

Dong L X, Jiang M, Peng D, *et al.* Selenium sources and selenium levels on growth performance and muscle quality of juvenile hybrid culter “Xian-feng No. 1” [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(1): 012604. [董立学, 蒋明, 彭迪, 等. 硒源及硒水平对杂交鲂“先锋1号”生长性能和肌肉品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(1): 012604.]

硒源及硒水平对杂交鲂“先锋1号”生长性能和肌肉品质的影响

董立学¹ 蒋明¹ 彭迪¹ 程珂¹ 文华¹ 王贵英^{2,3}
李清^{2,3} 覃秋莹¹ 张浪¹

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430223; 2. 武汉市农业科学院水产研究所, 武汉 430207;
3. 武汉先锋水产科技有限公司, 武汉 430207)

摘要: 实验旨在研究饲料中硒源及硒水平对杂交鲂“先锋1号”生长性能和肌肉品质的影响, 分别以亚硒酸钠和酵母硒为硒源, 在基础饲料(C0)中添加0.30、0.60和1.20 mg/kg的硒, 亚硒酸钠组为S1、S2和S3, 酵母硒组为Y1、Y2和Y3。选用初始体重为[(59.62±0.53) g]的杂交鲂“先锋1号”420尾, 随机分为7组, 每组3个重复, 使用实验饲料饲喂8周。结果显示: (1)亚硒酸钠为硒源时, S3组增重率和特定生长率最高; 酵母硒为硒源时, Y2组增重率和特定生长率最高。Y2组终末均重、增重率和特定生长率显著高于对照组C0和S2组($P<0.05$)。 (2)酵母硒组杂交鲂肌肉硒含量显著高于对照组及同水平亚硒酸钠组, Y2组肌肉粗蛋白含量最高, 酵母硒和亚硒酸钠对粗脂肪含量无显著影响($P>0.05$)。 (3) S3和Y2组血清谷草转氨酶水平显著低于对照组C0 ($P<0.05$); Y2组血清碱性磷酸酶水平显著低于C0组($P<0.05$); S3、Y1、Y2和Y3组血清总胆固醇水平显著低于对照组C0 ($P<0.05$)。 (4)随着硒含量的增加, 杂交鲂肌肉弹性、凝聚性和回复性均显著增加($P<0.05$); 酵母硒组肌肉硬度、黏附性和胶凝性显著高于其他组($P<0.05$); Y2和Y3组肌肉咀嚼性显著高于S1、S2和S3组($P<0.05$)。 (5)亚硒酸钠和酵母硒对杂交鲂肌肉氨基酸含量无显著影响。Y2组肌肉必需氨基酸比例显著高于对照组C0、S2和Y3组($P<0.05$)。 (6) Y2组n-3系列多不饱和脂肪酸含量显著高于对照组($P<0.05$), Y1组n-6系列多不饱和脂肪酸含量显著高于对照组C0 ($P<0.05$)。 综上, 在实验条件下, 以生长性能和肌肉品质为评价指标, 推荐杂交鲂饲料中硒源为酵母硒, 添加水平为0.60 mg/kg。

关键词: 硒; 生长性能; 肌肉品质; 杂交鲂“先锋1号”

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)01-012604-12

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0096 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0096



硒作为一种重要的必需微量元素, 在机体抗氧化、促生长及提高免疫等方面起着重要的作用^[1]。硒在环境中的存在形态可分为无机态和有机态两大类, 无机态主要包括亚硒酸盐和硒酸盐, 有机态主要包括硒代蛋氨酸及酵母硒等。硒的水平及化学形态决定其在生物体内的代谢途径、生物利用率及生理功能^[2]。适宜的硒水平能够促进鱼类的生长发育、提升免疫和抗氧化能力, 而缺硒易导致鱼

类的生长速率降低、氧化压力增加、免疫机能下降、机体代谢紊乱等^[3]。鱼类中饲料适宜硒源的研究表明, 不同化学形式的硒利用率明显不同, 有机硒因具有更高的生物利用度和安全性, 在促进生长、增强抗氧化能力及降低硒残留方面的效果显著优于无机硒^[4-6]。肌肉品质是决定水产品经济价值的关键因素, 硒作为谷胱甘肽过氧化物酶的核心组分, 可通过调节脂质代谢、抑制氧化应激等途径

收稿日期: 2025-03-25; **修订日期:** 2025-06-06

基金项目: 湖北省重点研发计划(2023BBB051); 中国水产科学研究院长江水产研究所基本科研业务费项目(YFI202409) 资助 [Supported by the Key Research and Development Program of Hubei Province (2023BBB051); Basic Scientific Research Operating Expenses Project of Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences (YFI202409)]

作者简介: 董立学(1996—), 助理研究员; 主要从事水产营养与饲料研究。E-mail: dlx@yfi.ac.cn

通信作者: 张浪, 副研究员; E-mail: zhanglang@yfi.ac.cn

影响肌肉的质构特性和营养成分^[7]。目前, 硒源及硒水平对鱼类肌肉品质的影响尚未明确, 其与肌肉质构指标、脂肪酸组成的剂量效应关系仍需系统研究。

杂交鮠“先锋1号”是经选育的丹江口水库翘嘴鮠(*Erythroculter ilishaeformis*)与长江上游黑尾近红鮠(*Ancherythroculter nigrocauda*)通过属间杂交的子代^[8], 因其具有生长速度快、抗逆性强和肉质鲜美等特点, 现已成为我国鮠类养殖的新品种^[9]。当前, 杂交鮠营养与饲料研究还较欠缺, 在规模化养殖中, 如何通过营养调控进一步提高其生长性能和肌肉品质, 是目前杂交鮠产业关注的重点。本实验探究饲料中不同硒源及硒水平对杂交鮠“先锋1号”生长性能、血清生化指标、肌肉营养成分及质构特性的影响, 旨在通过提升肌肉品质增强杂交鮠的市场竞争力, 为其饲料配制和品质评价提供数据参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验饲料配方及营养成分见表1。参考陈政等^[10]的研究, 以亚硒酸钠和酵母硒为硒源, 在基础饲料中分别添加0.30、0.60和1.20 mg/kg硒, 亚硒酸钠添加组分别记为S1、S2和S3, 酵母硒添加组分别记为Y1、Y2和Y3。按表1称取各组饲料原料, 过80目筛, 采用分级混匀法混合均匀, 制成0.20 mm颗粒饲料后烘干, 于-4℃条件下保存。亚硒酸钠来自山东西亚化学工业有限公司, 纯度≥98%; 酵母硒来自安琪酵母股份有限公司, 硒含量为2000 mg/kg。实验基础饲料硒含量实测为0.47 mg/kg, 亚硒酸钠组饲料硒含量实测值分别为0.65、0.95和1.50 mg/kg, 酵母硒组饲料硒含量实测值分别为0.67、0.98和1.52 mg/kg。

1.2 养殖实验

实验杂交鮠“先锋1号”来自武汉先锋水产科技有限公司, 购回后暂养于池塘网箱中(长江水产研究所山坡实验基地), 驯养2周以适应养殖环境, 暂养期间使用对照组饲料投喂。实验开始前, 将实验鱼饥饿24h, 挑选420尾规格均匀、体质健康的杂交鮠[(59.62±0.53) g], 随机分配到21个网箱中, 网箱规格为2.0 m×1.0 m×1.5 m, 每个网箱20尾鱼, 随机分为7组, 每组3个重复。每日8:00和17:00饱食投喂2次, 记录每天投喂量, 持续饲养8周。养殖期间水温24—32℃, 溶氧>4 mg/L, 水体氨氮<0.05 mg/L, 水体pH 6.5—7.2, 水体盐度<0.05‰。

1.3 样品采集

在养殖实验结束时, 将实验鱼饥饿24h。记录

数量并称重每个网箱中实验鱼, 计算存活率和增重率; 每个网箱取3尾鱼, 使用75 mg/L MS-222麻醉, 测量体长体重, 计算肥满度; 使用2 mL注射器尾静脉抽血, 4℃下静置2h后于1500 r/min下离心15min, 分离血清并于-20℃下保存, 测定血清生化指标; 随后将鱼体解剖, 分离内脏与肝脏并称重, 计算肝体比和脏体比; 取背部肌肉, 鲜样用于测定肌肉质构指标; 其他肌肉样本于-20℃下保存, 测定常规营养成分、硒、氨基酸和脂肪酸含量。实验按照中国水产科学院长江水产研究所动物福利委员会批准的动物饲养规程进行。

1.4 指标计算

按以下公式计算生长性能:

