

doi: 10.7541/2022.2022.0405

大黄鱼对5种新型非粮蛋白源表观消化率的研究

张健¹ 李磊¹ 董衍邹¹ 李学山¹ 王玲¹ 宋凯¹
谭北平² 鲁康乐¹ 张春晓¹

(1. 集美大学水产学院, 厦门市饲料检测与安全评价重点实验室, 厦门 361021; 2. 广东海洋大学水产学院, 水产动物营养与饲料实验室, 湛江 524088)

摘要: 为研究大黄鱼(*Larimichthys crocea*)对乙醇梭菌蛋白、小球藻、黑水虻粉、黄粉虫粉和棉籽浓缩蛋白5种蛋白质原料的干物质、粗蛋白、粗脂肪、能量和氨基酸表观消化率, 试验选取初始体重为(154.0±5.3) g的大黄鱼1800尾, 随机分到18个浮式网箱中, 设5个试验组和1个基础组, 每组3个平行。基础组投喂基础饲料, 试验组分别投喂5种试验饲料, 试验饲料由70%基础饲料和30%试验蛋白质原料组成, 以0.1%三氧化二钇(Y_2O_3)为外源指示剂。结果显示, 大黄鱼对5种试验原料干物质的表观消化率为56.77%—75.53%(乙醇梭菌蛋白>黄粉虫粉>小球藻>黑水虻粉>棉籽浓缩蛋白); 粗蛋白的表观消化率为69.93%—89.59%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉>黄粉虫粉); 粗脂肪的表观消化率为58.58%—93.77%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>黄粉虫粉>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉); 能量的表观消化率为63.39%—84.33%(乙醇梭菌蛋白>黑水虻粉>小球藻>黄粉虫粉>棉籽浓缩蛋白); 总氨基酸的表观消化率为76.62%—93.24%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉>黄粉虫粉)。大黄鱼对各种蛋白质原料的氨基酸表观消化率与粗蛋白表观消化率变化趋势基本一致。结果表明: 乙醇梭菌蛋白是5种原料中最适合大黄鱼的蛋白源、小球藻次之, 大黄鱼对黄粉虫粉、棉籽浓缩蛋白和黑水虻粉的消化率均不佳。

关键词: 新型非粮蛋白源; 表观消化率; 大黄鱼

中图分类号: S965.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)09-1416-09



大黄鱼(*Larimichthys crocea*), 又称大黄花, 隶属硬骨鱼纲(Osteichthyes)的鲈形目(Perciformes), 石首鱼科(Sciaenidae), 黄鱼属(*Larimichthys*), 其肉质鲜美, 营养价值高, 主要分布在浙江、福建等沿海地区, 是我国东南沿海重要的养殖鱼类之一^[1]。过去, 大黄鱼的养殖主要以投喂生物饵料为主, 而生物饵料的缺点突出, 如成本过高、成分不明、供应量不稳定、易携带病原微生物、容易污染水体等^[2], 导致大黄鱼养殖业风险增加、收益减少, 在长远上限制了大黄鱼养殖业的健康发展。为了提高养殖经济效益, 大黄鱼人工配合饲料的研发刻不容缓。近年来, 由于渔业资源衰退和鱼粉需求量增加, 导致鱼粉价格上升^[3], 而鱼粉在大黄鱼饲料中的配比又较高(>40%)^[4, 5], 因而寻找价格低廉的优质蛋

白源替代鱼粉至关重要。

本试验研究了5种新型非粮蛋白源, 分别为乙醇梭菌蛋白、小球藻、黑水虻粉、黄粉虫粉和棉籽浓缩蛋白。乙醇梭菌蛋白是以炼钢废气中的一氧化碳为碳源、氨水为氮源, 通过乙醇梭菌发酵产生的一种新型微生物蛋白, 其蛋白质含量高达85%, 且具有与鱼粉相似的氨基酸组成^[6]。小球藻是一种富含蛋白质、多糖、不饱和脂肪酸、类胡萝卜素、虾青素、多种维生素和矿物质的微藻资源^[7], 而经过破壁处理的小球藻蛋白质含量高达50%, 且其营养物质更容易被吸收利用^[8]。乙醇梭菌蛋白和小球藻均属于单细胞蛋白, 也称微生物蛋白, 是从蛋白质含量较高的微生物细胞中分离出来的纯化蛋白^[9], 可通过化工产业规模化生产, 该生产模式效

收稿日期: 2022-10-08; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0900200)资助 [Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900200)]

作者简介: 张健(1997—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: zj19971024@126.com

通信作者: 张春晓, 教授; E-mail: cxzhang@jmu.edu.cn

率高,是一种“变废为宝”的绿色可持续发展模式^[10]。黑水虻是一种能将动物粪便、餐厨垃圾和其他有机废物有效转化成自身营养成分的双翅目昆虫,其本身可作为家禽、牲畜、宠物和水生经济动物的饲料原料^[11]。黑水虻粉蛋白质平均含量约为55%,必需氨基酸组成平衡,脂肪含量约为35%,可通过脱脂过程将其降至5%—9%^[12],此外黑水虻粉中还富含 ω -3多不饱和脂肪酸,使其更适合饲喂肉食性海水鱼类^[13]。黄粉虫粉是将活虫经过处死、灭菌、烘干、低温保存、加工等一系列过程而制成,是高度可持续供给的新型昆虫蛋白源^[14—16]。黄粉虫具有废物转化、节能减排的功能^[15, 16],其幼虫易繁殖,且蛋白质含量高,约为47%—60%,在畜禽和水产饲料的应用中有巨大潜力^[17, 18]。棉籽浓缩蛋白是指将脱壳的棉籽进行软化轧胚、低温烘干,其次在甲醇和正己烷混合溶剂中脱酚提油得到的一种新型植物蛋白源^[19]。其棉酚含量低,且蛋白质含量高(>60%)^[20],是一种极具开发潜力的新型非粮蛋白源。

消化率是评价饲料原料营养价值的重要依据^[21],也是饲料配方设计的考虑因素之一^[22],对于提高经济效益和促进养殖业健康的发展具有重要意义。因此,本试验通过指示剂法,分析大黄鱼对乙醇梭菌蛋白、小球藻、黑水虻粉、黄粉虫粉和棉籽浓缩蛋白的干物质、蛋白质、脂肪、能量和氨基酸表观消化率。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

