

文章编号: 1674-5566(2026)01-0045-12

DOI: 10.12024/jso.20241104700

黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱥生长性能、生理代谢及肌肉品质的影响

刘智俊¹, 李建忠¹, 欧阳创²

(1. 上海市水产研究所/上海市水产技术推广站, 上海 200433; 2. 上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海 200232)

摘要: 本研究旨在探究黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱥(*Siniperca chuatsi* ♀ × *Siniperca scherzeri* ♂)生长性能、生理代谢及肌肉品质的影响。实验以初始体质量为(11.43±0.54)g的杂交鱥幼鱼为投喂对象,利用黑水虻幼虫粉分别替代饲料中0%、10%、20%、30%和40%的鱼粉,配制5组等氮等脂实验饲料。结果表明:(1)黑水虻幼虫粉替代20%鱼粉显著提高了杂交鱥增重率和特定生长率,而当替代比例升至30%及以上时,杂交鱥生长性能显著下降($P<0.05$)。(2)组织质构及常规生化显示,20%~40%替代组肝胰脏中粗蛋白及粗脂肪含量显著低于对照组(0%替代组),且40%替代组肌肉胶着性、回复性和咀嚼性显著低于对照组($P<0.05$)。(3)血清生化分析显示,甘油三酯和总胆固醇含量随鱼粉替代水平的增加显著降低,而白蛋白含量随鱼粉替代水平的增加显著增加($P<0.05$)。(4)杂交鱥血清MDA水平在30%替代组达到最低,且血清LZM酶活在20%替代组达到最高。综上,黑水虻幼虫粉替代20%鱼粉对杂交鱥的生长性能和免疫抗氧化性能有明显的促进作用,而过高的替代比例则会对其生长性能和肌肉品质产生不利影响,故建议杂交鱥饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉的最适比例为20%左右。

关键词: 杂交鱥; 黑水虻幼虫粉; 鱼粉替代; 生长性能; 生理代谢

中图分类号: S 965. 199 **文献标志码:** A

鱥(*Siniperca chuatsi* Basilewsky)又名桂花鱼、季花鱼等,是广泛分布于我国江河湖泊的名贵食用鱼类^[1]。我国于20世纪70年代初开始鱥鱼人工繁殖技术的研究,随着鱥鱼苗种繁育技术的不断突破及配套技术的完善,鱥鱼人工养殖技术得到了快速发展^[2]。上海市水产研究所于2011年开始选取鱥属鱼类中体型最大、生长最快的翘嘴鱥(*S. chuatsi*)为母本,生长较慢但易于驯化且抗病力强的斑鱥(*S. scherzeri*)为父本,杂交产生杂交鱥并对其进行研究,发现杂交鱥继承了母本生长快及父本易于驯化的优点,经驯化可稳定摄食人工配合饲料^[3]。作为一种肉食性鱼类,鱥鱼对饲料中蛋白质的需求量高达40%~45%,因此其配合饲料中需要添加高比例的鱼粉^[4]。鱼粉是饲料成本结构占比最大的动物性蛋白原料,据渔业统计年鉴及农业农村部统计数据,2020年我

国鱼粉行业产量为70.8万t,消费量达到173.6万t,国内生产总量远不能满足实际需要,进口依赖严重^[5]。为了解决鱼粉短缺问题及降低饲料成本,寻找和开发新型可持续供应的蛋白质原料,已成为我国现代水产养殖业健康和可持续发展的当务之急。

黑水虻学名亮斑扁角水虻(*Hermetia illucens*),属昆虫纲(Insecta)双翅目(Diptera)短角亚目(Brachycera)水虻科(Stratiomyidae)扁角水虻属(*Hermetia*),一般世代每代历时35 d,有成虫期、卵期、幼虫期、蛹期4个阶段,具生长速度快、抗逆性强、养殖简单、繁殖迅速等优良特性^[6]。在生产中,黑水虻幼虫可降解餐厨垃圾、变质食物、禽畜粪便等有机废弃物,转化有机物为自身蛋白质和脂肪^[7]。黑水虻幼虫蛋白质含量高(35%~45%),富含月桂酸、棕榈酸、必需氨基酸、

收稿日期: 2024-11-16 修回日期: 2025-02-16

基金项目: 上海市绿化和市容管理局2024年度科学技术项目(G249910);上海市国资委企业技术创新和能级提升项目(2022032)

作者简介: 刘智俊(1985—),男,高级工程师,研究方向为河蟹养殖技术和营养饲料。E-mail: ljs1949@163.com

通信作者: 欧阳创, E-mail: ouyc@huanke.com.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

微量元素及多种生物活性物质,作为鱼粉替代蛋白源的优秀代表,具有来源广、饲养成本低、氨基酸组成平衡和营养价值高等优点^[8]。此外,黑水虻的幼虫中富含呈味核苷酸、谷氨酸等天然诱食成分,具有独特的香味,能刺激水产动物的食欲,促进消化液的分泌,提高消化酶的活性,加速饲料营养成分的分解,从而促进营养物质的吸收^[9]。目前,黑水虻幼虫粉替代鱼粉已经在加州鲈(*Micropterus salmoides*, 替代 15%~75%)^[10~12]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*, 替代 10%~60%)^[13~15]和大黄鱼(*Larimichthys crocea*, 替代 20%~80%)^[16]等肉食性鱼类中进行了应用研究,而其对杂交鱥生长性能的影响还未见报道。鉴于此,本实验采用摄食厨余垃圾的8日龄黑水虻幼虫制得的黑水虻幼虫粉,探讨其替代鱼粉对杂交鱥幼鱼生长性能、肌肉质构及血清生化指标的影响,以期为黑水虻幼虫粉作为鱼粉替代源的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 饲料配方及制备

实验以磷虾粉、谷朊粉作为蛋白源,鱼油和磷脂油作为脂肪源配制基础饲料,分别在基础饲料中添加 65.0%、58.5%、52.0%、45.5%、39.0% 鱼粉和 0%、6.5%、13.0%、19.5%、26.0% 黑水虻幼虫粉,分别以谷朊粉、鱼油和磷脂油调节饲料氮脂水平,配制黑水虻幼虫粉替代鱼粉水平分别为 0%、10%、20%、30% 和 40% 的等氮等脂饲料,分别记为 R0、R10、R20、R30 和 R40 组。饲料配制之前,所有原料粉碎后过 60 目筛,按照饲料配方中各原料的比例手工均匀混合,然后将脂肪源混合后加入粉料中均匀混合,然后加入 30% 的蒸馏水手工混匀,最后用双螺杆制粒机(鼎润机械 DSE32)制成粒径 2~3mm,长约 10.0mm 的浮性饲料。饲料在室温条件下风干后,装入自封袋中于 -20 °C 冰箱中保存备用。实验饲料配方及常规生化组成如表 1 所示。

表 1 实验饲料配方和营养水平
Tab. 1 Formulations and proximate composition of experimental diets