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

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

$$\text{特定生长率(SGR, \% / d)} = (\ln W_f - \ln W_i) \times 100 / T$$

表1 实验饲料配方及营养成分

Tab. 1 The formulation and nutrient composition of experimental diets

原料 Ingredient	含量 Content (%)	饲料营养成分 Feed nutrient	含量 Content (%)
鱼粉Fish meal	34.00	水分Moisture	8.34
面粉Wheat flour	20.25	粗蛋白Crude protein	43.61
菜粕Rapeseed meal	6.00	粗脂肪Crude fat	9.96
豆粕Soybean meal	18.00	灰分Ash	11.51
鸡肉粉Chicken meal	10.00	硒含量Selenium content (mg/kg)	0.47
纤维素Cellulose	2.00		
氯化胆碱Choline chloride	0.25		
大豆油Soybean oil	3.00		
鱼油Fish oil	3.00		
磷酸二氢钙Ca (H ₂ PO ₄) ₂	2.00		
维生素预混料 ¹ Vitamin premix ¹	0.50		
矿物质预混料 ² Mineral premix ²	1.00		

注: 维生素预混料¹(mg/kg饲料): 维生素A 1.5, 维生素D₃ 0.05, 维生素E 60, 维生素B₁ 5, 维生素B₂ 20, 维生素B₆ 10, 维生素C 120, 维生素K₃ 5, 肌醇 400, 烟酸120, 泛酸钙 10, 叶酸 1, 生物素 0.1; 矿物质预混料²(mg/kg饲料): Ca(H₂PO₄)₂ 26000, Ca(CH₃CHOHCOO)₂ 6540, FeSO₄ 42.5, MgSO₄ 1340, NaH₂PO₄ 1744, NaCl 870, AlCl₃ 3, KIO₃ 2.5, KCl 1500, CuCl₂ 2, MnSO₄ 16, CoCl₂ 20, ZnSO₄ 60

Note: The vitamin premix¹ (mg/kg of diets): vitamin A 1.5, vitamin D₃ 0.05; vitamin E 60; vitamin B₁ 5; vitamin B₂ 20; vitamin B₆ 10; vitamin C 120; vitamin K₃ 5; inositol 400; nicotinic acid 120; calcium pantothenate 10; folic acid 1; biotin 0.1. The minerals premix² (mg/kg of diets): Ca(H₂PO₄)₂ 26000; Ca(CH₃CHOHCOO)₂ 6540; FeSO₄ 42.5; MgSO₄ 1340; NaH₂PO₄ 1744; NaCl 870; AlCl₃ 3; KIO₃ 2.5; KCl 1500; CuCl₂ 2; MnSO₄ 16; CoCl₂ 20; ZnSO₄ 60

饲料系数(FCR)= $F/(W_f-W_i)$

肥满度(CF, g/cm^3)= $W \times 100/L^3$

肝体比(HSI)= $W_h \times 100/W$

脏体比(VSI)= $W_v \times 100/W$

式中, M_f 为终尾数, M_i 为初尾数; W_f 为末体质量(g), W_i 为初始体质量(g), T 为养殖时间(d), F 为摄入饲料总质量(g), W 为鱼体体质量(g), L 为体长(cm), W_h 为肝脏质量(g), W_v 为内脏质量(g)。

常规营养成分测定 参照食品安全国家标准, 饲料和肌肉水分采用电热鼓风干燥箱(德力祥, DHG-9140a)直接干燥测定(GB/T 5009.3-2016); 饲料和肌肉粗蛋白采用凯氏定氮仪(海能, K9840)测定(GB/T 5009.5-2016); 饲料和肌肉粗脂肪采用索氏抽提法测定(GB/T 5009.6-2016); 饲料和肌肉灰分采用马弗炉(国营, SX-4-10)灼烧测定(GB/T 5009.4-2016); 饲料和肌肉硒含量采用原子荧光光谱仪(亿辰, AFS-2202E)测定(GB 5009.93-2017)。

肌肉质构指标测定 取鱼体背部同一位置肌肉, 切成1 cm×1 cm×1 cm左右大小肌肉块, 每尾鱼3个平行样, 使用质构仪(瑞典泰沃, TVT-300XP)在25℃室温下测定肌肉质构指标, 测试条件: 测试速度1 mm/s, 压缩比30%, 停留间隔时间5s。

血清生化指标测定 将-20℃保存的血清样本于冰上解冻, 使用全自动生化分析仪(迈瑞, BS 460)测定血清葡萄糖(GLU)、谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)、甘油三酯(TG)、总胆固醇(T-CHO)、血清白蛋白(ALB)和总蛋白(TP)含量。

氨基酸和脂肪酸含量测定 使用氨基酸自

动分析仪(日立, L-8900)测定肌肉氨基酸含量(GB 5009.124-2016)。使用气相色谱仪(安捷伦, 7890A)测定肌肉脂肪酸含量(GB 5009.168-2016)。

1.5 氨基酸营养评价

参照喻亚丽等^[8]的方法计算氨基酸评分、化学评分和必需氨基酸指数:

氨基酸含量($\text{mg}/\text{g N}$)=(氨基酸含量, %)/(粗蛋白含量, %)×6.25×1000

氨基酸评分(AAS)=(氨基酸含量, $\text{mg}/\text{g N}$)/(FAO/WHO模式氨基酸含量, $\text{mg}/\text{g N}$)

化学评分(CS)=(氨基酸含量, $\text{mg}/\text{g N}$)/(全鸡蛋蛋白质模式氨基酸含量, $\text{mg}/\text{g N}$)

必需氨基酸指数(EAAI)=[(A/AE)×(B/BE)×... (I/IE)]^{1/n}

式中, A、B、...I为各氨基酸含量($\text{mg}/\text{g N}$); AE、BE、...IE为全鸡蛋蛋白质对应的氨基酸含量($\text{mg}/\text{g N}$)。

1.6 数据计算和统计分析

实验数据以平均值±标准差(mean±SD, $n=3$)表示。使用SPSS20.0进行分析, 采用单因素方差(One-way ANOVA)和Tukey检验比较分析组间差异显著性, 采用双因素方差(Two-way ANOVA)分析硒源和硒水平之间的差异和交互作用。P<0.05表示差异显著。

2 结果

2.1 生长性能

如表2所示, S3、Y2和Y3组饲料系数显著低于对照组(P<0.05); S3、Y2和Y3组终末均重、增重率

表2 硒源及硒水平对杂交鲢“先锋1号”生长性能的影响

Tab. 2 Effects of sodium selenite and selenium yeast on growth performance of juvenile hybrid F₁

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
存活率SR (%)	95.00±5.00	100.00±0.00	98.33±2.89	95.00±5.00	100.00±0.00	93.33±7.64	98.33±2.89	0.778	0.215	0.245
初始均重IBW (g)	59.75±0.43	59.83±0.38	59.17±0.14	59.83±0.29	59.33±0.58	59.67±0.38	59.42±0.29	0.439	0.597	0.067
终末均重FBW (g)	105.95±1.80 ^a	107.15±0.49 ^{ab}	106.33±3.98 ^a	112.14±1.26 ^{bc}	106.74±2.13 ^{ab}	113.81±4.24 ^c	114.39±4.71 ^c	0.064	0.018	0.140
增重率WGR (%)	77.34±4.29 ^a	79.09±1.68 ^{ab}	79.72±6.96 ^{ab}	87.41±1.57 ^{bc}	79.90±3.82 ^{ab}	90.73±6.24 ^c	92.50±7.02 ^c	0.038	0.013	0.262
饲料系数FCR	1.67±0.04 ^c	1.60±0.05 ^{bc}	1.53±0.08 ^{abc}	1.48±0.10 ^{ab}	1.63±0.02 ^c	1.39±0.07 ^a	1.41±0.12 ^a	0.170	0.007	0.196
特定生长SGR (%/d)	1.02±0.04 ^a	1.04±0.02 ^{ab}	1.05±0.07 ^{ab}	1.12±0.01 ^{bc}	1.05±0.04 ^{ab}	1.15±0.06 ^c	1.17±0.06 ^c	0.044	0.014	0.270
肝体比HSI	0.54±0.02 ^{ab}	0.49±0.01 ^a	0.52±0.04 ^{ab}	0.52±0.02 ^{ab}	0.51±0.05 ^{ab}	0.55±0.05 ^{ab}	0.58±0.02 ^b	0.061	0.125	0.644
脏体比VSI	3.41±0.36 ^{ab}	2.87±0.08 ^a	2.86±0.41 ^a	2.97±0.49 ^{ba}	2.92±0.49 ^{ab}	3.14±0.24 ^{ab}	3.60±0.17 ^c	0.076	0.181	0.391
肥满度CF (g/cm^3)	1.23±0.01 ^{ab}	1.30±0.03 ^d	1.24±0.01 ^{ab}	1.25±0.01 ^{bc}	1.21±0.02 ^a	1.29±0.01 ^{cd}	1.27±0.01 ^{bcd}	0.322	0.770	0

注: 表中数据均为3组重复的平均值±标准差($n=3$); 同一行右上角不同字母代表差异显著(P<0.05); 下同

Note: Data are means of triplicates ($n=3$, mean±SD); Means in each line with different letters are represents significant differences (P<0.05); the same applies below

和特定生长率显著高于对照组($P<0.05$); Y3组肝体比和脏体比显著高于S1组($P<0.05$); S1、S3、Y2和Y3组肥满度显著高于对照组C0 ($P<0.05$)。硒源及硒水平对杂交鲈肥满度的影响有交互作用。

