

DOI: 10.12264/JFSC2022-0396

微量元素锌、硒及维生素 E 对雌性黄鳢生长及抗氧化能力的影响

岳华梅, 符鹏, 邓海超, 阮瑞, 叶欢, 李忠, 李创举

中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223

摘要: 本研究旨在探讨微量元素锌、硒及维生素 E 对雌性黄鳢(*Monopterus albus*)生长、肌肉营养成分及肝脏抗氧化能力的影响。根据正交试验设计 L9 (3⁴)正交试验, 3 个因素分别设定 3 个浓度梯度(锌为 20 mg/kg、40 mg/kg、60 mg/kg, 硒为 0.66 mg/kg、1.31 mg/kg、1.97 mg/kg, 维生素 E 为 170 mg/kg、270 mg/kg、370 mg/kg), 制备 9 组等氮等能的饲料。挑选 1350 尾初始平均体重为(19.67±1.59) g 的 2 冬龄雌性黄鳢, 随机分为 9 组, 每组 3 个重复, 每个重复 50 尾鱼, 养殖周期为 12 周。结果表明: (1) 0.66 mg/kg 硒添加组黄鳢生长性能显著高于另外两个较高浓度硒添加组($P<0.05$), 而锌及维生素 E 添加不影响黄鳢的生长性能($P>0.05$), 试验组 1 即 0.66 mg/kg 硒、20 mg/kg 锌、170 mg/kg 维生素 E 添加组雌鳢的生长性能最好, 增重率及特定生长率分别为(115.04±8.71)%及(1.39±0.07)%/d; (2) 维生素 E 是影响黄鳢肥满度的首要指标, 370 mg/kg 维生素 E 添加组黄鳢的肥满度显著高于 170 mg/kg 及 270 mg/kg 添加组($P<0.05$); (3) 饲料中添加 60 mg/kg 锌、1.31 mg/kg 硒、170 mg/kg 维生素 E 时(试验组 8), 雌鳢的性腺指数最高, 为 10.02±1.26; (4) 锌为影响雌鳢肌肉粗脂肪含量的第一因素, 60 mg/kg 锌添加组雌鳢的粗脂肪含量显著高于 20 mg/kg 及 40 mg/kg 添加组; (5) 60 mg/kg 锌添加组黄鳢肝脏的超氧化物歧化酶活性显著高于其他两个添加浓度($P<0.05$)。270 mg/kg 维生素 E 添加时雌鳢的丙二醛含量显著低于其他两个添加梯度($P<0.05$), 而 60 mg/kg 锌添加时雌鳢的丙二醛含量显著高于其他两个添加梯度($P<0.05$)。综上, 饲料添加 0.66 mg/kg 硒、20 mg/kg 锌、170 mg/kg 维生素 E 最有利于雌鳢的生长; 添加 40 mg/kg 锌、1.03 mg/kg 硒、270 mg/kg 维生素 E 可显著提高雌鳢的抗氧化性能。

关键词: 黄鳢; 锌; 硒; 维生素 E; 生长; 抗氧化能力

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)03-0352-09

黄鳢(*Monopterus albus*)俗称鳢鱼, 属硬骨鱼纲, 合鳃目, 合鳃科, 黄鳢属, 是我国重要的淡水名优养殖鱼类。目前商业黄鳢的来源主要是人工养殖。但是由于黄鳢天然饵料的缺乏, 已经严重影响了养殖业的发展。为了促进黄鳢的健康养殖, 研制优质的配合饲料成为黄鳢人工养殖过程中亟待解决的问题。因此, 完善黄鳢对蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素和矿物质等方面的营养需要显得尤为必要。