项目 Items	R0 组	R10 组	R20 组	R30 组	%干物质
饲料原料 Ingredient					
鱼粉 Fishmeal	65.0	58.5	52.0	45.5	39.0
黑水虻幼虫粉 Black soldier fly larvae meal	0	6.5	13.0	19.5	26.0
磷虾粉 Krill meal	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
谷朊粉 Wheat gluten	5.00	6.75	8.50	10.25	12.00
淀粉 Starch	10.00	9.35	8.70	8.05	7.40
鱼油 Fish oil	5.0	4.2	3.4	2.6	1.8
磷脂油 Lecithin oil	2.0	1.7	1.4	1.1	0.8
磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
维生素预混料 Vitamin premix ¹⁾	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
矿物质预混料 Mineral premix ²⁾	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
常规生化组成 Proximate composition					
水分 Moisture	8.76±0.48	8.80±0.94	8.76±0.50	8.33±0.97	8.18±0.43
粗蛋白 Crude protein	53.60±3.51	54.13±4.12	54.08±5.10	53.59±5.04	54.15±2.85
粗脂肪 Crude lipid	13.16±1.14	13.19±1.08	13.40±1.22	13.39±1.38	13.34±1.53
灰分 Ash	6.05±0.35	6.25±0.36	6.56±0.48	6.93±0.27	7.05±0.72

注:1)维生素预混料为每千克饲料提供,维生素 A, 13 125 IU; 维生素 D₃, 5 250 IU; 维生素 E, 140 IU; 维生素 K₃, 14 mg; 维生素 B₁, 21 mg; 维生素 B₂, 33.6 mg; 维生素 B₆, 28.7 mg; 维生素 B₁₂, 0.07 mg; 生物素, 0.28 mg; D-泛酸钙, 77 mg; 叶酸, 7 mg; 烟酰胺, 175 mg; 维生素 C, 490 mg; 肌糖, 595 mg; 乙氧喹, 1.75 mg。2)矿物质预混料为每千克饲料提供,FeSO₄, 45 mg; ZnSO₄, 215 mg; CuSO₄, 90 mg; MnSO₄, 35 mg; Na₂SeO₃, 1 mg; CoSO₄, 5 mg; Ca (IO₃)₂, 1.5 mg。

Notes: 1) vitamin premix (per kg diet): vitamin A, 13 125 IU; vitamin D₃, 5 250 IU; vitamin E, 140 IU; vitamin K₃, 14 mg; vitamin B₁, 21 mg; vitamin B₂, 33.6 mg; vitamin B₆, 28.7 mg; vitamin B₁₂, 0.07 mg; biotin, 0.28 mg; D-calcium pantothenate, 77 mg; folic acid, 7 mg; nicotinamide, 175 mg; vitamin C, 490 mg; inositol, 595 mg; ethoxyquin, 1.75 mg. 2) mineral premix (per kg diet): FeSO₄, 45 mg; ZnSO₄, 215 mg; CuSO₄, 90 mg; MnSO₄, 35 mg; Na₂SeO₃, 1 mg. CoSO₄, 5 mg; Ca (IO₃)₂, 1.5 mg.

1.2 实验设计与养殖管理

2023年4月下旬在上海市水产研究所室内循环水系统中进行杂交鱥养殖实验。实验鱼为当年繁殖的杂交鱥幼鱼,购自上海浦东申孙水产养殖有限公司,已完成驯化,驯化流程:鱼饥饿2 d→投喂冰冻饵料鱼7 d→将冰冻饵料鱼与粉状配合饲料按质量比1:1混合制成长条状软颗粒饲料投喂5 d→投喂软颗粒饲料。幼鱼进入室内后,改用R0组饲料驯化2周,进一步挑选体质健康、个体大小基本一致、摄食配合饲料良好的幼鱼用于接下来的养殖实验。平均体质量为(11.43±0.54)g,养殖容器为150 L的玻璃缸,水箱四周用黑色塑料纸包裹,每个饲料组设定3个重复玻璃缸,每个玻璃缸放20尾鱼。利用循环水进行饲养,实验用水为曝气后的自来水,水体循环速度为500 L/h,滤材为活性炭和陶瓷环,滤材体积20 L。为保障滤材过滤效果,活性炭和陶瓷环每4周清洗1次,以去除附着的有机物和杂质。使用增氧泵24 h连续增氧,使水体溶氧量(DO)高于6 mg/L,实验过程中养殖环境的光照和水温与自然环境一致。每天投喂饲料2次,按体质量的3%投喂实验饲料,时间分别为9:00和16:00。实验期间养殖水体水温、氨氮、溶氧和亚硝酸盐等指标分别为22.0~28.0 °C、0.05~0.540 mg/L、5.0~8.0 mg/L和0.01~0.540 mg/L,养殖周期为10周。

1.3 生长数据收集及样本采集

养殖实验结束后,禁食24 h,对每缸实验鱼进行逐一称重并计数,据此计算各组实验鱼初始体质量(Initial body weight, IBW)、最终体质量(Final body weight, FBW)、增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific growth rate, SGR)、最终成活率(Survival rate, SR)及饵料系数(Feed coefficient ratio, FCR)。每缸随机取6尾鱼,鱼尾静脉抽血1 mL,静置2 h后使用D1008E离心机于3 000 r/min离心10 min,取血清保存至-80 °C冰箱待测血清生理生化指标;随后使用电子天平和游标卡尺称量并记录每条鱼的体质量、体长,再迅速于冰盘上解剖取出内脏团,生理盐水冲洗后用滤纸吸干,随后分离肝脏并称重。据此计算各组实验鱼肝体比(Hepatosomatic index, HSI)、脏体比(Viscerosomatic index, VSI)及肥满度(Condition factor, CF)。实验鱼躯体和肝胰脏分别装入塑封袋保存至-40 °C冰箱中,用于组织

营养成分和肌肉质构指标检测。实验鱼生长和摄食相关指标计算公式:

$$R_{WGR} = (W_f - W_i) / W_i \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{SGR} = (\ln W_f - \ln W_i) / d \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{SR} = N_f / N_i \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{FCR} = T_f / (T_{wf} - T_{wi}) \quad (4)$$

$$I_{HSI} = W_h / W \times 100\% \quad (5)$$

$$I_{VSI} = W_v / W \times 100\% \quad (6)$$

$$I_{CF} = W / L^3 \times 100 \quad (7)$$

式中: R_{WGR} 为增重率,%; R_{SGR} 为特定生长率,%/d; R_{SR} 为最终成活率,%; R_{FCR} 为饵料系数; I_{HSI} 为肝体比,%; I_{VSI} 为脏体比,%; I_{CF} 为肥满度,g/cm³; W_f 为最终体质量,g;, W_i 为初始体质量,g; N_f 为最终鱼尾数; N_i 为初始鱼尾数; T_f 为总摄食量; T_{wf} 为终末总体质量,g; T_{wi} 为初始总体质量,g; W_h 为肝脏质量; W_v 为内脏质量,g; W 为体质量,g; L 为体长,cm。

