

doi: 10.7541/2020.086

黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长、血清生化指标和肝脏脂滴面积的影响

胡俊茹^{1*} 易昌金^{2*} 王国霞¹ 莫文艳¹ 黄燕华^{1,2}

(1. 广东省农业科学院动物科学研究所, 农业农村部华南动物营养与饲料重点实验室, 广东省动物育种与营养公共实验室, 广东省畜禽育种与营养研究重点实验室, 广州 510640; 2. 广州飞禧特生物科技有限公司, 广州 510640)

摘要: 试验旨在研究黑水虻(*Hermetia illucens* L.)虫油替代饲料中豆油对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)幼鱼生长性能、血清抗氧化能力、炎症因子及肝脏脂滴面积的影响。以豆油为对照组(T0), 虫油分别替代20%(T20)、40%(T40)、60%(T60)、80%(T80)、100%(T100)的豆油, 配置6种等氮等脂的试验饲料。选取初始体重为(2.12±0.01) g 的黄颡鱼幼鱼840尾, 随机分为6组, 每组4个重复, 每个重复35尾, 养殖56d。结果表明: 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼的末均重、增重率、特定生长率、饲料系数、存活率、摄食率均无显著影响($P>0.05$); 各组间黄颡鱼肥满度、腹脂指数、脏体比、肝体比无显著差异($P>0.05$); 全鱼粗蛋白、粗脂肪、水分、灰分、钙、磷含量无显著差异($P>0.05$); 黑水虻虫油替代豆油对饲料的干物质、蛋白质、脂肪、磷及能量的表观消化率未产生显著影响($P>0.05$), 但T60和T80组钙的表观消化率显著高于T100组($P<0.05$), 与对照组相比差异不显著($P>0.05$)。各组间黄颡鱼幼鱼血清白蛋白、低密度脂蛋白胆固醇、甘油三酯、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、尿素氮、球蛋白、乳酸脱氢酶、血糖、总蛋白差异不显著($P>0.05$), 但高密度脂蛋白胆固醇含量则随着替代比例的增加先上升后下降, T60组和T80组显著高于对照组($P<0.05$)。各组间黄颡鱼幼鱼血清中抗超氧阴离子和丙二醛含量, 过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性无显著差异($P>0.05$); 与对照组相比, 各处理组血清肿瘤坏死因子- α 浓度无显著性差异($P>0.05$); 当黑水虻虫油替代比例超40%时, 各处理组血清中抗炎因子白介素-10和促炎因子白介素-6及白介素-8的浓度均显著高于对照组($P<0.05$)。油红O染色显示, 黑水虻虫油替代豆油对肝脏脂滴面积无显著影响($P>0.05$)。综上所述, 黑水虻虫油完全替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长性能、形体指标、体成分、营养物质表观消化率和抗氧化指标无显著影响, 以生长性能为评价指标, 当黄颡鱼幼鱼基础饲料中添加4%豆油时, 黑水虻虫油完全替代豆油。

关键词: 黑水虻虫油; 豆油; 黄颡鱼; 生长性能; 血清生化指标; 肝脏脂滴面积

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2020)04-0717-11

脂质作为水产动物一种重要的营养素, 为鱼类生长提供所需的能量和必需的脂肪酸是水产动物饲料中重要的组成成分。豆油含有多种不饱和脂肪酸是水产动物饲料重要的油脂来源。随着水产养殖的快速发展和高油脂饲料的广泛使用^[1], 豆油需求持续增加, 但我国大豆主要依赖进口, 对外依存度非常高, 豆油价格的涨幅直接关系我国水产养

殖效益的好坏。因此, 寻求其他合适的脂肪源替代豆油是保障我国水产养殖业可持续发展的重要措施之一。

昆虫是地球上生物量最大的群体, 其生物量超过其他生物总量的10倍, 是有待开发的巨大的食物和饲料资源。黑水虻(*Hermetia illucens* L.)是双翅目水虻科昆虫, 又名亮斑扁角水虻, 具有繁殖迅速,

收稿日期: 2019-05-24; **修订日期:** 2019-12-27

基金项目: 广东省现代农业科技创新联盟建设项目 (2018LM1082和2018LM1083); 广东省农业科学院学科团队建设项目 (201614TD)资助 [Supported by the Guangdong Modern Agricultural Science and Technology Innovation Alliance (2018LM1082, 2018LM1083); Guangdong Academy of Agricultural Sciences Discipline Team Building (201614TD)]

作者简介: 胡俊茹(1979—), 女, 博士; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: hujunru1025@163.com; 易昌金(1991—), 男, 硕士; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 275311958@qq.com *共同第一作者

通信作者: 黄燕华(1969—), 女, 博士; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: huangyh111@126.com

摄食范围广, 饲料转化率高, 饲养占地空间小等优势, 黑水虻幼虫干物质含有大约30%左右的脂肪^[2,3], 其中棕榈酸(C16:0)、油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2)含量较高, 月桂酸(C12:0)含量丰富^[3-5], 黑水虻幼虫脂肪酸组成和含量会随着采食基质的不同略有差异, 但仍以这几种脂肪酸为主^[6]。已有研究表明黑水虻虫油可完全替代幼建鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)饲料中的豆油^[5], 部分替代虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)饲料中鱼油^[3,7], ST-Hilaire等^[6]认为黑水虻是替代动物饲料鱼油的适宜脂肪源。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)是我国主要的水产名特养殖品种之一, 其肉质细嫩、无肌间刺、味道鲜美、营养丰富、药用价值较高。2017年我国黄颡鱼养殖产量为 43.44×10^7 kg^[8], 每年以20%左右的幅度迅猛增长, 国内外市场发展潜力巨大。黄颡鱼是杂食性动物, 对脂肪的最适需要量为9%—12%^[9], 目前豆油仍是黄颡鱼配合饲料主要的脂肪来源。因此, 鉴于豆油供应短缺的现状和饲料产业发展需求的矛盾, 本试验选取黄颡鱼为研究对象, 旨在研究黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长性能、营养物质表观消化率、血清生化指标、血清抗氧化能力、炎症因子和肝脏脂滴面积的影响, 为黑水虻虫油在黄颡鱼幼鱼配合饲料中的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 黑水虻虫油制备

取适量新鲜幼虫(7—8日龄, 由广州飞禧特生物科技有限公司提供)倒入小型果蔬料理机, 快速磨碎。然后按照料液比1:3加入乙酸乙酯, 4℃萃取24h, 收集提取液, 于4℃下6000 r/min离心10min, 除去沉淀, 得到粗提液, 使用旋转蒸发器对粗提液进行浓缩, 待有机溶剂蒸发完毕直至恒重, 收集油脂, 用于试验。

1.2 试验饲料

以国产鱼粉、豆粕、花生粕作为主要的蛋白质源, 黑水虻虫油分别替代0、20%、40%、60%、80%和100%的豆油, 配制6种等氮等脂的试验饲料, 饲料配方见表1。饲料制备之前, 将鱼粉和豆粕等饲料原料经粉碎后过60目筛网, 再按配比梯度混匀后倒入V型搅拌机充分混合20min。将大豆卵磷脂、黑水虻虫油和豆油放入烧杯中混合均匀, 将其倒入已混合均匀的干粉, V型搅拌机搅拌均匀再加入30%左右的水继续搅拌, 搅拌均匀后利用双螺杆挤条机(F-75型, 华南理工大学研制), 挤压温度为