矿物元素锌是鱼类生长必需的微量元素, 还参与调节其他重要的生理过程, 包括发育、繁殖、免疫等^[1-3]。在鱼体内, 锌可阻止活性氧或者氧自

由基的活动, 从而发挥抗氧化作用, 保护鱼体免受伤害^[4-6]。矿物元素硒可通过与谷胱甘肽过氧化物酶等结合形成含硒蛋白质, 抑制机体内的细胞损伤, 保护机体免受氧化胁迫^[7]。饲料中同时添加锌和硒可显著提高南亚野鲮(*Labeo rohita*)的生长率^[8]。维生素 E 又称生育酚, 对动物体来说是一种不可缺少的脂溶性维生素。维生素 E 是动物机体抗氧化防御系统的重要组成部分, 与硒协同作用, 可保护细胞膜免受氧化损伤^[9]。在黄尾鲷(*Seriola lalandi*)中, 硒与维生素 E 协同作用可显著提高其增重率^[10]。在黄鳢中, 已有研究证明饲料添加维生素 A、D₃、E、C 可影响黄鳢的性腺发

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-12-28.

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资助项目(2020XT08).

作者简介: 岳华梅(1984-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为鱼类饲料与营养调控. E-mail: yhuam@yfi.ac.cn

通信作者: 李创举, 研究员. 研究方向为鱼类分子营养学. E-mail: lcj@yfi.ac.cn

育、脂质过氧化及免疫应答能力^[11]。然而, 维生素 E 与矿物元素同时添加至饲料对黄鳝生长发育的影响目前尚未见报道。本研究拟以雌性 2 冬龄黄鳝为研究对象, 在人工配合饲料中添加不同比例的锌、硒、维生素 E, 探讨其对黄鳝生长、肌肉营养成分及抗氧化能力的影响, 旨在通过营养调控的方式提高雌鳝的生长及抗氧化性能。

1 材料方法

1.1 实验设计与饲料制备

选取微量元素锌、硒及维生素 E (A、B、C) 3 个因子, 分别设定 3 个浓度梯度, 根据正交试验设计方法设计 L9 (3⁴) 正交试验, 将试验分为 9 组 (表 1)。饲料中微量元素锌浓度梯度分别为 20 mg/kg (A)、40 mg/kg (B)、60 mg/kg (C); 微量元素硒浓度梯度分别为 0.66 mg/kg (A)、1.31 mg/kg (B)、1.97 mg/kg (C); 维生素 E 浓度梯度为 170 mg/kg (A)、270 mg/kg (B)、370 mg/kg (C)。微量元素锌(ZnSO₄·H₂O, 36.30%)、硒(Na₂SeO₃, 45.70%)购自国药集团化学试剂有限公司(上海, 中国), 维生素 E 购自浙江新维普添加剂有限公司(浙江, 中国)。微量元素锌、硒、维生素 E 的浓度设定参考已发表文献^[8,12-13]。

表 1 试验设计及分组处理
Tab. 1 The design and treatments of the trial

分组 trial	mg/kg		
	锌(理论值/ 实测值) Zn (TV/MV*)	硒(理论值/ 实测值)Se Se (TV/MV*)	维生素 E (理论值/实测值) vitamin E (TV/MV*)
1	20/23.15 (A)	0.66/0.87 (A)	170/180.71 (A)
2	20/22.17 (A)	1.31/1.14 (B)	270/282.47 (B)
3	20/22.73 (A)	1.97/1.96 (C)	370/382.28 (C)
4	40/40.32 (B)	0.66/0.86 (A)	270/291.77 (B)
5	40/40.02 (B)	1.31/1.15 (B)	370/393.81 (C)
6	40/43.02 (B)	1.97/1.97 (C)	170/194.86 (A)
7	60/66.74 (C)	0.66/0.81 (A)	370/390.51 (C)
8	60/67.78 (C)	1.31/1.13 (B)	170/174.58 (A)
9	60/65.46 (C)	1.97/1.98 (C)	270/282.89 (B)

Note: * TV/MV indicates theoretical value/measured value.

