水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20240614574
Science Press

雷锡俊, 柯江, 杨洪, 等. 硒代蛋氨酸对黄颡鱼生长性能、饲料利用、肌肉组织学和抗氧化性能的影响 [J]. 水产学报, 2026, 50(1): 019613.

Lei X J, Ke J, Yang H, *et al*. Effects of selenomethionine on the growth performance, feed utilization, muscle histology and antioxidant responses of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(1): 019613 (in Chinese).

硒代蛋氨酸对黄颡鱼生长性能、饲料利用、肌肉组织学和抗氧化性能的影响

雷锡俊，柯　江，杨　洪，徐鹏程，张　旭，郝志伟，罗　智*
(华中农业大学水产学院，湖北 武汉　430070)

摘要：【目的】探究饲料中不同硒代蛋氨酸添加水平对黄颡鱼生长性能和肌肉组织的影响。**【方法】**以硒代蛋氨酸为硒源，配制 6 组实验饲料，硒代蛋氨酸添加量分别为 0（S0）、0.15（S1）、0.30（S2）、0.45（S3）、0.60（S4）和 0.75 mg/kg（S5）。经测定，饲料中的硒含量分别为 0.17、0.22、0.29、0.33、0.41 和 0.45 mg/kg。饲养体重为 (4.00±0.01) g 的黄颡鱼 10 周。测定的指标包括黄颡鱼的生长性能、饲料利用、肌肉营养成分、抗氧化酶活性及相关基因和蛋白表达等。**【结果】**投喂 S1 组饲料黄颡鱼的生长性能和饲料利用率表现最佳，并且肌肉组织结构最为完整；而在 S1~S5 组中，随着硒代蛋氨酸添加水平的增加，黄颡鱼生长性能和饲料利用率下降，肌肉组织结构完整性下降，肌纤维密度和直径减小和缩短，表明肌肉组织已受到损伤。另外，随着饲料中硒代蛋氨酸添加水平的升高，肌肉组织的硒含量以及抗氧化酶 CAT、T-SOD 和 T-AOC 的活性增加，显著上调了抗氧化相关基因 *cat*、*sod*1、*sod*2 和 *nrf*2 以及硒蛋白基因 *txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2、*msrb*1、*selenok* 和 *selenow* 的 mRNA 表达，显著上调了 NRF2 的蛋白表达，表明黄颡鱼肌肉的抗氧化能力以及硒蛋白基因表达水平随着硒代蛋氨酸添加水平的增加逐渐上升。**【结论】**在饲料中添加 0.15 mg/kg 的硒代蛋氨酸，黄颡鱼的生长性能最佳，并且适量的硒代蛋氨酸添加可以增强黄颡鱼肌肉的抗氧化能力。

关键词：黄颡鱼；硒代蛋氨酸；生长性能；肌肉；硒蛋白；抗氧化
中图分类号：S 963.73+1　　**文献标志码：**A

黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 是鲇形目 (Siluriformes) 鲿科 (Bagridae) 黄颡鱼属的小型鱼类，因其肉质细腻、口味鲜美、营养丰富、还可入药，是中国和其他部分亚洲国家养殖的名特优经济淡水鱼类。硒是鱼类必需的微量元素[1]。它的缺乏已被证明会对鱼类产生各种负面影响，例如抑制

收稿日期：2024-06-16　　**修回日期：**2024-08-17
资助项目：国家自然科学基金 (32530109)；国家重点研发计划 (2023YFD2400600)
第一作者：雷锡俊，从事水产动物营养与饲料研究，E-mail：leif926@webmail.hzau.edu.cn
通信作者：罗智，从事水产动物营养与饲料研究，E-mail：luozhi99@mail.hzau.edu.cn

生长性能和饲料利用率[2]，死亡率增加、氧化应激[3]以及诱发炎症反应[4]等。有机硒比无机硒具有优势，包括生物利用度高、副作用少、环境污染少[5]。有机硒也是一种极好的抗氧化剂，有助于提高养殖动物的抗氧化性能[6]。

硒代蛋氨酸是饲料中硒添加的常用形式。在鱼类中，硒代蛋氨酸比无机形式更具生物活性，被认为是无机硒的有效替代品，在相同的添加水平下具有更显着的沉积效率[7-8]。低剂量的硒代蛋氨酸具有有益的效果，而高剂量则会产生抑制或毒性作用[9-11]。硒代蛋氨酸缺乏会对动物的神经、心血管、免疫系统和肌肉生长产生有害影响[12]。对于水产养殖鱼类，硒需求量范围为 0.1~0.5 g/kg (干重)。本研究以硒代蛋氨酸为硒源，设置硒代蛋氨酸浓度梯度的饲料，旨在探究硒代蛋氨酸不同水平梯度对黄颡鱼生长性能、肌肉组织学、抗氧化水平以及硒蛋白基因表达的影响。

1　材料与方法

1.1　实验试剂

qRT-PCR 荧光定量试剂盒、逆转录试剂盒购自宝日医生物技术 (北京) 有限公司。qRT-PCR 引物由武汉擎科生物有限公司合成。总蛋白质测定试剂盒 (考马斯亮蓝法)，过氧化氢酶 (CAT)、总超氧化物歧化酶 (T-SOD)、总抗氧化能力 (T-AOC)、丙二醛 (MDA) 和 GPX 测定试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。亚硒酸钠、NADPH、$NADP^+$、葡萄糖-6-磷酸 (G6PD)、DL-异柠檬酸、L-苹果酸购自 Sigma-Aldrich®公司。$CuSO_4$、K_2SO_4、H_2SO_4、H_3BO_3、HCl、NaOH、KOH、HNO_3、冰醋酸、无水乙醚均为分析纯 (上海国药集团化学试剂有限公司)。实验所用黄颡鱼来自华中农业大学水产养殖基地。

1.2　实验饲料

本实验饲料以酪蛋白、鱼粉、玉米粉和玉米蛋白粉为蛋白源，新鲜鱼油、氧化鱼油和豆油为脂肪源，小麦粉为糖源，以纤维素为填充剂，以硒代蛋氨酸形式添加配制 6 组实验饲料 (表 1)，添加量分别为 0 mg/kg(S0)、0.15 mg/kg (S1)、0.30 mg/kg(S2)、0.45 mg/kg(S3)、0.60 mg/kg (S4) 和 0.75 mg/kg(S5)。饲料原料粉碎后过 60 目筛，遵循逐级放大原则进行充分混匀。充分混匀饲料原料，经水产专用挤条膨化机压成细条，再用烘干机烘干。用饲料专用粉碎机粉碎直径为 1 mm 的颗粒饲料，放入自封袋封紧后在−20 ℃ 下保存备用。通过电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 分析饲料中的硒含量，实验饲料 (S0、S1、S2、S3、S4、S5) 最终的硒含量分别为 0.17、0.22、0.29、0.33、0.41 和 0.45 mg/kg。