(43±2)℃, 将其制成直径为1.5 mm的硬颗粒性饲料, 在55℃条件下烘12h后进行冷却回潮处理, 所制饲料采用双层塑料袋包装并封口, -20℃冰箱保存备用, 以防止饲料受潮氧化变质。饲料原料和试验饲料脂肪酸组成见表2。

1.3 试验鱼与饲养管理

黄颡鱼幼鱼购于广州市白云区锦龙渔业有限公司, 暂养期间投喂黄颡鱼配合饲料(锦龙渔业有限公司提供), 待试验开始前1周再用自制硬颗粒饲料(对照组饲料)暂养使其适应试验饲料。养殖试验在广东省农业科学院动物科学研究所水产研究室水产养殖基地内进行, 挑选初始重为(2.12±0.01) g的黄颡鱼幼鱼840尾, 随机分到24个缸, 每缸300L水, 35尾鱼, 然后随机分成6组, 每种饲料饲喂一组试验鱼。每天09:00和16:00饱食投喂2次, 投喂结束后40min将缸内剩余的饲料和粪便用虹吸管吸走。记录水温、气温、pH、摄食量及死亡情况等, 养殖周期为56d。本试验采用独立循环养殖系统, 控制水流速2 L/min。每天晚上8:00打开排污系统排污, 在试验前4周, 每3天更换一次循环水, 每次更换2/3, 之后每天更换1/2。养殖水温20—29℃, 溶氧浓度不低于5 mg/L, 氨氮和亚硝酸盐浓度均低于0.25 mg/L。

1.4 样品采集和分析

每天投饲40min后清理残饵, 养殖试验开始1个月月开始收集粪便, 投饲1.5h后采用网捞法收集包膜完整的粪便, 连续收集粪便至检测样品需求量, 为期20d。将收集到的粪便60℃烘干, 粉碎后装袋密封, -20℃冰箱中保存备用。在养殖试验结束后停食24h, 统计每缸尾数并称重每缸鱼体终末体重, 然后每个缸随机选取15尾鱼, 从中随机选取3尾鱼置于-20℃保存, 用于测定全鱼常规营养成分, 剩余的12尾鱼快速放入40 mg/L的MS-222溶液中麻醉, 静取血, 测量体长、体重, 其中6尾鱼冰上解剖, 测定其内脏重、肝脏重及腹脂重, 然后其中3尾鱼分离肌肉和肝脏用于测定脂肪酸组成, 另3尾鱼取肝脏进行油红O染色分析; 其余6尾鱼用于分子样品分析。尾静脉血于冷冻离心机4℃下4000 r/min离心10min制备血清样品, 保存于-80℃冰箱中, 用于血清生化、抗氧化指标和炎症因子测定。

试验饲料、全鱼及粪便常规营养成分的测定方法如下: 能量采用氧弹量热仪(IKA-C2000)测定, 粗脂肪含量采用乙醚抽提的方法(GB/T6433-2006)进行测定, 灰分含量采用550℃灼烧至恒重的方法(GB/T6438-2007)测定, 水分含量采用105℃烘箱烘干至恒重的方法(GB/T6435-2014)进行测定,

粗蛋白质含量采用凯氏定氮法(GB/T6432-2018)进行测定, 磷含量采用钼黄比色法(GB/T6436-2002)进行测定, 钙含量采用乙二胺四乙酸二钠(EDTA)滴定法(GB/T6436-2002)进行测定。饲料及粪便中 Y_2O_3 含量采用等离子体光谱仪(SPECTRO CIOSCCD)进行测定。

血清总蛋白(Total protein, TP)、白蛋白(Albumin, ALB)、球蛋白(Globulin, GLO)、尿素氮(Urea nitrogen, UN)、胆固醇(Cholesterol, CHO)、甘油三酯(Triglycerides, TG)、高密度脂蛋白胆固醇(High density lipoprotein Cholesterol, HDL-CH)、低密度脂蛋白胆固醇(Low density lipoprotein Cholesterol, LDL-DH)、血糖(Glucose, GLU)、乳酸脱氢酶

(Lactic dehydrogenase, LDH)、谷丙转氨酶(Alanine transaminase, ALT)及谷草转氨酶(Aspartate transaminase, AST)采用全自动生化分析仪进行检测。抗氧化酶活性采用南京建成试剂盒测定。白介素-6(Interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子- α (Tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白介素-8(Interleukin-8, IL-8)、白介素-10(Interleukin-10, IL-10)采用酶联免疫检测试剂盒测定。

油红O染色: 首先对肝脏组织采用冷冻切片法进行肝脏组织切片制作, 且切片厚度要求为6 μ m, 将制作好的肝脏切片放在配置好的10% 福尔马林 1% $CaCl_2$ 固定液中固定15min转移至60%异丙醇中漂洗2min, 随后将组织切片放入油红O工作液中染

表 1 试验饲料组成及营养水平(风干基础, %)

Tab. 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis, %)

项目Item	饲料Diet					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
原料Ingredient						
鱼粉Fish meal	32	32	32	32	32	32
豆粕Soybean meal	25	25	25	25	25	25
花生粕Peanut meal	8	8	8	8	8	8
高筋面粉Bread flour	26.96	26.96	26.96	26.96	26.96	26.96
豆油Soybean oil	4	3.2	2.4	1.6	0.8	0
黑水虻虫油Black soldier fly oil	0	0.8	1.6	2.4	3.2	4
大豆卵磷脂Soybean lecithin	1	1	1	1	1	1
维生素预混料Vitamin premix ¹⁾	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
矿物质预混料Mineral premix ²⁾	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1	1	1	1	1	1
维生素C Vitamin C	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
氯化胆碱Choline chloride	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
甜菜碱Betaine	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
三氧化二铋 Y_2O_3	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
合计Total	100	100	100	100	100	100
营养水平Nutrient level ³⁾						
粗蛋白质CP	41.16	40.52	40.79	39.97	41.34	40.27
粗脂肪CL	7.62	8.68	8.29	7.82	8.55	7.87
粗灰分Ash	7.94	7.94	7.92	7.94	7.77	7.93
水分Moisture	11.07	10.70	10.13	11.28	10.59	10.37
钙Ca	1.26	1.22	1.18	1.21	1.21	1.09
总磷TP	0.89	0.90	0.92	0.91	0.91	0.90
能量GE (MJ/kg)	18.35	18.41	18.52	18.31	18.43	18.49
钇元素含量Y (mg/kg)	254	256	248	252	252	254

注: ¹⁾ 每千克维生素预混料: VB₁₂ 0.016 g, VK 4 g, VA 3200000 IU, VB₁ 4 g, VE 16 g, VB₂ 8 g, VB₆ 4.8 g, VD 1600000 IU, 生物素 0.064 g, 叶酸1.28 g, 泛酸钙16 g, 烟酸28 g, 肌醇40 g; ²⁾ 每千克矿物质预混料: 镁9 g, 钾36 g, 铁10 g, 锌8 g, 钙230 g, 锰1.9 g, 碘0.032 g, 钴0.25 g, 硒0.05 g; ³⁾ 营养水平为实测值

