lowercase superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), the same below

表 5 南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼体成分的影响

Tab. 5 Effects of fish meal replaced with krill meal on the composition of whole fish body of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

体组成 body compositions	组别 groups					%
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10	
水分 moisture	72.45 \pm 0.50	72.67 \pm 0.53	71.06 \pm 0.08	70.85 \pm 0.96	71.17 \pm 0.16	
粗蛋白质 crude protein	48.79 \pm 0.20 ^{ab}	49.71 \pm 0.19 ^a	48.65 \pm 0.49 ^b	48.06 \pm 0.12 ^b	48.04 \pm 0.21 ^b	
粗脂肪 crude lipid	29.70 \pm 0.32	29.66 \pm 0.56	29.58 \pm 0.40	30.72 \pm 0.32	30.25 \pm 0.35	
粗灰分 crude ash	11.36 \pm 0.27	11.31 \pm 0.08	11.50 \pm 0.19	11.75 \pm 0.04	11.77 \pm 0.09	

表 6 南极磷虾粉对黄颡鱼肠道消化酶活性的影响

Tab. 6 Effects of fish meal replaced with krill meal on digestive enzyme activities of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

消化酶活性 digestive enzyme activities	组别 groups				
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10
胰蛋白酶/(U/mg prot) trypsin	407.99 \pm 19.51 ^b	248.44 \pm 12.32 ^a	265.05 \pm 2.48 ^a	230.05 \pm 12.37 ^a	240.74 \pm 12.92 ^a
淀粉酶/(U/g prot) amylase	1.05 \pm 0.07	1.04 \pm 0.02	1.03 \pm 0.00	1.04 \pm 0.04	1.11 \pm 0.01
脂肪酶/(U/g prot) lipase	60.88 \pm 0.30	59.70 \pm 2.96	60.18 \pm 2.41	62.07 \pm 1.23	64.06 \pm 4.45

2.2 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼血清免疫指标的影响

磷虾粉替代鱼粉有使黄颡鱼血清中补体 3 (C3)、补体 4 (C4) 和免疫球蛋白 M (IgM) 含量升高的趋势, C3 含量及 KM5 组 IgM 含量显著高于 KM0 组 ($P<0.05$)。血清中碱性磷酸酶 (AKP) 活性则呈下降趋势, 当磷虾粉替代比例超过 5% 时, AKP 活性显著降低 ($P<0.05$)。饲料中磷虾粉替代鱼粉, 对黄颡鱼血清中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性及丙二醛 (MDA) 含量无显著影响, 但可以提高 SOD 活性 ($P>0.05$) (表 7)。

2.3 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼肌肉质构及肌肉水解氨基酸的影响

各替代组间黄颡鱼肌肉内聚性均高于 KM0 组, 其中 KM10 组内聚性显著升高 ($P<0.05$)。随着磷虾粉替代比例的增加, 黄颡鱼肌肉黏附性、弹性、胶黏性呈下降趋势, 硬度、咀嚼性呈先上升后下降趋势, 与 KM0 组相比, KM10 组黄颡鱼肌肉黏附性、弹性、胶黏性显著降低 ($P<0.05$) (表 8)。随

着磷虾粉替代鱼粉比例的上升, 黄颡鱼肌肉水解氨基酸中呈味氨基酸和总非必需氨基酸含量呈先上升后下降趋势 (表 9)。

3 讨论

3.1 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长性能及体成分的影响

已有研究表明, 南极磷虾粉替代鱼粉对大规格银鲌 (*Pampus argenteus*) 生长性能及成活率均无显著影响^[15]。而在圆斑星鲈中发现, 磷虾粉替代 10%~40% 鱼粉能够显著提高其生长性能^[8]。本实验发现, 磷虾粉替代饲料中 2.5%~10% 鱼粉对黄颡鱼生长性能和成活率无显著影响, 但替代量为 2.5% 时可以提高黄颡鱼增重率, 可能与磷虾粉中含有的核苷酸、谷氨酸、脯氨酸、甘氨酸等小分子物质有关^[3]。但随着磷虾粉替代比例的增加, 黄颡鱼增重率呈下降的趋势, 这与杨程等^[15]在银鲌中的研究类似。这可能的原因: 第一, 和磷虾粉中氟的含量有关, 过量的氟对鱼体有一定毒害

表 7 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼血清免疫指标的影响

Tab. 7 Effects of dietary fish meal replaced with krill meal on serum immunity indexes of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