1.3　实验鱼的饲养

本研究所有实验程序均遵循华中农业大学关于实验动物使用的伦理规范，并经华中农业大学伦理委员会批准。

黄颡鱼购自武汉某养殖场，在正式实验前于华中农业大学水产基地 (300 L 养殖缸) 暂养 2 周。随后，将 450 尾大小均一、健康无病的黄颡鱼 [(4.00±0.01) g] 随机分配到 18 个鱼缸中，每组设置 3 个重复，每缸 25 尾鱼。实验在半静态水族系统中进行，连续充气以保持水体溶解氧接近饱和。实验期间，每天投喂 2 次 (9:00 和 16:00)，饱食投喂。实验过程中，摄食前和摄食后 10 min 采集水样，水中的硒浓度很低，可以忽略不计，每天记录摄食量和死亡情况，及时清理残饵，每 2 周对实验鱼进行称重。实验是在室温和自然光周期下 (约 12 h 光照/12 h 黑暗) 进行的。每周监测水质参数 2 次。整个实验期间，水温控制在 28.0~30.0 ℃，pH 为 7.2~8.0，其间不断充气增氧，保持溶解氧含量不低于 6 mg/L，氨氮浓度不高于0.05 mg/L，亚硝酸盐浓度不高于 0.005 mg/L，各项水质指标符合黄颡鱼养殖要求。饲养试验结束时，禁食 24 h 后计数、称重和取样。实验进行 10 周。

1.4　样品采集

在第 10 周取样时，饥饿 24 h 后，将所有鱼用 100 mg/L 的 MS-222 麻醉，计数和称重以确定存活率 (SR)、增重率 (WG) 和特定生长率 (SGR)。在得到每缸鱼的最终总重量后，每缸随机抽取 9 尾鱼，称重并在冰上解剖，得到肝脏和内脏样本，用于计算脏体比 (VSI) 和肝体比 (HSI)。每缸随机抽取 6 尾鱼，于冰上迅速取其肌肉组织置于 TRIzol 溶液中用于 RNA 的提取。每缸另取 3 尾鱼，采集肌肉，4% 多聚甲醛固定，用于组织学观察。每缸随机选取另外 6 尾鱼，取其肌肉样本得到合样，快速冷冻于液氮中，保存于−80 ℃，分别进行 RT-qPCR、营养成分、酶活性、硒含量和蛋白

表 1　实验饲料的成分和组成 (干物质)

Tab. 1　Ingredients and compositions of the experimental diets (dry matter)　g/kg

原料 ingredient	S0	S1	S2	S3	S4	S5
鱼粉　fish meal	20	20	20	20	20	20
玉米蛋白粉　corn gluten meal	130	130	130	130	130	130
玉米粉　corn meal	50	50	50	50	50	50
酪蛋白　casein	300	300	300	300	300	300
小麦粉　wheat flour	250	250	250	250	250	250
鱼油　fish oil	30	30	30	30	30	30
豆油　soybean oil	30	30	30	30	30	30
氯化胆碱　choline chloride	5	5	5	5	5	5
卵磷脂　lecithin	1	1	1	1	1	1
维生素预混料　vitamin premix[1)]	5	5	5	5	5	5
矿物质预混料　mineral premix[2)]	5	5	5	5	5	5
一水合磷酸二氢钙　$Ca(H_2PO_4)_2·H_2O$	10	10	10	10	10	10
抗坏血酸　ascorbyl-2-polyphosphate	10	10	10	10	10	10
硒代蛋氨酸　selenomethionine	0	0.000 15	0.000 3	0.000 45	0.000 6	0.000 75
氯化钠　NaCl	10	10	10	10	10	10
纤维素　cellulose	144	143.999 85	143.999 70	143.999 55	143.999 40	143.999 25
饲料硒含量						
Se /(mg/kg)	0.17	0.22	0.29	0.33	0.41	0.45

注：1) 维生素预混料供给(mg)/饲料(kg)，醋酸视黄醇 3，胆钙化醇 0.025，dl-α-生育酚醋酸酯 30，甲萘醌烟酰胺亚硫酸氢盐 7，盐酸硫胺 6，核黄素 3，盐酸吡哆醇 12，D-泛酸钙 30，烟酸 50，生物素 1，叶酸 6，氰基钴胺 0.03。2) 微量元素预混料供给(mg)/日粮(kg)，$Ca(H_2PO_3)_2·H_2O$ 1 000，$FeSO_4·7H_2O$ 40，$ZnSO_4·H_2O$ 100，$MnSO_4·H_2O$ 40，$CuSO_4·5H_2O$ 2，$CaIO_3·6H_2O$ 3。

Notes: 1) vitamin premix mg provided/kg diet, retinyl acetate 3, cholecalciferol 0.025, dl-α-tocopheryl acetate 30, menadione nicotinamide bisulfite 7, thiamine hydrochloride 6, riboflavin 3, pyridoxine hydrochloride 12, D-calcium pantothenate 30, niacin 50, biotin 1, folic acid 6, cyanocobalamine 0.03. 2) trace mineral premix mg provided/kg diet, $Ca(H_2PO_3)_2·H_2O$ 1 000, $FeSO_4·7H_2O$ 40, $ZnSO_4·H_2O$ 100, $MnSO_4·H_2O$ 40, $CuSO_4·5H_2O$ 2, $CaIO_3·6H_2O$ 3.

表达等其他后续分析。计算公式：

$$\text{增重率 (WGR, \%)} = (W_t - W_0)/W_0 \times 100\%$$

$$\text{存活率 (SR, \%)} = (N_t/N_0) \times 100\%$$

$$\text{肝体比 (HSI, \%)} = (W_h/W_0) \times 100\%$$

$$\text{脏体比 (VSI, \%)} = (W_n/W_0) \times 100\%$$

$$\text{肥满度 (CF, g/cm}^3\text{)} = (W_t/L^3) \times 100$$

$$\text{饲料系数 (FCR)} = F/(W_t - W_0)$$

$$\text{特定生长率 (SGR, \%/d)} = [\ln W_t - \ln W_0]/t \times 100\%$$

$$\text{摄食率 (FI, \%/d)} = F/[(W_t + W_0)/2 \times t] \times 100\%$$

式中，W_t 为实验结束时鱼的体重，W_0 为实验开始时鱼的体重，N_t 为实验结束时鱼的尾数，N_0 为实验开始时鱼的尾数，W_h 为实验结束时鱼的肝脏重量，W_n 为实验结束时鱼的内脏重量，W 为实验结束时鱼的重量，L 为实验开始时鱼的体长，F 为总摄食量，t 为实验天数。