Note: ¹⁾ One kilogram of vitamin premix contained the following: VB₁₂ 0.016 g, VK 4 g, VA 3200000 IU, VB₁ 4 g, VE 16 g, VB₂ 8 g, VB₆ 4.8 g, VD 1600000 IU, biotin 0.064 g, folic acid 1.28 g, calcium pantothenate 16 g, nicotinic acid 28 g, inositol 40 g; ²⁾ One kilogram of mineral premix contained the following: Mg 9 g, K 36 g, Fe 10 g, Zn 8 g, Ca 230 g, Mn 1.9 g, I 0.032 g, Co 0.25 g, Se 0.05 g; ³⁾ Nutrient levels were measured values

色10min,接着用60%异丙醇溶液分化漂洗,自来水冲洗,最后用甘油明胶封固,于显微镜下观察染色情况并拍照。每组内每张切片随机挑选至少3个200倍视野进行拍照。拍照时尽量让组织充满整个视野,保证每张照片的背景光一致。应用Image-Pro Plus 6.0软件选取相同的红色作为判断所有照片脂滴的统一标准,对每张照片进行分析得出每张照片红色脂滴占整个组织面积的比率即脂滴的面积百分比(%)。

1.5 指标计算

成活率(Survival rate, SR , %)= $100 \times N_t/N_0$;

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

特定生长率(Specific growth rate, SGR , %/d)= $100 \times (\ln W_t - \ln W_0)/t$;

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

摄食量(Food intake, FI , g/d)= W_f/t

肝体比(Hepatosomatic index, HSI , %)= $100 \times W_h/W$;

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

肥满度(Condition factor, CF , g/cm³)= $100 \times W/L^3$;

腹脂指数(Intraperitoneal fat index, IPF , %)= $W_i/W_t \times 100$;

干物质的表观消化率(ADC, %)= $100 \times (1 - D_y/F_y)$;

营养物质表观消化率(ADC, %)= $100 \times [1 - (F_n \times D_y)/(D_n/F_y)]$

式中, N_t 为终末尾数; N_0 为初始尾数; W_t 为终末体质量(g); W_0 为初始体质量(g); t 为实验天数(d); W_f 为摄入饲料量(g); W_h 为鱼肝脏重(g); W_v 为鱼内脏重(g); W 为鱼体质量(g); L 为鱼体长(cm); W_i 为肠系膜脂肪质量(g); F_n 为粪便中营养素百分含量或能量值; D_n 为饲料中营养素百分含量或能量值; F_y 为粪便中Y₂O₃的含量; D_y 为饲料中Y₂O₃的含量。

1.6 数据统计与分析

试验数据采用平均值±标准误差($n=3$)表示。采用SPSS11.5软件进行统计分析。首先对数据进行方差齐性检验,若满足方差齐性则用单因素方差分析(One-Way ANOVA)分析数据,差异显著者再用LSD检验方法进行多重比较,若不满足方差齐性则采用Dunnett's T3检验法进行多重比较。 $P<0.05$ 表示差异显著。

表2 原料和饲料脂肪酸组成(%总脂肪酸)

Tab. 2 Fatty acid composition of lipid sources and the diet (% of total fatty acids)

脂肪酸 Fatty acid	饲料Diet						脂肪源Oil	
	T0	T20	T40	T60	T80	T100	黑水虻虫油BSFLO	豆油SO
C10:0	/	0.05	0.10	0.14	0.19	0.23	0.41	/
C12:0	0.05	2.00	4.00	6.00	7.90	9.80	19.20	/
C14:0	1.50	1.90	2.50	3.00	3.50	4.20	5.10	0.24
C15:0	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.2	0.16	/
C16:0	15.10	15.80	16.80	17.70	19.00	20.50	20.80	11.10
C18:0	5.30	4.90	4.70	4.40	4.40	4.00	2.40	4.70
ΣSFA	23.23	25.90	29.42	32.45	36.21	39.89	48.63	16.04
C16:1	1.90	2.20	2.60	2.90	3.30	3.80	3.80	0.29
C18:1	25.60	25.00	24.90	24.60	25.00	26.20	23.70	25.00
C20:1	1.20	1.30	1.40	1.60	1.70	1.70	2.00	0.24
ΣMUFA	29.08	28.89	29.39	29.59	30.54	32.25	29.86	25.53
C18:2n-6	37.30	34.80	31.40	28.10	23.80	19.30	18.70	50.20
C20:4n-6	1.50	1.60	1.70	1.90	2.00	1.80	0.46	/
Σn-6 PUFA	39.56	37.10	33.77	30.64	26.41	21.50	19.31	50.2
C18:3n-3	4.20	3.80	3.30	3.00	2.30	1.80	1.60	6.20
C20:3n-3	0.52	0.47	0.42	0.37	0.31	0.27	/	0.49
C20:5n-3	1.40	1.50	1.50	1.60	1.70	1.70	0.56	0.23
C22:6n-3	2.00	2.10	2.10	2.20	2.20	2.20	0.11	0.18
Σn-3 PUFA	8.09	7.91	7.39	7.28	6.69	6.16	2.27	7.10
Σ PUFA	47.65	45.01	41.16	37.92	33.1	27.66	21.58	57.30
n-3/n-6 PUFA	20.45	21.32	21.88	23.76	25.33	28.65	11.76	0.14

2 结果

2.1 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼生长性能和形体指标的影响

由表 3 可知, 黑水虻虫油脂替代豆油对黄颡鱼幼鱼的末均重、增重率、特定生长率、存活率、饲料系数、肥满度、脏体比、肝体比及腹脂指数均无显著影响($P>0.05$)。

2.2 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼体成分的影响

由表 4 可知, 与对照组相比黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼粗蛋白、粗脂肪、水分、灰分、钙和磷含量无显著影响($P>0.05$)。

2.3 黑水虻虫油替代豆油对饲料营养物质表观消化率的影响

由表 5 可知, 各处理组饲料干物质、蛋白质、脂肪、钙、磷及能量的表观消化率与对照组相比均无显著差异($P>0.05$)。替代组钙的表观消化率与

对照组差异不显著($P>0.05$), 但 T100 组显著低于 T60 组与 T80 组($P<0.05$)。

2.4 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼血清生化指标的影响

由表 6 可知, 与对照组相比各处理组黄颡鱼幼鱼血清白蛋白、低密度脂蛋白胆固醇、甘油三酯、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、尿素氮、球蛋白、乳酸脱氢酶、血糖、总蛋白的含量差异不显著($P>0.05$)。高密度脂蛋白胆固醇随着替代比例的增加呈现先上升后下降的趋势, T60 组和 T80 组显著高于对照组($P<0.05$)。

2.5 黑水虻虫油替代鱼油对黄颡鱼幼鱼血清抗氧化指标和炎症因子的影响

由表 7 可知, 与对照组相比各替代组黄颡鱼幼鱼血清抗超氧阴离子、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性及丙二醛含量均无显著差异($P>0.05$)。与对照组相比, 各处理组血清肿瘤坏死因子- α 浓度无

表 3 黑水虻虫油替代鱼油对黄颡鱼幼鱼生长性能和形体指标的影响

Tab. 3 Effects of dietary soybean oil replaced with *Hermetia illucens* larvae oil on growth performance and physical indicators of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*