2.2 常规营养成分

如表 3 所示, S3、Y1、Y2和Y3组肌肉硒含量显著高于对照组C0 ($P<0.05$), Y2组肌肉硒含量显著高于其他组($P<0.05$); S3组肌肉水分含量显著增加, 粗蛋白含量显著降低($P<0.05$); Y2组粗蛋白含量显著增加, S1组灰分含量显著增加($P<0.05$); 酵母硒和亚硒酸钠对粗脂肪含量无显著影响($P>0.05$)。硒源及硒水平对杂交鲈肌肉粗蛋白质和硒含量的影响有交互作用。

2.3 血清生化指标

如表 4 所示, Y3组血清GLU水平显著高于C0、S1、Y1和Y2组($P<0.05$); C0组血清ALT水平显著低于其他组($P<0.05$), 其他组之间血清ALT水平无显著差异($P>0.05$); S3和Y2组血清AST水平显著低于对照组C0 ($P<0.05$); Y2组血清ALP水平显著低于C0组($P<0.05$); S2组血清TG水平显著高于对照组C0 ($P<0.05$), S3和Y3组血清TG水平显著高于对照组C0 ($P<0.05$); S3、Y1、Y2和Y3组血清T-CHO水平显著低于对照组C0 ($P<0.05$); 对照组C0血清ALB水平显著高于其他组($P<0.05$), S2、S3和Y3组血清

ALB水平显著低于其他组($P<0.05$); S1组血清TP水平显著高于其他组($P<0.05$), S3和Y3组血清TP水平显著低于其他组($P<0.05$)。硒源及硒水平对杂交鲈血清TG、T-CHO和ALB水平的影响有交互作用。

2.4 肌肉质构指标

如表 5 所示, S3、Y1、Y2和Y3组肌肉硬度显著高于其他组($P<0.05$); 随着硒含量的增加, 肌肉弹性和凝聚性均显著增加($P<0.05$); Y1、Y2和Y3组肌肉胶凝性显著高于其他组($P<0.05$); Y2和Y3组肌肉咀嚼性显著高于S1、S2和S3组($P<0.05$); Y2组肌肉黏附性显著高于其他组($P<0.05$); S3、Y1、Y2和Y3组肌肉黏着性显著高于其他组($P<0.05$); C0组肌肉回复性显著低于其他组($P<0.05$)。硒源及硒水平对杂交鲈肌肉黏附性和回复性的影响有交互作用。

2.5 肌肉氨基酸

如表 6 所示, 添加亚硒酸钠组和酵母硒组对杂交鲈肌肉氨基酸含量无显著影响。Y2组肌肉EAA/TAA显著高于对照组C0、S2和Y3组($P<0.05$), 其他组之间无显著差异($P>0.05$); 各处理组肌肉EAA/TAA均在0.40以上, EAA/NEAA均在0.68以上, 属于优质蛋白源。各组杂交鲈肌肉中必需氨基酸总量均高于FAO/WHO模式下的2190 mg/g N, 但低于鸡蛋蛋白标准的2960 mg/g N(表 7)。各实验组必需氨

表 3 硒源及硒水平对杂交鲈“先锋1号”肌肉营养成分的影响

Tab. 3 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle nutrients of juvenile hybrid F₁

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
水分 Moisture (%)	77.74±0.32 ^{ab}	78.19±0.37 ^{bc}	77.92±0.34 ^{ab}	78.61±0.28 ^c	77.80±0.36 ^{ab}	77.53±0.28 ^a	77.78±0.25 ^{ab}	0.004	0.515	0.066
粗蛋白Crude protein (%)	19.42±0.12 ^b	19.59±0.32 ^{bc}	19.44±0.40 ^b	18.86±0.40 ^a	19.44±0.20 ^b	20.00±0.25 ^c	19.34±0.08 ^{ab}	0.052	0.755	0.004
粗脂肪 Crude fat (%)	1.44±0.01	1.46±0.04	1.42±0.01	1.45±0.02	1.43±0.01	1.40±0.08	1.44±0.03	0.429	0.587	0.315
灰分Ash (%)	1.28±0.09 ^a	1.44±0.04 ^b	1.39±0.09 ^{ab}	1.39±0.06 ^{ab}	1.34±0.08 ^{ab}	1.40±0.02 ^{ab}	1.36±0.03 ^{ab}	0.145	0.784	0.306
硒Selenium content (mg/kg)	0.47±0.03 ^a	0.56±0.03 ^{ab}	0.54±0.01 ^{ab}	0.63±0.05 ^{bc}	0.71±0.07 ^{cd}	0.78±0.05 ^d	1.23±0.11 ^e	0	0	0

表 4 硒源及硒水平对杂交鲈“先锋1号”血清生化指标的影响

Tab. 4 Effects of sodium selenite and selenium yeast on serum biochemical index of juvenile hybrid F₁

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
GLU (mmol/L)	4.43±0.18 ^a	4.60±0.94 ^a	5.48±0.36 ^{ab}	5.37±0.27 ^{ab}	4.40±0.51 ^a	4.50±1.20 ^a	6.34±0.33 ^b	0.840	0.017	0.089
ALT (U/L)	19.33±1.90 ^b	12.57±1.33 ^a	14.03±0.32 ^a	12.67±1.05 ^a	12.30±0.62 ^a	13.67±2.77 ^a	15.00±1.40 ^a	0.430	0.202	0.238
AST (U/L)	31.9±0.36 ^c	29.03±1.34 ^{bc}	28.40±1.61 ^{abc}	26.37±2.89 ^{ab}	28.97±1.01 ^{bc}	25.27±1.42 ^a	28.53±3.01 ^{abc}	0.726	0.206	0.118
ALP (U/L)	80.13±4.31 ^{bc}	81.83±9.60 ^c	72.5±9.20 ^{abc}	75.10±1.06 ^{abc}	71.93±6.2 ^{abc}	62.43±9.56 ^a	67.27±6.30 ^{ab}	0.024	0.140	0.961
TG (mmol/L)	2.30±0.43 ^{bc}	2.00±0.07 ^{ab}	2.03±0.03 ^{ab}	2.86±0.39 ^d	1.84±0.06 ^a	2.24±0.20 ^{abc}	2.59±0.06 ^{cd}	0	0.001	0.008
T-CHO (mmol/L)	9.62±0.23 ^{cd}	10.39±0.15 ^d	8.77±0.32 ^{bc}	7.40±0.11 ^a	8.23±0.98 ^{ab}	7.80±0.98 ^{ab}	7.81±0.20 ^{ab}	0.007	0.001	0.009
ALB (g/L)	11.1±0.10 ^c	9.57±0.72 ^b	8.57±0.38 ^a	8.47±0.32 ^a	9.83±0.23 ^b	10.20±0.26 ^b	8.83±0.47 ^a	0.003	0.004	0.031
TP (g/L)	33.04±1.34 ^{bc}	37.92±1.44 ^d	32.76±1.54 ^{ab}	30.72±0.20 ^a	35.03±0.53 ^c	31.47±1.56 ^{ab}	30.78±0.88 ^a	0.026	0	0.127

基酸总量均高于对照组,且在S2组最高,其次是Y2组;S2组Lys含量最高,达到了鸡蛋蛋白质模式的1.22倍。各组必需氨基酸指数均在80%以上,其中S2组83.32%最高,其次是Y2组82.14%(表8)。

2.6 肌肉脂肪酸

如表9所示,C0组C14:0(豆蔻酸)含量显著高于其他组($P<0.05$);S2、Y2和Y3组杂交鲢肌肉C16:1n7(棕榈油酸)、C20:1(花生烯酸)、C18:3n3(α -

表5 硒源及硒水平对杂交鲢“先锋1号”肌肉质构的影响

Tab. 5 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle texture of juvenile hybrid F_1

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
硬度Hardness	336.33± 19.10 ^a	341.33± 12.48 ^a	351.83± 23.68 ^{ab}	402.83± 51.84 ^c	379.00± 32.70 ^{bc}	410.00± 20.59 ^c	410.17± 27.9 ^c	0.002	0.004	0.143
弹性Springiness	0.22± 0.01 ^a	0.23± 0.01 ^a	0.25± 0.01 ^c	0.25± 0.01 ^c	0.26± 0.01 ^d	0.27± 0.01 ^d	0.26± 0.01 ^d	0	0.004	0.092
凝聚性Cohesiveness	0.20± 0.01 ^a	0.25± 0.02 ^b	0.25± 0.02 ^b	0.24± 0.01 ^b	0.25± 0.01 ^b	0.25± 0.01 ^b	0.25± 0.01 ^b	0.419	0.592	0.352
胶黏性Chewiness	22.07± 5.74 ^{abc}	19.06± 3.80 ^a	19.96± 0.33 ^{ab}	20.93± 3.51 ^{ab}	24.76± 3.11 ^{bcd}	27.13± 5.45 ^d	26.59± 2.25 ^{cd}	0	0.368	0.831
咀嚼性Gumminess	94.37± 26.43 ^{ab}	81.00± 11.50 ^a	82.18± 2.63 ^a	82.90± 13.15 ^a	94.10± 15.32 ^{ab}	103.13± 20.63 ^b	104.87± 7.20 ^b	0	0.462	0.665
黏附性Stringiness	0.75± 0.09 ^{ab}	0.70± 0.03 ^a	0.82± 0.06 ^{abc}	0.89± 0.06 ^c	0.81± 0.04 ^{bc}	1.03± 0.13 ^d	0.89± 0.04 ^c	0	0	0.003
黏着性Adhesiveness	3.29± 0.92 ^a	3.05± 0.41 ^a	3.17± 0.47 ^a	4.24± 0.52 ^b	4.10± 0.28 ^b	4.15± 0.60 ^b	5.09± 0.29 ^c	0	0	0.846
回复性Resilience	0.09± 0.00 ^a	0.10± 0.00 ^{bc}	0.11± 0.01 ^{cd}	0.10± 0.01 ^b	0.12± 0.01 ^d	0.11± 0.01 ^{bcd}	0.12± 0.00 ^d	0.014	0.851	0.013