1.5　肌肉成分测定

肌肉营养粗成分测定　根据 AOAC[13] 的标准，以及 Tan 等[14] 的方法，测定肌肉的水分、粗蛋白、粗灰分和粗脂肪含量。水分测定采用干燥恒重法：肌肉放在 105 ℃ 的烘箱中烘干以分析水分含量。粗蛋白测定：通过凯氏定氮法，测定样品的总氮含量，将测定结果乘以 6.25 即得粗蛋白含量。灰分测定：采用高温 550 ℃ 马弗炉灰化法，通过在 550 ℃ 的马弗炉中加热 24 h 获得。粗脂肪测定：通过索氏提取仪使用醚提取法确定。以上测定至少重复 3 次。

硒含量的测定　饲料和肌肉中的总硒含量按照 Briens 等[15] 的方法测定，使用氢化物发生-原子荧光光谱仪 (AFS-8530；海光仪器) 分析硒含量。具体方法：取 0.5 g 组织置于微波消解管中，加入 2 mL 70% HNO_3 和 1 mL 35% H_2O_2，放置于微波消解仪中，85 ℃ 消解 4 h。对于饲料样品，取 1 g 饲料样品加入 4 mL 70% HNO_3 和 2 mL 35% H_2O_2，85 ℃ 消解 4 h。消解完全之后用蒸馏水稀

释至一定体积，4 ℃ 保存。配置不同浓度的硒标准溶液，准备工作完成之后，电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定硒含量。

1.6　肌肉抗氧化相关指标测定

测定了肌肉中 T-SOD 和 CAT 活性、T-AOC、MDA 含量，采用南京建成生物工程研究所的试剂盒，具体步骤参照试剂盒说明书。

1.7　肌肉组织 H.E 切片

肌肉组织学的观察通过苏木精-伊红 (H.E) 染色进行，染色方法参照之前的研究[16]。随机分析 6 个肌纤维视野 (在 100 倍显微镜下) 计算肌纤维的直径 (μm) 和密度 (N/mm^2)，以及结缔组织与肌纤维面积的比例 (%)。

1.8　肌肉组织总 RNA 的提取、基因表达分析

肌肉组织总 RNA 提取和基因表达分析参照近期的研究[16]。基因表达采用 qRT-PCR 方法检测，相对表达水平采用$2^{-\Delta\Delta C_t}$方法计算。本实验选用双内参进行标准化，这两个内参组合在不同处理之间表达水平没有显著性差异。qRT-PCR 引物序列见表 2。

表 2　引物序列

Tab. 2　Primers used for quantitative real-time PCR analysis

基因 genes	正向引物 forward primer (5′-3′)	反向引物 reverse primer (5′-3′)	登录号 accession no.
*gpx*1	ACTACACTCAGATGAACGAGCTC	CAAAGTTCCACGAGACGTCATTC	MN062284
*gpx*2	TCCCCTGTAATCAGTTTGGCTAC	GCCTTTGAATGTCGGGTTCTATG	XM_027172340.1
*gpx*3	AGAACAACATCTGGGTCTCTGTC	GATTTTCCCCAGGTTCCTGTTTC	MN062285
selenof	GGCTTTTACCGTTGCTTCAGT	ACCTCCCCAATTTTCATCCA	XM_027150758.1
selenok	ACAGTAGGACACAGTCGCCA	GCTTGACGAGGGTCTGAAAGA	XM_027166810.1
selenom	GCTGCGTTTCTTCCATGCTT	TCCTCCACAACTCTCCACCT	XM_027145607.1
selenon	CCGCATCTGGGCTTTATTC	GCGACGCCTGTGAGTTTCT	XM_027143731.1
selenot	CCCTCTGCCTATTTACCGGC	CCAAACAGCATGAACGGGTC	XM_027156829.1
selenoh	GCGTGAGGCTCTCTTCTCTG	TTTACGGGGAGGACCCTTCT	XM_027154592.1
selenos	TCCGTGGTAATGCGTCAGG	TTTGTCCGTCTTGGGCTTC	XM_027163809.1
selenow	GTACAGGCCCAAGTTCACCA	TCCCCGTTCTTCTTCGAGTG	MN062288
*sps*2	GTCCCTGATCCAGACTACAGATTT	TGTCACAGAAGTGCCTCCCTC	XM_027170772.1
txnrd	AGACAAGGCTGGGGTGATTG	GACCGCAGCTACCATACTCC	MN062291
*msrb*1	TCTGAATGACGGACCCAAGC	ACTCTACTGTCCATCTGCCTCT	XM_027141750.1
selenoo	GCTTCATGGACCGCTTT	CCAGGTTCCAGCGAC	XM_0271
selenou	CGTGTACACCCTGCGTC	CTGCAGAGCAGAGA	XM_0271
selenoe	GGGAAAACTGATGGCT	GCCCAATGCTCCATG	XM_0271
selenoi	TGGGTTGTCTGTTTGCC	AGGCCTCGTACACAG	XM_0271
β-actin	GGACTCTGGTGATGGTGTGA	CTGTAGCCTCTCTCGGTCAG	EU161066
*rpl*7	GGCAAATGTACAGGAGCGAG	GCCTTGTTGAGCTTGACGAA	KP938522
hprt	ATGCTTCTGACCTGGAACGT	TTGCGGTTCAGTGCTTTGAT	KP938523
tuba	TCAAAGCTGGAGTTCTCGGT	AATGGCCTCGTTATCCACCA	KP938526
b2m	GCTGATCTGCCATGTGAGTG	TGTCTGACACTGCAGCTGTA	KP938520
ubce	TCAAGAAGAGCCAGTGGAGG	TAGGGGTAGTCGATGGGGAA	KP938524
tbp	AGCAAAGAGTGAGGAGCAGT	ACTGCTGATGGGTGAGAACA	KP938525
gapdh	TTTCAGCGAGAGAGACCCAG	ATGACTCTCTTGGCACCTCC	KP938521
18S *rRNA*	AGCTCGTAGTTGGATCTCGG	CGGGTATTCAGGCGAGTTTG	KP938527
elfa	GTCTGGAGATGCTGCCATTG	AGCCTTCTTCTCAACGCTCT	KU886307

1.9　免疫印迹

采用 Western blot 法测定蛋白表达，参照相关研究[16]。一抗为 anti-NRF2 (1∶2000，16396-1-AP；武汉三鹰生物技术有限公司)，二抗为 Goat anti-rabbit IgG(H+L) (1∶10000，SA00001-2；武汉三鹰生物技术有限公司)。利用 Vilber Fusion FX6 光谱成像系统 (Vilber Lourmat) 对蛋白条带进行可视化，使用 ECL 化学发光检测试剂盒进行显影，并利用 Image-Pro Plus 6.0 软件对其进行定量。