指标 indexes	组别 groups				
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10
补体3/(mg/L) C3	238.71±13.74 ^a	373.64±29.74 ^b	414.62±11.78 ^b	453.79±53.17 ^b	386.89±22.96 ^b
补体4/(mg/L) C4	93.64±10.34	122.82±2.02	119.74±7.04	110.00±3.93	121.33±14.66
免疫球蛋白M/(mg/L) IgM	271.71±16.26 ^a	313.44±14.89 ^{ab}	342.02±14.45 ^b	303.81±10.62 ^{ab}	308.26±4.41 ^{ab}
碱性磷酸酶/(金氏单位/dL) AKP	3.15±0.12 ^b	3.12±0.09 ^b	2.79±0.01 ^a	2.68±0.08 ^a	2.66±0.08 ^a
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	62.31±2.81	67.67±4.23	64.36±3.02	67.27±6.83	68.27±4.23
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	1.93±0.10	1.94±0.33	1.88±0.07	1.82±0.10	1.60±0.13
丙二醛/(nmol/mL) MDA	9.08±0.56	8.79±0.27	9.08±0.31	10.43±0.68	9.69±0.58

表 8 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼肌肉质构参数的影响

Tab. 8 Effects of dietary fish meal replaced with krill meal on textural parameters of the muscle of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

质构参数 textural parameters	组别 groups				
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10
硬度 hardness	5.89±0.56	6.09±0.52	5.88±0.71	5.20±0.50	5.16±0.38
黏附性 adhesiveness	0.060 0±0.004 0 ^c	0.060 0±0.004 1 ^c	0.040 0±0.005 0 ^b	0.030 0±0.003 4 ^{ab}	0.020 0±0.002 3 ^a
内聚性 cohesiveness	0.520±0.023 ^a	0.570±0.026 ^{ab}	0.580±0.024 ^{ab}	0.570±0.030 ^{ab}	0.630±0.019 ^b
弹性 springiness	2.10±0.07 ^b	1.97±0.08 ^b	1.95±0.08 ^b	1.94±0.12 ^b	1.55±0.05 ^a
胶黏性 gumminess	4.95±0.17 ^b	4.75±0.43 ^b	4.48±0.39 ^b	4.45±0.34 ^b	3.01±0.12 ^a
咀嚼性 chewiness	4.95±0.17 ^b	5.13±0.45 ^b	5.47±0.55 ^b	4.45±0.34 ^b	3.01±0.12 ^a

表 9 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼肌肉水解氨基酸的影响
 Tab. 9 Effects of dietary fish meal replaced with krill meal on hydrolyzed amino acids of the muscle of juvenile yellow catfish (*P. fulvidraco*)

