

doi: 10.7541/2022.2022.0361

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

李汉东 李旭巧 吉红 孙健 胡泽超 刘莎

(西北农林科技大学动物科技学院, 水产动物营养与饲料科学实验室, 杨凌 712100)

摘要: 研究旨在探讨含棉籽浓缩蛋白(Cottonseed protein concentrate)饲料添加酵母硒(Yeast selenium, YS)对草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)生长性能和肌肉品质的影响。设计了4种等氮等脂实验饲料, 分别是在含棉籽浓缩蛋白饲料中添加0 (YS0)、0.3 (YS3)、0.6 (YS6)和0.9 mg/kg (YS9)酵母硒; 实验选取初始体重为(309.74±0.36) g的草鱼240尾, 随机分成4组, 分别投喂4种实验饲料, 在池塘网箱中开展为期54d的养殖实验。结果显示: (1)在生长性能方面, 与YS0组相比, YS3和YS6组草鱼在生长性能上无显著性差异($P>0.05$), YS9组草鱼的终末体重、增重率和特定生长率显著降低($P<0.05$)。 (2)在肌肉品质方面, YS3组草鱼肌肉的粗蛋白含量、硒含量、羟脯氨酸含量和硬度显著高于YS0组($P<0.05$), 肌肉纤维直径显著低于YS0组($P<0.05$)。研究表明, 在含棉籽浓缩蛋白的饲料中添加适量酵母硒(饲料硒含量为0.6 mg/kg), 对草鱼的生长性能无影响, 且可通过提高草鱼肌肉粗蛋白、硒、羟脯氨酸含量和硬度来提升草鱼肌肉品质, 但过量添加酵母硒会降低草鱼的生长性能。

关键词: 棉籽浓缩蛋白; 酵母硒; 生长; 肌肉品质; 草鱼

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)09-1408-08



草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是世界上产量最高的有鳍鱼类^[1], 2021年我国草鱼产量高达576万吨, 占淡水渔业总量的18.08%^[2]。前期研究发现, 棉籽浓缩蛋白(Cottonseed protein concentrate)完全替代草鱼日粮豆粕对其肌肉品质有一定的提升作用, 但对其生长性能却没有改善^[3]。本研究基于硒在改善水产动物植物蛋白饲料上具有良好的应用效果, 从探究出具有更好效果的含棉籽浓缩蛋白的饲料配方的角度出发, 拟通过在含棉籽浓缩蛋白的饲料中添加酵母硒, 以期在棉籽浓缩蛋白在草鱼配合饲料中的应用提供技术支撑。

棉籽浓缩蛋白是经过液选法、酶解醇洗法、生物发酵法“液-液-固”三相萃取法等生物、物理和化学方法将棉籽粕进一步去掉各种抗营养因子而获得蛋白含量更高、抗营养因子含量更低的一种新型蛋白源^[4]。研究发现, 尽管棉籽粕被进一步加工, 但棉籽浓缩蛋白依然含有各种抗营养因子(棉酚、环丙脂肪酸、植酸、单宁等)。因此, 饲料中棉籽浓缩蛋白所含的各种抗营养因子可能会对

养殖动物产生负面影响。棉籽浓缩蛋白所含的棉酚、植酸及单宁主要通过结合蛋白质、糖类及各种金属离子, 以形成不易于被机体消化吸收的复合物, 最终降低摄食率和对营养元素的利用^[4]。面对这种现象, 往往可以通过在饲料中添加各种营养素来消除这种不利影响。

硒作为必需微量营养素, 在水产动物的健康生长过程中发挥着至关重要作用^[5-8]。研究表明硒缺乏会导致机体氧化还原失衡, 脂质代谢重编程增加^[9]。饲料添加适量硒可促进水生动物的健康生长, 增强抗应激能力、抗氧化能力和免疫能力, 改善肌肉品质^[10]。与无机硒相比, 有机硒具有吸收快、利用率高和污染少等优点, 并可通过其独特的代谢途径, 在肌肉组织中以有机硒的形式沉积, 从而提升鱼类的生长性能、抗氧化能力和肌肉品质^[10]。酵母硒(Yeast selenium, YS)主要由一种在富含蔗糖蜜和亚硒酸钠的培养基中培养的酵母微生物发酵培育得到的。在培养过程中, 无机硒中的硒取代部分含硫氨基酸中的硫, 经过生化反应后以有机硒的形式存

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-11-11

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900200)资助 [Supported by the Blue Granary Major Special Foundation for Scientific and Technological Innovation (2019YFD0900200)]

作者简介: 李汉东(1991—), 男, 博士; 主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: 635725034@qq.com

通信作者: 吉红(1967—), 男, 教授; E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

在于酵母细胞中。通过洗涤和冲刷培养得到的酵母,可最大限度地去除未利用的无机硒,再通过干燥和灭活后生产的富硒有机酵母产品可应用于食品或饲料中^[10]。

肌肉品质是一个复杂的概念,其包括肌肉营养成分和质构特性^[11]。肌肉营养成分主要有粗脂肪、粗蛋白、氨基酸和矿物元素等^[11]。质构特性包括硬度、咀嚼性、黏附性、胶黏性、弹性、回复性和内聚性^[11]。除此之外,系水力、pH和嫩度也是评价养殖动物肌肉品质的重要指标^[11]。