表6 硒源及硒水平对杂交鲢“先锋1号”肌肉氨基酸的影响

Tab. 6 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle amino acid of juvenile hybrid F_1 (g/100g)

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
天冬氨酸Asp	1.74±0.02	1.72±0.15	1.79±0.02	1.68±0.11	1.72±0.11	1.78±0.04	1.73±0.11	0.729	0.802	0.781
苏氨酸Thr	0.77±0.01	0.77±0.09	0.81±0.02	0.76±0.07	0.76±0.07	0.80±0.02	0.76±0.07	0.652	0.841	0.830
丝氨酸Ser	0.69±0.01	0.69±0.09	0.72±0.02	0.68±0.06	0.68±0.06	0.71±0.02	0.67±0.06	0.995	0.752	0.523
谷氨酸Glu	2.47±0.03	2.44±0.20	2.50±0.07	2.39±0.16	2.43±0.14	2.54±0.07	2.46±0.14	0.996	0.891	0.483
甘氨酸Gly	0.88±0.11	0.81±0.16	0.92±0.07	0.89±0.20	0.83±0.09	0.80±0.05	0.79±0.10	0.719	0.953	0.715
丙氨酸Ala	1.41±0.08	1.35±0.25	1.49±0.03	1.42±0.16	1.37±0.15	1.45±0.07	1.37±0.14	0.814	0.835	0.997
半胱氨酸Cys	0.13±0.00	0.13±0.01	0.15±0.00	0.13±0.00	0.13±0.00	0.13±0.00	0.13±0.01	0.976	0.771	0.328
缬氨酸Val	0.91±0.02	0.88±0.11	0.94±0.02	0.87±0.10	0.88±0.08	0.96±0.04	0.92±0.08	0.507	0.831	0.254
蛋氨酸Met	0.49±0.01	0.49±0.05	0.46±0.04	0.47±0.04	0.46±0.04	0.51±0.01	0.49±0.03	0.958	0.841	0.293
异亮氨酸Ile	0.96±0.01	0.93±0.08	0.95±0.03	0.91±0.08	0.93±0.05	0.99±0.03	0.96±0.07	0.613	0.696	0.595
亮氨酸Leu	1.56±0.01	1.57±0.20	1.65±0.06	1.54±0.21	1.55±0.14	1.69±0.07	1.57±0.15	0.926	0.722	0.742
酪氨酸Tyr	0.63±0.00	0.62±0.06	0.67±0.02	0.61±0.05	0.63±0.06	0.65±0.01	0.63±0.06	0.871	0.478	0.740
苯丙氨酸Phe	0.60±0.01	0.60±0.07	0.64±0.01	0.57±0.05	0.60±0.05	0.63±0.01	0.59±0.07	0.800	0.722	0.420
赖氨酸Lys	1.63±0.02	1.61±0.14	1.68±0.04	1.57±0.11	1.62±0.10	1.68±0.05	1.65±0.08	0.759	0.889	0.347
组氨酸His	0.36±0.01	0.35±0.05	0.37±0.03	0.33±0.04	0.35±0.04	0.37±0.02	0.37±0.03	0.779	0.968	0.718
精氨酸Arg	1.06±0.04	1.03±0.14	1.10±0.02	1.05±0.10	1.03±0.08	1.08±0.04	1.04±0.09	0.680	0.931	0.529
脯氨酸Pro	0.66±0.06	0.63±0.09	0.67±0.04	0.67±0.10	0.62±0.04	0.63±0.03	0.61±0.07	0.847	0.758	0.484
EAA	6.92±0.07	6.85±0.73	7.12±0.16	6.69±0.65	6.80±0.50	7.26±0.21	6.93±0.54	0.876	0.957	0.795
NEAA	10.01±0.34	9.76±1.20	10.37±0.18	9.87±0.82	9.79±0.78	10.15±0.32	9.81±0.80	0.920	0.957	0.786
DAA	6.49±0.23	6.31±0.77	6.70±0.12	6.39±0.52	6.35±0.49	6.56±0.22	6.35±0.48	0.863	0.890	0.703
TAA	16.93±0.40	16.61±1.93	17.49±0.23	16.56±1.41	16.59±1.28	17.40±0.53	16.74±1.34	0.719	0.610	0.135
DAA/TAA	0.38±0.00	0.38±0.00	0.38±0.01	0.39±0.01	0.38±0.00	0.38±0.00	0.38±0.00	0.967	0.530	0.099
EAA/TAA	0.41±0.01 ^a	0.41±0.01 ^{ab}	0.41±0.01 ^a	0.40±0.01 ^a	0.41±0.00 ^{ab}	0.42±0.00 ^b	0.41±0.00 ^{ab}	0.94	0.530	0.095
EAA/NEAA	0.69±0.02	0.70±0.01	0.69±0.02	0.68±0.04	0.69±0.01	0.72±0.01	0.71±0.00	0.962	0.761	0.656

注: EAA为必需氨基酸总量; DAA为鲜味氨基酸总量; NEAA为非必需氨基酸总量; TAA为氨基酸总量

Note: EAA. Total essential amino acids; DAA. Total delicious amino acids; NEAA. Total non-essential amino acids; TAA. Total amino acids

亚麻酸)、C20:4n6 (花生四烯酸)和C20:5n3 (EPA)含量显著增加($P<0.05$), 而C18:1n9c (油酸)含量和SFA (饱和脂肪酸)含量显著降低($P<0.05$); Y3组C15:0 (十五碳酸)含量显著高于其他组($P<0.05$); S2组C20:2 (花生二烯酸)含量显著高于其他组($P<0.05$); S3组C20:3n6 (花生三烯酸)含量显著高于其他组($P<0.05$); S3和Y1组C18:0 (硬脂酸)含量显著高于其他组, 而MUFA (单不饱和脂肪酸)含量显著低于其他组($P<0.05$); Y2组n-3 PUFA含量显著高于对照组($P<0.05$), Y1组n-6 PUFA含量显著高于对照组C0 ($P<0.05$)。各组PUFA (多不饱和脂肪酸)和TFA (总脂肪酸)含量无显著差异($P>0.05$)。硒源及硒水平对杂交鮠肌肉SFA、MUFA、n-3 PUFA含量和n-3 PUFA/n-6 PUFA的影响有交互作用。

3 讨论

3.1 硒源及硒水平对杂交鮠生长性能的影响

硒作为鱼类的必需微量元素, 在其生长和发育过程中具有重要作用^[11]。鱼类对不同硒源的需求

量和耐受能力可能存在差异。在本研究中, 当硒添加量为0.60和1.20 mg/kg水平时, 酵母硒组的SGR和WGR均显著高于亚硒酸钠组, 且FCR显著降低, 表明酵母硒对杂交鮠的促生长效果优于亚硒酸钠。这种差异可能与两者的吸收利用机制相关: 酵母硒中的硒代蛋氨酸可通过氨基酸转运通道被肠道高效吸收, 并整合至鱼类蛋白代谢途径, 直接参与生长相关酶活性调控, 同时增强肝脏谷胱甘肽过氧化物酶GSH-Px活性, 缓解养殖密度导致的氧化损伤, 从而综合改善生长性能^[12, 13]; 而亚硒酸钠依赖被动扩散吸收, 易受肠道pH和拮抗矿物元素干扰, 且高剂量可能引发毒性^[14]。研究发现, 饲料添加有机硒可显著提高异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)的特定生长率^[15]; 史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)的终末体重随酵母硒含量的增加显著上升^[16]; 酵母硒可显著提高斑点叉尾鲟(*Ictalurus punctatus*)^[17]、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[18]的增重率; 硒源及硒水平对杂交鲟(*Acipenser baeri* ♂× *Acipenser schrenckii* ♀)^[10]和黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[6]的生

表 7 硒源及硒水平对杂交鮠“先锋1号”肌肉氨基酸的影响

Tab. 7 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle amino acid of juvenile hybrid F₁ (mg/g N)