1.4 肌肉质构及常规生化测定

根据AOAC的方法对实验饲料、实验鱼组织的水分、粗蛋白和灰分含量进行测定^[17]。根据FOLCH等^[18]的方法用氯仿-甲醇(体积比为2:1)提取总脂。杂交鱥解冻后,取长8 cm、宽5 cm、厚1 cm的鱼片,使用Rapid-TA质构分析仪(上海腾拔仪器科技有限公司)直径6 mm的平底圆柱形探头对肌肉进行2次压缩质地多面剖析(TPA)模式测试,测定指标包括硬度、弹性、黏性、胶着性、回复性、咀嚼性及内聚性。每个样品重复测量6次。

1.5 血清生理代谢及抗氧化指标测定

采用全自动生化分析仪(日立7180型)测定血清中甘油三酯(Triglyceride, TG)、总胆固醇(Total cholesterol, TC)、白蛋白(Albumin, ALB)、球蛋白(Globulin, GLB)、葡萄糖(Glucose, GLU)、尿素氮(Urea nitrogen, UN)、谷丙转氨酶(Glutamic-pyruvic transaminase, GPT)、谷草转氨酶(Glutamic oxalacetic transaminase, GOT)等生化指标。

使用分光光度计和相应的实验试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定血清中的丙二醛(Malondialdehyde, MDA)和溶菌酶(Lysozyme, LZM)水平。

1.6 统计分析

使用SPSS 19.0软件进行统计分析。数据表示为平均值±标准误(Mean±SE),用Levene法进

行方差齐性检验,当数据不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或者平方根处理,采用单因子ANOVA对实验结果进行方差分析,采用Tukey's-b(K)法进行多重比较;当数据转换后仍不满足齐性方差时,采用Games-Howell非参数检验对多重比较。取 $P<0.05$ 为差异显著,在GraphPad Prism 9软件上绘制相关图表。

2 结果

2.1 生长性能

由表2可知:杂交鱗最终体质量、增重率和特定生长率均随着黑水虻幼虫粉替代鱼粉水平的升高呈现先升高后下降的趋势,其中以R20组最

高,其最终体质量、增重率和特定生长率均显著高于R0、R30和R40组个体($P<0.05$)。杂交鱗存活率随着替代鱼粉水平的上升而呈下降趋势,其中R40组杂交鱗成活率(91.67%)显著低于R0~R20组个体($P<0.05$),其余各组杂交鱗成活率无显著差异($P>0.05$)。实验鱼饵料系数随着鱼粉替代水平的升高呈现先下降后升高的变化趋势,其中以R20组(1.11)最低,其饵料系数显著低于R30和R40组个体($P<0.05$)。各组杂交鱗肥满度无显著差异($P>0.05$),脏体比和肝体比均以R40组最低(7.82%和1.61%),其次为R30组(8.01%和1.65%),这两组脏体比和肝体比数值均显著低于其他实验组($P<0.05$)。

表2 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱗生长及摄食的影响

Tab. 2 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on the growth and feeding of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

指标 Indices	R0组	R10组	R20组	R30组	R40组	回归分析	
						线性 Linear regression	二次回归 Quadratic regression
生长情况 Growth performance							
初始体质量 IBW/g	11.38±1.26	11.48±0.89	11.40±0.52	11.50±1.08	11.40±0.52	0.719	0.800
最终体质量 FBW/g	74.15±3.21 ^b	80.75±6.92 ^{bc}	85.86±4.68 ^c	74.85±3.77 ^b	63.10±5.46 ^a	0.945	0.047
增重率 WGR/%	551.6±35.25 ^b	603.42±43.49 ^{bc}	653.15±77.58 ^c	550.9±28.68 ^b	453.51±49.01 ^a	0.902	0.032
特定生长率 SGR/(%/g)	2.34±0.15 ^b	2.44±0.20 ^{bc}	2.52±0.27 ^c	2.34±0.23 ^b	2.14±0.17 ^a	0.860	0.027
成活率 SR/%	98.33±2.89 ^b	96.67±2.89 ^b	96.67±5.77 ^b	93.33±2.89 ^{ab}	91.67±2.89 ^a	0.038	0.948
摄食情况 Feeding condition							
摄食量 Food intake/g	77.84±7.77 ^{ab}	82.43±8.83 ^b	82.65±4.30 ^b	83.63±6.89 ^b	68.76±3.24 ^a	0.047	0.037
饵料系数 FCR	1.24±0.06 ^{ab}	1.19±0.10 ^{ab}	1.11±0.08 ^a	1.32±0.06 ^b	1.33±0.12 ^b	0.800	0.033
形体指标 Body index							
脏体比 VSI/%	8.04±0.84 ^b	8.20±0.37 ^{bc}	8.44±0.81 ^c	8.01±0.82 ^b	7.82±0.89 ^a	0.260	0.031
肝体比 HSI/%	1.73±0.19 ^b	1.74±0.14 ^b	1.75±0.18 ^b	1.65±0.15 ^a	1.61±0.16 ^a	0.046	0.264
肥满度 CF	2.67±0.16	2.73±0.30	2.78±0.18	2.66±0.11	2.62±0.21	0.565	0.524

注:同行数据不同字母上标代表差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values in the same column without different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

2.2 肌肉质构及组织常规营养成分

由表3可知:当替代水平为10%至30%时,黑水虻替代鱼粉对杂交鱗肌肉硬度的影响较小,而当鱼粉替代水平进一步增加至40%后,肌肉硬度显著下降($P<0.05$)。随着鱼粉替代水平的上升,杂交鱗肌肉胶着性、回复性和咀嚼性均呈下降趋势,其中R40组杂交鱗肌肉的胶着性(19.00)、回复性(0.43)和咀嚼性(81.22)显著低于对照组($P<0.05$)。

随着鱼粉替代水平的上升,杂交鱗肝胰脏中

粗蛋白及粗脂肪含量均呈下降趋势,其中20%、30%和40%替代组粗蛋白和粗脂肪含量显著低于R0组个体,且40%替代组粗蛋白和粗脂肪含量进一步显著低于R20组个体($P<0.05$)。与之相反,杂交鱗肝胰脏中灰分含量随饲料中鱼粉替代水平的增加呈增加趋势($P<0.05$)。饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱗肌肉常规营养成分影响较小,各组杂交鱗肌肉中水分、粗蛋白、粗脂肪及灰分含量分别为74%、18%、1.5%和1.6%左右($P>0.05$),见表4。