在草鱼^[7]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[12]、钝吻鲷(*Megalobrama amblycephala*)^[13]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[14]和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[15]等水产动物上的研究表明酵母硒作为一种功能性添加剂具有良好的应用效果。除此之外,有研究表明饲料中的硒酵母并未增加利用棉籽浓缩蛋白替代条纹锯鲷饲料鱼粉的水平,但能提高条纹锯鲷养殖成活率和养殖效益^[16]。那么在含棉籽浓缩蛋白饲料添加酵母硒是否可以降低棉籽浓缩蛋白中抗营养因子对草鱼产生的负面影响,从而提升草鱼的生长性能和肌肉品质?因此,本实验旨在探讨饲料中棉籽浓缩蛋白和酵母硒组合使用对草鱼生长性能和肌肉品质的影响,为棉籽浓缩蛋白在草鱼饲料中的应用提供一定的基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以豆油作为主要的脂肪源,棉籽浓缩蛋白、菜粕和棉粕等作为主要的蛋白源,配制了4种蛋白和脂肪分别为29%和5%的等氮等脂实验饲料,其中YS0组是含棉籽浓缩蛋白的基础饲料,YS3、YS6和YS9组分别是在基础饲料中添加0.3、0.6和0.9 mg/kg 酵母硒(表 1)。酵母硒由湖北安琪酵母股份有限公司(湖北宜昌)提供。所有原料经粉碎后过60目筛,然后按照饲料配方精确称量各种饲料原料,充分混匀后用制粒机制成直径为4 mm的饲料颗粒,60℃烘干至水分为10%左右,随后置于4℃冰箱中保存。

1.2 实验鱼及饲养管理

实验草鱼由西北农林科技大学安康水产试验示范站提供。所有实验鱼先在安康水产试验示范站池塘网箱(1.5 m×1.5 m×1.8 m)中暂养2周,以适应养殖环境。实验开始前,选取健康、规格均一的草鱼240尾[初重: (309.74±0.36) g],随机分到12个网箱,每个网箱20尾鱼,每种饲料随机投喂3个网箱。每天9:00、13:00和17:00进行投喂,投饵量为体重的2%,实验周期为54d。每个网箱底部均放置直径

表 1 实验饲料配方及近似组成

Tab. 1 Formulation and approximate chemical composition of the experimental diets

项目Item	饲料Diet			
	YS0	YS3	YS6	YS9
原料Ingredient (g/kg, dry matter basis)				
棉籽浓缩蛋白Cottonseed protein concentrate	176.33	176.33	176.33	176.34
菜粕Rapeseed meal	163.58	163.58	163.58	163.58
棉粕Cottonseed meal	117.82	117.82	117.82	117.82
面粉Flour	208.88	208.88	208.88	208.88
玉米酒糟Distillers dried grains with soluble	50.63	50.63	50.63	50.63
米糠Rice bran	101.85	101.85	101.85	101.85
豆油Soybean oil	37.98	37.98	37.98	37.98
膨润土Bentonite	18.09	18.09	18.09	18.09
氯化胆碱Choline chloride	4.52	4.52	4.52	4.52
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	18.09	18.09	18.09	18.09
预混料 Premix ¹	9.04	9.04	9.04	9.04
稻壳粉Rice husk powder	92.29	92.20	92.10	92.00
酵母硒Yeast selenium	0.00	0.09	0.18	0.27
抗氧化剂Antioxidant	0.90	0.90	0.90	0.90
近似组成Approximate chemical composition				
粗蛋白Crude protein (g/kg)	288.13	281.84	285.11	282.26
粗脂肪Crude lipid (g/kg)	53.38	53.51	54.25	53.59
粗灰分Ash (g/kg)	94.35	93.90	95.39	95.28
水分Moisture (g/kg)	96.71	92.12	90.32	82.13
硒Selenium (mg/kg)	0.41	0.60	0.89	1.20

注: ¹预混料: 中国北京市北京英惠尔生物技术有限公司
Note: ¹Premix: Beijing Enhelor International Tech Co., Ltd., Beijing, China

为1 m的料台,用于观察实验鱼的摄食情况。实验期间,水温为19—28.6℃,溶解氧为8—11 mg/L,氨氮低于0.5 mg/L,亚硝酸盐低于0.05 mg/L, pH为7.8—8.2。

1.3 实验取样

养殖实验结束后,所有实验鱼饥饿24h后,用MS-222麻醉剂(浓度为50 mg/L)将实验鱼麻醉,然后计数、称重并测量鱼体体长。从每个网箱随机选取6尾鱼进行解剖,并称量其内脏重、肝脏重、肠重、脾脏重及肾脏重,接着用锋利的解剖刀取出鱼体左、右两侧的背肌;将左侧肌肉用解剖刀分为3部分,靠近头部的部分用于测定其pH和质构特性,中间部分被切成0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm的肌肉块用于肌肉组织学观察,靠近尾部的背肌立即保存于-80℃冰箱中,用于硒、羟脯氨酸、水/盐溶性蛋白、三甲胺和氧化三甲胺含量测定。右侧靠近头部的背肌用于测定其滴水损失,靠近尾部的背肌,立即保存在-20℃冰箱中,用于常规营养

成分测定。

1.4 指标检测

营养成分的测定 实验饲料与肌肉营养组成的测定方法如下:水分含量采用105℃烘干法测定,粗蛋白含量通过凯氏定氮法测定,粗脂肪含量通过索氏抽提法测定,粗灰分含量使用马弗炉(TMF-3100,日本东京EYELA公司)在550℃高温灼烧测定。饲料硒含量参照NYT 1945-2010测定,肌肉硒含量参照GB 5009.93-2017测定。