基础饲料以鱼粉、鸡肉粉、豆粕、玉米蛋白粉和大豆浓缩蛋白为主要蛋白源,鱼油和豆油为主要脂肪源,以0.1%的三氧化二钇(Y_2O_3)为外源指示剂,并补充矿物质和维生素等配制基础饲料^[22],其配方见表1。5种新型非粮蛋白源分别为乙醇梭菌蛋白(河北首朗新能源有限公司)、小球藻(中国科学院水生生物研究所)、黑水虻粉(广州飞禧特生物科技有限公司)、黄粉虫粉(广州泽合成生物科技有限公司)、棉籽浓缩蛋白(新疆金兰植物蛋白有限公司),原料的营养水平和氨基酸组成分别见表2和表3。以质量分数为70%的基础饲料和30%的乙醇梭菌蛋白、小球藻、黑水虻粉、黄粉虫粉和棉籽浓缩蛋白配制成5种试验饲料。所有饲料原料均粉碎后过60目筛,并按比例称量后逐级混匀,然后加入20%的水搅拌均匀,用TSE-65双螺杆膨化机(北京现代洋工机械科技发展有限公司)制成粒径为5.0 mm的颗粒饲料,在电热鼓风干燥箱(WGL-625B,天津市

泰斯特仪器有限公司)中60℃恒温干燥12h,烘干后置于-20℃冰箱内备用。

1.2 试验设计

试验所用大黄鱼为宁德市三都澳某大黄鱼育苗场培育的同一批鱼苗,养殖试验于宁德市三都澳

表1 基础饲料组成及营养水平(干物质基础%)

Tab. 1 Composition and nutrient levels of foundational diets (dry-matter basis %)

原料Ingredient	含量Content (%)
鱼粉Fish meal ¹	25.0
鸡肉粉Chicken meal	12.0
大豆浓缩蛋白Soyprotein concentrate	5.0
豆粕Soybean meal	16.0
玉米蛋白粉Corn gluten meal	6.0
高筋面粉Wheat flour	25.4
鱼油Fish oil	2.0
豆油Soybean oil	2.0
卵磷脂Lecithin	1.5
鱿鱼膏Squid paste	2.5
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1.0
维生素预混料Vitamin premix ²	0.4
矿物质预混料Mineral premix ³	0.5
维生素C Vitamin C	0.1
氯化胆碱Choline chloride	0.5
三氧化二钇Yttrium(III)-oxide	0.1
营养水平Nutrient level ⁴	
水分Moisture	5.79
粗蛋白Crude protein	46.25
粗脂肪Crude lipid	4.45
灰分Ash	9.06
能量Gross energy (MJ/Kg)	19.06

注: ¹鱼粉为秘鲁蒸汽鱼粉(粗蛋白含量 $\geq 67\%$)。 ²维生素预混料为每千克饲料提供: 硫胺素, 25 mg; 核黄素, 45 mg; 盐酸吡哆醇, 20 mg; 维生素B₁₂, 0.1 mg; 维生素K₃, 10 mg; 肌醇, 800 mg; 泛酸钙, 60 mg; 烟酰胺, 200 mg; 叶酸, 20 mg; 生物素, 1.2 mg; 维生素A乙酸酯, 32 mg; 维生素D₃, 5 mg; α -生育酚, 120 mg; 乙氧基喹啉, 150 mg; 玉米淀粉, 1511.7 mg。 ³矿物质预混料为每千克饲料提供: 一水硫酸镁, 4000 mg; 一水硫酸锰, 50 mg; 碘化钾(1%), 100 mg; 氯化钴(1%), 100 mg; 五水硫酸铜, 20 mg; 一水硫酸亚铁, 260 mg; 一水硫酸锌, 150 mg; 亚硒酸钠(1%), 50 mg。 ⁴营养水平均为实测值

Note: ¹The fish meal is Peruvian steam dried fish meal (crude protein content $\geq 67\%$), and its quality is Japanese-grade. ²Vitamin premix provided the following per kg of diets: thiamin, 25 mg; riboflavin, 45 mg; hydrochloric acid pyridoxine, 20 mg; vitamin B₁₂, 0.1 mg; vitamin K₃, 10 mg; inositol, 800 mg; pantothenic acid, 60 mg; nicotinic acid, 200 mg; folic acid, 20 mg; biotin, 1.2 mg; retinal acetate, 32 mg; vitamin D₃, 5 mg; α tocopherol, 120 mg; ethoxy quinoline, 150 mg; microcrystalline cellulose, 1511.7 mg. ³Mineral premix provided the following per kg of diets: MgSO₄·H₂O, 4000 mg; MnSO₄·H₂O, 50 mg; KI, 100 mg; CoCl₂(1%), 100 mg; CuSO₄·5H₂O, 20 mg; FeSO₄·H₂O, 260 mg; ZnSO₄·H₂O, 150 mg; Na₂SeO₃(1%), 50 mg. ⁴Nutrient levels are all measured values

表2 试验原料营养水平与鱼粉的比较(干物质基础%)

Tab. 2 Nutrient levels of test ingredients (dry-matter basis %)

原料 Ingredient	乙醇梭 菌蛋白 CAP	小球藻 CM	黑水 虻粉 HM	黄粉 虫粉 TM	棉籽浓 缩蛋白 CPC	鱼粉 FM
营养水平Nutrient level						
水分 Moisture	2.47	9.11	2.28	2.67	5.09	5.79
粗蛋白 Crude protein	84.54	54.29	34.20	66.30	63.05	68.00
粗脂肪 Crude lipid	0.74	7.92	41.47	0.76	3.06	9.66
灰分Ash	6.98	8.26	10.15	9.04	8.73	9.06
能量Gross energy (MJ/kg)	21.89	21.62	24.36	20.33	18.98	22.43

表3 试验原料氨基酸组成与鱼粉的比较(干物质基础%)

Tab. 3 Amino acids compositions of test ingredients (dry-matter basis %)