氨基酸 amino acid	组别 groups					ug/g
	KM0	KM2.5	KM5	KM7.5	KM10	
丝氨酸 Ser	283.26±5.72 ^c	283.72±5.42 ^c	257.37±1.81 ^b	235.83±3.43 ^a	227.40±5.05 ^a	
酪氨酸 Tyr	11.30±1.45	11.39±0.09	18.21±0.31	15.35±3.48	8.94±0.76	
脯氨酸 Pro	269.86±9.27 ^b	212.72±4.32 ^a	254.13±1.89 ^b	259.54±1.99 ^b	264.51±3.34 ^b	
甘氨酸 Gly	405.65±18.86 ^{bc}	438.06±8.36 ^c	340.45±34.80 ^{ab}	342.98±2.83 ^{ab}	292.51±16.83 ^a	
天冬氨酸 Asp	69.23±2.56	70.54±6.39	62.35±2.05	66.35±0.79	66.69±4.33	
谷氨酸 Glu	348.01±28.01 ^{abc}	426.00±8.75 ^c	386.79±3.37 ^{bc}	309.96±36.97 ^{ab}	295.20±8.10 ^a	
丙氨酸 Ala	358.37±9.23 ^b	369.80±10.00 ^b	344.08±8.28 ^b	355.10±3.16 ^b	309.16±1.77 ^a	
赖氨酸 Lys	222.45±3.82 ^d	198.60±2.07 ^b	216.58±2.71 ^{cd}	205.54±2.89 ^{bc}	174.96±3.71 ^a	
苏氨酸 Thr	204.17±2.01	202.42±4.22	199.35±10.35	191.86±1.96	183.01±1.94	
蛋氨酸 Met	13.65±0.02 ^{ab}	12.93±0.03 ^a	14.60±0.30 ^b	18.09±0.54 ^c	20.09±0.50 ^d	
缬氨酸 Val	41.51±0.85	38.98±1.03	38.16±0.39	38.42±0.36	38.37±0.46	
异亮氨酸 Ile	24.95±2.30	20.10±0.05	18.75±1.20	18.51±0.46	21.16±0.44	
亮氨酸 Leu	50.13±2.42 ^b	41.00±0.38 ^a	45.02±2.82 ^{ab}	38.90±1.25 ^a	41.64±0.56 ^a	
苯丙氨酸 Phe	16.79±0.66 ^{ab}	20.43±0.23 ^c	16.78±1.29 ^{ab}	14.73±0.62 ^a	18.14±0.59 ^{bc}	
色氨酸 Trp	3.31±0.27 ^{bc}	3.39±0.03 ^{bc}	2.80±0.21 ^{ab}	2.67±0.13 ^a	3.54±0.04 ^c	
组氨酸 His	353.46±20.72	288.91±7.31	302.47±27.28	331.17±1.53	306.66±31.96	
精氨酸 Arg	128.47±4.99 ^a	162.23±2.52 ^b	146.64±7.86 ^b	124.21±1.20 ^a	112.98±0.07 ^a	
ΣAA	2 804.58±10.18 ^c	2 801.00±55.83 ^c	2 664.50±22.74 ^{bc}	2 569.23±22.78 ^b	2 384.90±72.82 ^a	
ΣEAA	1 058.89±26.93	988.98±12.50	1 001.16±25.05	984.11±9.45	920.54±36.19	
ΣNEAA	1 745.68±37.11 ^c	1 812.00±43.33 ^c	1 663.38±47.78 ^{bc}	1 585.12±32.23 ^{ab}	1 464.42±36.63 ^a	
ΣDAA	1 181.20±53.55 ^{bc}	1 304.40±33.50 ^c	1 133.66±44.39 ^b	1 074.40±30.19 ^{ab}	963.57±27.49 ^a	
ΣEAA/ΣAA	0.38±0.01	0.35±0.00	0.38±0.01	0.38±0.01	0.39±0.00	
ΣEAA/ΣNEAA	0.61±0.03	0.55±0.01	0.60±0.03	0.62±0.02	0.63±0.01	
ΣDAA/ΣAA	0.42±0.02	0.47±0.00	0.43±0.01	0.42±0.01	0.40±0.00	

注: 半胱氨酸未检测
 Notes: Cys not detected

作用^[16]; 第二, 磷虾粉中含有的几丁质会影响饲料在鱼体内的消化吸收, 降低消化酶活性^[17], 本实验肠道消化酶结果也表明, 磷虾粉替代鱼粉显著降低了肠道胰蛋白酶活性。

3.2 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼血清免疫指标的影响

鱼类的免疫系统由营养物质调节, 血液是机体免疫发生的重要内环境, 血清中免疫相关指标的变化对于反映机体生理状态具有重要意义。在鱼类体液免疫中, 免疫球蛋白具有重要的功能, 目前发现的免疫球蛋白以 IgM 亚型分布最多, 而 IgM 不仅是适应性体液免疫反应中出现的第一种免疫球蛋白, 而且还是天然免疫系统的一道有

效屏障^[18]。C3 和 C4 是补系统的主要组成部分^[19]。本研究结果表明, 磷虾粉部分替代鱼粉, 能够显著提高黄颡鱼血清中 C3 和 IgM 的含量, C4 含量有上升的趋势, 说明磷虾粉替代部分鱼粉可提高黄颡鱼的免疫能力。AKP 是一种磷酸水解酶, 能够水解外源异物的磷酸酯, 破坏外部成分的活性, 发挥免疫功能, 被认为是水产动物中重要的非特异性指标, 是反映水生动物健康状况的评价指标^[20]。本研究中, 磷虾粉替代饲料中 2.5% 鱼粉对 AKP 活性无负面影响, 当其大于 5% 时, AKP 活性显著降低。这与在大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 的研究相似, 当磷虾粉替代比例提高时, AKP 活性降低, 这可能与磷虾粉中含有的氟有关。