1.10　数据分析

使用 SPSS 19.0 软件 (SPSS，美国) 进行数据统计分析，结果用平均值±标准误 (mean±SE) 表示，使用单因素方差分析进行不同组间指标差异性统计检验。在统计分析之前，所有数据均采用 Kolmogorov-Smirnov 检验进行正态性评估，并进行 Bartlett 检验以检验处理间方差的同质性。显著性水平为 $P<0.05$。

2　结果

2.1　硒代蛋氨酸对黄颡鱼生长性能及饲料利用的影响

在本实验中，硒代蛋氨酸的添加没有显著影响黄颡鱼的 SR、HSI、VSI 和 CF(表 3)，但显著影响终末体重、WGR、SGR、FI 和 FCR。具体，S0~S1 组黄颡鱼终末体重有所上升；但是 S1~S5 组，随着硒代蛋氨酸水平的上升，黄颡鱼的终末体重逐渐下降。黄颡鱼的 WGR 呈现和终末体重相同的变化趋势；S1~S5 组，随着硒代蛋氨酸水平的上升，黄颡鱼的 SGR 逐渐下降。对于 FCR，S1 组最低，S5 组最高。

2.2　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织营养组成的影响

硒代蛋氨酸的添加没有显著影响黄颡鱼肌肉组织的营养组成，包括水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分 (表 4)。

表 3　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼生长性能和饲料相关系数的影响

Tab. 3　Effects of dietary selenomethionine levels on growth performance and feed correlation coefficient of *P. fulvidraco*

项目 items	S0	S1	S2	S3	S4	S5
初始体重/g　IBW	3.23±0.03	3.24±0.02	3.23±0.02	3.22±0.02	3.24±0.01	3.24±0.01
终末体重/g　FBW	8.27±0.18^{b}	8.78±0.84^{a}	8.32±0.12^{b}	7.88±0.16^{c}	7.69±0.57^{cd}	7.54±0.45^{d}
存活率/%　SR	100.00±0.00	98.00±0.20	100.00±0.00	100.00±0.00	98.00±0.20	97.00±0.20
增重率/%　WGR	155.70±0.81^{b}	171.30±0.94^{a}	157.30±0.75^{b}	150.00±1.27^{c}	137.50±1.64^{d}	132.70±3.10^{e}
特定生长率/(%/d)　SGR	2.23±0.01^{b}	2.37±0.01^{a}	2.25±0.01^{b}	2.13±0.01^{c}	2.06±0.02^{d}	2.02±0.03^{e}
摄食率/(%/d)　FI	2.30±0.04^{b}	2.30±0.08^{b}	2.30±0.02^{b}	2.35±0.03^{ab}	2.39±0.06^{ab}	2.44±0.03^{a}
肝体比/%　HSI	1.78±0.04	2.08±0.01	1.85±0.09	1.76±0.03	1.80±0.03	1.81±0.03
脏体比/%　VSI	5.00±0.12	5.63±0.19	5.18±0.14	5.33±0.14	5.47±0.15	5.07±0.16
肥满度/(g/cm^{3})　CF	1.43±0.02	1.46±0.03	1.52±0.06	1.49±0.02	1.48±0.03	1.47±0.02
饲料系数　FCR	1.11±0.02^{c}	1.06±0.05^{c}	1.10±0.01^{c}	1.18±0.02^{b}	1.25±0.04^{a}	1.31±0.05^{a}

注：不同字母表示不同组之间的数值差异显著，$P<0.05$。

Notes: Values with different letters indicate significant differences among different groups, $P<0.05$.

表 4　不同硒代蛋氨酸水平的饲料对黄颡鱼营养组成的影响 (湿重)

Tab. 4　Effects of dietary selenomethionine levels on nutritional composition of *P. fulvidraco* (live weight basis)　%

组分分析 proximate analysis	S0	S1	S2	S3	S4	S5
水分　moisture	80.28±0.71	80.19±0.43	79.53±0.76	79.67±0.25	79.92±0.30	79.79±0.40
粗蛋白　crude protein	15.83±0.24	16.26±0.92	15.44±0.94	15.39±0.38	15.05±1.65	14.63±0.61
粗脂肪　crude lipid	1.87±0.49	1.81±0.67	2.01±0.45	2.07±0.38	1.84±0.23	1.73±0.49
灰分　ash	1.18±0.03	1.14±0.07	1.30±0.11	1.21±0.02	1.17±0.03	1.15±0.03

2.3　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织硒含量的影响

硒代蛋氨酸的添加对黄颡鱼肌肉组织的硒含量有显著影响，硒代蛋氨酸水平的上升会显著增加黄颡鱼肌肉组织的硒含量 (图 1)。

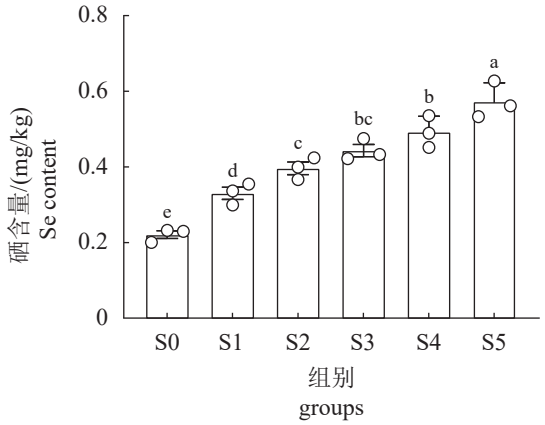


图 1　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼肌肉组织硒含量的影响

不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$，下同。

Fig. 1　Effects of different selenomethionine levels on muscle selenium content of *P. fulvidraco*