项目Item	组别Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
初始均重IBW (g)	2.12±0.00	2.12±0.00	2.12±0.01	2.12±0.00	2.12±0.00	2.12±0.00
末均重FBW (g)	29.9±1.27	28.7±0.76	28.5±1.80	26.0±1.71	26.9±0.55	27.8±0.64
增重率WGR (%)	1313±59.5	1257±36.5	1245±84.5	1127±82.9	1169±28.6	1213±29.9
特定生长率SGR (%/d)	4.70±0.06	4.62±0.06	4.60±0.11	4.45±0.12	4.50±0.06	4.60±0.04
摄食量FI (g/d)	19.1±0.21	19.2±0.30	19.4±0.94	18.8±0.51	18.8±0.30	18.6±0.28
成活率SR (%)	100±0.00	100±0.00	100±0.00	100±0.00	99.3±0.72	100±0.00
饲料系数FCR	1.00±0.03	1.06±0.04	1.08±0.02	1.06±0.05	1.09±0.02	1.04±0.03
肥满度CF (g/cm ³)	1.84±0.06	1.85±0.11	1.85±0.03	1.81±0.08	1.82±0.03	1.82±0.07
脏体比VSI (%)	11.0±0.72	11.0±0.41	10.9±1.22	10.6±0.54	11.2±0.39	10.7±0.45
肝体比HSI (%)	2.02±0.13	2.01±0.10	2.13±0.21	2.09±0.08	2.10±0.11	2.08±0.08
腹脂指数IFI (%)	3.04±0.19	2.63±0.17	2.58±0.17	2.55±0.18	2.98±0.25	2.98±0.24

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下同
Note: Values in each row without a common superscript are significantly different ($P<0.05$), the same applies below

表 4 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼体成分的影响(干重, %)

Tab. 4 Effects of dietary soybean oil replaced with *Hermetia illucens* larvae oil on body composition of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco* (dry weight %)

项目Item	组别 Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
粗蛋白Crude protein	14.1±0.07 ^{ab}	14.1±0.09 ^{ab}	14.1±0.02 ^{ab}	13.8±0.13 ^a	14.1±0.13 ^{ab}	14.3±0.06 ^b
粗脂肪Crude lipid	7.49±0.08	8.46±0.30	7.90±0.05	7.77±0.18	8.07±0.45	8.04±0.44
水分Moisture	74.90±0.94	74.78±0.68	75.17±1.32	75.00±0.64	74.90±0.59	75.23±0.29
灰分Ash	3.00±0.03	3.03±0.05	3.07±0.04	2.99±0.08	2.99±0.06	3.00±0.04
钙Ca	0.82±0.02	0.86±0.03	0.85±0.01	0.82±0.01	0.82±0.03	0.83±0.01
磷P	0.54±0.01 ^{ab}	0.55±0.01 ^{ab}	0.56±0.01 ^b	0.54±0.01 ^{ab}	0.53±0.01 ^a	0.55±0.01 ^{ab}

显著差异($P>0.05$);当黑水虻虫油替代比例超40%时,各处理组血清中白介素-10、白介素-6及白介素-8的浓度均显著高于对照组($P<0.05$)。

2.6 黑水虻虫油脂替代豆油对黄颡鱼幼鱼肝脏脂肪面积的影响

由表8和图1可知,与对照组相比黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼肝脏脂肪面积无显著影响($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长性能和形体指标的影响

脂肪为鱼类生长发育提供必需脂肪酸和能量。本试验结果显示,黑水虻虫油完全替代豆油对黄颡鱼的末均重、增重率、特定生长率、存活

表5 黑水虻虫油替代豆油对饲料营养物质表观消化率的影响

Tab. 5 Effects of dietary soybean oil replaced with *H. illucens* larvae oil on ADC's of feed nutrients (%)

项目Item	组别Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
干物质DM	73.7±0.76	74.8±0.31	74.6±0.92	75.3±0.28	75.4±0.78	75.1±0.81
蛋白质CP	88.9±0.75	88.9±0.61	88.0±1.13	88.5±0.34	89.3±0.59	89.4±0.81
脂肪CL	79.1±1.26	80.9±0.26	80.6±2.50	80.0±1.06	80.7±1.50	78.6±0.95
钙Ca	36.8±0.63 ^{ab}	35.4±1.66 ^{ab}	34.3±1.70 ^{ab}	37.1±1.99 ^b	39.6±1.80 ^b	31.5±1.93 ^a
磷P	59.3±1.34	60.6±0.58	61.9±0.90	60.0±0.33	62.5±1.58	60.0±0.95
能量GE	77.1±0.80	78.2±0.38	77.7±1.04	78.3±0.29	78.6±0.64	78.4±0.79

表6 黑水虻虫油替代鱼油对黄颡鱼幼鱼血清生化指标的影响

Tab. 6 Effects of dietary soybean oil replaced with *H. illucens* larvae oil on serum biochemical indices of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*

项目Item	组别 Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
白蛋白ALB (g/L)	12.1±0.22	12.1±0.67	12.5±0.34	13.4±0.66	12.4±0.26	11.8±0.30
球蛋白GLO (g/L)	20.3±0.75	20.8±2.80	20.1±2.29	20.1±2.29	21.0±1.38	20.0±1.36
总蛋白TP (g/L)	32.4±0.57	32.9±3.43	32.7±2.40	33.0±2.42	33.4±1.29	31.9±1.13
胆固醇CHO (mmol/L)	4.26±0.33	4.48±0.45	4.32±0.14	4.58±0.37	4.66±0.19	4.46±0.31
低密度脂蛋白胆固醇LDL-CHO (mmol/L)	0.16±0.03	0.18±0.02	0.19±0.02	0.21±0.05	0.18±0.04	0.21±0.09
高密度脂蛋白胆固醇HDL-CHO (mmol/L)	0.47±0.03 ^a	0.49±0.04 ^{ab}	0.51±0.02 ^{ab}	0.53±0.06 ^b	0.53±0.02 ^b	0.51±0.01 ^{ab}
甘油三酯TG (mmol/L)	7.00±0.98	7.72±1.00	7.18±0.54	7.87±0.13	8.31±0.68	7.16±0.48
血糖GLU (mmol/L)	8.08±0.54	7.85±1.18	7.45±1.14	7.45±1.61	7.44±0.91	8.32±1.31
尿素氮UREA (mmol/L)	0.83±0.19	0.90±0.08	0.85±0.26	0.75±0.13	0.73±0.10	0.80±0.08
谷丙转氨酶ALT (U/L)	7.00±2.94	9.00±2.16	7.50±1.73	6.00±1.15	6.25±1.89	5.75±1.50
谷草转氨酶AST (U/L)	320±35.8	327±62.9	328±50.8	276±4.8	320±12.3	309±21.6
乳酸脱氢酶LDH (U/L)	1355±106	1220±259	1300±255	1202±280	1334±277	1150±156

表7 黑水虻虫油替代鱼油对黄颡鱼幼鱼血清抗氧化能力和炎症因子的影响

Tab. 7 Effects of dietary soy bean oil replaced with *H. illucens* larvae oil on serum antioxidant and inflammatory factors of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*