肌肉组织学样品制备及观察 首先将肌肉组织块立即固定于4%福尔马林溶液中。固定好的样品经梯度乙醇脱水,随后移入二甲苯溶液中,浸蜡包埋后切片(厚度5 μm),以苏木精-伊红染色法(Hematoxylin-eosin staining, HE染色)染色,并用倒置显微镜(OPTEC, China)拍照。

肌肉物理特性的测定 滴水损失的测定参考文献[17]的方法,准确称取10.00 g (W_0)草鱼肌肉样品,用细线悬挂在塑料罐中,在4℃冰箱中存放24h后,用滤纸擦干肌肉块表面水分并称重(W_1),计算 $100 \times (W_0 - W_1) / W_0$ 的值即为滴水损失;pH采用pH计(pH828+,东莞万创电子制品有限公司)进行测定。

羟脯氨酸含量的测定 羟脯氨酸含量采用南京建成生物工程研究所的羟脯氨酸试剂盒测定。

水/盐溶性蛋白含量的测定 水/盐溶性蛋白的提取参考文献[18]的方法,水/盐溶性蛋白含量测定使用南京建成生物工程研究所的考马斯亮蓝法蛋白定量试剂盒。

三甲胺与氧化三甲胺含量的测定 三甲胺和氧化三甲胺含量利用多功能酶标仪(SynergyH1,美国BioTek公司)测定,步骤参照马睿^[19]的方法,其中还原剂使用三氯化钛。

肌肉质构特性的测定 肌肉质构特性采用食品物性分析仪(TMS-pilot, FTC, USA)中Texture Profile Analysis模式测定(探头型号p/5),其中质构特性指标包括硬度、弹性、黏附性、内聚性、咀嚼性、胶黏性和剪切力。将肌肉块修剪成1 cm×1 cm×1 cm的方块,每尾鱼取2个方块进行测定,并取其平均值。测试参数:测试前中后探头速度分别为3、1和1 mm/s,样品压缩距离为50%,两次压缩时间间隔为5s。

1.5 数据处理

采用以下公式计算生长性能和形体指标:

增重率(Weight gain rate, WGR, %)= $100 \times (\text{终末均重} - \text{初始均重}) / \text{初始均重}$

特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d)= $100 \times (\ln \text{终末均重} - \ln \text{初始均重}) / \text{养殖天数}$

饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)= $\text{摄食饲料干重} / (\text{终末均重} - \text{初始均重})$

存活率(Survival rate, SR, %)= $100 \times \text{最终鱼数} / \text{初始鱼数}$

蛋白质效率(Protein efficiency ratio, PER)= $100 \times (\text{终末均重} - \text{初始均重}) / \text{蛋白质摄入量}$

脏体指数(Viscerosomatic index, VSI)= $100 \times \text{内脏重} / \text{终末体重}$

肥满度(Condition factor, CF, g/cm³)= $100 \times \text{体重} / \text{体长}^3$

肝体指数(Hepatosomatic index, HSI)= $100 \times \text{肝脏重} / \text{终末体重}$

肠体指数(Intestine somatic index, ISI)= $100 \times \text{肠重} / \text{终末体重}$

脾体指数(Spleen somatic index, SSI)= $100 \times \text{脾脏重} / \text{终末体重}$

肾体指数(Kidney somatic index, KSI)= $100 \times \text{肾脏重} / \text{终末体重}$

使用ImageJ图像软件对肌细胞面积进行测量。所有实验数据用SPSS 19.0 for windows(SPSS, IL, USA)经正态检验(Shapiro-Wilk normality test)及方差齐性检验(Levene homogeneity of variance test)后,进行单因素方差分析(One-way ANOVA), $P < 0.05$ 表示差异显著,差异显著时对各处理组均值进行Duncan's多重比较(Duncan's multiply range tests)。数据均用平均值±标准误($n=3$)表示。

2 结果

2.1 饲料中酵母硒对草鱼生长性能和形体指标的影响

如表2所示,所有实验组草鱼的存活率均为100%,所有实验组草鱼的饲料系数和蛋白质效率均无显著差异($P > 0.05$)。然而,YS9组草鱼的终末体重、增重率和特定生长率显著低于YS0组($P < 0.05$);各组间草鱼的肥满度、脏体指数、脾体指数和肾体指数无显著差异($P > 0.05$)。与YS0组相比,YS3和YS6组草鱼的肝体指数显著降低($P < 0.05$),YS3组的肠体指数显著降低($P < 0.05$)。

2.2 饲料中酵母硒对草鱼肌肉组织形态学的影响

如图1所示,各组间肌纤维形态正常,排列致密,肌纤维由内膜分离,未见组织病变。

所有组草鱼的肌肉纤维直径的结果如表3所示。酵母硒添加组的肌肉纤维直径显著低于YS0组($P < 0.05$),且YS3组最小。

2.3 饲料中酵母硒对草鱼肌肉常规营养成分的影响

如表4所示,YS3组肌肉粗蛋白含量显著高于

YS0组($P<0.05$)。肌肉硒含量随着饲料酵母硒含量的增加呈上升趋势($P<0.05$)。草鱼肌肉的水分、粗脂肪和灰分含量在各组间无显著差异($P>0.05$)。