饲料基础成分及化学组成见表 2, 微晶纤维素作为辅料补平每组饲料重量至 1000.00 g。所有

饲料原料经充分粉碎, 过 60 目筛, 然后充分混匀, 含量较低的饲料原料采用逐级预混法添加。采用 32 型制粒机(浙江, 中国)将饲料预混料加工成直径约为 2.00 mm 的长条状饲料, 烘干破碎后将饲料密封放置于-20 ℃冰柜中备用。饲料在投喂前加入 20% 自来水, 团成团状后进行饲喂。饲料中锌、硒含量采用原子吸收光谱法(GB/T13885-2017、GB/T13883-2008)进行测定, 饲料总维生素 E 含量采用高效液相色谱法(GB/T17812- 2008)进行测定。

表 2 基础饲料配方及营养组成(风干基础)
Tab. 2 Formulation and chemical composition of the basal diet (dry matter basis)

饲料成分 diet composition	含量/(g/kg) content
饲料配方 diet formulation	
鱼粉 fish meal	200.00
大豆蛋白 soy protein concentrate	300.00
磷虾粉 krill meal	100.00
面粉 wheat flour	200.00
鱼油 fish oil	28.00
豆油 soybean oil	28.00
维生素预混料* vitamin premix*	10.00
矿物质预混料** mineral premix**	10.00
氯化胆碱 choline chloride	10.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	10.00
蚯蚓粉 earthworm lyophilized powder	30.00
乙氧基喹啉 ethoxyquin	5.00
酵母 brewer yeast	10.00
羧甲基纤维素钠 sodium carboxymethylcellulose	5.00
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	不定
营养成分/% chemical composition	
粗蛋白质 crude protein	40.30
粗脂肪 crude lipid	7.15

注: *维生素预混料(mg/kg diet): 维生素 B₁ 50 mg, 维生素 B₂ 200 mg, 维生素 B₆ 50 mg, 维生素 B₁₂ 20 mg, 叶酸 15 mg, 维生素 C (30%) 325 mg, 泛酸酯 400 mg, 肌醇 500 mg, D-biotin 生物素 (2%) 5 mg, 烟酸 750 mg, 维生素 A 2.50 mg, 维生素 D₃ 2 mg, 维生素 K 20 mg.

** 矿物质预混料 Mineral premix (mg/kg diet): Ca(H₂PO₄)₂ 1800 mg, KH₂PO₄ 1350 mg, NaCl 500 mg, MgSO₄·7H₂O 750 mg, NaH₂PO₄·2H₂O 650 mg, KI 1.50 mg, COSO₄·6H₂O 2.50 mg, CuSO₄·5H₂O 15 mg, FeSO₄·7H₂O 1250 mg, MnSO₄·4H₂O 80 mg.

Note: *Vitamin premix (mg/kg diet): vitamin B₁ 50 mg, vitamin B₂ 200 mg, vitamin B₆ 50 mg, vitamin B₁₂ 20 mg, folic acid 15 mg, vitamin C (30%) 325 mg, pantothenate 400 mg, inositol 500 mg, D-biotin (2%) 5 mg, niacin 750 mg, vitamin A 2.50 mg, vitamin D₃ 2 mg, vitamin K 20 mg.

1.2 试验鱼及饲养管理

试验鱼购自湖北省仙桃市张沟镇忠善黄鳝养殖合作社,选取健康无损伤的 2 冬龄人工繁殖雌性黄鳝 1350 尾[初始平均体重(19.67 ± 1.59) g],平均分配到 27 个网箱中。养殖实验在室外池塘网箱中进行,养殖水深 1.67 m,池塘水域面积约为 1333×33 m²,池塘中网箱尺寸为 2.00 m $\times$ 1.00 m $\times$ 1.50 m (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。实验共计 9 个处理组,每组设 3 个平行网箱,每个网箱放置 50 尾实验鱼,养殖周期为 12 周。养殖采用表观饱食投喂法,每天下午 18:00~19:00 投喂 1 次,每 6 天停止投喂 1 次。投喂后 1 h 内及时捞出残饵,后烘干称重。试验养殖用水为池塘水加地下水,实验期间水体溶解氧 5.98~7.72 mg/L, pH 范围 7.50~7.70,氨氮值平均为 2.03 mgN/L,水体硬度 92 德国度,养殖水温为 22.60~28.90 ℃。