此外, 机体免疫系统的整体抗氧化能力与健

康程度也密切相关。在机体受到损伤条件下会不断产生活性氧自由基 (ROS), 为了避免或修复这些化合物可能对组织造成的损害, 机会采取一定的保护措施, 例如增强关键的抗氧化酶活性 (如 SOD 和 CAT 等)^[21]。有研究发现, 在饲料中添加南极磷虾粉可显著提高大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 血清中 SOD、CAT 和谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx) 的活性, 进而提高机体抗氧化能力^[22]; 而也有研究表明, 不同磷虾粉水平对大菱鲆血清中总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 活性无显著影响^[23]。同样, 本研究结果表明, 磷虾粉替代部分鱼粉对黄颡鱼血清中 SOD、CAT 活性和 MDA 含量无负面影响, 并可以提高 SOD 活性, 这表明磷虾粉替代鱼粉在一定程度上可以提高抗氧化能力, 推测原因可能是摄入磷虾粉饲料的过程中摄入了虾青素, 在一定程度上增强了免疫能力。

3.3 磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼肌肉品质的影响

鱼类肌肉的质构参数是用于评价鱼肉新鲜度的重要指标, 它取决于硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性、咀嚼性等参数^[24]。肌肉质构也是消费者重点关注的肉质指标, 坚硬与有弹性的鱼肉往往更受到消费者青睐^[25]。Suárez 等^[26]的研究表明, 鱼肉的硬度与肌肉组织中胶原蛋白以及脂肪含量直接相关。肌球蛋白的存在有助于维持鱼肉凝胶网络的弹性, 进而保持肌肉的弹性^[27]。黏附性、胶黏性、咀嚼性是用来表示肌肉承受形变能力的参数^[28]。本实验结果表明, 随着磷虾粉替代鱼粉比例上升, 黄颡鱼肌肉的内聚性呈上升趋势, 肌肉的黏附性、弹性、胶黏性呈下降趋势, 肌肉的硬度和咀嚼性呈现先上升后下降的趋势, 这表明适量磷虾粉替代鱼粉可以改善鱼肉质构, 但过量磷虾粉替代鱼粉时反而会影晌黄颡鱼鱼肉质构。这与 Shi 等^[29]在黄鳝 (*Monopterus albus*) 中以及 Wei 等^[6]在三倍体虹鳟中的研究结果基本一致。可能是因为南极磷虾粉中含有较多的氟, 氟在组织中的积累取决于盐度和鱼类种类, 氟的毒性随着盐度的增加而降低^[30]。而黄颡鱼长期生活在淡水中, 肌肉等组织容易积累高比例的氟, 高浓度的氟会引起黄颡鱼胶原蛋白降解, 进而降低肌肉质构参数。

肌肉呈味氨基酸含量是决定鱼类肌肉味觉的重要指标^[7]。谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸等非必需氨基酸是决定肌肉鲜甜味的重要呈味

氨基酸^[31]。本研究发现, 随着磷虾粉替代鱼粉比例的上升, 黄颡鱼肌肉必需氨基酸含量各组间没有显著差异, 而肌肉呈味氨基酸含量呈先上升后下降趋势。上述结果表明磷虾粉替代部分鱼粉可以增加肌肉中呈味氨基酸的含量, 增加肌肉风味, 而过量的磷虾粉替代鱼粉会引起一定负面效果。

综上所述, 在本实验条件下, 磷虾粉替代鱼粉影响黄颡鱼肌肉质构, 当替代比例在 50% 以内时, 可以促进黄颡鱼的生长, 增强免疫功能并提高肌肉呈味氨基酸含量; 但是当替代比例超过 50% 时会降低黄颡鱼生长性能, 同时降低肌肉呈味氨基酸含量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018 - meeting the sustainable development goals [EB/OL]. Rome: FAO, 2018: 184; ISBN 978-92-5-130562-1.
- [2] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. A reappraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.
- [3] Jiang Q X, Li S J, Xu Y S, et al. Nutrient compositions and properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) muscle and processing by-products[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2016, 25(3): 434-443.
- [4] King M F, Boyd L C, Sheldon B W. Effects of phospholipids on lipid oxidation of a salmon oil model system[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1992, 69(9): 953.
- [5] Miao F P, Geng Y H, Lu D Y, et al. Stability and changes in astaxanthin ester composition from *Haematococcus pluvialis* during storage[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(6): 1181-1189.
- [6] Wei Y T, Chen H, Jia M X, et al. Effects of dietary Antarctic krill *Euphausia superba* meal on growth performance and muscle quality of triploid rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* farmed in sea water[J]. *Aquaculture*, 2019, 509: 72-84.
- [7] Wei Y T, Shen H H, Xu W Q, et al. Replacement of dietary fishmeal by Antarctic krill meal on growth performance, intestinal morphology, body composition and