项目Item	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	FAO/WHO	鸡蛋蛋白质模式
苏氨酸Thr	247.81	245.66	260.42	251.86	244.34	250.00	245.60	250.00	292.00
缬氨酸Val	283.21	290.33	302.21	288.31	282.92	300.00	297.31	310.00	411.00
异亮氨酸Ile	299.30	306.28	305.43	301.56	299.00	309.38	310.24	250.00	331.00
亮氨酸Leu	505.28	497.70	530.48	510.34	498.33	528.13	507.37	440.00	534.00
赖氨酸Lys	518.15	520.04	540.12	520.28	520.83	525.00	533.22	340.00	441.00
蛋氨酸+胱氨酸Met+Cys	199.54	197.81	196.12	198.83	189.69	200.00	200.36	220.00	386.00
苯丙氨酸+酪氨酸Phe+Try	392.64	392.42	421.17	391.04	395.45	400.00	394.26	380.00	565.00
总量Total	2445.93	2450.23	2555.94	2462.22	2430.56	2512.50	2488.37	2190.00	2960.00

表 8 硒源及硒水平对杂交鮠“先锋1号”肌肉氨基酸评分的影响

Tab. 8 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle amino acid composition of juvenile hybrid F₁

项目Item	C0		S1		S2		S3		Y1		Y2		Y3	
	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分	氨基酸 评分	化学 评分
	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS
苏氨酸Thr	0.99	0.85	0.98	0.84	1.04	0.89	1.01	0.86	0.86	0.98	0.84	1.00	0.86	0.98
缬氨酸Val	0.91**	0.69**	0.94**	0.71	0.97**	0.74**	0.93**	0.70	0.70	0.91**	0.69**	0.97**	0.73	0.96**
异亮氨酸Ile	1.20	0.90	1.23	0.93	1.22	0.92	1.21	0.91	0.91	1.20	0.90	1.24	0.93	1.24
亮氨酸Leu	1.15	0.95	1.13	0.93	1.21	0.99	1.16	0.96	0.96	1.13	0.93	1.20	0.99	1.15
赖氨酸Lys	1.52	1.17	1.53	1.18	1.59	1.22	1.53	1.18	1.18	1.53	1.18	1.54	1.19	1.57
蛋氨酸+胱氨酸Met+Cys	0.91*	0.52*	0.90*	0.51*	0.89*	0.51*	0.90*	0.52*	0.52*	0.86*	0.49*	0.91*	0.52*	0.91*
苯丙氨酸+酪氨酸Phe+Try	1.03	0.69	1.03	0.69**	1.11	0.75	1.03	0.69**	0.69**	1.04	0.70	1.05	0.71**	1.04
必需氨基酸指数EAAI	80.08		80.29		83.32		80.63		79.30		82.14		81.42	

注: *代表第一限制性氨基酸; **代表第二限制性氨基酸

Note: * the first limiting amino acid; ** the second limiting amino acid

长性能无显著影响,这可能与养殖品种、养殖环境及饲料配方有关。在本研究中,以增重率为评价指标,杂交鲮饲料推荐硒源为酵母硒,推荐添加量为0.6 mg/kg。

3.2 硒源及硒水平对杂交鲮肌肉营养成分的影响

在本研究中,硒源及硒水平对杂交鲮肌肉营养成分和硒含量的影响存在显著差异。中水平酵母硒组(0.60 mg/kg)肌肉粗蛋白含量最高,高水平酵母硒组(1.20 mg/kg)肌肉硒含量最高,这说明酵母硒在肌肉的蓄积效率优于亚硒酸钠。研究发现,酵母硒中的硒代蛋氨酸可通过肠道氨基酸转运体LAT1高效吸收,并整合至谷胱甘肽过氧化物酶4 (GPX4)等肌肉硒蛋白中,促进蛋白质合成的同时实现硒沉

积^[12]。高水平亚硒酸钠组(1.20 mg/kg)肌肉粗蛋白含量下降,可能与亚硒酸钠诱导的氧化应激损伤有关,其可通过Fenton反应产生活性氧ROS,破坏肌纤维结构并激活泛素-蛋白酶体系统,引起蛋白降解及细胞膜通透性改变^[19],导致粗蛋白含量降低。

已有研究表明,饲料中添加酵母硒可提高史氏鲮^[16]和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[7]肌肉硒含量,提高吉富罗非鱼(GIFT, *Oreochromis nilotica*)肌肉硒含量和粗蛋白含量及降低粗脂肪含量^[20],而杂交鲮^[10]仅在高水平硒水平下肌肉硒含量显著增加。中水平酵母硒组(0.60 mg/kg)肌肉硒含量达到最高,这表明杂交鲮肌肉硒蓄积与蛋白合成的剂量效应可能存在剂量效应和阈值,其效果还可能因鱼种、

表 9 硒源及硒水平对杂交鲮“先锋1号”肌肉脂肪酸含量的影响(mg/100g)

Tab. 9 Effects of sodium selenite and selenium yeast on muscle fatty acid of juvenile hybrid F₁

脂肪酸	C0	S1	S2	S3	Y1	Y2	Y3	硒源	硒水平	硒源× 硒水平
豆蔻酸C14:0	33.59± 3.67 ^c	27.14± 3.13 ^{ab}	26.73± 0.88 ^{ab}	24.03± 4.03 ^a	26.77± 3.90 ^{ab}	30.48± 2.73 ^{bc}	23.93± 2.17 ^a	0.456	0.058	0.058
十五碳酸C15:0	3.62± 0.08 ^a	4.63± 0.86 ^{ab}	4.68± 0.52 ^{ab}	4.55± 0.26 ^{ab}	4.20± 0.71 ^{ab}	5.49± 0.84 ^{bc}	6.47± 1.51 ^c	0.087	0.132	0.132
棕榈酸C16:0	268.66± 16.42 ^b	284.59± 18.47 ^b	226.99± 15.51 ^a	267.71± 7.20 ^b	271.75± 6.67 ^b	238.8± 8.36 ^a	239.91± 9.10 ^a	0.109	0	0
棕榈油酸C16:1n7	26.77± 1.24 ^a	25.19± 0.68 ^a	42.10± 3.22 ^c	22.40± 2.44 ^a	35.04± 1.06 ^b	51.30± 4.21 ^d	41.42± 2.34 ^c	0	0	0
十七碳酸C17:0	7.47± 0.52	7.57± 0.60	7.33± 0.71	7.12± 0.10	7.52± 0.34	7.21± 0.63	7.73± 0.76	0.591	0.715	0.715
硬脂酸C18:0	89.62± 2.34 ^{ab}	78.74± 9.89 ^a	79.55± 8.80 ^a	124.02± 5.02 ^c	95.80± 10.51 ^b	89.45± 8.68 ^{ab}	81.29± 7.76 ^{ab}	0.221	0.007	0.007
油酸C18:1n9c	386.31± 9.13 ^d	324.71± 12.00 ^{ab}	363.79± 24.89 ^c	301.79± 8.26 ^a	322.93± 15.95 ^{ab}	355.96± 8.18 ^c	345.22± 12.60 ^{bc}	0.132	0.001	0.001
亚油酸C18:2n6c	273.36± 30.26	304.93± 10.36	278.56± 8.30	285.37± 17.08	306.47± 26.14	286.92± 11.26	274.54± 14.41	0.967	0.029	0.029
花生酸C20:0	7.31± 0.47	7.62± 0.80	7.26± 0.78	7.52± 0.55	7.22± 0.56	6.74± 0.48	7.35± 0.85	0.285	0.473	0.473
花生烯酸C20:1	8.30± 2.20 ^{ab}	7.62± 2.69 ^a	14.28± 0.95 ^{cd}	15.73± 4.41 ^d	10.60± 3.06 ^{abc}	14.55± 0.49 ^{cd}	12.84± 0.94 ^{bcd}	0.922	0.005	0.005
α-亚麻酸C18:3n3	26.66± 0.95 ^b	29.41± 2.01 ^{bc}	26.08± 0.93 ^b	28.96± 3.26 ^{bc}	22.10± 1.05 ^a	38.44± 1.39 ^d	31.23± 1.76 ^c	0.018	0	0
花生二烯酸C20:2	14.24± 2.06 ^b	14.77± 1.16 ^b	17.35± 0.81 ^c	13.64± 0.47 ^b	10.20± 0.93 ^a	13.53± 0.35 ^b	14.14± 1.03 ^b	0	0	0
花生三烯酸C20:3n6	8.80± 0.41 ^a	9.73± 0.56 ^a	12.45± 1.47 ^c	16.82± 1.49 ^d	10.64± 0.58 ^{ab}	9.51± 1.00 ^a	11.74± 0.72 ^{bc}	0	0	0
花生四烯酸C20:4n6	26.02± 1.85 ^a	30.71± 2.79 ^b	38.10± 2.06 ^c	38.33± 2.79 ^c	28.52± 1.46 ^{ab}	37.28± 1.73 ^c	46.17± 3.93 ^d	0.212	0	0
EPA C20:5n3	37.06± 0.78 ^{ab}	35.63± 1.13 ^a	51.90± 3.34 ^c	41.53± 2.87 ^b	38.46± 1.02 ^{ab}	59.03± 3.03 ^d	52.54± 3.30 ^c	0	0	0
神经酸C24:1n9	4.63± 0.30 ^{ab}	4.82± 0.30 ^b	4.16± 0.67 ^{ab}	4.39± 0.29 ^{ab}	3.87± 0.25 ^a	4.15± 0.40 ^{ab}	4.21± 0.72 ^{ab}	0.115	0.774	0.774
DHA C22:6n3	136.38± 17.96	131.05± 10.25	129.62± 13.16	137.25± 11.30	129.37± 11.09	129.88± 6.05	135.55± 7.24	0.831	0.471	0.471
SFA饱和脂肪酸	410.26± 13.06 ^{bc}	410.28± 18.60 ^{bc}	352.54± 25.23 ^a	434.96± 3.66 ^c	413.27± 17.59 ^c	378.16± 20.41 ^{ab}	366.7± 16.67 ^a	0.150	0.002	0.002
MUFA单不饱和脂肪酸	426.01± 16.40 ^c	362.34± 8.96 ^a	424.33± 25.59 ^c	344.32± 19.57 ^d	372.44± 28.12 ^{ab}	425.96± 11.56 ^c	403.68± 11.94 ^{bc}	0.022	0	0
n-3 PUFA	200.10± 26.85 ^{ab}	196.09± 7.51 ^a	207.61± 23.76 ^a	207.74± 3.74 ^{ab}	189.93± 3.03 ^a	227.35± 14.60 ^b	219.32± 9.38 ^{ab}	0.182	0.012	0.012
n-6 PUFA	308.18± 27.48 ^a	342.04± 14.10 ^{ab}	329.11± 5.72 ^{ab}	338.85± 17.81 ^{ab}	345.63± 29.75 ^b	333.71± 11.48 ^{ab}	332.45± 13.94 ^{ab}	0.942	0.465	0.465
n-3PUFA/n-6PUFA	0.65± 0.06	0.57± 0.02	0.63± 0.07	0.61± 0.04	0.55± 0.06	0.68± 0.02	0.66± 0.06	0.284	0.013	0.013
PUFA多不饱和脂肪酸	522.52± 57.92	552.90± 26.22	554.06± 24.84	560.24± 19.80	545.76± 28.43	574.59± 26.05	565.91± 4.79	0.571	0.482	0.482
TFA总脂肪酸	1358.8± 50.17	1325.52± 51.50	1330.94± 48.91	1339.51± 14.12	1331.47± 17.46	1378.71± 57.07	1336.29± 2.61	0.370	0.503	0.503