1.3 样品采集

养殖实验结束后,所有鱼经 24 h 饥饿处理,随后进行逐箱称重及尾数统计,以统计分析生长相关指标,包括增重率(weight gain, WG)以及特定生长率(specific growth rate, SGR)。每个网箱随机选取 6 尾鱼,采用 100 mg/L MS-222 (Sigma, St. Louis, MO, USA)麻醉处理后,称取个体体重及体长,以计算肥满度(condition factor, CF)。解剖取卵巢组织称重,用于性腺指数(gonadosomatic index, GSI)指标的测定;取肝脏组织称重,用于肝体比(hepatosomatic index, HSI)指标的测定,随后保存于-80 ℃冰箱,用于抗氧化指标超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)以及丙二醛(malondialdehyde, MDA)的测定;同时取肌肉样品,用于后续粗蛋白质(crude protein)、粗脂肪(crude lipid)相关营养成分指标的测定。

1.4 样品测定

实验饲料及肌肉营养成分测定采用标准方法进行,粗蛋白质测定采用微量凯氏定氮法(GB/5009.5-2003),粗脂肪测定采用索氏抽提法(GB/T5009.6-2003)。肝脏超氧化物歧化酶(SOD)活性以及丙二醛(MDA)含量采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定,相应操作均参照说明书进行。

1.5 计算公式

增重率(WG, %)= $100 \times (\text{终末体重} - \text{初始体重}) / \text{初始均重}$;

特定生长率(SGR, %/d)= $100 \times (\ln \text{终末体重} - \ln \text{初始体重}) / \text{投喂天数}$;

饲料系数(FCR)= $\text{摄食量} / (\text{终末体重} - \text{初始体重})$;

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

肝体比(HSI, %)= $100 \times (\text{肝脏重} / \text{终末体重})$;

性腺指数(GSI, %)= $100 \times (\text{性腺重} / \text{终末体重})$ 。

1.6 数据统计分析

实验结果采用平均值 $\pm$ 标准误($\bar{x} \pm \text{SE}$)表示。数据分析采用 SPSS 22.00 软件进行,选取极差分析以及一般线性模型单变量分析中的 Duncan's 方差分析^[14]。极差分析用于确定影响特定指标的主要因素。方差分析用于确定组间的差异, $P < 0.05$ 认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 微量元素锌、硒及维生素 E 对黄鳝生长指标、形体指标及性腺指数的影响

如表 3 所示,试验组 1 黄鳝的增重率(WG)及特定生长率(SGR)最高,分别为(115.04 ± 8.71)%及(1.39 ± 0.07)%/d;其次为试验组 5,其黄鳝增重率及特定生长率分别为(113.97 ± 17.33)%及(1.38 ± 0.15)%/d。黄鳝增重率及特定生长率最低的为试验组 8 的黄鳝。表 4 的极差分析显示,在两个生长指标增重率及特定生长率中,微量元素硒各浓度梯度之间极差值最大,其次为维生素 E 及微量元素锌。方差分析显示,饲料中硒浓度梯度 A (0.66 mg/kg)、B (1.03 mg/kg)与浓度梯度 C (1.97 mg/kg)在增重率及特定生长率指标中存在显著性差异($P < 0.05$)。锌与维生素 E 各浓度梯度间无显著性差异($P > 0.05$)。以上结果表明,在该试验条件下,微量元素硒是影响黄鳝生长指标的主要因素,饲料中添加 0.66~1.31 mg/kg 硒对黄鳝的生长最有利。对饲料系数进行统计分析发现,饲料系数最低的组为试验组 5 (1.88 ± 0.07),其次为试验组 1 (1.88 ± 0.07);饲料系数最高的组为试验组 9 (2.48 ± 0.18)。综合考虑,最有利于黄鳝生长的 3 个因子组合为 0.66 mg/kg 硒、20 mg/kg 锌、170 mg/kg 维生素 E,即试验组 1。