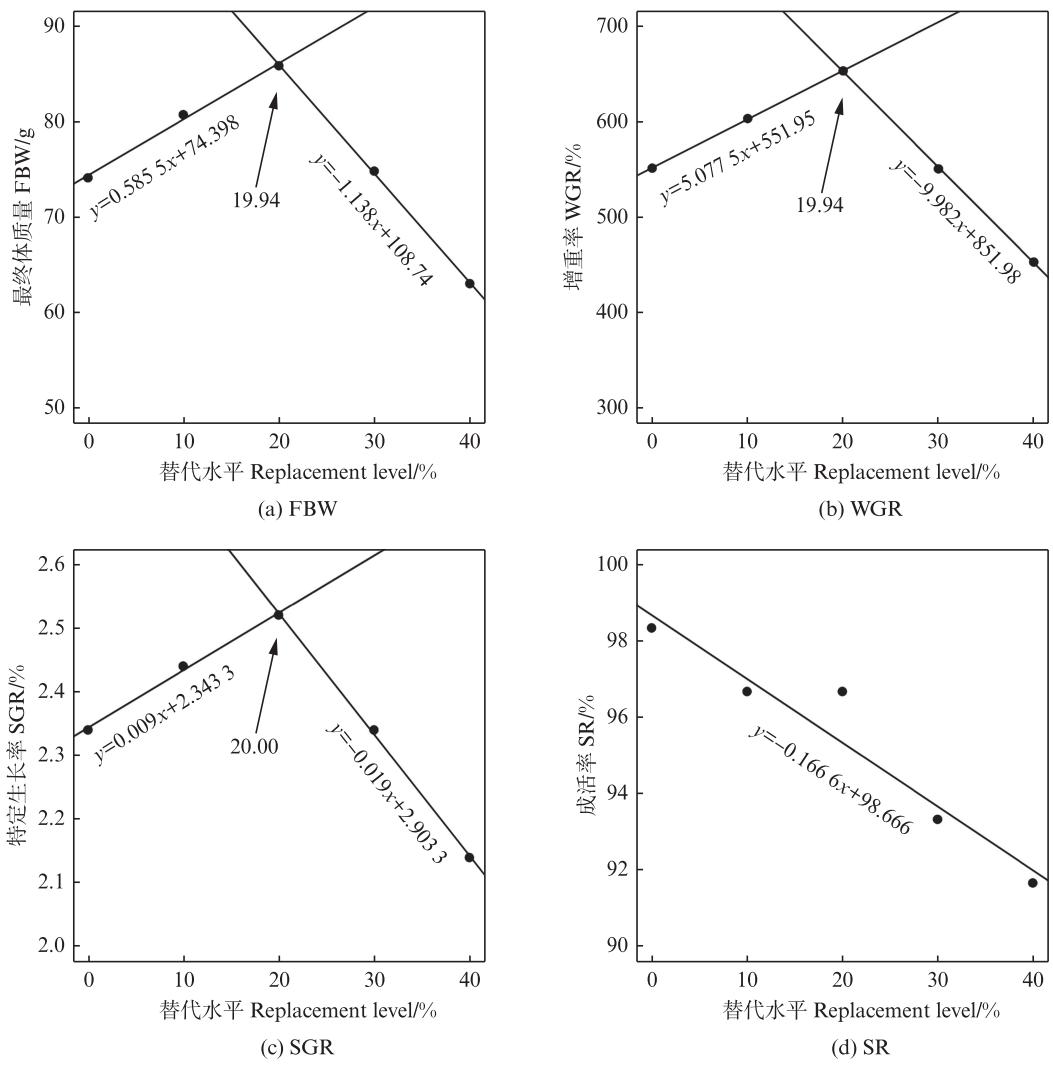


图1 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱥生长和存活的影响

Fig. 1 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on the growth and survival of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

表3 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱥肌肉质构的影响

Tab. 3 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on the texture properties of muscle of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

指标 Indices	R0组	R10组	R20组	R30组	R40组	回归分析	
						线性 Linear regression	二次回归 Quadratic regression
硬度 Hardness	160.87±8.72 ^b	158.87±8.51 ^b	160.79±23.39 ^b	156.64±17.38 ^b	148.37±19.19 ^a	0.014	0.310
弹性 Elasticity	0.56±0.07	0.58±0.04	0.55±0.03	0.56±0.03	0.57±0.06	0.383	0.186
黏性 Viscidity	-11.33±1.12	-10.15±0.89	-10.98±1.07	-10.38±0.64	-9.81±0.94	0.012	0.122
胶着性 Gumminess	24.54±2.34 ^b	22.00±2.30 ^{ab}	21.09±2.33 ^{ab}	21.33±2.44 ^{ab}	19.00±0.93 ^a	0.019	0.309
回弹性 Resilience	0.56±0.04 ^b	0.53±0.04 ^{ab}	0.49±0.05 ^{ab}	0.44±0.05 ^a	0.43±0.03 ^a	0.011	0.052
咀嚼性 Chewiness	106.58±6.85 ^c	100.59±11.12 ^{bc}	93.65±10.3 ^b	92.13±5.42 ^b	81.22±4.14 ^a	0.021	0.063
内聚性 Cohesiveness	0.77±0.08	0.79±0.08	0.77±0.07	0.79±0.05	0.78±0.11	0.270	0.161

注:同行数据不同字母上标代表差异显著($P<0.05$)。Notes: Values in the same column without different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表4 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱚常规营养成分的影响

Tab. 4 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on the proximate composition of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

指标 Indices	R0组	R10组	R20组	R30组	R40组	回归分析		%湿物质	
						Regression analysis			
						线性 Linear regression	二次回归 Quadratic regression		
肝胰脏 Hepatopancreas									
水分 Moisture	73.54±7.71	74.23±7.45	74.68±5.56	74.99±7.55	75.67±5.50	0.611	0.579		
粗蛋白 Crude protein	15.42±1.22 ^c	15.29±1.00 ^{bc}	14.87±1.66 ^b	13.20±1.18 ^a	13.19±0.71 ^a	0.030	0.270		
粗脂肪 Crude lipid	5.06±0.37 ^c	4.69±0.23 ^{bc}	4.19±0.52 ^b	3.56±0.54 ^{ab}	3.19±0.51 ^a	0.025	0.748		
灰分 Ash	1.97±0.11 ^a	2.30±0.10 ^{ab}	2.99±0.09 ^b	3.28±0.09 ^{bc}	3.56±0.16 ^c	0.048	0.670		
肌肉 Muscle									
水分 Moisture	73.62±8.57	73.78±6.32	74.38±3.67	73.40±6.32	73.96±6.61	0.100	0.228		
粗蛋白 Crude protein	18.80±0.95	18.06±1.65	17.58±1.36	17.74±1.95	17.14±1.85	0.138	0.325		
粗脂肪 Crude lipid	1.52±0.07	1.56±0.07	1.51±0.17	1.51±0.12	1.52±0.11	0.287	0.446		
灰分 Ash	1.55±0.09	1.55±0.17	1.51±0.08	1.58±0.17	1.62±0.12	0.259	0.537		

注:同行数据不同字母上标代表差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values in the same column without different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

2.3 生理代谢及抗氧化性能

随着鱼粉替代水平的上升,血清中甘油三酯和总胆固醇含量均明显下降,其中R40组个体各指标数值显著低于R0~R20组个体($P<0.05$)。与之相反,血清中白蛋白和球蛋白含量随着饲料中

鱼粉替代水平的上升均呈上升趋势,其中R30和R40组白蛋白含量显著高于R0组个体($P<0.05$)。与对照组(R0组)相比,各黑水虻替代组血清中葡萄糖含量均表现为不同程度的升高,但各组之间并无显著差异($P>0.05$),见表5。

表5 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱚血清中生理生化指标的影响

Tab. 5 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on the serum biochemical indices of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