2.4 饲料中酵母硒对草鱼肌肉理化特性的影响

草鱼肌肉理化特性的结果见表5。YS9组肌肉pH显著高于YS3组($P<0.05$)。酵母硒添加组的羟脯氨酸含量显著高于YS0组($P<0.05$)。

表2 饲料中酵母硒对草鱼生长性能和形体指标的影响

Tab. 2 Effects of dietary YS on growth performance and physical indicators of grass carp

项目Item	YS0	YS3	YS6	YS9	P值
初始体重IBM (g)	310.93±0.36	309.90±0.81	309.63±0.69	308.48±0.33	0.099
终末体重FBW (g)	495.16±2.75 ^a	493.41±6.69 ^a	490.00±2.50 ^a	477.50±0.00 ^b	0.043
增重率WGR (%)	0.60±0.00 ^a	0.58±0.02 ^{ab}	0.58±0.00 ^{ab}	0.55±0.00 ^b	0.074
特定生长率SGR (%/d)	0.87±0.01 ^a	0.85±0.03 ^{ab}	0.85±0.01 ^{ab}	0.81±0.00 ^b	0.073
饲料系数FCR	2.23±0.06	2.23±0.18	2.36±0.02	2.29±0.22	0.900
蛋白质效率PER	1.49±0.04	1.48±0.12	1.35±0.01	1.44±0.15	0.765
脏器指数VSI	9.31±0.40	9.99±0.14	9.53±0.05	10.08±0.36	0.242
肥满度CF (g/cm ³)	2.03±0.03	2.10±0.01	2.09±0.02	2.08±0.03	0.215
肝体指数HSI	3.43±0.05 ^a	3.13±0.09 ^b	3.18±0.05 ^b	3.31±0.01 ^{ab}	0.024
肠体指数ISI	3.41±0.04 ^a	3.03±0.08 ^b	3.09±0.18 ^{ab}	3.22±0.08 ^{ab}	0.135
脾体指数SSI	0.18±0.02	0.17±0.01	0.18±0.01	0.19±0.00	0.495
肾体指数KSI	0.51±0.00	0.48±0.04	0.49±0.03	0.50±0.02	0.861

注: 表中数据表示为平均值±标准误。同行数值上标不同表示差异显著($P<0.05$); 下同

Note: Data are shown as mean±SE. Different superscripts of peer values indicate significant differences ($P<0.05$). The same applies below

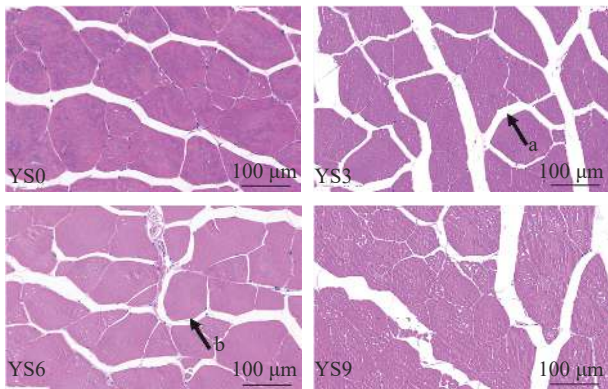


图1 饲料中酵母硒对草鱼肌肉组织的影响

Fig. 1 Effects of dietary YS on the histology of grass carp muscle
a. 肌纤维由内膜分离; b. 肌纤维形态为不规则多边形。比例尺=100 μm

a. The muscle fibers are separated from the intima; b. The shape of the muscle fibers is irregular polygon. Scale bar=100 μm

2.5 饲料中酵母硒对草鱼肌肉质构特性的影响

如表6所示, 酵母硒添加组的肌肉硬度显著高于YS0组($P<0.05$)。YS3组的肌肉内聚性显著低于其他组($P<0.05$)。各组间的肌肉弹性、胶黏性和咀嚼性无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 含棉籽浓缩蛋白饲料添加酵母硒对草鱼生长性能的影响

郑霖^[20]用添加酵母硒的饲料饲喂草鱼发现, 基于增重率、功能器官免疫参数和结构完整性及肌肉中风味氨基酸和多不饱和脂肪酸的含量, 草鱼的饲料硒需求量为0.502—0.633 mg/kg。苏传福等^[21]用添加亚硒酸钠的饲料饲喂草鱼发现, 基于增重率、特定生长率和饲料效率等指标, 草鱼幼鱼的硒需求量为0.614—0.631 mg/kg。本研究发现, 在含

表3 饲料中酵母硒对草鱼肌肉纤维直径的影响

Tab. 3 Effects of dietary YS on muscle fiber diameter of grass carp

项目Item	YS0	YS3	YS6	YS9	P值
纤维直径	93.84±8.42 ^a	62.94±1.46 ^b	64.64±1.18 ^b	68.35±1.84 ^b	0.004
Fiber diameter (μm)					

表4 饲料中酵母硒对草鱼肌肉常规营养成分(湿重)的影响

Tab. 4 Effects of dietary YS on muscle basic nutritional composition (wet weight) of grass carp