食性及养殖环境的不同而存在差异。在本研究中, 杂交鮰饲料中添加0.60 mg/kg酵母硒, 可实现鱼肉高蛋白和富硒的最佳组合。

3.3 硒源及硒水平对杂交鮰血清生化指标的影响

肝脏作为鱼类代谢的核心器官^[21], 其生理状态与硒暴露水平密切相关。研究发现, 过量硒摄入可能引发肝脏组织病理学损伤^[22]。血清谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)和碱性磷酸酶(ALP)水平的升高是评估肝脏应激损伤的重要标志^[23]。在本研究中, 杂交鮰血清AST、ALP和ALT的水平在酵母硒组均到达最低, 这一发现与泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*)^[24]、鲤(*Cyprinus carpio*)^[25]和鲢^[5]的研究结论一致, 表明酵母硒可降低鱼类血清AST、ALP和ALT的水平, 改善鱼类肝脏健康的功效。此外, 在鲤的研究中发现1.0—2.0 mg/kg纳米硒导致其血清AST和ALP水平增加^[26], 纳米硒可能使鲤肝脏受损, 导致AST和ALP被释放到血液中导致其水平上升。这说明不同鱼类对硒代谢能力的强度与阈值因物种特性、养殖环境和饲料配方而异。

血清总胆固醇(T-CHO)和甘油三酯(TG)作为脂质代谢核心指标, 其水平直接反映机体能量储存状态与脂蛋白代谢效率, TC参与细胞膜构建及类固醇激素合成, TG与短期能量平衡与膳食脂质利用率有关^[27—29]。在本研究中, 酵母硒组杂交鮰血清T-CHO水平显著降低, 这表明酵母硒改善了杂交鮰肝脏脂代谢功能。值得注意的是, 高水平酵母硒组和亚硒酸钠组血清TG水平显著升高, 呈现剂量依赖性特征。这种双相调控现象在大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)研究中同样存在: 3.98 mg/kg酵母硒使血浆T-CHO水平降低而TG水平增加^[30], 提示硒对脂代谢的调控存在“代谢改善-毒性应激”双重机制。其潜在机理可能与高剂量硒诱发内质网应激, 通过固醇调节元件结合蛋白(SREBP)通路促进肝脏脂质沉积有关^[31]。研究结果表明, 酵母硒在维持肝脏健康和调节脂代谢方面具有显著优势。

3.4 硒源及硒水平对杂交鮰肌肉质构指标的影响

研究发现, 饲料中添加有机硒不仅能通过降低脂质过氧化提升肌肉抗氧化能力, 还可显著优化质构特性^[32, 33]。在本研究中, 酵母硒组杂交鮰肌肉硬度和弹性均显著优于同水平的亚硒酸钠组和对照组, 表明酵母硒可有效改善杂交鮰肌肉质构指标, 这可能与有机硒调控肌肉蛋白质代谢密切相关。同时, 高水平酵母硒组(1.20 mg/kg)杂交鮰肌肉黏着性显著升高, 提示硒可能通过改变肌纤维表面疏水性影响肌肉微观结构。类似的研究中发现, 羟基硒蛋氨酸可显著提高金头鲷(*Sparus aurata*)^[34]的肌肉

硬度; 酵母硒可显著提高草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[9]和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[35]的肌肉硬度。肌肉硬度与肌肉胶原蛋白含量、肌纤维密度呈显著正相关^[36], 肌肉硬度提升能增强鱼体在高密度养殖环境中的抗机械损伤能力, 高硬度的鱼肌肉表现出更好的持水性和冻融稳定性^[37], 这有助于延长鱼肉冷链运输周期和降低加工损耗。硬度还反映了鱼肉的蛋白质沉积效率, 这可能是由于硒元素通过调节谷胱甘肽过氧化物酶活性, 有效缓解氧化应激对肌原纤维蛋白的损伤, 进而维持肌肉蛋白网络的完整性^[38]。

3.5 硒源及硒水平对杂交鮰肌肉氨基酸的影响

作为评估蛋白质品质的核心指标, 氨基酸组成中呈味氨基酸(谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸)与必需氨基酸(EAA)的配比直接影响鱼肉风味与营养价值^[39]。在本研究中, 各处理组EAA/TAA均达40%以上, 符合FAO/WHO的优质蛋白质标准^[40]; 中水平酵母硒组(0.6 mg/kg)杂交鮰肌肉EAA/TAA高达42%, 且EAA总量高于对照组和同水平亚硒酸钠组, 其中鲜味氨基酸谷氨酸和天冬氨酸含量及必需氨基酸亮氨酸、缬氨酸和赖氨酸含量均达到最高, 说明饲料中添加酵母硒可显著提升杂交鮰肌肉的鲜味, 提高必需氨基酸含量。研究发现, 饲料中添加3 mg/kg酵母硒可显著提升吉富罗非鱼肌肉谷氨酸含量, 优化罗非鱼肌肉蛋白比例, 提高必需氨基酸利用率^[20]。

必需氨基酸指数(EAAI)是评估蛋白质质量的一个指标, 反映肌肉必需氨基酸组成与FAO/WHO推荐模式的匹配度。在本研究中, 各处理组EAAI均在80%以上, 属于优质蛋白源, 中水平亚硒酸钠组和中水平酵母硒组必需氨基酸总量、EAAI和赖氨酸评分均为最高, 赖氨酸作为人体必需氨基酸之一, 是维持生命活动、促进生长发育和免疫功能的核心营养素^[41], 其在鱼类肌肉中的高含量与均衡分布赋予了鱼肉独特的营养优势。这与王贵英等^[40]对杂交鮰的研究结果类似, 说明杂交鮰具有较高的营养价值, 且在饲料硒添加量为0.60 mg/kg时, 肌肉氨基酸营养品质最佳。

3.6 硒源及硒水平对杂交鮰肌肉脂肪酸的影响

鱼类是人类膳食中n-3脂肪酸的重要来源^[42]。研究发现, 硒酵母可通过提升脂肪酸去饱和酶mRNA表达水平, 调控大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)肝脏组织中多不饱和脂肪酸(PUFA)的生物合成^[29], 其作用机制包括双重路径: 一方面通过抗氧化保护维持PUFA结构稳定, 另一方面激活脂肪酸从头合成通路, 从而改善PUFA的代谢。 α -亚麻