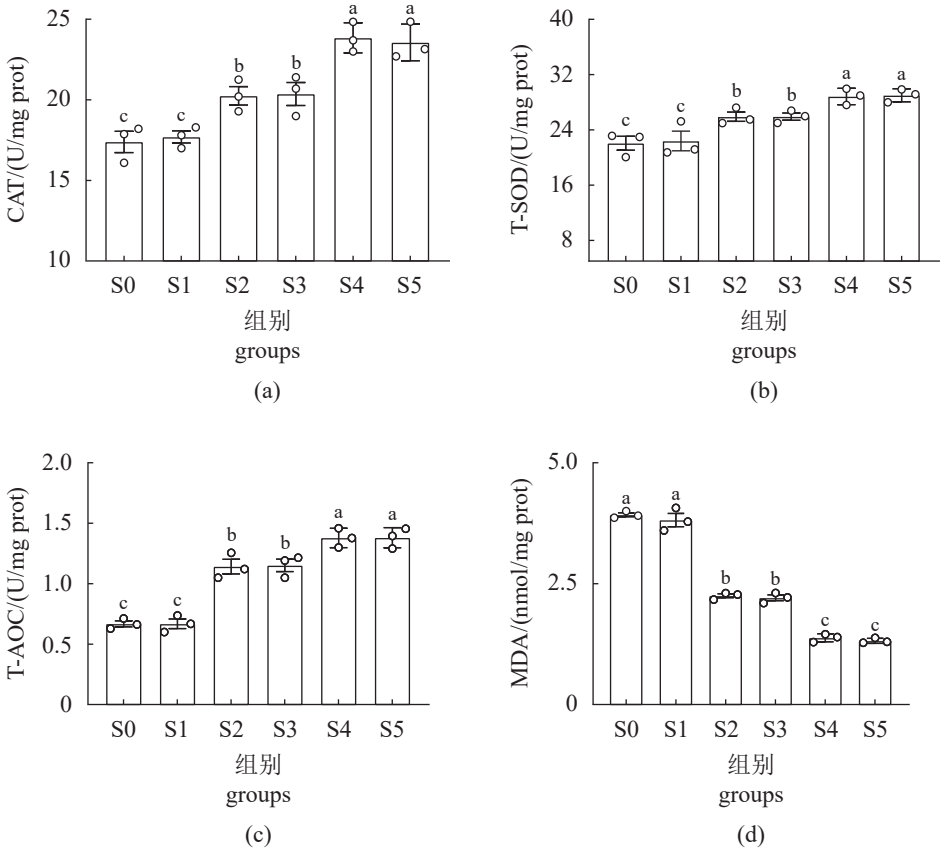
Different lowercases denote significance at $P<0.05$, the same below.

2.4　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织抗氧化相关指标的影响

在本实验中，硒代蛋氨酸的添加显著影响黄颡鱼肌肉组织抗氧化相关指标，包括抗氧化相关酶的活性和抗氧化相关基因 mRNA 表达。硒代蛋氨酸水平的上升使 CAT、T-SOD 活性显著升高；使 T-AOC 活性显著增加；使 MDA 含量显著降低 (图 2)。并且硒代蛋氨酸水平显著影响氧化应激相关基因 *cat*、*sod*1、*sod*2、*nrf*2 和 *keap*1 的 mRNA 水平；硒代蛋氨酸水平的上升，显著升高 *cat*、*sod*1、*sod*2 和 *nrf*2 的 mRNA 水平，显著降低 *keap*1 的 mRNA 水平，表明硒代蛋氨酸的添加可有效提高机体的抗氧化能力。

2.5　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织学的影响

硒代蛋氨酸的添加会影响肌肉组织的肌纤维直径和密度 (图版)。具体而言，S1~S5 组，随着硒代蛋氨酸水平的上升，肌肉组织肌纤维直径不断减小，直径小于 20 μm 的肌纤维逐渐增多 (图 3)。随着硒代蛋氨酸水平的上升，肌肉组织逐渐出现损伤，肌纤维的密度也逐渐减小，表明硒代蛋氨



(图 2　Fig.2)

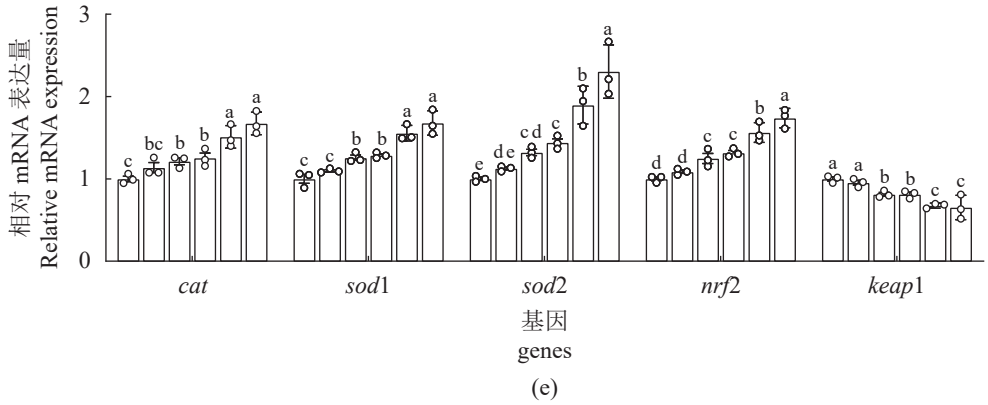
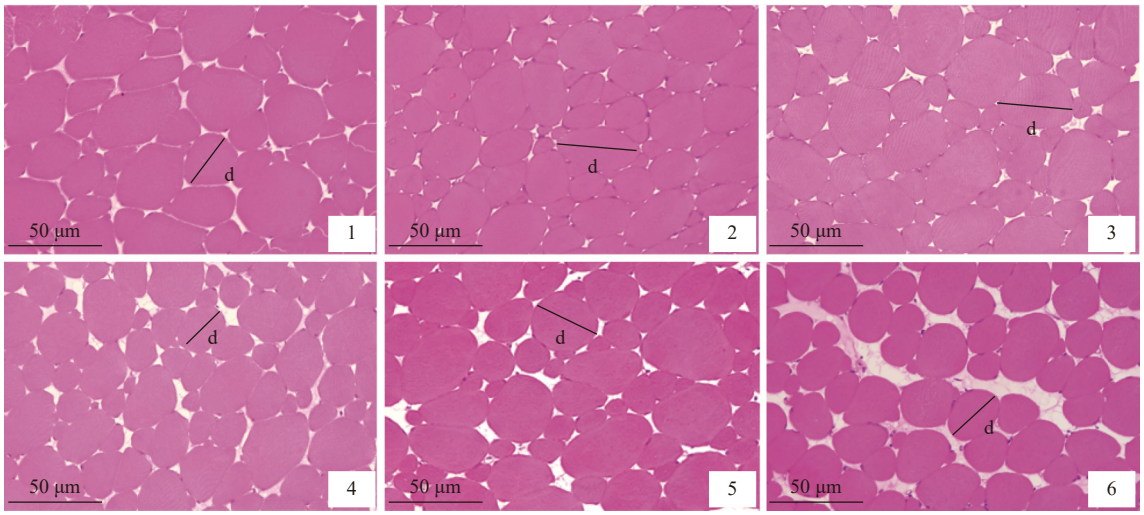


图 2　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼肌肉组织抗氧化指标的影响

Fig. 2　Effects of different selenomethionine levels on muscle antioxidant indexes of *P. fulvidraco*



图版　不同水平硒代蛋氨酸添加后黄颡鱼肌肉组织 H.E 切片

1~6. S0~S5，d.肌纤维直径，下同。

Plate　H.E slices of muscle tissue of *P. fulvidraco* after adding different levels of selenomethionine

1-6. S0-S5, d. diameters of muscle fibers, the same below.