氨基酸 Amino acid	乙醇梭 菌蛋白 CAP	小球藻 CM	黑水 虻粉 HM	黄粉 虫粉 TM	棉籽浓 缩蛋白 CPC	鱼粉 FM
必需氨基酸Essential amino acid						
精氨酸Arg	3.43	2.92	1.22	3.93	7.78	3.87
组氨酸His	1.22	0.87	0.75	0.65	1.62	1.82
异亮氨酸Ile	4.98	1.54	1.31	2.65	1.66	4.86
亮氨酸Leu	6.06	4.02	2.31	4.74	3.23	2.85
蛋氨酸Met	2.32	1.17	0.61	1.15	0.88	1.67
赖氨酸Lys	7.40	2.84	1.94	4.89	2.57	4.78
苯丙氨酸Phe	3.17	2.34	1.31	3.01	3.10	3.09
苏氨酸Thr	4.40	2.32	1.24	2.30	1.84	2.33
色氨酸Trp	0.49	0.77	0.34	0.39	0.71	0.57
缬氨酸Val	5.09	2.68	1.82	3.99	2.59	3.54
非必需氨基酸Non-essential amino acid						
丙氨酸Ala	4.87	3.99	2.52	3.09	2.18	4.11
天冬氨酸Asp	8.94	4.21	2.34	4.61	5.21	6.20
谷氨酸Glu	8.58	5.41	3.25	6.93	11.90	9.45
甘氨酸Gly	3.93	2.77	1.60	4.67	2.35	4.01
脯氨酸Pro	2.76	2.17	1.92	5.96	2.14	2.55
丝氨酸Ser	3.36	2.10	1.21	4.91	2.47	2.02
酪氨酸Tyr	2.96	1.60	1.73	1.88	1.42	1.78
胱氨酸Cys	1.37	0.77	0.38	2.14	1.09	0.52
必需氨基酸总量EAA	38.56	21.47	12.85	27.7	25.98	29.38
非必需氨基酸总量NEAA	36.77	23.02	14.95	34.19	28.76	30.64
氨基酸总量TAA	75.33	44.49	27.8	61.89	54.74	60.02

海上浮式网箱中进行。试验鱼运至鱼排后,先置于养殖网箱中暂养1周,暂养期间使用基础组饲料投喂以适应环境。正式试验开始前,大黄鱼饥饿24h,挑选体格健壮、规格一致的大黄鱼 $[(154.0 \pm 5.3) \text{ g}]$ 1800尾,随机分到18个养殖网箱中 $(2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times$

2 m),每组3个重复,每个重复100尾鱼,其中对照组试验鱼投喂基础饲料,试验组分别投喂5种试验饲料,每天(6:00和18:00)饱食投喂2次,当大多数鱼停止摄食时,即达到了饱食。养殖周期为8周,养殖期间水温20—24℃,pH为7.5—8.0,溶解氧 $\geq 6 \text{ mg/L}$,氨氮 $< 0.1 \text{ mg/L}$ 。

1.3 样品收集

投喂试验饲料1周后,采用挤压和解剖的方法收集后肠粪便样品,其过程为将试验鱼进行解剖,取出后肠,再将粪便从后肠中轻轻挤压而出,粪便经60℃烘干后,用研钵研磨成粉末状,放置在-20℃冰箱中保存。

1.4 样品的测定

原料、饲料和粪便样品中的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分的含量测定参照AOAC(2005)^[23]的方法。样品的水分采用105℃恒温干燥法(DHG-9123A,宁波江南仪器厂)测定;粗蛋白采用凯氏定氮法测定;粗脂肪采用索氏抽提法(无水乙醚为提取溶剂)测定;粗灰分则通过马弗炉中550℃燃烧8h的灼烧法测定。饲料和粪便的能量采用全自动氧弹量热仪(Parr 6300)测定。矿物元素含量的测定方法为加酸微波消解(JUPITER-B,多通量微波消解仪,上海新仪微波化学科技有限公司),然后稀释定容,用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES,Prodigy7,LEEMAE LABS,USA)测定。原料、饲料和粪便样品被冻干至恒重,每个样品取30 mg放入15 mL 6 mol/L HCl溶液中,在110℃下水解24h,用全自动氨基酸分析仪(L-8900,Hitachi,Tokyo,Japan)测定其氨基酸含量。

1.5 计算公式

试验饲料干物质表观消化率(ADC, %) $= (1 - D_y / F_y) \times 100$;

试验饲料营养成分表观消化率(ADC, %) $= [1 - (F_i / D_i) \times (D_y / F_y)] \times 100$;

试验原料营养物质和能量的表观消化率(ADC, %) $= \text{ADC}_{\text{试验饲料}} + [(\text{ADC}_{\text{试验饲料}} - \text{ADC}_{\text{基础饲料}}) \times (0.7 \times D_R) / (0.3 \times D_T)]$;

式中, D_y 为饲料中钼的含量(%); F_y 为粪便中钼的含量(%); D_i 为饲料中营养成分的含量(%); F_i 为粪便中营养成分的含量(%); D_R 为基础饲料中营养成分的含量(%); D_T 为试验原料中营养成分的含量(%)。

1.6 数据分析与处理

所有试验数据使用SPSS 22.0统计软件进行One-way ANOVA分析,采用Levene's F 检验方差齐次性,并用Duncan氏法进行多重比较,差异显著水平为 $P < 0.05$ 。所有试验数据均以平均值 $\pm$ 标准误

(mean±SE)的形式来表示。

2 结果

2.1 大黄鱼对5种试验原料干物质、蛋白质、脂肪和能量的表观消化率

如表4所示, 大黄鱼对5种试验原料中干物质的表观消化率为56.77%—75.53%(乙醇梭菌蛋白>黄粉虫粉>小球藻>黑水虻粉>棉籽浓缩蛋白)。乙醇梭菌蛋白干物质的表观消化率显著高于其他试验原料($P<0.05$); 其次是黄粉虫粉、小球藻和黑水虻粉, 黑水虻粉干物质的表观消化率显著低于黄粉虫粉($P<0.05$); 棉籽浓缩蛋白干物质的表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$)。

大黄鱼对5种试验原料中粗蛋白的表观消化率为69.93%—89.59%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉>黄粉虫粉)。乙醇梭菌蛋白粗蛋白的表观消化率显著高于其他4种试验原料($P<0.05$); 其次是小球藻、棉籽浓缩蛋白和黑水虻粉, 黑水虻粉粗蛋白的表观消化率显著低于小球藻($P<0.05$); 黄粉虫粉粗蛋白的表观消化率显著低于其他4种试验原料($P<0.05$)。

大黄鱼对5种试验原料中粗脂肪的表观消化率为58.58%—93.77%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>黄粉虫粉>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉)。乙醇梭菌蛋白粗脂肪的表观消化率显著高于其他4种试验原料($P<0.05$); 其次是小球藻, 小球藻粗脂肪的表观消化率显著高于黑水虻粉和黄粉虫粉($P<0.05$); 黑水虻粉粗脂肪的表观消化率显著低于其他4种试验原料($P<0.05$)。