表 3 锌、硒、维生素 E 对黄鳝生长、形体指标及性腺指数指标的影响

Tab. 3 Effect of zinc, selenium and vitamin E on parameters of growth, morphological and GSI parameter of *Monopterus albus*

n=6; $\bar{x} \pm \text{SE}$								
分组 trial group	初始均重/g IBW	终末均重/g FBW	增重率/% WG	特定生长率/ (%/d) SGR	饲料系数 FCR	肥满度/% CF	肝体比/% HIS	性腺指数/% GSI
1	18.33±0.33	39.44±1.38	115.04±8.71	1.39±0.07	1.99±0.11	0.15±0.02	1.72±0.02	8.30±1.04
2	19.00±1.15	37.27±1.47	96.79±11.59	1.23±0.11	2.29±0.09	0.12±0.01	1.66±0.02	7.79±1.13
3	20.33±1.45	38.86±2.12	92.96±7.50	1.18±0.07	2.25±0.09	0.18±0.03	1.57±0.01	8.26±1.15
4	19.66±0.33	39.59±1.93	101.24±14.00	1.27±0.12	2.12±0.17	0.13±0.01	1.84±0.01	7.80±1.96
5	19.66±1.20	41.84±0.66	113.97±17.33	1.38±0.15	1.88±0.07	0.14±0.01	1.84±0.01	9.10±0.90
6	20.00±0.57	37.79±0.99	89.06±5.56	1.16±0.05	2.35±0.08	0.12±0.01	1.71±0.01	8.23±1.15
7	18.66±0.88	38.01±1.81	103.63±0.91	1.29±0.01	2.16±0.11	0.19±0.02	1.45±0.01	8.11±1.95
8	21.33±0.66	38.85±1.26	82.12±1.51	1.09±0.02	2.38±0.09	0.13±0.01	1.64±0.01	10.02±1.26
9	20.00±1.00	36.96±1.99	84.82±7.48	1.12±0.07	2.48±0.18	0.17±0.03	1.75±0.01	8.51±1.07

Note: IBW, initial body weight; FBW, final body weight; WG, weight gain; SGR, specific growth rate; FCR, feed conversion ratio; CF, condition factor; HSI, hepatosomatic index; GSI, gonadosomatic index.

在各组中, 试验组 7 黄鳝的肥满度(CF)数值最高(0.19±0.02), 其次为试验组 3; 而肥满度最低的为试验组 2 与试验组 6 的黄鳝(0.12±0.01)(表 3)。进一步的极差分析结果显示, 在肥满度指标中维生素 E 的极差值最大, 其次为锌、硒(表 4)。方差分析结果显示, 维生素 E 浓度梯度 C (370 mg/kg)条件下, 黄鳝的肥满度较好, 且与浓度梯度 A (170 mg/kg)、B (270 mg/kg)有显著性差异($P<0.05$)。不同浓度梯度锌对黄鳝肥满度的影响由高到低表现为浓度 C、A、B, 而不同浓度梯度硒对黄鳝肥满度的影响表现为浓度 A、C 高于 B ($P<0.05$)。综上, 饲料中添加 370 mg/kg 维生素 E、60 mg/kg 锌、0.66 mg/kg 硒组合最有利于黄鳝肥满度的增加。

试验组 3 和 4 黄鳝的肝体比(HSI)数值最高, 为 1.84±0.01, 试验组 7 黄鳝的 HSI 数值最低, 为 1.45±0.01。极差值分析结果显示, 微量元素锌在 HSI 指标中的极差值最大, 其次为维生素 E。方差分析结果表明, 锌浓度梯度 C 条件下, 黄鳝的肝体比数值显著小于浓度梯度 A 及 B ($P<0.05$); 不同浓度梯度维生素 E 对 HSI 的影响表现为 A、B 高于 C。不同浓度微量元素硒对 HSI 的影响差异不显著($P>0.05$)。

对黄鳝性腺指数(GSI)统计分析结果显示, 试验组 8 黄鳝的 GSI 数值最高, 其次为试验组 5; 试验组 4 黄鳝的 GSI 数值最低(表 3)。极差分析结果表明, 微量元素锌在 GSI 指标中极差值最大(0.93),

其次为硒(0.90), 极差值最小的为维生素 E (0.65)(表 4)。不同浓度锌对黄鳝 GSI 的影响表现为浓度 C 高于 A、B; 不同浓度硒对黄鳝 GSI 的影响表现为浓度 B、C 高于 A; 不同浓度维生素 E 对 GSI 的影响表现为 A、C 高于 B。以上结果表明, 60 mg/kg 锌、1.31 mg/kg 硒、170 mg/kg 维生素 E 组合(试验组 8)最有利于黄鳝性腺指数的提高。