酸水平的升高会使肌肉组织出现损伤，即高硒水平的情况下会损伤肌肉组织。

2.6　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织硒蛋白基因表达的影响

本研究中不同水平的硒代蛋氨酸显著影响硒蛋白基因的表达 (图 4-a)，包括 *txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2 和 *msrb*1。随着硒代蛋氨酸水平的不断上升，硒蛋白基因 *txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2 和 *msrb*1 的表达水平也逐渐升高；*txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2 和 *msrb*1 的表达变化趋势都和硒代蛋氨酸的变化水平呈正相关，即硒代蛋氨酸水平越高，硒蛋白基因表达量越高。本研究也表明，不同硒代蛋氨酸水平显著影响硒蛋白基因 *selenok* 和 *selenow* 的表达 (图 4-b)。具体表现为，硒代蛋氨酸水平的不断上升，促进了硒蛋白基因 *selenok* 和 *selenow* 表达的不断增强。硒代蛋氨酸水平没有显著影响硒蛋白基因 *gpx*3、*selenoi*、*selenon*、*selenoo*、*selenoh*、*selenou*、*selenom*、*selenot* 和 *selenoe* 的表达。

2.7　硒代蛋氨酸对黄颡鱼肌肉组织 NRF2 蛋白表达的影响

硒代蛋氨酸水平的变化会显著影响 NRF2 蛋白表达量的变化 (图 5)。随着饲料硒代蛋氨酸水平的上升，肌肉组织中 NRF2 的蛋白表达量增加，说明抗氧化水平升高。

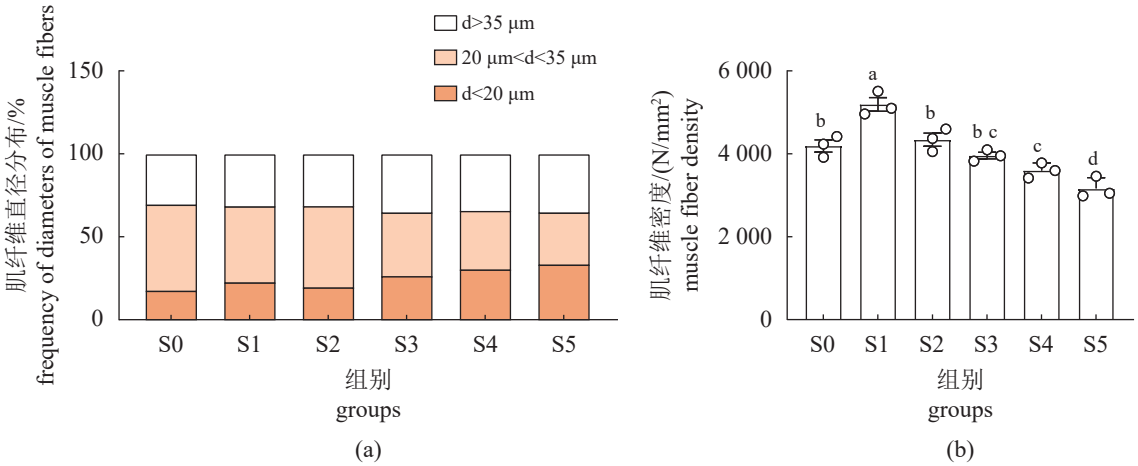


图 3　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼肌肉组织肌纤维直径和密度的影响

Fig. 3　Effects of different selenomethionine levels on the diameter of muscle fibers and density in muscle tissue of *P. fulvidraco*

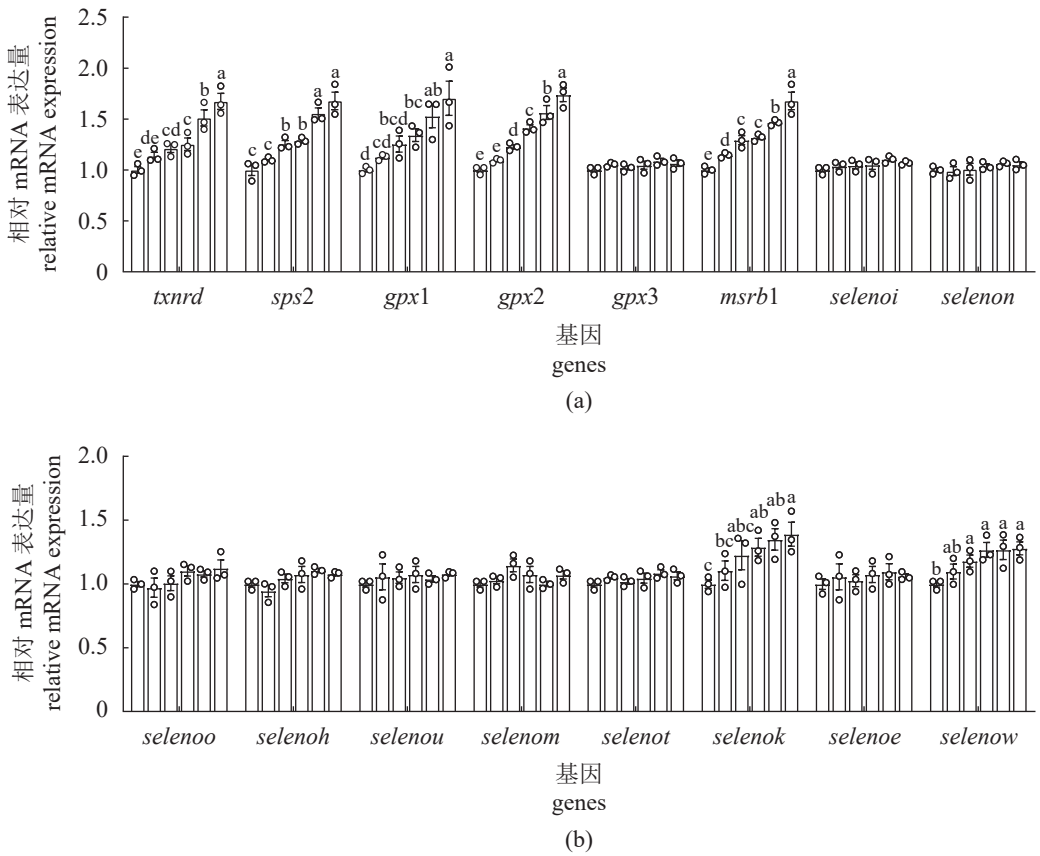


图 4　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼肌肉组织硒蛋白基因表达的影响

Fig. 4　Effects of different selenomethionine levels on selenoprotein expression in muscle tissue of *P. fulvidraco*