大黄鱼对5种试验原料中能量的表观消化率为63.39%—84.33%(乙醇梭菌蛋白>黑水虻粉>小球藻>黄粉虫粉>棉籽浓缩蛋白)。乙醇梭菌蛋白能量的表观消化率显著高于其他4种试验原料($P<0.05$); 其次是黑水虻粉、小球藻和黄粉虫粉, 黑水虻粉和小球藻能量的表观消化率无显著差异($P>0.05$), 且这两种试验原料能量的表观消化率均显著高于黄粉虫粉($P<0.05$); 棉籽浓缩蛋白能量的表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$)。

2.2 大黄鱼对5种试验原料氨基酸的表观消化率

如表5所示, 大黄鱼对5种试验原料氨基酸总量的表观消化率为76.62%—93.24%(乙醇梭菌蛋白>小球藻>棉籽浓缩蛋白>黑水虻粉>黄粉虫粉), 乙醇梭菌蛋白氨基酸总量的表观消化率显著高于其他试验原料($P<0.05$); 其次是小球藻和棉籽浓缩蛋白, 这两种原料氨基酸总量的表观消化率无显著差异($P>0.05$); 黑水虻粉和黄粉虫粉氨基酸总量的表观消化率显著低于其余3种试验原料($P<0.05$)。在10种必需氨基酸中, 5种试验原料精氨酸的表观消化率普遍较高, 为89.44%—98.13%; 除色氨酸外, 其余必需氨基酸在乙醇梭菌蛋白中的表观消化率显著高于其他试验原料($P<0.05$); 异亮氨酸、亮氨酸、蛋氨酸、赖氨酸和缬氨酸在棉籽浓缩蛋白中的表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$); 组氨酸、苏氨酸和色氨酸均在黄粉虫粉中的表观消化率最低, 组氨酸和色氨酸在黄粉虫粉中的表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$)。

蛋氨酸在各组试验原料中表观消化率从高到低依次为: 乙醇梭菌蛋白、黄粉虫粉、小球藻、黑水虻粉和棉籽浓缩蛋白, 其中蛋氨酸在乙醇梭菌蛋白中的表观消化率显著高于其他试验原料($P<0.05$); 蛋氨酸在棉籽浓缩蛋白中表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$); 蛋氨酸在小球藻、黑水虻粉和黄粉虫粉3种试验原料中表观消化率无显著差异($P>0.05$)。

赖氨酸在各组试验原料中表观消化率从高到低依次为: 乙醇梭菌蛋白、黄粉虫粉、小球藻、黑水虻粉和棉籽浓缩蛋白, 其中赖氨酸在棉籽浓缩蛋白中表观消化率显著低于其他试验原料($P<0.05$), 在乙醇梭菌蛋白中表观消化率显著高于其他试验原料($P<0.05$)。

3 讨论

由于本试验是在海上浮式网箱中进行, 无法通过沉积法或虹吸法等方法收集粪便, 故本试验采用挤压法和解剖法收集粪便, 其所得试验结果与肛吸

表4 干物质、粗蛋白、粗脂肪和能量的表观消化率

Tab. 4 Apparent digestibility coefficients of dry matter, crude protein, crude lipid and gross energy

原料Ingredient	乙醇梭菌蛋白CAP	小球藻CM	黑水虻粉HM	黄粉虫粉TM	棉籽浓缩蛋白CPC
干物质Dry matter	75.53±0.99 ^d	67.04±1.20 ^{bc}	65.33±0.07 ^b	69.49±0.20 ^c	56.77±1.07 ^a
粗蛋白Crude protein	89.59±0.13 ^d	81.29±1.09 ^c	78.43±0.89 ^b	69.93±0.25 ^a	79.41±0.27 ^{bc}
粗脂肪Crude lipid	93.77±0.18 ^c	89.16±0.48 ^d	58.58±0.43 ^a	63.04±0.15 ^c	60.48±0.54 ^b
能量Gross energy	84.33±0.63 ^d	75.30±1.28 ^c	76.72±0.30 ^c	71.72±0.30 ^b	63.39±1.03 ^a

注: 同列数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 下同

Note: In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same applies below

法和沉淀柱采粪法相近^[24]。

3.1 大黄鱼对乙醇梭菌蛋白的表观消化率

干物质的表观消化率反映了动物对饲料原料总体的消化吸收能力^[25]。本研究中大黄鱼对乙醇梭菌蛋白干物质的表观消化率最高,为75.53%。李会涛等^[26]研究发现,大黄鱼对基础白鱼粉和红鱼粉的表观消化率分别为70.0%和65.2%,略低于本研究中大黄鱼对乙醇梭菌蛋白干物质的表观消化率,而大黄鱼对乙醇梭菌蛋白粗蛋白、粗脂肪和能量的表观消化率均为5种蛋白源中最高,分别为89.59%、93.77%和84.33%,这与白鱼粉和红鱼粉的表观消化率结果相近。氨基酸在细胞和代谢水平上起着重要的调节作用^[27],而鱼类饲料中必需氨基酸的适宜含量是维持正常肌肉生长、蛋白质合成及脂肪和碳水化合物代谢的必要条件。否则,必需氨基酸的含量不足可能会对鱼类的生长性能和生理生化健康产生不利影响^[28—30]。而在本研究中,乙醇梭菌蛋白的多项必需氨基酸含量均高于进口鱼粉,尤其作为鱼类生长的限制性氨基酸,蛋氨酸和赖氨酸在乙醇梭菌蛋白中的含量分别为2.32%和7.40%,而进口鱼粉的蛋氨酸和赖氨酸含量分别为1.67%和4.78%,乙醇梭菌蛋白在蛋氨酸和赖氨酸的含量上更有优势。在本研究中,大黄鱼对乙醇梭菌蛋白中蛋氨酸

和赖氨酸的表观消化率均为同组最高,分别为95.38%和96.25%。此外,在大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[31]、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)^[32]、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[33]、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)^[34]和罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[35]等相关研究中均表明乙醇梭菌蛋白替代饲料中部分鱼粉而不会对养殖对象的生长产生不利影响。因此,乙醇梭菌蛋白可以作为优质蛋白源添加到大黄鱼配合饲料中。

3.2 大黄鱼对小球藻的表观消化率

在本研究中,大黄鱼对小球藻干物质、蛋白质、粗脂肪和能量的表观消化率分别为67.04%、81.29%、89.16%和75.30%,略低于乙醇梭菌蛋白。Tibbetts等^[8]在对大西洋鲑(*Salmo salar*)饲喂小球藻的研究中发现,相较于完整的小球藻,饲喂细胞壁破碎的小球藻能大幅提高大西洋鲑对营养物质的消化吸收能力。本研究中的小球藻经过破壁处理,以保证其营养成分能尽可能被大黄鱼吸收利用。有研究表明,饲料中氨基酸的不平衡会降低饲料的转化效率,从而对鱼种的生长产生负面影响^[36]。在本研究中,大黄鱼对小球藻氨基酸的表观消化率为83.24%,仅次于乙醇梭菌蛋白,但小球藻的蛋氨酸和赖氨酸含量低于鱼粉,分别为1.17%和2.84%,若