2.2 微量元素锌、硒及维生素 E 对黄鳝肌肉营养成分的影响

对黄鳝肌肉营养成分测定结果显示, 试验组 3 黄鳝的粗蛋白质含量最高, 为 20.66±0.11, 试验组 9 黄鳝的粗蛋白质水平最低, 为 14.62±0.05 (表 5)。试验组 1 黄鳝肌肉中粗脂肪含量最高(2.63±0.03), 试验组 9 黄鳝肌肉中的粗脂肪含量最低, 为 1.18±0.05。3 个因素对黄鳝肌肉粗蛋白质指标影响的极差分析显示, 维生素 E 的极差值最大, 其次为锌、硒。而黄鳝粗脂肪指标极差分析结果表明, 3 个因素极差值从高到低依次为锌、硒、维生素 E (表 6)。通过方差分析发现, 不同浓度锌对黄鳝肌肉粗蛋白的影响表现为 B、A 高于 C; 不同浓度硒对黄鳝肌肉粗蛋白质的影响表现为 A、C 高于 B; 不同浓度维生素 E 对黄鳝肌肉粗蛋白质的影响表现为 C、A 高于 B。最有利于黄鳝肌肉粗蛋白质积累的 3 因素组合为 370 mg/kg 维生素 E、20 mg/kg 锌、0.66 mg/kg 硒。3 个因素对黄鳝粗脂肪影响的方差分析结果表明, 20 mg/kg 锌、

表 4 黄鳝增重率、特定生长率、肥满度及性腺指数指标的极差分析及方差分析

Tab. 4 Range analysis and variance analysis for parameters of weight gain rate, specific growth rate, condition factor, and gonadosomatic index of <i>Monopterus albus</i>			
指标 parameter	锌 Zn	硒 Se	维生素 E vitamin E
增重率/% WG			
k_A	101.15	106.64 ^a	95.41
k_B	101.42	97.63 ^a	94.29
k_C	90.19	88.49 ^b	103.07
极差值 range value	11.23	81.51	15.71
特定生长率/% SGR			
k_A	1.27	1.32 ^a	1.21
k_B	1.27	1.23 ^a	1.20
k_C	1.17	1.15 ^b	1.28
极差值 range value	0.10	0.17	0.08
肥满度/% CF			
k_A	0.15 ^b	0.16 ^a	0.13 ^b
k_B	0.13 ^c	0.13 ^b	0.14 ^b
k_C	0.16 ^a	0.16 ^a	0.17 ^a
极差值 range value	0.03	0.03	0.04
肝体比/% HSI			
k_A	1.65 ^b	1.67	1.69 ^a
k_B	1.80 ^a	1.71	1.75 ^a
k_C	1.61 ^b	1.68	1.62 ^b
极差值 range value	0.19	0.04	0.13
性腺指数/% GSI			
k_A	8.12 ^b	8.07 ^b	8.85 ^a
k_B	8.38 ^b	8.97 ^a	8.20 ^b
k_C	9.05 ^a	8.50 ^a	8.49 ^a
极差值 range value	0.93	0.90	0.65

注: k_A 、 k_B 、 k_C 分别代表各指标中每个试验因子 A、B、C 3 个浓度梯度下的平均值。极差值代表每个项目下的极差分析结果(最大 k 值-最小 k 值)。同一指标下同列不同小写字母上标代表差异显著($P<0.05$)。

Note: k_A , k_B , and k_C are the means of each parameter under concentration levels A, B and C, respectively. The range value refers to the result of extreme analysis (maximum k - minimum k) for each item. Values of the same index in the same collum with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

0.66 mg/kg 硒、170 mg/kg 维生素 E (试验组 1)最有利于黄鳝肌肉粗脂肪的积累。

2.3 微量元素锌、硒及维生素 E 对黄鳝肝脏抗氧化能力的影响

本研究还对各试验组黄鳝肝脏的抗氧化能力进行了分析, 结果发现, 超氧化物歧化酶(SOD)