项目Item	组别 Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
抗超氧阴离子ASAFR (U/L)	258±22.1	268±27.1	254±21.6	272±23.0	314±15.3	264±22.1
过氧化氢酶CAT (U/mL)	23.9±0.83	24.2±1.77	23.4±2.72	20.0±3.50	18.7±3.95	23.5±3.14
超氧化物歧化酶SOD (U/mL)	22.9±0.57	23.1±3.08	19.7±1.66	22.9±3.02	26.1±1.32	22.9±1.99
丙二醛MDA (nmol/mL)	11.08±1.24	10.40±1.41	9.38±1.45	12.08±0.90	11.45±2.16	9.23±0.63
肿瘤坏死因子- α TNF- α (mol/mL)	23.8±2.36 ^{ab}	23.1±1.75 ^a	25.7±1.70 ^{ab}	29.5±1.05 ^{ab}	28.2±0.50 ^{ab}	30.5±3.84 ^b
白介素-6 IL-6 (pg/mL)	53.1±6.12 ^a	76.3±8.64 ^{ab}	112±13.6 ^b	106±17.7 ^b	171±19.9 ^c	116±15.4 ^b
白介素-8 IL-8 (ng/mL)	0.70±0.05 ^a	0.84±0.05 ^{ab}	0.97±0.08 ^{bc}	1.13±0.09 ^{cd}	1.24±0.11 ^d	1.17±0.05 ^{cd}
白介素-10 IL-10 (ng/mL)	29.6±5.24 ^a	31.2±3.37 ^{ab}	63.9±9.47 ^c	48.0±3.13 ^{bc}	87.0±6.09 ^d	52.1±6.82 ^c

率、饲料系数未产生显著影响,说明黑水虻虫油可以100%替代黄颡鱼幼鱼配合饲料中的豆油,这一结果与Li等^[5]用黑水虻虫油完全替代豆油对建鲤的生长性能未产生显著影响的结果一致。本实验中豆油亚油酸含量达到50.2%,而黑水虻虫油中月桂酸含量19.20%、棕榈酸含量20.80%、油酸含量23.70%、亚油酸含量18.7%。Li等^[5]认为黑水虻虫油月桂酸含量较高与椰子油相似,而且亚油酸含量远远大于亚麻酸的组成则与豆油相似。当椰子油(富含月桂酸)替代虹鳟^[10]饲料中低剂量的鱼油和红姑鱼(*Sciaenops ocellatus*)^[11]饲料中其他脂肪源时,对鱼的生长性能影响不显著,但是当椰子油替代高剂量鱼油时虹鳟增重率降低^[12],在以豆油为基础油脂的饲料中添加椰子油黄颡鱼生长性能也不受影响^[13]。已有研究表明,黄颡鱼体内具有把C18多不饱和脂肪酸(PUFA)去饱和及延长合成高度不饱和脂肪酸(HUFA)的能力,豆油、棕榈油与鱼油都是黄颡鱼适宜的脂肪源^[14],棕榈油能够完全替代黄颡鱼饲料中鱼油和豆油混合物^[15],上述研究结果进一步说明黄颡鱼能够利用黑水虻虫油中的大部分脂肪酸。

本试验中黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼形体指标无显著影响,然而随着黑水虻虫油替代豆油比例的增加,幼建鲤脏体比和腹脂指数显著降低^[5]。研究认为黑水虻虫油富含中链脂肪酸^[5],而中链脂肪酸具有减少脂肪组织沉积,可在不增加脂肪沉积的情况下提高能量的利用^[16,17]。本试验中黄颡鱼的肥满度、脏体比、肝体比及腹脂指数均未受豆油替代比例增加时饲料中饱和脂肪酸(SFA)增加的影响,这也可能是由于黑水虻虫油中的短链脂肪酸具有降低脂肪在组织中沉积的作用导致的。

3.2 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼体成分的影响

饲料组成影响鱼体的体成分组成^[18],饲料中过量的脂肪会导致大量脂肪沉积在鱼体腹腔和组织中^[19-21]。在本试验中,配置各实验组饲料粗蛋白、粗脂肪和能量相等可能是造成黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼粗蛋白、粗脂肪影响不显著的因素之一,同样Li等^[5]未发现黑水虻虫油替代豆油对幼建鲤肝脏、肌肉和鱼体的组成存在显著影响。研究发现饲料中PUFA通过降低脂肪酸合成酶(FAS)和乙酰CoA羧化酶(ACC)的酶活和含量以及

表 8 黑水虻虫油替代鱼油对黄颡鱼肝脏脂滴的影响

Tab. 8 Effects of dietary soy bean oil replaced with *H. illucens* larvae oil on liver lipid droplets in liver of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*

项目Item	组别Group					
	T0	T20	T40	T60	T80	T100
脂滴Lipid droplets (%)	26.2±3.33	24.0±3.26	30.4±2.54	30.4±2.81	28.7±4.15	21.2±0.82

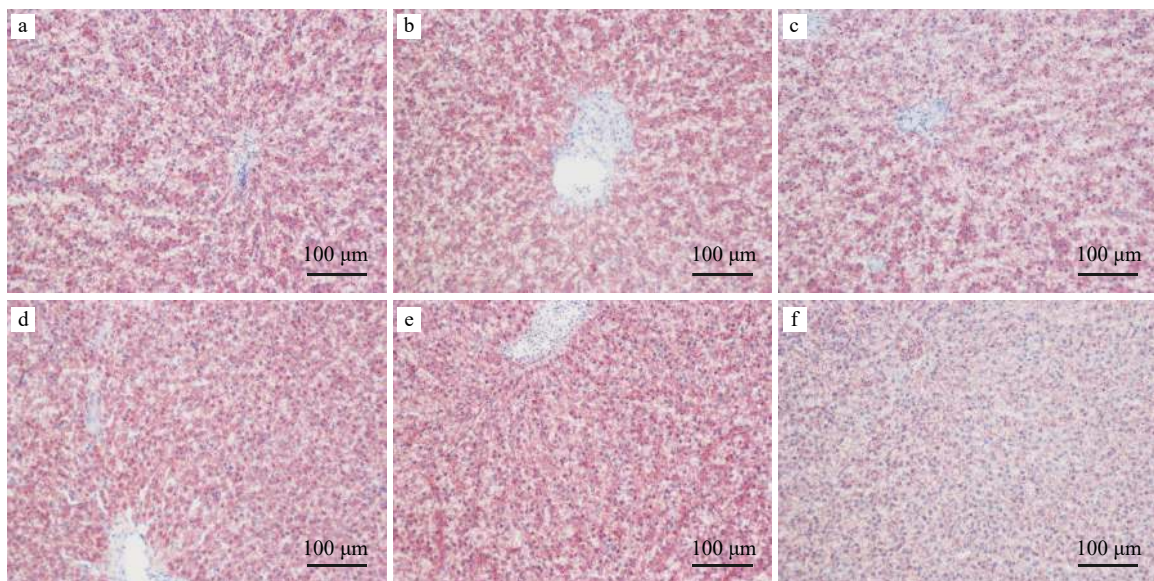


图 1 油红O染色观察黄颡鱼肝脏脂质积累(×200倍)

Fig. 1 Oil red O staining analysis of the accumulation of lipid droplets in liver of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco* (×200)

图中红色为脂肪滴,蓝色为细胞核。a. T0组; b. T20组; c. T40组; d. T60组; e. T80组; f. T100组

Fat droplets in red and nuclei in blue. a. T0 group; b. T20 group; c. T40 group; d. T60 group; e. T80 group; f. T100 group

提高脂肪酸氧化酶活性,从而降低体脂沉积的作用^[22,23]。在本试验中由于黑水虻虫油SFA和单不饱和脂肪酸(MUFA)含量较高,因此随着替代量的增加饲料中PUFA含量降低,这一现象亦出现在Li等^[5]的试验中,虽然饲料中PUFA含量下降,但未对体脂肪沉积产生显著影响,这可能也与中链脂肪酸月桂酸的降脂作用有关。但陆游等^[13]在研究黄颡鱼对不同脂肪源利用情况时,发现虽然椰子油中月桂酸含量较高但黄颡鱼体脂沉积也显著高于其他富含PUFA的脂肪源组。