表 5 氨基酸的表观消化率

Tab. 5 Apparent digestibility coefficients of amino acid

氨基酸Amino acid	乙醇梭菌蛋白CAP	小球藻CM	黑水虻粉HM	黄粉虫粉TM	棉籽浓缩蛋白CPC
必需氨基酸Essential amino acid					
精氨酸Arg	98.13±0.37 ^d	94.24±0.77 ^c	89.44±0.43 ^a	91.30±0.56 ^b	94.59±0.18 ^c
组氨酸His	91.66±0.32 ^d	81.19±0.40 ^e	75.09±0.85 ^b	71.83±0.99 ^a	83.19±0.56 ^c
异亮氨酸Ile	93.91±0.07 ^d	82.88±0.29 ^c	81.46±0.61 ^b	81.69±0.40 ^{bc}	71.72±0.39 ^a
亮氨酸Leu	92.74±0.07 ^c	83.27±0.16 ^d	78.21±0.23 ^b	80.41±0.35 ^c	73.41±0.45 ^a
蛋氨酸Met	95.38±0.19 ^c	86.13±0.41 ^b	84.63±0.91 ^b	86.30±0.30 ^b	79.15±0.71 ^a
赖氨酸Lys	96.25±0.06 ^c	86.44±0.77 ^c	75.71±0.40 ^b	88.09±0.14 ^d	69.82±0.35 ^a
苯丙氨酸Phe	92.90±0.55 ^c	85.08±0.31 ^b	76.92±2.26 ^a	83.58±0.52 ^b	85.64±0.85 ^b
苏氨酸Thr	92.85±0.27 ^d	80.76±0.22 ^c	76.42±1.52 ^b	69.10±0.72 ^a	70.31±0.83 ^a
色氨酸Trp	80.16±1.35 ^b	82.08±0.73 ^b	81.11±0.82 ^b	74.77±1.75 ^a	82.40±1.37 ^b
缬氨酸Val	93.66±0.24 ^c	83.99±0.74 ^d	81.60±1.06 ^c	78.48±1.01 ^b	75.57±0.30 ^a
非必需氨基酸Non-essential amino acid					
丙氨酸Ala	93.50±0.53 ^d	87.43±0.28 ^c	83.19±1.26 ^b	73.48±0.87 ^a	71.26±0.41 ^a
天冬氨酸Asp	92.97±0.16 ^c	80.31±0.24 ^b	68.44±0.36 ^a	68.83±0.96 ^a	79.84±0.61 ^b
谷氨酸Glu	93.21±0.41 ^c	83.07±0.25 ^c	73.34±1.63 ^b	69.79±0.78 ^a	88.04±0.14 ^d
甘氨酸Gly	90.95±0.40 ^c	78.52±0.49 ^b	68.36±2.19 ^a	71.57±0.72 ^a	75.20±0.22 ^b
脯氨酸Pro	92.90±1.28 ^c	80.88±0.98 ^b	74.10±1.24 ^a	74.37±0.42 ^a	78.45±0.16 ^b
丝氨酸Ser	90.32±0.46 ^d	77.21±0.23 ^{ab}	75.27±1.29 ^a	78.61±0.38 ^b	80.84±0.30 ^c
酪氨酸Tyr	91.80±0.22 ^c	79.48±1.04 ^b	79.56±0.70 ^b	77.17±0.64 ^b	71.50±1.39 ^a
胱氨酸Cys	71.31±0.51 ^c	55.53±0.15 ^b	91.83±0.66 ^d	42.96±0.54 ^a	97.86±0.55 ^c
氨基酸总量TAA	93.24±0.15 ^c	83.24±0.25 ^b	77.21±0.64 ^a	76.62±0.49 ^a	82.12±0.27 ^b

将小球藻应用到大黄鱼饲料中,需在饲料原料中补充蛋氨酸和赖氨酸以提高饲料的营养价值。

3.3 大黄鱼对黑水虻粉的表现消化率

黑水虻是一种可以将废弃的食物和粪便转化为高质量蛋白质的昆虫^[37]。目前,黑水虻粉已经被证实是大口黑鲈^[38]、凡纳滨对虾^[39]、大西洋鲑^[40]和红鲷(*Pagrus major*)^[41]等动物饲料中鱼粉的有效替代品,而黑水虻粉在大黄鱼人工配合饲料中的研究却尚未有报道。本研究大黄鱼对黑水虻粉粗脂肪的表现消化率较低,为58.58%。推测可能是由于黑水虻粉原料中粗脂肪的含量较高(41.47%),大黄鱼不能高效率地消化利用饲料中的粗脂肪。此外,Guerreiro等^[42]的研究中发现黑水虻粉替代鱼粉会造成饲料中SFA/PUFA比值上升,而n-3/n-6 PUFA比值下降。有研究表明^[43],PUFA会影响鱼类对脂肪的消化吸收。此外,在大菱鲆的研究中也发现^[44],n-3/n-6 PUFA比值下降会降低肠道对脂肪的消化能力,这可能是造成大黄鱼对黑水虻粉粗脂肪表现消化率较低的原因之一。由于本研究采用的黑水虻粉末经过脱脂处理,饲料原料中高比例的粗脂肪则会影响到粗蛋白的含量,导致黑水虻原料中粗蛋白含量较低(34.20%)。Zozo等^[45]研究证明,未经过脱脂处理的黑水虻粉粗蛋白含量低于脱脂处理组。另外,本研究中黑水虻粉的氨基酸组成不平衡,必需氨基酸含量较低,Pfarr等^[46]在研究中发现大豆中较低的蛋白质含量会影响氨基酸的平衡,这与本研究结果相符。Zhang等^[47]、He等^[48]和Li等^[49]研究发现,饲料中赖氨酸、苏氨酸和亮氨酸等多种必需氨基酸的含量过低会直接对大黄鱼生长及健康产生不利影响。因此,未经过脱脂处理的黑水虻粉不适合添加到大黄鱼饲料中,而脱脂黑水虻粉在大黄鱼饲料中的应用有待进一步研究。