3　讨论

本研究结果表明，饲料硒代蛋氨酸水平会影响黄颡鱼的生长性能。S1~S5 组饲料中硒含量的增加，导致黄颡鱼终末体重、增重率、特定生长率降低。研究表明，缺乏和过量的饲料硒已被证明会减少黄颡鱼的生长水平[17]。并且有研究表明，过量的饲料硒会造成负面影响[1]。此外，研究还表明饲料硒代蛋氨酸水平不会显著影响成活率，随着饲料硒代蛋氨酸水平的上升，黄颡鱼肌肉组

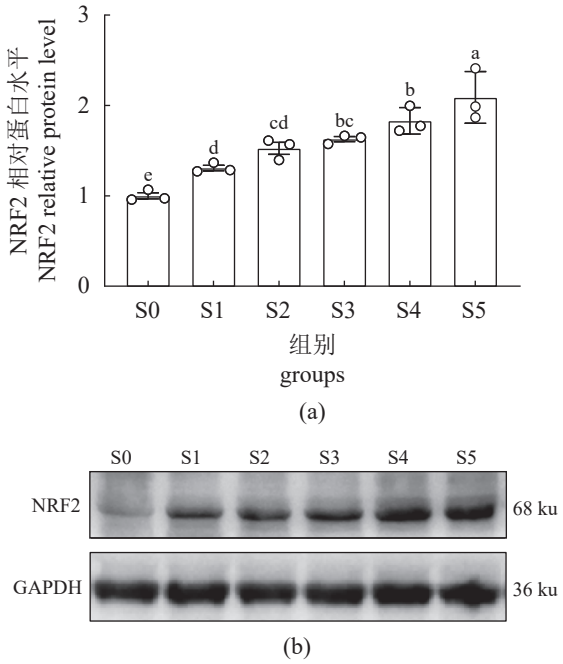


图 5　不同硒代蛋氨酸水平对黄颡鱼肌肉组织 NRF2 蛋白表达的影响

(a) NRF2 蛋白表达量的变化；(b) NRF2 蛋白的免疫印迹图。

Fig. 5　Effects of different selenomethionine levels on NRF2 protein expression in muscle tissue of *P. fulvidraco*

(a) changes in NRF2 protein expression levels; (b) Western blot of NRF2 protein.

织中的硒含量也随之显著升高，表明饲料硒水平会影响鱼体组织的硒含量[18-19]。

一般来说，饲料硒水平高和低引起机体的不良反应，其中最常见的是氧化应激和生长抑制[1]。研究也表明，硒代蛋氨酸水平的上升，导致黄颡鱼肌肉组织受损，肌纤维直径缩短，出现损伤，使肌纤维密度减小。同时，显著增强了机体抗氧化相关酶的活性；显著增强了硒蛋白基因 *txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2、*msrb*1、*selenok* 和 *selenow* 的表达；并且显著增强了抗氧化相关蛋白的表达量。其他研究表明，动物通过改善抗氧化系统来缓解氧化应激，改善生殖生理机能[20–21]。在对尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的研究中，饲料补充硒显著增强了 CAT、T-SOD 和 GPX 活性，从而减少了细胞损伤[22]。硒作为一种必需的微量元素，对提高鱼类的抗氧化能力至关重要[23–24]。MDA 是反映氧化应激和脂质过氧化程度的重要指标。有研究报道，在饲料硒含量低的幼鱼中，血清 MDA 的含量显著增加[25]。在鱼类中，抗氧化酶的活性与其 mRNA 水平密切相关[26]。NRF2 被认为是细胞抗氧化反应的关键调节因子，它调节抗氧化酶相关基因的表达。KEAP1 是一种 NRF2 结合蛋白，可防止 NRF2 易位至细胞核[27]。据报道，NRF2 的核易位通过抑制 KEAP1 转录来增加下游抗氧化剂的基因表达[28]。对虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)[29] 的研究表明，饲料硒缺乏和过量会引起氧化应激并下调 NRF2 的表达。

4　结论

研究结果显示，S1~S5 组，硒代蛋氨酸水平的上升引起黄颡鱼终末体重、增重率、特定生长率的降低；并且使肌肉组织肌纤维密度降低。然而，随着硒代蛋氨酸水平的上升，黄颡鱼肌肉组织的硒含量逐渐增多；CAT、T-SOD、T-AOC 的活性增强；*cat*、*sod*1、*sod*2、*nrf*2 的 mRNA 表达水平升高；NRF2 的蛋白表达水平也增强；并且硒蛋白基因 *txnrd*、*sps*2、*gpx*1、*gpx*2、*msrb*1、*selenok* 和 *selenow* 的表达水平也升高，更能显著增强机体的抗氧化能力，从而在应对环境压力时展现出更强的抵抗力。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] Khan K U, Zuberi A, Fernandes J B K, *et al*. An overview of the ongoing insights in selenium research and its role in fish nutrition and fish health[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2017, 43(6): 1689-1705.

[2] Lin Y H, Shiau S Y. Dietary selenium requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus*[J]. Aquaculture, 2005, 250(1-2): 356-363.

[3] Bell J G, Cowey C B, Adron J W, *et al*. Some effects of selenium deficiency on enzyme activities and indices of tissue peroxidation in Atlantic salmon parr (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture, 1987, 65(1): 43-54.

[4] Gao X J, Tang B, Liang H H, *et al*. Selenium deficiency induced an inflammatory response by the HSP60-TLR2-MAPKs signalling pathway in the liver of carp[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 87: 688-694.

[5] Thiry C, Ruttens A, De Temmerman L, *et al*. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 767-784.

[6] Wojtasik-Kalinowska I, Guzek D, Górska-Horczyczak E, *et al*. Volatile compounds and fatty acids profile in longissimus dorsi

muscle from pigs fed with feed containing bioactive components[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 67: 112-117.

[7] Liu Y M, Wang H J, Zhang M Y, *et al*. Protective effect of selenomethionine on T-2 toxin-induced liver injury in new zealand rabbits[J]. BMC Veterinary Research, 2021, 17(1): 153.

[8] Zhang Y, Qi X, Chen X M, *et al*. Dietary selenomethionine ameliorates lipopolysaccharide-induced renal inflammatory injury in broilers *via* regulating the PI3K/AKT pathway to inhibit necroptosis[J]. Food & Function, 2021, 12(10): 4392-4401.

[9] Schrauzer G N. The nutritional significance, metabolism and toxicology of selenomethionine[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2003, 47: 73-112.

[10] Wang H, Chen H X, Chernick M, *et al*. Selenomethionine exposure affects chondrogenic differentiation and bone formation in Japanese medaka (*Oryzias latipes*)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387: 121720.