指标 Indices	R0组	R10组	R20组	R30组	R40组	回归分析		%湿物质	
						Regression analysis			
						线性 Linear regression	二次回归 Quadratic regression		
甘油三酯 TG/(mmol/L)									
甘油三酯 TG/(mmol/L)	10.16±0.81 ^c	9.07±0.69 ^b	8.84±0.95 ^b	7.48±0.71 ^a	7.76±0.57 ^a	0.020	0.810		
总胆固醇 TC/(mmol/L)	1.84±0.21 ^c	1.73±0.20 ^c	1.54±0.11 ^b	1.30±0.07 ^{ab}	1.07±0.07 ^a	0.037	0.446		
白蛋白 ALB/(g/L)	4.46±0.26 ^a	4.76±0.23 ^a	5.10±0.37 ^{ab}	5.76±0.40 ^b	6.61±0.83 ^c	0.020	0.373		
球蛋白 GLB/(g/L)	20.11±1.65	21.76±1.13	20.81±2.41	21.90±3.27	22.26±1.68	0.406	0.170		
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	10.25±0.94	11.75±0.71	11.99±1.38	11.29±1.60	11.14±2.65	0.489	0.085		
尿素氮 UN/(mmol/L)	0.62±0.06	0.65±0.05	0.64±0.05	0.67±0.04	0.61±0.03	0.333	0.248		
谷丙转氨酶 GPT/(U/L)	7.17±0.40	7.88±0.52	7.97±0.20	8.00±0.16	7.18±0.09	0.608	0.326		
谷草转氨酶 GOT/(U/L)	80.23±8.98	81.33±5.06	85.08±3.11	88.43±4.00	85.28±5.14	0.039	0.120		

注:同行数据不同字母上标代表差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values in the same column without different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

杂交鱚血清中LZM水平均随着饲料中鱼粉替代水平的增加而呈先增加后降低的变化趋势,其中当饲料中鱼粉替代水平为20%时LZM酶活最高。基于双折线回归分析的结果表明,当饲料中鱼粉替代水平为19.03%时,血清中LZM酶活

性最高。此外,血清中MDA水平均随着鱼粉替代水平的增加而呈先减后增的变化趋势,并且双折线回归分析的结果表明鱼粉替代水平为25.29%时MDA水平最低,见图2。

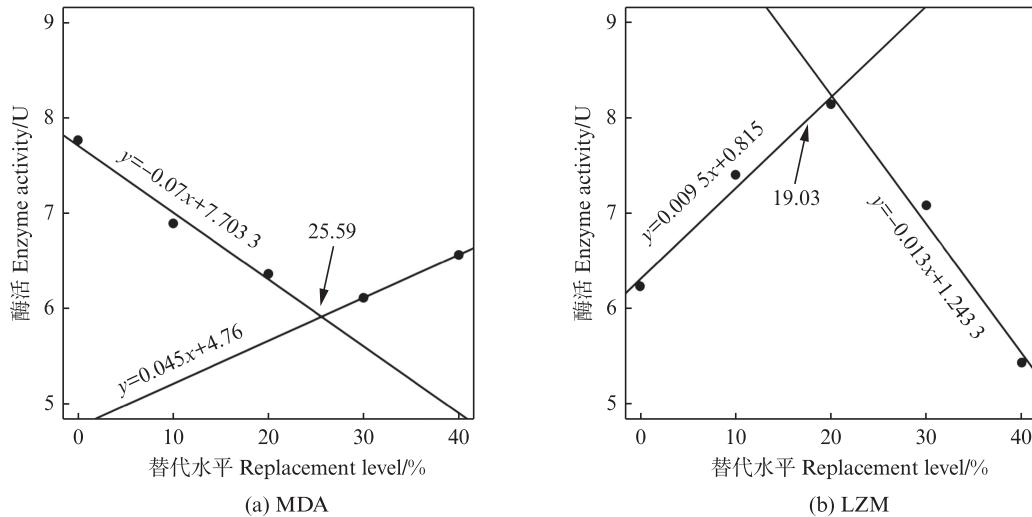


图2 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对杂交鱥免疫和抗氧化指标的影响

Fig. 2 Effects of fishmeal replacement by black soldier fly larvae meal on immune and antioxidant indices of *S. chuatsi* (♀) × *S. scherzeri* (♂)

3 讨论

3.1 生长性能

本研究结果显示黑水虻幼虫粉替代 10% 和 20% 鱼粉可以有效提高杂交鱥增重率和特定生长率,这一现象可能与黑水虻幼虫粉中含有丰富的必需氨基酸和脂肪酸有关。研究发现,黑水虻幼虫不仅含有丰富的蛋白质、必需氨基酸、不饱和脂肪酸以及奇数碳脂肪酸,还含有抗菌肽和壳聚糖等生物活性成分,这有助于提高鱼类营养物质的合成效率,从而提升生长性能^[19]。此外,幼虫粉中含有较高比例的中链脂肪酸,这类脂肪酸可快速氧化,提供高效的能量来源^[20]。尽管 20% 替代组个体表现出最佳的生长性能,但随着鱼粉替代水平继续增加至 40%,杂交鱥增重率和特定生长率均明显下降,表明过高比例的黑水虻幼虫粉对杂交鱥的生长产生了不利影响。这可能与幼虫粉中几丁质和其他抗营养因子增加有关,几丁质是一种天然多糖,其对部分鱼类而言较难消化,易干扰肠道的营养吸收,进而影响整体生长性能^[21]。该现象还可能与黑水虻幼虫粉过高的脂肪含量有关,研究表明实验饲料中 HUFA 含量往往随着黑水虻幼虫粉替代鱼粉水平的上升而下降,这将造成饲料中必需脂肪酸含量不足进而影响杂交鱥的生长^[16]。研究显示黑水虻幼虫粉的加工工艺和处理方式(如去脂和发酵等)优化可以改善其营养成分并降低抗营养因子含量,从

而提升鱼类对其的适应性^[22]。因此在实际应用中采用合适的预处理方法以提升黑水虻幼虫粉的营养利用率是未来研究的重要方向。

本实验中黑水虻幼虫粉替代 40% 鱼粉导致杂交鱥成活率(91.67%)显著降低,这种成活率的下降可能是鱼类长期处于亚营养状态或应激状态的结果,并且与黑水虻幼虫粉中潜在的抗营养因子和成分变化有关。黑水虻幼虫粉作为一种可持续的鱼粉替代品,富含优质蛋白和脂肪酸,但也含有几丁质等抗营养因子,在较高替代比例下将影响鱼类的消化和健康^[23]。在其他研究中,类似现象也有所体现,比如王国霞等^[15]在研究使用昆虫粉替代鱼粉对杂交鱥的影响时发现,鱼类的免疫系统和生理健康随着昆虫粉的替代比例(60%)的增加而受到不利影响,进而导致成活率降低。此外,本实验中杂交鱥脏体比和肝体比随饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉比例的升高呈降低趋势。CHEN 等^[24]指出,高黑水虻幼虫粉水平组脏体比和肝体比的降低可能与饲料中几丁质的含量有关,因为几丁质中含有高水平壳聚糖,其在鱼类中具有降低胆固醇、影响鱼体脂肪沉积的特性。