3.4 大黄鱼对黄粉虫粉的表现消化率

黄粉虫是一种生长迅速、以面包和谷物为食的昆虫,黄粉虫粉具有蛋白质含量高、脂肪含量适中和氨基酸组成平衡等优点^[18],因而被认为是替代鱼粉的优质蛋白源。目前,黄粉虫粉在大黄鱼人工配合饲料中的研究已有相关报道。Yuan等^[50]研究表明,在大黄鱼饲料中添加黄粉虫粉可替代鱼粉中至少30%的蛋白质,且不会对大黄鱼的生长、饲料利用率和肉质产生负面影响。本研究中大黄鱼对黄粉虫干物质、粗蛋白、粗脂肪和能量的表现消化率分别为69.49%、69.93%、63.04%和71.72%,这表明大黄鱼对黄粉虫粉的利用率较低,可能有两方面原因:首先本研究采用的是脱脂黄粉虫粉,其粗脂肪含量只有0.76%,Hillestad等^[51]和Boujard等^[52]

在研究中证明适量的脂肪水平可以节省饲料蛋白质和提高饲料利用效率,本研究中大黄鱼对黄粉虫粉的利用率较低可能是黄粉虫粗脂肪含量低导致的;另一方面,黄粉虫粉中含有较高的甲壳素含量,Alegebeleye等^[53]研究证实甲壳素含量高可能会阻碍非洲鲶(*Clarias gariepinus*)对其他营养成分的吸收利用。本研究中黄粉虫粉具有与鱼粉相似的氨基酸组成,必需氨基酸中蛋氨酸和赖氨酸含量较高,而异亮氨酸含量较低,李晋南等^[54]研究发现饲料中较低的异亮氨酸含量会对大黄鱼生长和饲料利用等方面有负面影响。因此,脱脂黄粉虫粉可在搭配含高脂和高异亮氨酸原料的大黄鱼饲料中使用。

3.5 大黄鱼对棉籽浓缩蛋白的表现消化率

棉籽浓缩蛋白是经脱酚提油后得到的一种新型植物蛋白源^[19]。本研究中大黄鱼对棉籽浓缩蛋白干物质的表现消化率最低,仅为56.77%。在时于惠等^[55]和程云旺等^[22]的研究中,大口黑鲈和花鲈(*Lateolabrax maculatus*)对脱酚棉籽蛋白干物质的消化率同样较低,仅为37.27%和69.24%,这与本研究相符。大黄鱼对棉籽浓缩蛋白的利用率较低可能是因为其中含有较高的纤维素含量(4.5%),鱼类较难吸收饲料中的纤维素。较高的纤维素含量会降低原料干物质的表现消化率,这一点已在Kraugerud等^[56]用大豆纤维素喂养大西洋鲑鱼的研究中证实。本研究中大黄鱼对棉籽浓缩蛋白氨基酸的表现消化率为69.82%—97.86%,其中蛋氨酸和赖氨酸的表现消化率较低,分别为79.15%和69.82%,这可能是由于原料中缺乏蛋氨酸和赖氨酸所致。此外,棉籽浓缩蛋白中含有较高浓度的精氨酸,过多的精氨酸也会阻碍赖氨酸的消化吸收。因此,大黄鱼饲料中若添加棉籽浓缩蛋白,还需补充蛋氨酸和赖氨酸且避开使用精氨酸含量高的原料。

4 结论

根据大黄鱼对5种蛋白质原料的表现消化率和原料的营养含量,乙醇梭菌蛋白是5种原料中最理想的蛋白源、小球藻次之,可作为大黄鱼饲料中鱼粉的有效替代原料。

参考文献:

- [1] Wu Z, Chen N S, Hua X M, et al. Effects of replacement of dietary fish meal by four kinds of soybean meal on growth, antioxidant and antibacterial ability of *Pseudosciaena crocea* R [J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(5): 495-506. [吴钊, 陈乃松, 华雪铭, 等. 4种豆粕替代鱼粉对大黄鱼生长、抗氧化及抗菌能力的影响[J]. 海洋渔业, 2016, 38(5): 495-506.]