项目Item	YS0	YS3	YS6	YS9	P值
水分Moisture (%)	78.06±0.08	77.60±0.35	77.76±0.23	77.96±0.32	0.634
粗蛋白Crude protein (%)	18.69±0.26 ^{bc}	20.32±0.36 ^a	19.53±0.16 ^{ab}	18.42±0.37 ^c	0.008
粗脂肪Crude lipid (%)	1.24±0.12	1.26±0.21	1.25±0.14	1.28±0.23	0.998
灰分Ash (%)	1.35±0.05	1.32±0.05	1.34±0.08	1.29±0.02	0.866
硒Selenium (mg/kg)	0.19±0.00 ^d	0.29±0.00 ^c	0.40±0.01 ^b	0.58±0.03 ^a	0

表5 饲料中酵母硒对草鱼肌肉理化特性的影响

Tab. 5 Effects of dietary YS on muscle physicochemical properties of grass carp

项目Item	YS0	YS3	YS6	YS9	P值
滴水损失	2.88±0.37	3.01±0.16	2.56±0.22	2.91±0.16	0.608
Drip loss (%)					
羟脯氨酸	0.29±0.03 ^b	0.55±0.06 ^a	0.48±0.04 ^a	0.53±0.08 ^a	0.046
Hydroxyproline (μg/mg)					
水溶性蛋白	0.55±0.03	0.56±0.01	0.54±0.01	0.55±0.01	0.916
Water soluble protein (%)					
盐溶性蛋白	0.71±0.05	0.60±0.01	0.57±0.08	0.71±0.09	0.390
Salt soluble protein (%)					
三甲胺	10.47±1.03	11.08±0.16	11.49±0.51	11.74±1.12	0.711
Trimethylamine (μg/g)					
氧化三甲胺	27.46±1.56	35.49±3.67	30.05±3.69	29.77±2.43	0.338
Trimethylamine oxide (μg/g)					
pH	6.54±0.01 ^{ab}	6.49±0.03 ^b	6.56±0.01 ^{ab}	6.56±0.02 ^a	0.149

表 6 饲料中酵母硒对草鱼肌肉质地特性的影响

Tab. 6 Effects of dietary YS on muscle texture properties of grass carp

项目Item	YS0	YS3	YS6	YS9	P值
硬度 Hardness (N)	15.51±0.76 ^b	18.86±0.56 ^a	17.65±0.61 ^a	17.97±0.60 ^a	0.031
黏附性 Adhesiveness (N·mm)	0.09±0.00 ^{ab}	0.13±0.02 ^{ab}	0.13±0.01 ^a	0.09±0.00 ^b	0.105
内聚性 Cohesiveness (Ratio)	0.16±0.00 ^a	0.13±0.01 ^b	0.15±0.00 ^a	0.15±0.01 ^a	0.018
弹性 Springiness (N)	2.26±0.07	2.16±0.08	2.17±0.12	2.23±0.03	0.828
胶黏性 Gumminess (N)	2.53±0.08	2.49±0.18	2.60±0.12	2.72±0.21	0.755
咀嚼性 Chewiness (mj)	5.75±0.34	5.46±0.47	5.76±0.51	6.13±0.44	0.765
剪切力 Shear force (N)	7.47±0.89	8.86±1.11	8.49±1.23	6.90±0.20	0.478

棉籽浓缩蛋白饲料中添加酵母硒后,草鱼的终末体重、增重率和特定增长率在饲料硒含量为0.6—0.89 mg/kg时无显著变化,但在硒含量为1.2 mg/kg时显著降低,表明日粮中硒含量为0.6—0.89 mg/kg时对草鱼的生长性能无影响,但1.2 mg/kg的硒则会抑制草鱼的生长。有研究表明,日粮缺硒会抑制水产动物的生长,同时也会提升水产动物的死亡率;但硒过量也会产生毒性作用,从而抑制水产动物的生长和增加饲料系数^[22, 23]。在鲈的研究中也得到了与本研究类似的结果,梁萌青等^[24]发现当饲料添加0.4—0.6 mg/kg的亚硒酸钠时,鲈的生长性能显著升高,而添加量为0.8—1.0 mg/kg时显著抑制了鲈的生长。除此之外,Liu等^[8]指出高硒饲料(饲料硒含量>1.12 mg/kg)显著降低了草鱼的增重率,其原因可能是由硒过量引起的促氧化作用所导致。在虹鳟和乌贼研究中却得到了不同的结果,即饲料中添加酵母硒^[12, 25]或富含硒蛋氨酸的酵母^[26]对养殖动物的生长性能无显著影响。然而,在团头鲂的研究中发现添加适量酵母硒则显著增加了鱼体增重率和特定增长率^[27]。在不同的研究中,饲料中的硒对养殖动物的生长性能产生了不同程度的影响,其原因可能与养殖动物种类、生长阶段、养殖环境、硒剂量及硒种类等因素有关。在本研究中,YS9组草鱼生长受到抑制可能是由于硒过量时引起的促氧化作用。

棉酚作为一种抗营养因子严重制约了棉籽浓缩蛋白在水产饲料中的应用^[4]。当棉籽浓缩蛋白替代日粮豆粕水平超过30%时,罗非鱼生长性能和肠道消化酶活受到显著抑制^[4],作者通过进一步研究发现造成这种负面影响的原因是棉籽浓缩蛋白中的棉酚所致。在水产养殖中,已有大量研究表明硒具有通过提升水产动物抗氧化能力、肠道消化酶