[11] Liu G H, Yu H B, Wang C, *et al*. Nano-selenium supplements in high-fat diets relieve hepatopancreas injury and improve survival of grass carp *Ctenopharyngodon idella* by reducing lipid deposition[J]. Aquaculture, 2021, 538: 736580.

[12] Hossain A, Skalicky M, Brestic M, *et al*. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects[J]. Molecules, 2021, 26(4): 881.

[13] AOAC. Official methods of analysis[M]. 16th ed. Washington DC: Association of Official Analytical Chemists, 1995.

[14] Tan X Y, Luo Z, Xie P, *et al*. Effect of dietary linolenic acid/linoleic acid ratio on growth performance, hepatic fatty acid profiles and intermediary metabolism of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Aquaculture, 2009, 296 (1-2): 96-101.

[15] Briens M, Mercier Y, Rouffineau F, *et al*. 2-hydroxy-4-methylselenobutanoic acid induces additional tissue selenium enrichment in broiler chickens compared with other selenium sources[J]. Poultry Science, 2014, 93(1): 85-93.

[16] Xu X J, Zhang D G, Zhao T, *et al*. Characterization and expression analysis of seven selenoprotein genes in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* to dietary selenium levels[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2020, 62: 126600.

[17] Hu J R, Huang Y H, Wang G X, *et al*. Deficient and excess dietary selenium levels affect growth performance, blood cells apoptosis and liver HSP70 expression in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2016, 42(1): 249-261.

[18] 郝甜甜, 李宝山, 于朝磊, 等. 硒对摄食高植物蛋白饲料的大菱鲆幼鱼生长性能、体组成、ppars 相关基因表达及肠道炎症应答的影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(10): 109615.
Hao T T, Li B S, Yu C L, *et al*. Effects of dietary selenium supplementation in high-plant-protein diets on the growth performance, body composition, PPAR gene expression and intestinal inflammatory response of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Journal of fisheries of china, 2025, 49(10): 109615(in Chinese).

[19] Zhang D G, Zhao T, Xu X J, *et al*. Dietary marginal and excess selenium increased triglycerides deposition, induced endoplasmic reticulum stress and differentially influenced selenoproteins expression in the anterior and middle intestines of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Antioxidants, 2021, 10(4): 535.

[20] Kendall N R, McMullen S, Green A, *et al*. The effect of a zinc, cobalt and selenium soluble glass bolus on trace element status and semen quality of ram lambs[J]. Animal Reproduction Science, 2000, 62(4): 277-283.

[21] Marin-Guzman J, Mahan D C, Pate J L. Effect of dietary selenium and vitamin E on spermatogenic development in boars[J]. Journal of Animal Science, 2000, 78(6): 1537-1543.

[22] Esterbauer H, Schaur R J, Zollner H. Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1991, 11(1): 81-128.

[23] Küçükbay F Z, Yazlak H, Karaca I, *et al*. The effects of dietary organic or inorganic selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under crowding conditions[J]. Aquaculture Nutrition, 2009, 15(6): 569-576.

[24] Takahashi L S, Biller-Takahashi J D, Mansano C F M, *et al*. Long-term organic selenium supplementation overcomes the trade-off between immune and antioxidant systems in pacu (*Piaractus mesopotamicus*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 60: 311-317.

[25] Liu L W, Liang X F, Li J, *et al*. Effects of dietary selenium on growth performance and oxidative stress in juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(4): 1296-1303.

[26] Fontagné-Dicharry S, Lataillade E, Surget A, *et al*. Antioxidant defense system is altered by dietary oxidized lipid in first-feeding rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture, 2014, 424-425: 220-227.

[27] Ma Q. Role of nrf2 in oxidative stress and toxicity[J]. Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 2013, 53(1): 401-426.

[28] Kang M I, Kobayashi A, Wakabayashi N, *et al*. Scaffolding of keap1 to the actin cytoskeleton controls the function of nrf2 as

key regulator of cytoprotective phase 2 genes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(7): 2046-2051.

[29] Fontagné-Dicharry S, Véron V, Larroquet L, *et al*. Effect of selenium sources in plant-based diets on antioxidant status and oxidative stress-related parameters in rainbow trout juveniles under chronic stress exposure[J]. Aquaculture, 2020, 529: 735684.

Effects of selenomethionine on the growth performance, feed utilization, muscle histology and antioxidant responses of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)

LEI Xijun , KE Jiang , YANG Hong , XU Pengcheng , ZHANG Xu , HAO Zhiwei , LUO Zhi *

(*College of Fisheries*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: To investigate the effects of selenomethionine on growth performance and muscle tissue of *Pelteobagrus fulvidraco*, we formulated six experimental diets with selenomethionine as the Se source. The supplemental levels of selenomethionine in the six experimental diets (S0, S1, S2, S3, S4, S5) were 0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60 and 0.75 mg/kg, respectively. The Se contents in diets were 0.17, 0.22, 0.29, 0.33, 0.41 and 0.45 mg/kg, respectively. The feeding experiment lasted for 10 weeks. The *P. fulvidraco* fed with S1 group feed showed the best growth performance and feed utilization rate, and had the most intact muscle histology. However, with the increase of selenomethionine levels in S1-S5 groups, the growth performance and feed utilization rate of *P. fulvidraco* decreased, the structural integrity of muscle tissue decreased, and the density and diameter of muscle fiber decreased and shortened, indicating that muscle tissue had been damaged. In addition, with the increase of dietary selenometine levels, the selenium content and the activities of antioxidant enzymes CAT, T-SOD and T-AOC in muscle tissue were increased. The mRNA expression of antioxidation-related genes (*cat*, *sod*1, *sod*2 and *nrf*2) and selenproteins (*txnrd*, *sps*2, *gpx*1, *gpx*2, *msrb*1, *selenok* and *selenow*) was significantly up-regulated, and the protein expression of NRF2 was significantly up-regulated. These results indicated that the antioxidant capacity and the expression level of selenoproteins in muscle of *P. fulvidraco* increased with the increase of dietary selenomethionine levels. Dietary supplementation of excessive selenomethionine can affect the growth performance of *P. fulvidraco*, reduce feed utilization, cause muscle tissue damage and reduce antioxidant capacity. This study determined that adding 0.15 mg/kg of selenomethionine to the diets of *P. fulvidraco* is most beneficial for its growth, and found that appropriate addition of selenomethionine can enhance the antioxidant capacity of *P. fulvidraco* muscles.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; selenomethionine; growth performance; muscle; selenoprotein; antioxidant response

Corresponding author: LUO Zhi. E-mail: luozhi99@mail.hzau.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32530109); National Key Research and Development Program of China (2023YFD2400600)