- organoleptic quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2019, 512: 734281.
- [8] 严俊丽, 陈四清, 常青, 等. 南极磷虾粉替代鱼粉对圆斑星鲈幼鱼生长性能、血清和肝脏生化指标及血清非特异性免疫指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(11): 3503-3510.
- Yan J L, Chen S Q, Chang Q, *et al.* Effects of Antarctic krill meal replacing fish meal on growth performance, serum and liver biochemical indices and serum non-specific immune indices of juvenile spotted halibut (*Verasper variegatus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(11): 3503-3510 (in Chinese).
- [9] Ringø E, Sperstad S, Myklebust R, *et al.* The effect of dietary krill supplementation on epithelium-associated bacteria in the hindgut of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): a microbial and electron microscopical study[J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37(16): 1644-1653.
- [10] Nunes A J P, Sá M V C, Sabry-Neto H. Growth performance of the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, fed on practical diets with increasing levels of the Antarctic krill meal, *Euphausia superba*, reared in clear- versus green-water culture tanks[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(2): e511-e520.
- [11] 周露阳, 吴代武, 高敏敏, 等. 鱼溶浆、酶解鱼溶浆和酶解鱼浆完全替代鱼粉对黄颡鱼生长的影响[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(3): 504-516.
- Zhou L Y, Wu D W, Gao M M, *et al.* The effects of fish meal replacement on growth performance of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(3): 504-516 (in Chinese).
- [12] 王国霞, 陈冰, 孙育平, 等. 脱脂亮斑扁角水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、营养素沉积率、血清生化指标和消化酶活性的影响[J]. *水产学报*, 2020, 44(6): 987-998.
- Wang G X, Chen B, Sun Y P, *et al.* Effects of replacing fish meal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal on growth performance, nutrient retention, serum biochemical parameters and digestive enzymes activity of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(6): 987-998 (in Chinese).
- [13] Xiao X P, Jin P, Zheng L Y, *et al.* Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal protein as a fish-meal replacement on the growth and immune index of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(4): 1569-1577.
- [14] Wu D W, Zhou L Y, Gao M M, *et al.* Effects of stickwater hydrolysates on growth performance for yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Aquaculture*, 2018, 488: 161-173.
- [15] 杨程, 高权新, 覃干景, 等. 南极磷虾粉替代鱼粉对大规模银鲈生长性能、性腺指数及肌肉氨基酸与脂肪酸组成的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(10): 4877-4884.
- Yang C, Gao Q X, Qin G J, *et al.* Effects of Antarctic krill meal replacing fish meal on growth performance, gonadal index, amino acid and fatty acid composition in muscle of large size *Pampus argenteus*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(10): 4877-4884 (in Chinese).
- [16] Yoshitomi B, Aoki M, Oshima S I, *et al.* Evaluation of krill (*Euphausia superba*) meal as a partial replacement for fish meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(1): 440-446.
- [17] Rodde R H, Einbu A, Vårum K M. A seasonal study of the chemical composition and chitin quality of shrimp shells obtained from northern shrimp (*Pandalus borealis*)[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71(3): 388-393.
- [18] 叶剑敏, 王玉红, 丁明媚, 等. 硬骨鱼IgM结构和功能及其体液免疫应答[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(5): 1-8.
- Ye J M, Wang Y H, Ding M M, *et al.* Teleost IgM structure, function and humoral immune response[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 47(5): 1-8 (in Chinese).
- [19] Mori K, Nakanishi T, Suzuki T, *et al.* Defense mechanisms in invertebrates and fish[J]. *Tanpakushitsu Kakusan Koso. Protein, Nucleic Acid, Enzyme*, 1989, 34(3): 214-223.
- [20] Han T, Wang J T, Li X Y, *et al.* Effects of dietary cholesterol levels on the growth, molt performance, and immunity of juvenile swimming crab, *Portunus trituberculatus*[J]. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2015, 67: 1065-1069.
- [21] Liu G, Ye Z Y, Liu D Z, *et al.* Influence of stocking density on growth, digestive enzyme activities, immune responses, antioxidant of *Oreochromis niloticus* finger-