活性和免疫功能来消除饲料中各种抗营养因子所带来的负面影响,从而保障了鱼体的生长性能和机体健康^[28]。在条纹锯鲈中得到了与以上研究相似的结论,张静雅等^[16]发现在棉籽浓缩蛋白替代条纹锯鲈日粮鱼粉的饲料中同时添加硫磺酸和酵母硒混合物以降低棉酚等各种抗营养因子的负面影响,从而在鱼体生长方面得到了与对照组无差异的结果。在本研究中发现,酵母硒可能通过降低日粮中棉酚所带来的负面影响的作用,为酵母硒改善草鱼肌肉品质提供保障。因此,本研究中草鱼肌肉品质的提升可能与酵母硒降低了日粮中棉酚等抗营养因子的负面影响有关。

肝胰脏是水产动物关键性的代谢器官。正常肝胰脏颜色应是紫红色,肝胰脏脂肪增加导致颜色变浅,严重时出现脂肪肝和肝硬化^[29],与此同时,脂肪在肝脏中沉积也会导致肝脏重量的增加,具体表现为肝体指数增大。之前的研究发现,高脂饲料中纳米硒含量为0.3—0.6 mg/kg时可通过AMPK途径调节草鱼脂质代谢相关基因的表达来减少脂质沉积^[30]。在本研究中,饲料中硒含量为0.6和0.89 mg/kg时显著降低了草鱼的肝体指数,可能与日粮中的硒促进了草鱼对肝脏脂肪的分解利用有关。

3.2 含棉籽浓缩蛋白饲料添加酵母硒对草鱼肌肉品质的影响

肌肉的营养价值对于鱼肉品质至关重要,而营养价值与蛋白质、脂肪、氨基酸和矿物元素等物质的含量密不可分^[31]。本研究发现,饲喂硒含量为0.6 mg/kg的饲料显著增加了草鱼肌肉的粗蛋白。与此结果类似,在团头鲂和虹鳟的研究中也有发现,饲料中添加酵母硒可显著提高团头鲂肌肉的粗蛋白含量^[27]。Hunt等^[32]研究指出,日粮中添加有机硒可显著增加虹鳟肌肉的粗蛋白含量。此外,有研究发现,肌肉组织中的硒浓度与饲料中硒含量呈强线性正相关^[33]。此研究结论在本研究中也得到了验证,本研究发现饲喂硒含量为0.6 mg/kg的饲料显著增加了草鱼肌肉的硒含量,并且肌肉硒含量随着添加水平的升高呈上升趋势。其次,肌肉硒含量随着日粮硒含量增加而增加在团头鲂的研究中也有发现^[29]。因此,在含棉籽浓缩蛋白饲料添加酵母硒可通过提升草鱼肌肉粗蛋白和硒含量来提升草鱼的营养价值,从而提升草鱼的肌肉品质。

肌肉硬度是评估鱼类肉质最关键的指标之一^[34],且受许多内在特性的影响,如肌肉的常规成分^[35]、胶原蛋白^[36]、肌肉纤维大小和结缔组织^[37]。鱼死后肌肉的pH是重要的肉质参数^[38—40]。研究表明,鱼片硬度的提高通常代表鱼肉质量的提升^[41]。本

研究发现,与YS0组相比,在饲料中添加酵母硒时草鱼肌肉的硬度显著增加,且饲料硒含量为0.6 mg/kg时硬度最大。在虹鳟的研究中也得到了与本研究相似的结果,Wang等^[12]发现日粮中的酵母硒显著提升了肌肉的硬度,从而提升虹鳟肉质品质,其原因可能与日粮硒显著下调了肌肉中两种自噬-溶酶体相关基因的表达有关。通常认为鱼肉的硬度与纤维直径呈负相关,与纤维密度呈正相关^[37]。在本研究中,我们发现在饲料中添加酵母硒显著降低了肌纤维直径,并且饲料硒含量为0.6 mg/kg时肌纤维直径最小,从而证实了前人的研究结论。除此之外,也有研究发现肌肉的硬度与胶原蛋白含量呈正相关^[41]。而羟脯氨酸在胶原蛋白中占13.4%,因此,羟脯氨酸含量可用于计算鱼肉的胶原蛋白含量^[42]。从本研究结果来看,日粮中的硒显著增加了草鱼肌肉羟脯氨酸含量,从而提升了草鱼肌肉硬度。综上,摄食含酵母硒饲料后,草鱼肌肉硬度增加可能是由硒显著下调了草鱼肌肉中自噬-溶酶体相关基因的表达、降低肌纤维直径及增加肌肉胶原蛋白含量等原因所致。

4 结论

在本实验条件下,含棉籽浓缩蛋白(添加水平:17.63%)饲料中添加酵母硒(饲料硒含量为0.6 mg/kg)不影响草鱼的生长性能,但可通过提高肌肉粗蛋白、硒、羟脯氨酸含量和硬度来提升草鱼的肌肉品质。以生长性能和肌肉品质为评价指标,在含17.63%棉籽浓缩蛋白的草鱼饲料中添加0.6 mg/kg酵母硒时效果最佳,过量添加酵母硒(0.9 mg/kg)则会降低草鱼的生长性能。

参考文献:

- [1] Liang J J, Yang H J, Liu Y J, *et al.* Dietary zinc requirement of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on growth and mineralization [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(4): 380-387.
- [2] 2022 China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 25. [2022中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 25.]
- [3] Li X Q, Li H D, Ji H, *et al.* Effects of substitution of soybean meal with cottonseed protein concentrate on growth performance, health status and flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(2): 235-248. [李旭巧, 李汉东, 吉红, 等. 棉籽浓缩蛋白替代饲料中豆粕对草鱼生长性能、健康状况及肌肉品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(2): 235-248.]
- [4] Li W J. Effects and mechanism of replacing soybean meal with cottonseed protein concentrate on the growth condition and intestinal health of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022: 1-5. [李玮洁. 棉籽浓缩蛋白替代豆粕对尼罗罗非鱼生长和肠道健康的影响及机制初探 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022: 1-5.]
- [5] Kumar N, Singh N P. Effect of dietary selenium on immuno-biochemical plasticity and resistance against *Aeromonas veronii* biovar *sobria* in fish reared under multiple stressors [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(84): 38-47.
- [6] Jin X, Jia T, Liu R, *et al.* The antagonistic effect of selenium on cadmium-induced apoptosis via PPAR- γ /PI3K/Akt pathway in chicken pancreas [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018(357): 355-362.
- [7] Zheng L, Feng L, Jiang W D, *et al.* Selenium deficiency impaired immune function of the immune organs in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018(77): 53-70.
- [8] 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.
- [9] Tang C, Li S, Zhang K, *et al.* Selenium deficiency-induced redox imbalance leads to metabolic reprogramming and inflammation in the liver [J]. *Redox Biology*, 2020(36): 101519.
- [10] Liu J X, Wei W Y, Yang M, *et al.* A new selenium additive in aquatic feed-yeast selenium [J]. *Fishery Guide to be Rich*, 2019: 30-32. [刘家星, 魏文燕, 杨马, 等. 水产饲料中的新型硒元素添加剂-酵母硒 [J]. 渔业致富指南, 2019: 30-32.]
- [11] Wen L M, Zhao W. Fish muscle quality evaluation: a review [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, **59**(S1): 174-176. [文玲梅, 赵伟. 鱼类肌肉品质评价研究进展 [J]. 湖北农业科学, 2020, **59**(S1): 174-176.]
- [12] 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.
- [13] Liu G X, Jiang G Z, Lu K L, *et al.* Effects of dietary selenium on the growth, selenium status, antioxidant activities, muscle composition and meat quality of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(4): 777-787.
- [14] 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.]
- [15] Molnár C, Biró M, Balogh K, *et al.* Improving the nutritional value of Nile Tilapia Fillet by dietary selenium supplementation [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2012(64): 744-750.
- [16] Zhang J Y, Ren X, Li W Y, *et al.* Influence of taurine and selenium yeast supplementation on replacing fish meal with cottonseed protein concentrate in black sea bass (*Centropristis striata*) diet [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, **32**(7): 3291-3302. [张静雅, 任幸, 李伟业, 等. 添加牛磺酸和硒酵母对改善棉籽浓缩蛋白替代条纹锯鲷饲料鱼粉的作用 [J]. 动物营养学报, 2020, **32**(7): 3291-3302.]
- [17] Zheng Q M, Wen R S, Liu X L, *et al.* Effect of compound microorganism agent on immunity function of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Journal of Jia-ying University*, 2007, **25**(3): 68-71. [郑清梅, 温茹淑, 刘兴隆, 等. 复合微生物制剂对草鱼的生长和免疫因子的影响 [J]. 嘉应学院学报, 2007, **25**(3): 68-71.]
- [18] Wang H Q, Zhao Y R, Jin B T, *et al.* Effects of dietary alpha-ketoglutarate supplementation on growth and serum biochemical parameters of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fingerlings [J]. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2016: 1239-1245.
- [19] Ma R. Preliminary study on relationship between nutrition and fish quality of farmed large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 28-29. [马睿. 营养与养殖大黄鱼品质之间关系的初步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 28-29.]
- [20] Zheng L. Effects of dietary selenium on the growth performance, flesh quality and the health status of functional organs, as well as the possible mechanisms in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018: 1-2. [郑霖. 硒对生长中期草鱼生产性能, 肌肉品质和功能器官健康的作用及其作用机制 [D]. 成都: 四川农业大学, 2018: 1-2.]
- [21] Su C F. Study on the nutritional needs of selenium in grass carp juvenile [D]. Chongqing: Southwest University, 2008: 1-8. [苏传福. 草鱼幼鱼硒的营养需要研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008: 1-8.]
- [22] 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.
- [23] Kim K W, Wang X, Choi S M, *et al.* No synergistic effects by the dietary supplementation of ascorbic acid, α -tocopheryl acetate and selenium on the growth performance and challenge test of *Edwardsiella tarda* in fingerling Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. [J]. *Aquaculture Research*, 2003, **34**(12): 1053-1058.
- [24] Liang M Q, Wang J L, Chang Q, *et al.* Effects of dietary Se on growth performance and activities of related enzymes in juvenile Japanese seabass *Lateolabrax japonicus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, **13**(6): 1017-1022. [梁萌青, 王家林, 常青, 等. 饲料中硒的添加水平对鲈鱼生长性能及相关酶活性的影响 [J]. 中国水产科学, 2006, **13**(6): 1017-1022.]
- [25] Pacitti D, Lawan M M, Sweetman J, *et al.* Correction: selenium supplementation in fish: a combined chemical and biomolecular study to understand Sel-Plex assimilation and impact on selenoproteome expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *PLoS One*, 2016, **11**(2): e0144681.
- [26] 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.
- [27] 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.]
- [28] Li Y, Chen Y S, Ji H, *et al.* Research progress of selenium application in aquaculture [J]. *Journal of Ankang University*, 2014, **26**(3): 82-85. [李杨, 陈永生, 吉红, 等. 硒在水产养殖中的应用研究进展 [J]. 安康学院学报, 2014, **26**(3): 82-85.]
- [29] Ye Y T. The evaluation index system on nutrition and feed study for aquatic animal [J]. *Feed China*, 2004(20): 19-21. [叶元土. 水产动物的营养与饲料研究评价指标体系 [J]. 饲料广角, 2004(20): 19-21.]
- [30] Liu G, Yu H, 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.
- [31] Tocher D. Issues surrounding fish as a source of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids [J]. *Lipid Technology*, 2009, **21**(1): 13-16.
- [32] Hunt A O, Berkoy M, Ozkan F, *et al.* Effects of organic selenium on growth, muscle composition, and antioxidant system in rainbow trout [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2011, **63**(562): 1-10.
- [33] Le K T, Fotadar R. Toxic effects of excessive levels of dietary selenium in juvenile yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) [J]. *Aquaculture*, 2014(433): 229-234.
- [34] Brinker A, Reiter R. Fish meal replacement by plant protein substitution and guar gum addition in trout feed, Part I: Effects on feed utilization and fish quality [J]. *Aquaculture*, 2011, **310**(3-4): 350-360.
- [35] Dunajski E. Texture of fish muscle [J]. *Journal of Tex-*