酸是一种n-3系列多不饱和脂肪酸,具有促进生长、增强免疫和降低血脂的作用,且可通过去饱和及碳链延长作用转化为HUFA(长链高不饱和脂肪酸)^[43]。在大西洋白鲈鱼的研究中发现,有机硒可提高其肝脏中亚油酸、 α -亚麻酸及n-3和n-6 PUFA含量^[29]。在本研究中,中水平酵母硒组(0.60 mg/kg)的n-3 PUFA、EPA和 α -亚麻酸含量增加,显著高于对照组和同水平亚硒酸钠组,所有处理组的n-3/n-6比值(0.55—0.68)均高于FAO/WHO组织推荐的>0.2,中水平酵母硒组(0.60 mg/kg)比值最高,其比值越高代表脂肪酸营养价值越高^[44]。这说明杂交鲈具有较高的脂肪酸营养价值,且在饲料酵母硒添加量为0.60 mg/kg时,杂交鲈肌肉脂肪酸营养品质最佳,既保障必需脂肪酸的生物利用率,又满足现代膳食对n-3/n-6平衡比的健康需求。

4 结论

在本试验条件下,以亚硒酸钠为硒源,添加量1.20 mg/kg时(饲料硒含量1.50 mg/kg),杂交鲈“先锋1号”增重率最高;以酵母硒为硒源时,添加量0.60 mg/kg时(饲料硒含量0.98 mg/kg),杂交鲈“先锋1号”增重率最高。综合分析肌肉硒沉积、质构特性及脂肪酸组成,饲料中添加0.60 mg/kg酵母硒可显著提升肌肉粗蛋白含量、必需氨基酸比例及n-3多不饱和脂肪酸水平,同时降低血清谷草转氨酶和总胆固醇水平,表明其兼具促进生长、提高肌肉营养品质和改善健康水平的优势。综合生长性能和肌肉品质分析,推荐杂交鲈饲料中硒源为酵母硒,添加水平为0.6 mg/kg。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ferreira R L U, Sena-Evangelista K C M, de Azevedo E P, et al. Selenium in human health and gut microflora: bioavailability of selenocompounds and relationship with diseases [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021(8): 685317.
- [2] Wadhvani S A, Shedbalkar U U, Singh R, et al. Biogenic selenium nanoparticles: current status and future prospects [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(6): 2555-2566.
- [3] Hardy R W, Oram L L, Möller G. Effects of dietary selenomethionine on cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki* Bouvieri) growth and reproductive performance over a life cycle [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **58**(1): 237-245.
- [4] Liang D Z, Ma H Y, Yang Q H, et al. Effects of selenium sources and selenium levels on growth performance, immune enzyme activities and selenium contents of whole fish and vertebrae for juvenile grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, **31**(6): 2777-2787. [梁达智, 马豪勇, 杨奇慧, 等. 硒源及硒水平对斜带石斑鱼幼鱼生长性能、免疫酶活性和全鱼及脊椎骨硒含量的影响 [J]. 动物营养学报, 2019, **31**(6): 2777-2787.]
- [5] Mushtaq M, Fatima M, Shah S Z H, et al. Effects of sodium selenite, selenium methionine, and selenium yeast on growth performance, carcass composition, blood biochemistry, and antioxidant status of intensively reared *Hypophthalmichthys molitrix* [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(24): 101182.
- [6] Hu J R, Wang G X, Sun Y P, et al. Effects of dietary sodium selenite and selenoyeast on growth performance, antioxidant responses and low temperature stress resistance of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(11): 2394-2404. [胡俊茹, 王国霞, 孙育平, 等. 亚硒酸钠和酵母硒对黄颡鱼幼鱼生长性能、抗氧化能力及抗低温应激的影响 [J]. 水产学报, 2019, **43**(11): 2394-2404.]
- [7] Li H D, Li X Q, Ji H, et al. Yeast selenium added to cottonseed protein concentrate diet on growth performance and flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(9): 1408-1415. [李汉东, 李旭巧, 吉红, 等. 含棉籽浓缩蛋白饲料添加酵母硒对草鱼生长性能和肌肉品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(9): 1408-1415.]
- [8] Yu Y L, Li Q, Zhang L, et al. Quality improvement of short-time micro-flow water treatment on the flesh of juvenile hybrid F1 fish cultured in ponds [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(2): 245-256. [喻亚丽, 李清, 张浪, 等. 短期微流水处理对池塘养殖杂交鲈“先锋1号”肌肉品质的影响 [J]. 渔业科学进展, 2024, **45**(2): 245-256.]
- [9] Wu F, Wen H, Li Q, et al. Dietary protein requirement of juvenile *Erythroculter ilishaeformis* (♀) × *Ancherythroculter nigrocauda* (♂) hybrid F1 [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, **30**(12): 5052-5061. [吴凡, 文华, 李清, 等. 杂交鲈“先锋1号”幼鱼蛋白质需求量的研究 [J]. 动物营养学报, 2018, **30**(12): 5052-5061.]
- [10] Chen Z, Liu C, Liu H K, et al. Dietary sodium selenite, selenium yeast and selenium-enriched Spirulina on growth, antioxidant capacity and tissue selenium contents of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser baerii* ♂ × *Acipenser schrenckii* ♀) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(1): 44-52. [陈政, 刘翠, 刘昊昆, 等. 亚硒酸钠、酵母硒和富硒螺旋藻对杂交鲟幼鱼生长、抗氧化能力及组织硒含量的影响 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(1): 44-52.]
- [11] Wang Y, Han J, Li W, et al. Effect of different selenium source on growth performances, glutathione peroxidase activities, muscle composition and selenium concentration of allogynogenetic crucian carp (*Carassius auratus*