3.2 肌肉质构及组织常规营养成分

杂交鱥肌肉质构测定有助于了解其肉质特性,可以为评估其食用品质、营养价值及市场潜力提供科学依据,并且对于杂交鱥的饲喂和养殖具有重要的指导意义。本研究结果显示,随着饲

料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉比例的增加,杂交鱥肌肉的胶着性、回复性和咀嚼性等呈下降趋势,说明高比例黑水虻幼虫粉将影响杂交鱥肌肉纤维和组织结构。郑金宇等^[25]研究指出,当替代鱼粉的昆虫蛋白含量增加时,鱼类肌肉组织的硬度和咀嚼性显著下降,本研究结果与之相符。黑水虻幼虫粉虽然具有较高的蛋白质含量,但其氨基酸组成和脂肪酸谱不同于传统的鱼粉,特别是黑水虻幼虫粉中不饱和脂肪酸含量相对较低而饱和脂肪酸含量较高,这种脂肪酸组成的差异可能会影响鱼体肌肉细胞膜的结构和弹性,导致肌肉胶着性下降,进而影响鱼肉的整体质地和口感^[26]。虽然黑水虻幼虫粉具有丰富的营养价值和潜在的抗氧化成分,但其使用量必须谨慎控制,以避免对鱼类肌肉质量产生负面影响。一些研究已尝试通过优化饲料配方来减缓高比例昆虫蛋白替代所带来的不利影响,例如 HENRY 等^[27]提出通过结合多种蛋白源或者添加必需氨基酸补充剂,可以有效改善鱼类在高比例昆虫蛋白饲料下的生长性能和肌肉质量。SPRANGHERS 等^[28]提出,黑水虻幼虫粉的使用可能需要与其他营养补充剂或配方策略相结合,以确保鱼类能够获得全面的必需营养物质,从而维持理想的肌肉质构。

本实验中黑水虻虫粉替代鱼粉水平超过20%后,杂交鱥肝胰脏中粗蛋白含量显著降低,这与先前在建鲤(*Cyprinus carpio*)^[29]和大黄鱼^[16]上的研究结果类似。尽管黑水虻幼虫粉是一种优质的蛋白原料,但其氨基酸组成与传统鱼粉相比存在显著差异,尤其是赖氨酸、蛋氨酸和精氨酸等必需氨基酸的含量偏低,这种氨基酸不平衡可能会影响鱼体对蛋白质的有效利用率,进而导致本实验杂交鱥肝胰脏中粗蛋白含量的下降^[30]。肝胰脏是鱼体内脂肪代谢的主要器官,本研究中肝胰脏粗脂肪含量同样随着鱼粉替代比例的增加呈下降趋势,研究表明几丁质及其衍生物能干扰脂肪酸的合成以及促进肝脏中脂蛋白和TG的水解,因此脂肪含量的降低可能是由于几丁质影响了鱼体肝脏脂肪的合成^[31]。此外,黑水虻幼虫粉中的脂肪酸组成与鱼粉不同,昆虫蛋白来源的脂肪酸通常以饱和脂肪酸为主,而长链不饱和脂肪酸的比例较低,饲料中高比例的饱和脂肪酸会影响鱼类对脂肪的合成代谢及消化吸收效率,进

而导致肝脏脂质沉积的减少及肝胰脏中粗脂肪含量下降^[32]。本实验中肝胰脏灰分含量的上升可能与黑水虻幼虫粉中的矿物质成分相关,研究表明黑水虻幼虫粉中富含钙质、磷等矿物质,这些成分在高替代比例下易导致鱼体内矿物质负担增加,从而导致肝胰脏中灰分含量的上升^[33]。此外,昆虫蛋白中的几丁质和其他不可消化成分也会影响矿物质的吸收与代谢,几丁质通过改变鱼体消化道内的营养吸收环境,影响钙、磷等矿物质在肝胰脏中的沉积和排泄^[34]。

3.3 生理代谢及抗氧化性能

甘油三酯和胆固醇是血液脂类的重要组成部分,血液中胆固醇主要源于肝脏,其含量的高低能够反映脂类的吸收和代谢状况:含量升高表明肝脏功能发生障碍或损伤,进而导致机体脂肪代谢紊乱^[35]。本实验中,10%~40% 替代组甘油三酯含量及 20%~40% 替代组总胆固醇含量均显著低于对照组,这与本研究中肝胰脏粗脂肪含量随鱼粉替代比例的增加呈下降趋势的结果相一致。研究表明,肝脏是动物机体脂肪合成与分解代谢的中枢组织,饲料中的黑水虻可以通过抑制肝脏合成甘油三酯,进而降低全鱼和肝脏的脂肪含量及血清甘油三酯含量^[11]。血清白蛋白在肝脏内合成,主要用于修补组织和提供能量,可以反映肝脏功能的损伤程度;血清球蛋白是由 B 细胞转化成浆细胞后分泌的,可以反映机体的抵抗力。白蛋白与球蛋白含量升高通常与机体代谢紊乱或者肝功能和肾功能损伤有关^[36]。研究表明,饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉显著增加了锦鲤 (*Cyprinus carpio*)^[37] 和 鲈 鱼 (*Lateolabrax japonicas*)^[38] 血清中白蛋白和球蛋白含量,本研究结果与之相似。然而,另有研究报道,黑水虻幼虫粉部分或完全替代鱼粉并不影响鱼类血液中白蛋白和球蛋白含量^[13-15, 39],这些不同研究结果之间的差异可能受动物品种、黑水虻来源、添加剂量、不同实验条件等因素影响。

维持生物体复杂的免疫系统需要多种类型的免疫和抗氧化酶,它们构成了针对自由基的酶防御机制的第一道防线。MDA 是酶促和非酶促脂质过氧化反应最常见的终产物之一,MDA 含量可以作为衡量机体脂质过氧化程度的重要指标^[40]。随着饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉的比例从 0% 增加至 40%,杂交鱥血清中 MDA 水平呈

“高-低-高”的变化趋势,并且当饲料中鱼粉替代水平为20%~30%时数值最高。这些结果表明,饲料中黑水虻幼虫粉适量替代鱼粉(20%~30%)可以维持幼鱼活性氧(ROS)产生和抗氧化活性之间的平衡,但饲料中黑水虻幼虫粉过量替代鱼粉会对投喂对象的抗氧化性能产生负面影响。徐齐云等^[41]研究结果表明,黑水虻幼虫的抗氧化作用主要是基于它们体内含有抗菌肽和甲壳素等生物活性物质,其可以作为免疫增强剂提高动物机体非特异免疫能力和抗氧化能力。本研究中40%鱼粉替代组杂交鱥抗氧化性能显著降低,可以假设为饲料中高含量黑水虻幼虫粉加快了杂交鱥正常生理代谢,机体处于一种氧化应激状态,使得MDA含量相应增加^[42]。