- [2] Liang P. Effects of microencapsulated feeds replacing biological bait on digestive enzyme activities of juvenile *Pseudosciaena crocea* [J]. *China Feed*, 2022(3): 118-121. [梁萍. 微胶囊饲料替代生物饵料对大黄鱼稚鱼消化酶活性的影响 [J]. *中国饲料*, 2022(3): 118-121.]
- [3] Gao X N, Chen Y C, Zhao Q, *et al.* Fermented feed meal instead of fish meal used in aquaculture [J]. *China Feed*, 2017(3): 33-36. [高绪娜, 陈玉春, 赵倩, 等. 发酵粕类替代鱼粉在水产养殖中的应用 [J]. *中国饲料*, 2017(3): 33-36.]
- [4] Zhang J, Dong Y, Song K, *et al.* Substituting fish meal with a bacteria protein (*Clostridium autoethanogenum* Protein) derived from industrial-scale gas fermentation: effects on growth and gut health of juvenile large yellow croakers (*Larimichthys crocea*) [J]. *Fishes*, 2022, 7(5): 228.
- [5] Zhang J, Dong Y, Song K, *et al.* Effects of the replacement of dietary fish meal with defatted yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) on juvenile large yellow croakers (*Larimichthys crocea*) growth and gut health [J]. *Animals*, 2022, 12(19): 2659.
- [6] Yang P, Li X, Song B, *et al.* The potential of *Clostridium autoethanogenum*, a new single cell protein, in substituting fish meal in the diet of largemouth bass (*Micropterus salmoides*): growth, feed utilization and intestinal histology [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2023, 8(1): 67-75.
- [7] Xie F, Zhang F, Zhou K, *et al.* Breeding of high protein *Chlorella sorokiniana* using protoplast fusion [J]. *Biore-source Technology*, 2020(313): 123624.
- [8] Tibbetts S M, Mann J, Dumas A. Apparent digestibility of nutrients, energy, essential amino acids and fatty acids of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) diets containing whole-cell or cell-ruptured *Chlorella vulgaris* meals at five dietary inclusion levels [J]. *Aquaculture*, 2017(481): 25-39.
- [9] Bratosin B C, Darjan S, Vodnar D C. Single cell protein: a potential substitute in human and animal nutrition [J]. *Sustainability*, 2021, 13(16): 9284.
- [10] Pan S H, Gu M, Liang Z L. Research progress on application of single-cell protein source in aquaculture [J]. *Hebei Fisheries*, 2020(7): 53-56. [潘世会, 谷珉, 梁振林. 单细胞蛋白在水产配合饲料中应用的研究进展 [J]. *河北渔业*, 2020(7): 53-56.]
- [11] Wang G, Peng K, Hu J, *et al.* Evaluation of defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as an alternative protein ingredient for juvenile Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) diets [J]. *Aquaculture*, 2019(507): 144-154.
- [12] Magalhães R, Sánchez-López A, Leal R S, *et al.* Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Aquaculture*, 2017, 476(1): 79-85.
- [13] St-Hilaire S, Cranfill K, McGuire M A, *et al.* Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in omega-3 fatty acids [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2007, 38(2): 309-313.
- [14] Ji F, Yang H, Wang D, *et al.* advances in application of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) meal as protein sources in diets of pigs, broilers and fishes [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2021, 57(9): 39-44. [冀凤杰, 杨焕胜, 王定发, 等. 黄粉虫粉作为蛋白源在猪、肉鸡和鱼类饲料中应用的研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(9): 39-44.]
- [15] van Huis A, Dunkel F V. Edible Insects [M]. Sustainable Protein Sources. Amsterdam: Elsevier, 2017: 341-355.
- [16] van Huis A. Potential of insects as food and feed in assuring food security [J]. *Annual Review of Entomology*, 2013(58): 563-583.
- [17] Gasco L, Gai F, Maricchiolo G, *et al.* Fishmeal Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds [M]. Springer-Briefs in Molecular Science. Cham: Springer International Publishing, 2018: 1-28.
- [18] Makkar H P S, Tran G, Heuzé V, *et al.* State-of-the-art on use of insects as animal feed [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014(197): 1-33.
- [19] Xue M. Processing of cottonseed protein concentrated and its nutrient values in aquatic feed [J]. *Feed Industry*, 2021, 42(12): 1-5. [薛敏. 棉籽浓缩蛋白加工工艺及其在水产饲料中营养价值 [J]. *饲料工业*, 2021, 42(12): 1-5.]
- [20] Xu X, Yang H, Zhang C, *et al.* Effects of replacing fishmeal with cottonseed protein concentrate on growth performance, flesh quality and gossypol deposition of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2022(548): 737551.
- [21] Chang Q, Liang M Q, Wang J L, *et al.* Apparent digestibility coefficients of various feed ingredients for Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(2): 172-176. [常青, 梁萌青, 王家林, 等. 花鲈对不同饲料原料的表观消化率 [J]. *水生生物学报*, 2005, 29(2): 172-176.]
- [22] Cheng Y W, Lu K L, Wang L, *et al.* Apparent digestibility of seven protein ingredients for *Lateolabrax maculatus* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, 51(1): 57-64. [程云旺, 鲁康乐, 王玲, 等. 花鲈对七种蛋白质原料的表观消化率 [J]. *淡水渔业*, 2021, 51(1): 57-64.]
- [23] AOAC. Official Methods of Analysis of Analysis of Official Analytical Chemists International, 17th ed.; Association of Official Analytical Chemists: Arlington, VA, USA, 2005.
- [24] 申屠基康. 大黄鱼对21种饲料原料表观消化率及色氨酸营养需要研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [25] Wang J X, Wei Y K, Xu H G, *et al.* Apparent digestibility coefficients of selected feed ingredients for juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*) [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(2): 96-103. [王建学, 卫育良, 徐后国, 等. 红鳍东方鲀对8种饲料原料的表观消化率 [J]. *渔业*

科学进展, 2021, 42(2): 96-103.]

- [26] Li H T, Mai K S, Ai Q H, *et al.* Apparent digestibility of selected protein ingredients for larger yellow croaker *Pseudosciaena crocea* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(3): 370-376. [李会涛, 麦康森, 艾庆辉, 等. 大黄鱼对几种饲料蛋白原料消化率的研究 [J]. *水生生物学报*, 2007, 31(3): 370-376.]
- [27] Tacon G J. The nutrition and feeding of farmed fish and shrimp - A training manual, 2. Essential nutrients-Proteins and Amino acids [R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- [28] Oliveira T S, Khan K U, Boaratti A Z, *et al.* Evaluation of the optimum dietary essential amino acid pattern for adult pacu (*Piaractus mesopotamicus*) [J]. *Aquaculture*, 2021(540): 736686.
- [29] Li P, Mai K, Trushenski J, *et al.* New developments in fish amino acid nutrition: towards functional and environmentally oriented aquafeeds [J]. *Amino Acids*, 2009, 37(1): 43-53.
- [30] Peres H, Oliva-Teles A. The optimum dietary essential amino acid profile for gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2009, 296(1/2): 81-86.
- [31] Zhu S, Gao W, Wen Z, *et al.* Partial substitution of fish meal by *Clostridium autoethanogenum* protein in the diets of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(22): 100938.
- [32] Chen Y, Sagada G, Xu B, *et al.* Partial replacement of fishmeal with *Clostridium autoethanogenum* single-cell protein in the diet for juvenile black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. *Aquaculture Research*, 2019, 51(3): 1000-1011.
- [33] Yao W, Yang P, Zhang X, *et al.* Effects of replacing dietary fish meal with *Clostridium autoethanogenum* protein on growth and flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Aquaculture*, 2022(549): 737770.
- [34] Wu Z, Yu X, Guo J, *et al.* Replacement of dietary fish meal with *Clostridium autoethanogenum* protein on growth performance, digestion, mTOR pathways and muscle quality of abalone *Haliotis discus* Hannai [J]. *Aquaculture*, 2022(553): 738070.
- [35] Maulu S, Liang H, Ge X, *et al.* Effect of dietary *Clostridium autoethanogenum* protein on growth, body composition, plasma parameters and hepatic genes expression related to growth and AMPK/TOR/PI3K signaling pathway of the genetically improved farmed tilapia (GIFT: *Oreochromis niloticus*) juveniles [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021(276): 114914.
- [36] Fauconneau B, Basseres A, Kaushik S J. Oxidation of phenylalanine and threonine in response to dietary arginine supply in rainbow trout (*Salmo gairdneri* R.) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1992, 101(2): 395-401.
- [37] Craig Sheppard D, Larry Newton G, Thompson S A, *et al.* A value added manure management system using the black soldier fly [J]. *Bioresource Technology*, 1994, 50(3): 275-279.
- [38] Xu F M, Hou S W, Wang G X, *et al.* Effects of zymolytic black soldier fly (*Hermetia illucens*) pulp as dietary supplementation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(21): 100823.
- [39] Usman, Fahrur M, Kamaruddin, *et al.* The utilization of black soldier fly larvae meal as a substitution of fish meal in diet for white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, grow-out [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 860(1): 012023.
- [40] Belghit I, Liland N S, Gjesdal P, *et al.* Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture*, 2019(503): 609-619.
- [41] Takakuwa F, Tanabe R, Nomura S, *et al.* Availability of black soldier fly meal as an alternative protein source to fish meal in red sea bream (*Pagrus major*, Temminck & Schlegel) fingerling diets [J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53(1): 36-49.
- [42] Guerreiro I, Castro C, Antunes B, *et al.* Catching black soldier fly for meagre: growth, whole-body fatty acid profile and metabolic responses [J]. *Aquaculture*, 2020(516): 734613.
- [43] Geurden I, Jutfelt F, Olsen R-E, *et al.* A vegetable oil feeding history affects digestibility and intestinal fatty acid uptake in juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2009, 152(4): 552-559.
- [44] Bell J G, McEvoy J, Tocher D R, *et al.* Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism [J]. *The Journal of Nutrition*, 2001, 131(5): 1535-1543.
- [45] Zozo B, Wicht M M, Mshayisa V V, *et al.* The nutritional quality and structural analysis of black soldier fly larvae flour before and after defatting [J]. *Insects*, 2022, 13(2): 168.
- [46] Pfarr M D, Kazula M J, Miller-Garvin J E, *et al.* Amino acid balance is affected by protein concentration in soybean [J]. *Crop Science*, 2018, 58(5): 2050-2062.
- [47] Zhang C, Ai Q, Mai K, *et al.* Dietary lysine requirement of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. [J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1/2/3/4): 123-127.
- [48] He Z, Mai K, Li Y, *et al.* Dietary threonine requirement of juvenile large yellow croaker, *Larmichthys crocea* [J]. *Aquaculture Research*, 2015, 47(11): 3616-3624.
- [49] Li Y, Ai Q, Mai K, *et al.* Dietary leucine requirement for juvenile large yellow croaker *Pseudosciaena crocea* (Richardson, 1846) [J]. *Journal of Ocean University of*