3.3 黑水虻虫油替代豆油对饲料营养物质表观消化率的影响

消化率是评定饲料营养成分可利用性的重要指标。脂肪的表观消化率与脂肪酸的不饱和程度及碳链长度有关^[24]。在许多鱼类中研究发现鱼类对脂肪酸消化率的顺序依次是HUFA>C18PUFA>MUFA>SFA,在同一饱和程度下短链脂肪酸>长链脂肪^[25-29]。在本试验中虽然随着替代量的增加饲料不饱和脂肪酸含量下降,但黄颡鱼对饲料脂肪的表观消化率无显著差异。彭墨等^[30]使用亚麻籽油替代鱼油时饲料中不饱和脂肪酸含量升高,但大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼对饲料脂肪的表观消化率也无显著差异。Ng和Gibon^[31]认为个别脂肪酸消化率微小地降低对于鱼类来说并没有显著的生物学意义。

3.4 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼血清生化指标、抗氧化能力和炎症因子的影响

鱼类血液生理生化指标与机体自身的营养状况、代谢和疾病密切相关^[32]。在本试验中,黄颡鱼幼鱼高密度脂蛋白胆固醇随着替代比例的增加呈现先上升后下降的趋势。血清高密度脂蛋白胆固醇水平反应肝脏合成高密度脂蛋白的能力,它将总胆固醇、甘油三酯等物质从外周组织运输到肝脏分解,防止总胆固醇在血管壁沉积,其血浆含量与冠状动脉疾病的发生负相关^[33,34]。已有研究显示单月桂酸甘油酯能够显著提高蛋鸡血清中高密度脂蛋白胆固醇的含量,改善蛋鸡的脂肪代谢^[35]。然而,Li等^[5]在实验中未发现黑水虻虫油替代豆油对幼建鲤血清生化指标产生显著影响。陆游等^[13]用富含月桂酸的椰子油配置等氮等脂饲料投喂黄颡鱼时,各组血清生化指标无显著差异,Luo等^[12]也认为,从椰子油提取的中链脂肪酸对虹鳟血浆脂类代谢产物影响较小。实验对象不同,待研究脂肪源脂肪酸组成差异,或者养殖时间长短等都是影响动物血脂类代谢差异的重要因素。

动物机体的抗氧化状态,在一定程度上反映了

机体的健康状况。在本试验中黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼血清抗氧化能力无显著影响。但陆游等^[13]发现富含月桂酸的椰子油添加到饲料中显著提高了黄颡鱼血清超氧化物歧化酶活性(SOD)和谷胱甘肽巯基转移酶(GST)活性,降低了MDA含量,认为这可能与椰子油的脂肪酸不饱和程度有关。已有研究表明,高含量DHA饲料可能会提高细胞膜脂质过氧化的敏感性,破坏抗氧化系统,从而对大鼠肝脏组织的抗氧化能力产生负面影响^[36]。在虹鳟幼鱼中,随着橡胶籽油(其中不饱和脂肪酸含量为74.52%; α -亚麻酸的含量为20%—24%,是大豆油和菜籽油的3—4倍)替代豆油比例的升高,血浆一氧化氮含量显著升高,过氧化氢酶活性显著降低^[37],鱼油中n-3脂肪酸含量较高可以抑制尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)幼鱼的抗氧化酶活性^[38],同样富含亚麻酸(Linolenic acid, LNA)的紫苏籽油,因不饱和脂肪酸含量过高,则容易引起中华绒螯蟹(*Eriocheir Sinensis*)幼蟹肝胰腺的脂质氧化应激^[39]。在本试验中,黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼血清抗氧化能力无显著影响,说明黑水虻虫油未对黄颡鱼幼鱼的抗氧化能力产生负面影响,这是否与黑水虻虫油的不饱和程度或是中链脂肪酸有关,需要进一步探讨。

肿瘤坏死因子- α (Tumor necrosis factor α , TNF- α)、白介素-6(Interleukin-6, IL-6)和白介素-8(Interleukin-8, IL-8)是促炎症因子,而白介素-10(Interleukin-10, IL-10)是抑制炎症因子,它们在抗菌、抗病毒感染和免疫功能调节中发挥重要作用。已有研究表明,蝇蛆油溶液能减轻二甲苯引起的小鼠耳廓肿胀度,有抗炎作用^[40],而目前仅在大西洋鲑(*Salmo salar*)中发现,黑水虻虫粉替代鱼粉对头肾细胞促炎基因IL-1 β 、IL-8、IL-10和TNF- α 的转录无影响^[41]。黑水虻幼虫脂肪酸的特殊性在于其中中链脂肪酸MCFA和月桂酸的浓度较高^[42,43],中链脂肪酸MCFA是一种碳链为6-12碳的饱和脂肪酸,由于其快速氧化和吸收,以及其在养殖动物肠道微生物群中抗菌和抗病毒的特性而被广泛研究^[44,45]。在本试验中黄颡鱼血清促炎症因子TNF- α 、IL-6、IL-8和抗炎因子IL-10均随着黑水虻虫油替代量的增加而升高,这是否表明黑水虻虫油替代时黄颡鱼幼鱼血清促炎和抗炎细胞因子的动态平衡状态?由于目前相关资料比较缺乏,因此黑水虻虫油的抗炎作用及其机理需要深入研究。

3.5 黑水虻虫油脂替代豆油对黄颡鱼幼鱼肝脏脂肪滴面积的影响

肝脏是机体内脂肪合成的主要部位。肝脏脂

肪沉积与从脂肪组织摄取的脂肪酸和肝脏脂肪合成有关^[46], 已有研究表明, 植物油替代鱼油会造成饲料中PUFA的减少, 促进大菱鲃幼鱼肝脏脂肪过多沉积^[30], 油酸和亚油酸比长链多不饱和脂肪酸显著增加了大黄鱼(*Larimichthys crocea*)肝脏和肌肉脂肪沉积^[47]。然而在本实验中黄颡鱼幼鱼肝脏脂滴面积未受黑水虻虫油的影响。相反, Li等^[5]发现随着黑水虻虫油替代量的增加, 幼建鲤腹腔脂肪组织的脂肪细胞变小, 认为这可能与黑水虻虫油内含大量中链脂肪酸有关。鱼类代谢脂肪酸的能力与很多因素有关, 比如鱼的种类、大小、生长周期等都可能对研究结果造成一定影响。

4 结论

黑水虻虫油完全替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长性能、形体指标、体成分、营养物质表观消化率和抗氧化指标无显著影响, 但提高了血清高密度脂蛋白胆固醇、抗炎和促炎因子含量, 肝脏脂滴面积无显著变化。以生长性能为评价指标, 当黄颡鱼幼鱼基础饲料中添加4%豆油时, 黑水虻虫油能够完全替代豆油。

参考文献:

- [1] Ai Q H, Yan J, Mai K S. Research progresses of lipids and fatty acids transport in fish [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(4): 859-868. [艾庆辉, 严晶, 麦康森. 鱼类脂肪与脂肪酸的转运及调控研究进展 [J]. *水生生物学报*, 2016, **40**(4): 859-868.]
- [2] Newton G L, Sheppard D C, Watson D W, et al. The black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a manure management/resource recovery tool. Symposium on the state of the science of Animal Manure and Waste Management, January 5-7, 2005, San Antonio, Texas, USA. Retrieved April 10, 2007, <http://www.cals.ncsu.edu/wastemgmt/natlcenter/sanantonio/proceedings.htm>.
- [3] St-Hilaire S, Sheppard C, Tomberlin J K, et al. Fly prepupae as a feedstuff for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2007a, **38**(1): 309-313.
- [4] Hu J R, He F, Mo W Y, et al. The feeding value of black soldier fly *Hermetia illucens* larvae for feeding different organic wastes [J]. *China Feed*, 2017(15): 24-27. [胡俊茹, 何飞, 莫文艳, 等. 采食不同有机废弃物黑水虻幼虫饲料价值分析 [J]. *中国饲料*, 2017(15): 24-27.]
- [5] Li S L, Ji H, Zhang B X, et al. Influence of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil on growth performance, body composition, tissue fatty acid composition and lipid deposition in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. *Aquaculture*, 2016, **465**: 43-52.
- [6] ST-Hilaire S, Cranfill K. Fish offal recycling by the black soldier fly produces a food stuff high in omega-3 fatty acids [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2007b, **38**(2): 309-313.
- [7] Sealey W M, Gaylord T G, Barrows F T, et al. Sensory analysis of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fed enriched black soldier fly prepupae, *Hermetia illucens* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011, **42**(1): 34-45.
- [8] Fishery and Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas. China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 25. [农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 25.]
- [9] Sun T. Macronutrient composition of formulated diets for yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson) [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008: 1. [孙挺. 黄颡鱼幼鱼三大营养素需要量的研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2008: 1.]
- [10] Figueiredo-Silva A C, Kaushik S, Terrier F, et al. Link between lipid metabolism and voluntary food intake in rainbow trout fed coconut oil rich in medium-chain TAG [J]. *British Journal of Nutrition*, 2012, **107**(11): 1714-1725.
- [11] Craig S R, Gatlin III D M. Coconut oil and beef tallow, but not tricaprillin, can replace menhaden oil in the diet of red drum (*Sciaenops ocellatus*) without adversely affecting growth or fatty acid composition [J]. *Journal Nutrition*, 1995, **125**(12): 3041.
- [12] Luo L, Xue M, Vachot C, et al. Dietary medium chain fatty acids from coconut oil have little effects on post-prandial plasma metabolite profiles in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2014, **420-421**: 24-31.
- [13] Lu Y, Jin M, Yuan Y, et al. Effects of different lipid sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and antioxidant capacity in juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(7): 1094-1110. [陆游, 金敏, 袁野, 等. 不同脂肪源对黄颡鱼幼鱼生长性能、体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及抗氧化能力的影响 [J]. *水产学报*, 2018, **42**(7): 1094-1110.]
- [14] Tan X Y. Nutrient physiology of lipid in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 84. [谭肖英. 黄颡鱼脂类营养生理研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 84.]
- [15] Zhao S B, Wu W J, Dai X F, et al. Effects of substituting palm oil for fish oil and soy oil in feed on the growth performance and muscular fatty acid composition of *Pelteobagrus vachelli* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(5): 1000-1009. [赵帅兵, 吴文俊, 代小芳, 等. 饲料中棕榈油替代鱼油和豆油对黄颡鱼生长和肌肉脂肪酸组成的影响 [J]. *水生生物学报*, 2017, **41**(5): 1000-1009.]
- [16] Hashim S A, Tantibhedyangkul P. Medium chain triglyceride in early life: effects on growth of adipose tissue [J]. *Lipids*, 1987, **22**(6): 429-434.
- [17] Lavau M M, Hashim S A. Effect of medium chain triglyceride on lipogenesis and body fat in the rat [J]. *Journal Nutrition*, 1978, **108**(4): 613-620.
- [18] Hansen A C, Rosenlund G, Karlsen Ö, et al. Total re-

- placement of fish meal with plant proteins in diets for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) I-Effects on growth and protein retention [J]. *Aquaculture*, 2007, **272**(1-4): 599-611.
- [19] Hemre G I, Sandnes K. Effect of dietary lipid level on muscle composition in Atlantic salmon *Salmo salar* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1999, **5**(1): 9-16.
- [20] Wang J T, Liu Y J, Tian L X, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth performance, lipid deposition, hepatic lipogenesis in juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. *Aquaculture*, 2005, **249**(1): 439-447.
- [21] López L M, Torres A L, Durazo E, *et al.* Effects of lipid on growth and feed utilization of white seabass (*Atractoscion nobilis*) fingerlings [J]. *Aquaculture*, 2006, **253**(1): 557-563.
- [22] Toussant M J, Wilson M D, Clarke S D. Coordinate suppression of liver acetyl-CoA carboxylase and fatty acid synthetase by polyunsaturated fat [J]. *The Journal of Nutrition*, 1981, **111**(1): 146-153.
- [23] Takada R, Saiton M, Mori T. Dietary r-Linolenic acid-enriched oil reduces body fat content and induces liver enzyme activities relating to fatty acid Beta-oxidation in rats [J]. *Journal Nutrition*, 1994, **124**(4): 469-474.
- [24] Castro C, Corraze G, Panserat S, *et al.* Effects of fish oil replacement by a vegetable oil blend on digestibility, postprandial serum metabolite profile, lipid and glucose metabolism of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015(21): 592-603.
- [25] Torstensen B E, Lie O, Froyland L. Lipid metabolism and tissue composition in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) - effects of capelin oil, palm oil, and oleic acid-enriched sunflower oil as dietary lipid sources [J]. *Lipids*, 2000, **35**(6): 653-664.
- [26] Caballero M J, Obach A, Rosenlund G, *et al.* Impact of different dietary lipid sources on growth, lipid digestibility, tissue fatty acid composition and histology of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Aquaculture*, 2002, **214**(1-4): 253-271.
- [27] Menoyo D, Lopez-Bote C J, Bautista J M, *et al.* Growth, digestibility and fatty acid utilization in large Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed varying levels of n-3 and saturated fatty acids [J]. *Aquaculture*, 2003, **225**(1-4): 295-307.
- [28] Francis D S, Turchini G M, Jones P L, *et al.* Effects of fish oil substitution with a mix blend vegetable oil on nutrient digestibility in Murray cod, *Maccullochella peelii peelii* [J]. *Aquaculture Amsterdam*, 2007, **269**(1): 447-455.
- [29] Martins D A, Valente L M P, Lall S P. Apparent digestibility of lipid and fatty acids in fish oil, poultry fat and vegetable oil diets by Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus* L [J]. *Aquaculture*, 2009, **294**(1-2): 132-137.
- [30] Peng M, Xu W, Mai K S, *et al.* Growth performance, fatty acids composition and lipid deposition in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) fed diets with various fish oil substitution levels by linseed oil [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(8): 1131-1139. [彭墨, 徐玮, 麦康森, 等. 亚麻籽油替代鱼油对大菱鲆幼鱼生长、脂肪酸组成及脂肪沉积的影响 [J]. 水产学报, 2014, **38**(8): 1131-1139.]
- [31] Ng W K, Gibon V. Palm oil and saturated fatty acid-rich vegetable oils [C]//Turchini G M, Ng W K, Tocher D (Eds.), *Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds*. New York: CRC Press, 2010: 99-132.
- [32] Zhou Y, Guo W C, Yang Z G, *et al.* Advances in the study of haematological indices of fish [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2001, **10**(2): 163-165. [周玉, 郭文场, 杨振国, 等. 鱼类血液学指标研究的进展 [J]. 上海水产大学学报, 2001, **10**(2): 163-165.]
- [33] Franzen J, Johansson B W, Gustafson A. Reduced high density lipoproteins as a risk factor after acute myocardial infarction [J]. *Acta Medica Scandinavica*, 1987, **221**(4): 357-362.
- [34] Tu Y H, Zhang X, Tao L L, *et al.* Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on growth performance, digestive enzyme activities, and partial biochemical indices of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, **39**(5): 81-90. [涂佑欢, 张曦, 陶琳丽, 等. 橡胶籽油替代豆油对草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 生长性能、消化酶活性及部分生化指标的影响 [J]. 渔业科学进展, 2018, **39**(5): 81-90.]
- [35] Liu M Y, Wang J L, Feng F Q. Effects of glycerol monolaurate on production performance, egg quality, serum parameters, immune organ index and abdominal fat morphology of laying hens [J]. *China Poultry*, 2017, **39**(17): 24-30. [刘梦芸, 王建莉, 冯凤琴. 饲料添加单月桂酸甘油酯对蛋鸡生产性能、蛋品质、血清生化指标、免疫器官指数和腹脂形态的影响 [J]. 中国家禽, 2017, **39**(17): 24-30.]
- [36] Song J H, Fujimoto K, Miyazawa T. Polyunsaturated (n-3) fatty acids susceptible to peroxidation are increased in plasma and tissue lipids of rats fed docosahexaenoic acid-containing oils [J]. *Journal of Nutrition*, 2000, **130**(12): 3028-3033.
- [37] Wang K, Tao L L, Zhan G R, *et al.* Effects of replacing soy oil with rubber seed oil on growth performance, the blood and liver biochemical indexes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2017, **32**(4): 627-636. [王坤, 陶琳丽, 詹瑰然, 等. 橡胶籽油替代豆油对虹鳟幼鱼生长性能、血液及肝脏生化指标的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, **32**(4): 627-636.]
- [38] Ayisi C L, Zhao J L, Wu J W. Replacement of fish oil with palm oil: Effects on growth performance, innate immune response, antioxidant capacity and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *PLoS One*, 2018, **13**(4): e0196100.
- [39] Ma Q Q. Study on the dietary suitable lipid source and utilization of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018: 105. [马倩倩. 中华绒螯蟹饲料适宜脂肪源筛选并提高其利用效率的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018: 105.]
- [40] Chen S Y. Study on chemical composition, physical and chemical properties of fly maggot oil and its therapeutic effect on experimental scald in animals [D]. Wuhan:

- Huazhong Agricultural University, 2007: 1-2. [陈淑媛. 蝇蛆油脂化学成分、理化特性及其对动物实验性烫伤治疗药效的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2007: 1-2.]
- [41] Stenberg O K, Holen E, Piemontese L, *et al.* Effect of dietary replacement of fish meal with insect meal on in vitro bacterial and viral induced gene response in Atlantic salmon (*Salmo salar*) head kidney leukocytes [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2019, **91**: 223-232.
- [42] Liland N S, Biancarosa I, Araujo P, *et al.* Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(8): e0183188.
- [43] Belghit I, Waagbø R, Lock E J, *et al.* Insect-based diets high in lauric acid reduce liver lipids in freshwater Atlantic salmon [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**: 343-357.
- [44] Skřivanová E, Marounek M, Dlouhá G, *et al.* Susceptibility of *Clostridium perfringens* to C2-C18 fatty acids [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2005, **41**(1): 77-81.
- [45] Dierick N A, Decuypere J A, Molly K, *et al.* The combined use of triacylglycerols containing medium-chain fatty acids (MCFAs) and exogenous lipolytic enzymes as an alternative for nutritional antibiotics in piglet nutrition: I. In vitro screening of the release of MCFAs from selected fat sources by selected exogenous lipolytic enzymes under simulated pig gastric conditions and their effects on the gut flora of piglets [J]. *Livestock Production Science*, 2002, **75**(2): 129-421.
- [46] Vyas D, Kadegowda A K, Erdman R A. Dietary conjugated linoleic Acid and hepatic steatosis: species-specific effects on liver and adipose lipid metabolism and gene expression [J]. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2012, doi: 10.1155/2012/932928.
- [47] Yan J. Effect of dietary lipid levels and types of fatty acid on lipid deposition in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: II-III. [严晶. 饲料脂肪水平和脂肪酸种类对大黄鱼脂肪沉积的影响 [D]. 青岛, 中国海洋大学, 2014: II-III.]

EFFECTS OF DIETARY SOYBEAN OIL REPLACED WITH BLACK SOLDIER FLY LARVAE OIL ON GROWTH PERFORMANCE, PLASMA BIOCHEMICAL INDEXES AND LIVER LIPID DROPLETS OF JUVENILE YELLOW CATFISH

HU Jun-Ru¹, YI Chang-Jin², WANG Guo-Xia¹, MO Wen-Yan¹ and HUANG Yan-Hua^{1,2}

(1. Guangdong Public Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Guangzhou Fishtech Biotechnology Co., Ltd, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To evaluate the effects of soybean oil (SO) replacement by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil (BSFLO) on growth performance, plasma biochemical indexes and liver lipid droplets of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*), BSFLO was used to replace 0 (control diet, T0), 20% (T20), 40% (T40), 60% (T60), 80% (T80) and 100% (T100) of SO in the basal diet, respectively. A total of 840 juvenile yellow catfish with an initial weight of (2.12 ± 0.01) g were randomly divided into 6 groups for a 56-day trial with 4 replicates in each group and 35 per replicate. The results showed that, the weight gain rate, specific growth rate, feed conversion ratio, survival rate, feeding rate and protein efficiency of juvenile yellow catfish were not affected by BSFLO replacements ($P > 0.05$). There were no significant difference in *CF*, *VSI*, *HSI* and *IPF* among all the groups ($P > 0.05$). The crude protein, crude fat, total phosphorus as well as water content in whole body were not affected by BSFLO replacement ($P > 0.05$). The apparent digestibility of dry matter, protein, fat, phosphorus and energy among all the groups were not significantly different ($P > 0.05$), but the apparent digestibility of calcium in the T60 and T80 groups were significantly higher than that in T100 group ($P < 0.05$). Except for HDL cholesterol, other serum biochemical indices were not significantly affected ($P > 0.05$), but HDL cholesterol were significantly higher in T60 and T80 groups than in control group ($P < 0.05$). No significant difference in antioxidant ability was found ($P > 0.05$), and the concentrations of the anti-inflammatory factor IL-10. The proinflammatory factors IL-6, IL-8 and TNF- α in the BSFLO replacement exceeded 40% were significantly higher than those of control group ($P < 0.05$). Oil red O staining showed that the BSFLO had no significant effect on liver fat content ($P > 0.05$). In conclusion, BSFLO can be used to completely replace SO without significantly affecting the growth performance, body indexes, body composition, apparent digestibility of nutrients, antioxidant indexes and liver lipid droplets of juvenile yellow catfish. Based on growth performance, BSFLO can completely replace SO in the diet of juvenile yellow cat fish, when the basic diet contains 4% SO.

Key words: Black soldier fly larvae oil; Soybean oil; *Pelteobagrus fulvidraco*; Growth performance; Plasma biochemical indexes; Liver lipid droplets