4 结论

饲料中黑水虻幼虫粉替代20%鱼粉可以显著促进杂交鱥生长性能、改善血清生化和生理代谢指标,同时保持较佳的肌肉品质,反映了更有效的氮代谢和肝功能保护。然而,随着鱼粉替代比例增加至30%及以上时,杂交鱥的生长性能和肌肉质构出现下降,显示出高替代水平可能对鱼类的健康和生理功能产生不利影响。建议杂交鱥饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉的最适比例为20%左右,该替代比例可以确保可持续蛋白源的有效利用,同时保持鱼体健康和生长性能。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 曹阳,曹浩宇,杜文迪,等.广东省鱥鱼养殖业发展现状及对策[J].广东农业科学,2024,51(1):136-143.
CAO Y, CAO H Y, DU W D, et al. Status and countermeasures of development of *Siniperca chuatsi* breeding industry in Guangdong Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51(1): 136-143.
- [2] 李志成,潘嘉传,荣家平.鱥鱼规模化繁育及提高苗种成活率的技术[J].淡水渔业,2002,32(5):15-16.
LI Z C, PAN J Z, RONG J P. Technologies for large-scale breeding and improving survival rate of juvenile *Siniperca chuatsi* [J]. Freshwater Fisheries, 2002, 32 (5): 15-16.
- [3] 李燕,史建华,李永强,等.翘嘴鱥、斑鱥和杂交鱥鱼体营养成分和氨基酸、脂肪酸组成的比较分析[J].水产科技情报,2015,42(5):246-250.
LI Y, SHI J H, LI Y Q, et al. Comparative analysis of nutrient and amino acid, fatty acid composition in mandarin fish, spotted mandarin fish and hybrid mandarin fish [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2015, 42(5): 246-250.
- [4] 负彪.几种蛋白原料的消化率及替代鱼粉蛋白在花鲈饲料中的应用[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.
YUN B. Digestibility of several protein sources and utilization of alternative fish meal proteins in diets of Japanese sea bass, *Lateolabrax japonicus* [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009.
- [5] 刘敏,张海涛,孙广文.水产饲料中动物性蛋白源替代鱼粉的研究进展[J].饲料工业,2019,40(22):48-54.
LIU M, ZHANG H T, SUN G W. Advances in research on replacement of fishmeal by animal protein source in aquatic feed[J]. Feed Industry, 2019, 40(22): 48-54.
- [6] 李顺才,吉志新,苏绯,等.资源昆虫黑水虻的生长特性与科学利用[J].科学种养,2020(3):55-57.
LI S C, JI Z X, SU F, et al. The growth characteristics and scientific utilization of resource insect black soldier fly [J]. Scientific Farming and Breeding, 2020(3): 55-57.
- [7] 叶牧,孔祥平,叶小梅,等.餐厨垃圾含水率和碳氮比对黑水虻幼虫养殖过程中气体释放的影响[J].江苏农业科学,2023,51(4):220-225.
YE M, KONG X P, YE X M, et al. Influences of food waste moisture content and C/N ratio on gas release during breeding of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51 (4): 220-225.
- [8] 喻国辉,陈燕红,喻子牛,等.黑水虻幼虫和预蛹的饲料价值研究进展[J].昆虫知识,2009,46(1):41-45.
YU G H, CHEN Y H, YU Z N, et al. Research progression on the larvae and prepupae of black soldier fly *Hermetia illucens* used as animal feedstuff [J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2009, 46(1): 41-45.
- [9] 杨航,袁泉,吕巍巍,等.黑水虻幼虫的营养特性及其在水产饲料中的应用进展[J].华中农业大学学报,2024,43(2):164-174.
YANG H, YUAN Q, LYU W W, et al. Progress on nutritional characteristics of black soldier fly larvae and its application in aquatic feeds [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 164-174.
- [10] 彭凯,萧鸿发,莫文艳,等.饲料中添加黑水虻幼虫粉对加州鲈血清代谢物、抗氧化与免疫指标及肠道组织结构的影响[J].动物营养学报,2021,33(12):6964-6972.
PENG K, XIAO H F, MO W Y, et al. Effects of dietary black soldier fly larvae meal on serum metabolites, antioxidant and immune indexes and intestinal histological appearance of *Micropterus salmoides* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12): 6964-6972.
- [11] 游翠红,李鸿伟,周萌,等.黑水虻幼虫粉替代不同比

- 例鱼粉对加州鲈生长、机体健康和肌肉品质的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(3): 372-383.
- YOU C H, LI H W, ZHOU M, et al. Replacing different proportions of fishmeal with *Hermetia illucens* meal on the growth, health and muscle quality of *Micropterus salmoides* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(3): 372-383.
- [12] 邬伊田, 王尊, 吴玉波, 等. 脱脂黑水虻虫粉替代鱼粉对大口黑鲈生长、饵料利用和鱼体成分的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(20): 43-47.
- WU Y T, WANG Z, WU Y B, et al. Effect of fish meal replacement by defatted *Hermetia illucens* powder on growth, feed utilization and body composition of *Micropterus salmoides* [J]. *Feed Research*, 2021, 44(20): 43-47.
- [13] 陈晓瑛, 胡俊茹, 王国霞, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、肌肉品质及血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(6): 2788-2799.
- CHEN X Y, HU J R, WANG G X, et al. Effects of fish meal replacement by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal on growth performance, serum biochemical indices and meat quality of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(6): 2788-2799.
- [14] 蔺玉珍, 王伟伟. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、血清生化指标、肉品质的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(18): 44-49.
- LIN Y Z, WANG W W. Effect of replacing fish meal with black soldier fly larval meal on growth performance, serum biochemical indexes and meat quality of *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Feed Research*, 2023, 46(18): 44-49.
- [15] 王国霞, 莫文艳, 范怡杰, 等. 黑水虻对杂交鳢生长、肌肉组成和血清指标的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(5): 603-609.
- WANG G X, MO W Y, FAN Y J, et al. Effect of black soldier fly larvae on growth performance, muscular composition and serum indices of hybrid snakehead *Channa argus* × *C. maculata* [J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(5): 603-609.
- [16] 韩星星, 叶坤, 王志勇, 等. 脱脂黑水虻虫粉替代鱼粉对大黄鱼幼鱼生长、体成分、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J]. 中国水产科学, 2020, 27(5): 524-535.
- HAN X X, YE K, WANG Z Y, et al. Effect of substitution of fish meal with defatted black soldier fly larvae meal on growth, body composition, serum biochemical parameters, and antioxidant capacity of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(5): 524-535.
- [17] AOAC. *Official methods of analysis* [M]. 17th ed. Gaithersburg: Association of Official Analytical Chemists, 2000.
- [18] FOLCH J, LEES M, SLOANE STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1957, 226(1): 497-509.
- [19] 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.
- [20] XIAO X P, JIN P, ZHENG L Y, et al. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal protein as a fishmeal replacement on the growth and immune index of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(4): 1569-1577.
- [21] KROECKEL S, HARJES A G E, ROTH I, et al. When a turbot catches a fly: evaluation of a pre-pupae meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute—growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*) [J]. *Aquaculture*, 2012, 364-365: 345-352.
- [22] SOGARI G, AMATO M, BIASATO I, et al. The potential role of insects as feed: a multi-perspective review [J]. *Animals*, 2019, 9(4): 119.
- [23] 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.
- [24] CHEN Y F, ZHU X M, YANG Y B, et al. Effect of dietary chitosan on growth performance, haematology, immune response, intestine morphology, intestine microbiota and disease resistance in gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2014, 20(5): 532-546.
- [25] 郑金宇. 黑水虻、黄粉虫替代鱼粉对凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)生长与肉质的影响及其营养改选策略[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- ZHENG J Y. Influence of replacing fish meal with *Hermetia illucens* and *Tenebrio molitor* on the growth and flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and its nutrition improvement strategies [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [26] LOCK E R, ARSIWALLA T, WAAGBØ R. Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(6): 1202-1213.
- [27] HENRY M, GASCO L, PICCOLO G, et al. Review on the use of insects in the diet of farmed fish: past and future [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, 203:

- 1-22.
- [28] SPRANGHERS T, OTTOBONI M, KLOOTWIJK C, et al. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(8): 2594-2600.
- [29] 刘世胜. 黑水虻幼虫替代鱼粉在鲤鱼饲料中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LIU S S. The study on replacement of fish meal with black soldier fly meal in feed for common carp (*Cyprinus carpio*) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [30] GARCÍA-ORTEGA A, KISSINGER K R, TRUSHENSKI J T. Evaluation of fish meal and fish oil replacement by soybean protein and algal meal from *Schizochytrium limacinum* in diets for giant grouper *Epinephelus lanceolatus* [J]. *Aquaculture*, 2016, 452: 1-8.
- [31] LI S L, JI H, ZHANG B X, et al. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian): growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure [J]. *Aquaculture*, 2017, 477: 62-70.
- [32] LI Q P, GOONERATNE S R, WANG R L, et al. Effect of different molecular weight of chitosans on performance and lipid metabolism in chicken [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, 211: 174-180.
- [33] BARROSO F G, DE HARO C, SÁNCHEZ-MUROS M J, et al. The potential of various insect species for use as food for fish [J]. *Aquaculture*, 2014, 422-423: 193-201.
- [34] 吉红, 李森林, 徐歆歆. 昆虫资源在水产饲料中的应用研究进展[J]. 饲料工业, 2016, 37(22): 1-9.
- JI H, LI S L, XU X X. Research progress on the application of insects as feed resources in aquaculture feed [J]. *Feed Industry*, 2016, 37(22): 1-9.
- [35] 毕清竹, 梁萌青, 廖章斌, 等. 饲料中胆汁酸对红鳍东方鲀脂肪酸组成及抗氧化能力的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 829-839.
- BI Q Z, LIANG M Q, LIAO Z B, et al. Effect of dietary bile acid supplementation on fatty acid composition and anti-oxidative capacity of tiger puffer *Takifugu rubripes* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, 29(6): 829-839.
- [36] JOSEPH JOHN P. Alteration of certain blood parameters of freshwater teleost *Mystus vittatus* after chronic exposure to Metasystox and Sevin [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2007, 33(1): 15-20.
- [37] 刘兴, 孙学亮, 李连星, 等. 黑水虻替代鱼粉对锦鲤生长和健康状况的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(4): 422-427.
- LIU X, SUN X L, LI L X, et al. Effects of dietary fish meal replaced by *Hermetia illucens* meal on growth and health of koi carp *Cyprinus carpio* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(4): 422-427.
- [38] 张雯, 陈志, 韦玲冬, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对鲈鱼生长性能和血浆生化指标的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(17): 44-47.
- ZHANG W, CHEN Z, WEI L D, et al. Effect of *Hermetia illucens* L. larvae meal instead of fish meal on growth performance and plasma biochemical indexes of *Lateolabrax japonicas* [J]. *Feed Research*, 2022, 45(17): 44-47.
- [39] 崔锡帅, 孟晓雪, 卫育良, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉在暗纹东方鲀饲料中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(6): 1382-1393.
- CUI X S, MENG X X, WEI Y L, et al. Fish meal replacement with black soldier fly larvae meal in the diet of juvenile obscure puffer *Takifugu obscurus* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(6): 1382-1393.
- [40] DEVASENA T, LALITHA S, PADMA K. Lipid peroxidation, osmotic fragility and antioxidant status in children with acute post-streptococcal glomerulonephritis [J]. *Clinica Chimica Acta*, 2001, 308(1/2): 155-161.
- [41] 徐齐云, 喻国辉, 安新城. 黑水虻蛹壳中几丁质的提取及壳聚糖制备研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(5): 87-88, 102.
- XU Q Y, YU G H, AN X C, et al. Research on extraction of chitin and preparation of chitosan from pupal shell of Black soldier fly [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(5): 87-88, 102.
- [42] 贾玲芝, 史雪莹, 郭金龙, 等. 全脂黑水虻幼虫粉替代鱼粉对大菱鲆养殖性能、生理代谢及体色的影响[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(2): 80-88.
- BEN L Z, SHI X Y, GUO J L, et al. Effects of replacement of fish meal with full-fat *Hermetia illucens* larvae on culture performance, physiological metabolism, and skin color in turbot [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(2): 80-88.

Effects of replacing fishmeal with black soldier fly larvae meal on growth performance, physiological metabolism, and muscle quality of mandarin fish *Siniperca chuatsi* ♀ × *Siniperca scherzeri* ♂

LIU Zhijun¹, LI Jianzhong¹, OUYANG Chuang²

(1. Shanghai Fisheries Research Institute / Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China;

2. Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: This study evaluated the effects of replacing fishmeal with black soldier fly (BSF) larvae meal on the growth performance, physiological metabolism, and muscle quality of hybrid mandarin fish (*Siniperca chuatsi* ♀ × *Siniperca scherzeri* ♂). Juvenile fish with an initial body weight of (11.43±0.54) g were used as experimental subjects, and five isonitrogenous and isolipidic diets were formulated, incorporating BSF larvae meal as a replacement for fishmeal at levels of 0%, 10%, 20%, 30%, and 40%. The results showed that: (1) Replacing 20% of fishmeal with BSF larvae meal significantly enhanced weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR), whereas growth performance declined markedly when the replacement level reached 30% or higher ($P<0.05$). (2) Analysis of tissue texture and proximate composition showed that crude protein and lipid contents in the hepatopancreas of the 20%–40% replacement groups were significantly lower than those in the control group (0% replacement). Moreover, gumminess, resilience, and chewiness of muscle were significantly reduced in the 40% replacement group compared to the control group ($P<0.05$). (3) Serum biochemical parameters indicated that triglyceride and total cholesterol levels decreased significantly with increasing fishmeal replacement, while albumin levels increased significantly ($P<0.05$). (4) Serum malondialdehyde (MDA) levels were lowest in the 30% replacement group, while lysozyme (LZM) activity peaked at the 20% replacement group. In conclusion, replacing up to 20% of fishmeal with BSF larvae meal significantly improved growth performance and enhanced the immune-antioxidant capacity of hybrid mandarin fish. However, higher replacement levels adversely impacted growth performance and muscle quality. Therefore, the optimal replacement level of BSF larvae meal for fishmeal in hybrid mandarin fish diets is approximately 20%.

Key words: *Siniperca chuatsi* ♀ × *Siniperca scherzeri* ♂; black soldier fly larvae meal; fishmeal replacement; growth performance; physiological metabolism