- China*, 2010, **9**(4): 371-375.
- [50] Yuan J, Wu Y, Zhang Z Y, *et al.* Replacement of fish-meal by yellow mealworm meal on the growth performance, feed utilisation and quality of large yellow croaker [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2022, **8**(11): 1311-1332.
- [51] Boujard T, Gélinau A, Covès D, *et al.* Regulation of feed intake, growth, nutrient and energy utilisation in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed high fat diets [J]. *Aquaculture*, 2004, **231**(1/2/3/4): 529-545.
- [52] Hillestad N, Johnsen N, Austreng N, *et al.* Long-term effects of dietary fat level and feeding rate on growth, feed utilization and carcass quality of Atlantic salmon [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1998, **4**(2): 89-97.
- [53] Alegbeleye W O, Obasa S O, Olude O O, *et al.* Preliminary evaluation of the nutritive value of the variegated grasshopper (*Zonocerus variegatus* L.) for African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) fingerlings [J]. *Aquaculture Research*, 2012, **43**(3): 412-420.
- [54] Li J N, Wang L, Wang L S. Research progress of isoleucine nutrition in aquatic animals [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(3): 1374-1387. [李晋南, 王良, 王连生. 水产动物异亮氨酸营养研究进展 [J]. *动物营养学报*, 2022, **34**(3): 1374-1387.]
- [55] Shi Y H, Zhu S J, Tan B P, *et al.* Apparent digestibility of six new non-grain protein ingredients for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(8): 1-16. [时于惠, 祝书杰, 谭北平, 等. 大口黑鲈对六种非粮蛋白源表观消化率的研究 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(8): 1-16.]
- [56] Kraugerud O F, Penn M, Storebakken T, *et al.* Nutrient digestibilities and gut function in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with cellulose or non-starch polysaccharides from soy [J]. *Aquaculture*, 2007, **273**(1): 96-107.

APPARENT DIGESTIBILITY OF FIVE NEW NON-GRAIN PROTEIN INGREDIENTS FOR LARGE YELLOW CROAKERS (*LARIMICHTHYS CROCEA*)

ZHANG Jian¹, LI Lei¹, DONG Yan-Zou¹, LI Xue-Shan¹, WANG Ling¹, SONG Kai¹,
TAN Bei-Ping², LU Kang-Le¹ and ZHANG Chun-Xiao¹

(1. Xiamen Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation, Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Aquatic Economic Animal Nutrition and Feed Laboratory, College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Finding inexpensive and high-quality protein sources to replace fish meal is currently a thorny issue for the feed industry due to the decline in fishery resources and the increased demand for fishmeal, which has led to a significant increase in fishmeal prices. In this study, we selected five new non-grain protein sources, *Clostridium autoethanogenum* protein (CAP), *Chlorell* meal (CM), *Hermetia illucens* meal (HM), *Tenebrio molitor* meal (TM), and cottonseed protein concentrate (CPC). This study was conducted to evaluate the apparent digestibility of dry matter, crude protein, crude lipid, gross energy, and amino acid of these five protein sources by large yellow croakers (*Larimichthys crocea*) to provide a theoretical basis for the design of artificial compound feed formulations for large yellow croakers. Triplicate groups of fish [initial weight=(154.0±5.3)g] were fed the test diets to apparent satiation two times daily for eight weeks. The test diets consisted of 70% basal diet and 30% test ingredients, and 0.1% yttrium oxide (Y₂O₃) was used as an indicator. The results showed that dry matter coefficients of five test ingredients ranged from 56.77% to 75.53%(CAP>TM>CM>HM>CPC); The apparent digestibility of the crude protein ranged from 69.93% to 89.59%(CAP>CM>CPC>HM>TM); The apparent digestibility of crude lipid ranged from 58.58% to 93.77%(CAP>CM>TM>CPC>HM); The apparent digestibility of the gross energy ranged from 63.39% to 84.33%(CAP>HM>CM>TM>CPC); The apparent digestibility of the total amino acids ranged from 76.62% to 93.24%(CAP>CM>CPC>HM>TM). In conclusion, CAP is the optimum protein source of the five ingredients. However, CM, TM, and CPC require supplementation of deficient nutrients in their diets, and HM involves the addition of a defatting process to improve raw material nutrient levels. Additionally, comparative feeding experiments are required to determine the optimum amount of these five protein sources to be added to the large yellow croaker feed.

Key words: New non-grain protein ingredients; Apparent digestibility; *Larimichthys crocea*