- ture Studies, 1980, **10**(4): 301-318.
- [36] Hatae K, Tobimatsu A, Takeyama M, *et al.* Contribution of the connective tissues on the texture difference of various fish species [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1986, **52**(11): 2001-2007.
- [37] Valente L M P, Cornet J, Donnay-Moreno C, *et al.* Quality differences of gilthead sea bream from distinct production systems in Southern Europe: Intensive, integrated, semi-intensive or extensive systems [J]. *Food Control*, 2011, **22**(5): 708-717.
- [38] Johnsen C A, Hagen Ø, Adler M, *et al.* Effects of feed, feeding regime and growth rate on flesh quality, connective tissue and plasma hormones in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *Aquaculture*, 2011, **318**(3-4): 343-354.
- [39] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, *et al.* Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. [J]. *Aquaculture*, 2005, **249**(1-4): 175-188.
- [40] Wang B, Liu Y, Feng L, *et al.* Effects of dietary arginine supplementation on growth performance, flesh quality, muscle antioxidant capacity and antioxidant-related signalling molecule expression in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Food Chemistry*, 2015(167): 91-99.
- [41] Johnston I A, Li X, Vieira V L A, *et al.* Muscle and flesh quality traits in wild and farmed Atlantic salmon [J]. *Aquaculture*, 2006, **256**(1-4): 323-336.
- [42] Hofman K, Hall B, Cleaver H, *et al.* High-throughput quantification of hydroxyproline for determination of collagen [J]. *Analytical Biochemistry*, 2011, **417**(2): 289-291.

YEAST SELENIUM ADDED TO COTTONSEED PROTEIN CONCENTRATE DIET ON GROWTH PERFORMANCE AND FLESH QUALITY OF GRASS CARP (*CTENOPHARYNGODON IDELLA*)

LI Han-Dong, LI Xu-Qiao, JI Hong, SUN Jian, HU Ze-Chao and LIU Sha

(Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In aquaculture, selenium has been shown to improve the immune and antioxidant capacity of aquatic animals. As a kind of new style protein resource, cottonseed protein concentrate plays a crucial role in aquaculture industry, however, the antinutritional factors (such as gossypol) seriously hindered the application of cottonseed protein concentrate in aquatic feed. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effects of adding yeast selenium (YS) to the diet that containing cottonseed protein concentrate on the growth performance and muscle quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Four isonitrogenous and isolipidic diets were designed: 0, 0.3, 0.6 and 0.9 mg/kg YS were added to the diet containing cottonseed protein concentrate, and corresponding named YS0, YS3, YS6 and YS9, respectively. A total of 240 healthy grass carp with similar size (initial weight: 309.74 ± 0.36 g) were randomly distributed into 12 net cages in the pond. Each of the experimental diets was randomly fed triplicate cages for 56-day three times per day (9:00, 13:00 and 17:00). The results showed that: (1) In terms of growth performance, compared with YS0 group, there was no significant difference in growth performance between YS3 and YS6 groups ($P > 0.05$), but the final body weight (FBW), weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) of YS9 group were significantly reduced ($P < 0.05$); (2) In terms of muscle quality, compared with YS0 group, the crude protein content, selenium content, hydroxyproline content and hardness of grass carp muscle in YS3 group were significantly increased ($P < 0.05$), and the fiber diameter and cohesiveness of muscle were significantly decreased ($P < 0.05$). The study indicated that the addition of YS to the diet containing cottonseed protein concentrate (the selenium content of the diet was 0.6 mg/kg) had no significant effect on the growth performance of grass carp, and flesh quality were significantly improved. However, exceeded dietary YS had negative influence on the growth performance of grass carp. This study provides a theoretical basis for further application of cottonseed protein concentrate in aquatic feed.

Key words: Cottonseed protein concentrate; Yeast selenium; Growth performance; Flesh quality; *Ctenopharyngodon idella*