- Gibelio) [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, **134**(3/4): 243-251.
- [12] Schrauzer G N. The nutritional significance, metabolism and toxicology of selenomethionine [J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2003(47): 73-112.
- [13] Kimball S R, Jefferson L S. Signaling pathways and molecular mechanisms through which branched-chain amino acids mediate translational control of protein synthesis 1-3 [J]. *The Journal of Nutrition*, 2006, **136**(1): 227S-231S.
- [14] Rayman M P. Selenium and human health [J]. *The Lancet*, 2012, **379**(9822): 1256-1268.
- [15] Li Y Z, Liu H K, Gong Y L, *et al.* High dietary doses of organic and inorganic selenium on growth performance, tissue selenium accumulation and blood biochemical parameters of gibel carp (*Carassius auratus gibelio* var. CAS V) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(5): 702-712. [李圆泽, 刘昊昆, 巩玉龙, 等. 饲料中添加高剂量有机硒和无机硒对异育银鲫生长性能、组织硒蓄积和血液生化指标的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(5): 702-712.]
- [16] Wu L, Zhang X Z, Wang L, *et al.* Effects of dietary levels of yeast selenium on growth performance, muscle quality and antioxidant capacity of juvenile sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. *Freshwater Fisheries*, 2023, **53**(1): 3-11. [吴雷, 张学振, 王力, 等. 饲料中添加酵母硒对史氏鲟幼鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化能力的影响 [J]. 淡水渔业, 2023, **53**(1): 3-11.]
- [17] Zheng Z L, Huang C/Z F, Wang D H. Comparative feeding experiment upon the effects of different selenium sources on the growing performance of channel catfish [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2002(3): 30-32. [郑宗林, 黄朝芳, 汪道好. 不同硒源对叉尾鲟生长性能影响的对比试验 [J]. 粮食与饲料工业, 2002(3): 30-32.]
- [18] Long M, Hou J, Su Y J, *et al.* Effects of selenium yeast and tea polyphenols on growth and related gene transcription in the hypothalamus-pituitary-growth axis, muscle composition and disease resistance of juvenile Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, **39**(1): 97-107. [龙萌, 侯杰, 苏玉晶, 等. 酵母硒和茶多酚对团头鲂幼鱼生长和生长轴基因表达、营养品质及抗病力的影响 [J]. 水产学报, 2015, **39**(1): 97-107.]
- [19] Lin Y H, Shiau S Y. Dietary selenium requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. *Aquaculture*, 2005, **250**(1/2): 356-363.
- [20] Li L Q, Luo Y J, Xiao J, *et al.* Effects of artificial addition of yeast selenium on protein, fat and amino acids in muscle of GITF Tilapia [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, **51**(11): 2856-2864. [李柳清, 罗永巨, 肖俊, 等. 人工添加酵母硒对吉富罗非鱼肌肉蛋白、脂肪及氨基酸的影响 [J]. 南方农业学报, 2020, **51**(11): 2856-2864.]
- [21] Abdel-Tawwab M, Mousa M A A, Abbass F E. Growth performance and physiological response of African catfish, *Clarias gariepinus* (B.) fed organic selenium prior to the exposure to environmental copper toxicity [J]. *Aquaculture*, 2007, **272**(1/2/3/4): 335-345.
- [22] Sorensen E M B, Cumbie P M, Bauer T L, *et al.* Histopathological, hematological, condition-factor, and organ weight changes associated with selenium accumulation in fish from Belews Lake, North Carolina [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1984, **13**(2): 153-162.
- [23] Abdel-Daim M M, Dawood M A O, Elbadawy M, *et al.* Spirulina platensis reduced oxidative damage induced by chlorpyrifos toxicity in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Animals*, 2020, **10**(3): 473.
- [24] Hao X, Ling Q, Hong F. Effects of dietary selenium on the pathological changes and oxidative stress in loach (*Paramisgurnus dabryanus*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2014, **40**(5): 1313-1323.
- [25] Saffari S, Keyvanshokoo S, Zakeri M, *et al.* Effects of different dietary selenium sources (sodium selenite, selenomethionine and nanoselenium) on growth performance, muscle composition, blood enzymes and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(3): 611-617.
- [26] Ashouri S, Keyvanshokoo S, Salati A P, *et al.* Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composition, blood biochemical profiles and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Aquaculture*, 2015(446): 25-29.
- [27] Daniels L A. Selenium metabolism and bioavailability [J]. *Biological Trace Element Research*, 1996, **54**(3): 185-199.
- [28] Zhang X, Liang M Q, Wei Y L, *et al.* Effects of dietary protein content and stocking density on growth performance, nitrogen excretion, and relevant biochemical parameters of juvenile *Takifugu rubripes* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, **42**(1): 74-83. [张晓, 梁萌青, 卫育良, 等. 饲料中蛋白质含量及养殖密度对红鳍东方鲀幼鱼生长性能、氮排泄及相关生化指标的影响 [J]. 渔业科学进展, 2021, **42**(1): 74-83.]
- [29] Silva-Brito F, Magnoni L J, Fonseca S B, *et al.* Dietary oil source and selenium supplementation modulate Fads2 and Elovl5 transcriptional levels in liver and brain of meagre (*Argyrosomus regius*) [J]. *Lipids*, 2016, **51**(6): 729-741.
- [30] Khalil H S, Mansour A T, Goda A M A, *et al.* Effect of selenium yeast supplementation on growth performance, feed utilization, lipid profile, liver and intestine histological changes, and economic benefit in meagre, *Argyrosomus regius*, fingerlings [J]. *Aquaculture*, 2019(501): 135-143.
- [31] 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.
- [32] Calvo L, Segura J, Toldrá F, *et al.* Meat quality, free fatty acid concentration, and oxidative stability of pork from animals fed diets containing different sources of selenium [J]. *Food Science and Technology International*, 2017, **23**(8): 716-728.
- [33] Huang Q, Wang S, Yang X, *et al.* Effects of organic and inorganic selenium on selenium bioavailability, growth performance, antioxidant status and meat quality of a local beef cattle in China [J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023(10): 1171751.
- [34] Filipa-Silva A, Monteiro M, Costa R S, *et al.* Comparative study of dietary selenium sources on gilthead seabream (*Sparus aurata*): Growth, nutrient utilization, stress response and final product quality [J]. *Aquaculture*, 2025, **595**(1): 741508.
- [35] Wang L, Wu L, Liu Q, *et al.* Improvement of flesh quality in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed supranutritional dietary selenium yeast is associated with the inhibited muscle protein degradation [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(4): 1351-1360.
- [36] Johnston I A, Li X J, Vieira V L A, *et al.* Muscle and flesh quality traits in wild and farmed Atlantic salmon [J]. *Aquaculture Amsterdam*, 2006, **256**(1): 323-336.
- [37] Cheng H H, Xie C X, Li D P, *et al.* Muscular nutritional components and meat quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) cultured under the model of cultivating fish with grass [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, **40**(7): 1050-1059. [程辉辉, 谢从新, 李大鹏, 等. 种青养鱼模式下的草鱼肌肉营养成分和品质特性 [J]. 水产学报, 2016, **40**(7): 1050-1059.]
- [38] Hu J R, Wang G X, Sun Y P, *et al.* Effects of dietary selenium content on growth performance, antioxidant capacity and lipid metabolism gene expression of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(12): 3925-3934. [胡俊茹, 王国霞, 孙育平, 等. 饲料硒含量对黄颡鱼幼鱼生长性能、抗氧化能力和脂肪代谢基因表达的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(12): 3925-3934.]
- [39] Xu G F, Wang Y Y, Bai Q L, *et al.* Analysis of nutrient components and evaluation of nutritive quality in muscle of *Lota lota* (Linnaeus) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, **25**(12): 3027-3032. [徐革锋, 王裕玉, 白庆利, 等. 江鳕肌肉营养成分分析与品质评价 [J]. 动物营养学报, 2013, **25**(12): 3027-3032.]
- [40] Wang X S. Effects of essential amino acids on human health [J]. *Food and Nutrition in China*, 2005, **11**(7): 48-49. [王小生. 必需氨基酸对人体健康的影响 [J]. 中国食物与营养, 2005, **11**(7): 48-49.]
- [41] Wang G Y, Yu Y L, He L, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional composition for the juvenile hybrid F₁ [J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, **51**(2): 72-80. [王贵英, 喻亚丽, 何力, 等. 杂交鲈“先锋1号”肌肉营养成分分析及品质评价 [J]. 淡水渔业, 2021, **51**(2): 72-80.]
- [42] Liu Y, Jiao J G, Gao S, *et al.* Dietary oils modify lipid molecules and nutritional value of fillet in Nile tilapia: A deep lipidomics analysis [J]. *Food Chemistry*, 2019(277): 515-523.
- [43] Wang C Q, Xu H G, Liang M Q, *et al.* Effects of dietary α -linolenic acid content on growth performance, antioxidant indices and serum biochemical indices of large size Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(10): 3123-3133. [王成强, 徐后国, 梁萌青, 等. 饲料亚麻酸含量对大规格鲈鱼生长性能、抗氧化指标和血清生化指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(10): 3123-3133.]
- [44] Wang H, Shi W Z, Wu X G, *et al.* Comparison of flavor quality in gonads and meat of female *Portunus trituberculatus* cultured at different water temperatures [J]. *Feed Science*, 2016, **37**(18): 84-90. [王慧, 施文正, 吴旭干, 等. 不同温度养殖的雌体三疣梭子蟹性腺和蟹肉风味品质比较 [J]. 食品科学, 2016, **37**(18): 84-90.]

SELENIUM SOURCES AND SELENIUM LEVELS ON GROWTH PERFORMANCE AND MUSCLE QUALITY OF JUVENILE HYBRID CULTER “XIANFENG No. 1”

DONG Li-Xue¹, JIANG Ming¹, PENG Di¹, CHENG Ke¹, WEN Hua¹, WANG Gui-Ying^{2,3}, LI Qing^{2,3},
QIN Qiu-Ying¹ and ZHANG Lang¹

(1. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. Fisheries Research Institute, Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430207, China; 3. Wuhan Xianfeng Aquaculture Technology Co., Ltd., Wuhan 430207, China)

Abstract: To investigate the effects of sodium selenite and selenium yeast supplementation on growth performance and muscle quality of juvenile hybrid culter “Xianfeng No. 1” (*Erythroculter ilishaeformis* × *Ancherythroculter nigrocauda*), a basal diet (C0) was supplemented with 0.3, 0.6, and 1.2 mg/kg selenium from sodium selenite (groups S1, S2, S3) or selenium yeast (groups Y1, Y2, Y3). A total of 420 juvenile hybrid F₁ [initial body weight: (59.62±0.53) g] were randomly allocated into seven groups (three replicates per group) and fed experimental diets for 8 weeks. The results showed that the sodium selenite group S3 (1.2 mg/kg) and selenium yeast group Y2 (0.6 mg/kg) achieved the highest weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR). Y2 exhibited significantly higher final body weight, WGR, and SGR compared to the control (C0) and S2 groups ($P<0.05$). Selenium yeast significantly enhanced muscle selenium deposition ($P<0.05$), with Y2 showing the highest crude protein content (20.00%). Neither selenium source affected crude fat content ($P>0.05$). Muscle elasticity, cohesiveness, and resilience increased with selenium levels ($P<0.05$). Selenium yeast groups demonstrated superior hardness, adhesiveness, and gumminess ($P<0.05$), while Y2 and Y3 exhibited higher chewiness than sodium selenite groups ($P<0.05$). Serum aspartate aminotransferase (AST) in S3 and Y2, and alkaline phosphatase (ALP) in Y2 were significantly lower than that in C0 ($P<0.05$). Total cholesterol (T-CHO) decreased in S3, Y1, Y2, and Y3 compared to C0 ($P<0.05$). No significant differences in muscle amino acids were observed between selenium sources, though Y2 showed a higher EAA/TAA than C0, S2, and Y3 ($P<0.05$). Y2 exhibited significantly elevated n-3 PUFA content ($P<0.05$), while Y1 exhibited higher n-6 PUFA levels ($P<0.05$). In conclusion, under the experimental conditions of this study, with growth performance and muscle quality as evaluation criteria, it is recommended to add 0.6 mg/kg selenium yeast to the feed of hybrid F₁ feed.

Key words: Selenium; Growth performance; Muscle quality; *Erythroculter ilishaeformis* × *Ancherythroculter nigrocauda*