- lings in biofloc systems[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 81: 416-422.
- [22] 朱旺明, 谭永刚, 马卉佳, 等. 不同水平南极磷虾粉等量替代鱼粉对大口黑鲈生长性能及部分生理生化指标的影响[J]. *中国饲料*, 2019(15): 85-92.
Zhu W M, Tan Y G, Ma H J, *et al.* Effects of different levels of krill meal replacement with fish meal on growth performance and some physiological and biochemical indexes of Largemouth Bass[J]. *China Feed*, 2019(15): 85-92 (in Chinese).
- [23] 孔凡华, 梁萌青, 吴立新, 等. 南极磷虾粉对大菱鲆生长、非特异性免疫及氟残留的影响[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33(1): 54-60.
Kong F H, Liang M Q, Wu L X, *et al.* Effect of different level of Antarctic krill meal on growth, non-specific immunity and fluoride retention in diets of turbot *Scophthalmus maximus*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(1): 54-60 (in Chinese).
- [24] Cheng J H, Sun D W, Han Z, *et al.* Texture and structure measurements and analyses for evaluation of fish and fillet freshness quality: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, 13(1): 52-61.
- [25] Imsland A K D, Roth B, Døskeland I, *et al.* Flesh quality of Atlantic salmon smolts reared at different temperatures and photoperiods[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50(7): 1795-1801.
- [26] Suárez M D, Abad M, Ruiz-Cara T, *et al.* Changes in muscle collagen content during post mortem storage of farmed sea bream (*Sparus aurata*): influence on textural properties[J]. *Aquaculture International*, 2005, 13(4): 315-325.
- [27] Chan J K, Gill T A, Thompson J W, *et al.* Herring surimi during low temperature setting, physicochemical and textural properties[J]. *Journal of Food Science*, 1995, 60(6): 1248-1253.
- [28] Varghese T, Mathew S. Assessment of the textural variation of iced stored *Anabas testudineus* (Bloch, 1792) muscle tissue with emphasis on their collagen and myofibrillar protein content[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(8): 2512-2518.
- [29] Shi Y, Zhong L, Zhang J Z, *et al.* Substitution of fish meal with krill meal in rice field eel (*Monopterus albus*) diets: effects on growth, immunity, muscle textural quality, and expression of myogenic regulation factors[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 280: 115047.
- [30] Gong Y Y, Huang Y Q, Gao L J, *et al.* Substitution of krill meal for fish meal in feed for Russian Sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*[J]. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2016, 68(2016): 1319-1325.
- [31] Wongso S, Yamanaka H. Extractive components of the adductor muscle of Japanese baking scallop and changes during refrigerated storage[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(5): 772-776.

Effects of replacement of fish meal by Antarctic krill meal on growth performance, immune indexes and muscle quality of *Pelteobagrus fulvidraco*

XIE Kai¹, SHI Yong¹, HE Hui^{1,2}, MA Xuekun², LI Zhaolin²,
ZHONG Lei¹, WU Tongqiang¹, ZHANG Junzhi¹, HU Yi^{1*}

(1. Hunan Engineering Technology Research Center of Featured Aquatic Resources Utilization,

Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Guangdong Yuehai Feed Group Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China)

Abstract: An 8-week feeding experiment was conducted to evaluate the effects of replacing fish meal (FM) with krill meal (KM) on the growth performance, serum immune indexes and muscle quality of *Pelteobagrus fulvidraco* [initial body weight (10.51±0.13) g]. Five experimental diets consisted of different proportions of FM that were replaced with KM, corresponding to dietary inclusion levels of 0% (KM0), 2.5% (KM2.5), 5% (KM5), 7.5% (KM7.5), and 10% (KM10). The results showed that there was no significant difference in growth performance, survival rate, intestinal amylase and lipase activities with the increase of the substitution proportion of krill meal. Compared with KM0 group, trypsin activity in each substitution group decreased significantly. Compared with KM0 group, the content of serum complement 3 in each substitution group increased significantly, and immunoglobulin M in KM5 group increased significantly. When the substitution level exceeded 5%, the activity of serum alkaline phosphatase decreased significantly. With the increase of the substitution ratio of krill meal, the muscle adhesiveness, springiness and gumminess decreased, the cohesiveness increased, and the hardness and chewiness increased first and then decreased. Compared with KM0 group, muscle adhesiveness, springiness and gumminess in KM10 group decreased significantly, and cohesiveness increased significantly. With the increase of the proportion of KM instead of FM, the content of total delicious amino acids and total non-essential amino acids in muscle hydrolyzed amino acids increased first and then decreased. In conclusion, the substitution of KM for FM has no negative effect on the growth performance, which can enhance immune function to a certain extent, and affect the muscle textural parameters and total delicious amino acids in the appropriate ratio.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; krill meal; growth performance; serum immune indexes; muscle quality

Corresponding author: HU Yi. E-mail: huyi740322@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32172986); University-industry-research cooperation Foundation of Guangdong Yuehai Feeds Group Co., Ltd (17066-1)