表 5 微量元素锌、硒、维生素 E 对黄鳝肌肉粗蛋白及粗脂肪含量的影响(以鲜样为基础)

Tab. 5 Effect of zinc, selenium and vitamin E on parameters of crude protein and crude lipid in muscle of <i>Monopterus albus</i> (on the fresh tissue basis)		
$n=6; \bar{x} \pm SE; \%$		
实验组 trial group	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude lipid
1	19.26±0.11	2.63±0.03
2	14.81±0.10	1.61±0.03
3	20.66±0.11	2.23±0.20
4	19.54±0.17	2.32±0.03
5	19.32±0.21	2.22±0.03
6	18.02±0.10	1.69±0.10
7	18.58±0.33	1.63±0.07
8	18.63±0.09	1.70±0.08
9	14.62±0.05	1.18±0.05

表 6 黄鳝肌肉粗蛋白、粗脂肪含量的极差分析及方差分析

Tab. 6 Range analysis and variance analysis for parameters of crude protein and crude lipid in muscle of <i>Monopterus albus</i>			
指标 parameter	锌 Zn	硒 Se	维生素 E vitamin E
粗蛋白质/% crude protein			
k_A	18.24 ^a	19.13 ^a	18.63 ^a
k_B	18.96 ^a	17.59 ^b	16.32 ^b
k_C	17.27 ^b	17.77 ^a	19.52 ^a
极差值 range value	1.69	1.54	3.20
粗脂肪/% crude lipid			
k_A	2.16 ^a	2.19 ^a	2.01 ^a
k_B	2.07 ^a	1.84 ^b	1.70 ^b
k_C	1.50 ^b	1.70 ^b	2.02 ^a
极差值 range value	0.66	0.49	0.32

注: k_A 、 k_B 、 k_C 分别代表各指标中每个试验因子 A、B、C 3 个浓度梯度下的平均值。极差值代表每个项目下的极差分析结果(最大 k 值-最小 k 值)。同一指标下同列不同小写字母上标代表差异显著($P<0.05$)。

Note: k_A , k_B , and k_C are the means of each parameter under concentration levels A, B and C, respectively. The range value refers to the result of extreme analysis (maximum k - minimum k) for each item. Values of the same index in the same collum with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

活性在试验组 9 最高, 而在试验组 3 最低。肝脏丙二醛(MDA)含量在试验组 2 最低, 而在试验组 3 最高(表 7)。进一步的极差分析(表 8)结果表明, 在 SOD 指标中, 微量元素锌在 3 个浓度梯度之间极差值最大, 对 SOD 活性的影响最为显著, 其次

为维生素 E、硒。试验因子锌 3 个浓度梯度之间对 SOD 平均值影响由高到低为浓度 C、B、A, 即 60 mg/kg 锌条件下黄鳝肝脏的 SOD 活性最高。不同浓度维生素 E 对肝脏 SOD 影响表现为浓度 A、B 高于 C; 而不同浓度硒对肝脏 SOD 活性影响表现为 C、B 高于 A。在肝脏丙二醛(MDA)指标的极差分析中, 维生素 E 的极差值最大, 其次

表 7 微量元素锌、硒、维生素 E 对黄鳝
肝脏抗氧化指标的影响
Tab. 7 Effect of zinc, selenium and vitamin E on
antioxidant parameters in liver of *Monopterus albus*
n=6; $\bar{x} \pm SE$

分组 trial group	超氧化物歧化酶/ (U/mg prot) SOD	丙二醛/ (nmol/mg prot) MDA
1	197.77±12.15	0.85±0.06
2	190.02±31.66	0.70±0.16
3	170.99±17.89	1.28±0.21
4	227.79±23.31	0.76±0.05
5	233.85±23.51	0.98±0.06
6	278.39±20.78	1.10±0.04
7	246.83±26.13	1.17±0.11
8	282.84±45.97	1.18±0.06
9	302.26±26.22	0.99±0.08

表 8 黄鳝肝脏抗氧化指标的极差分析及方差分析
Tab. 8 Range analysis and variance analysis for
antioxidant parameters in liver of *Monopterus albus*

指标 parameter	锌 Zn	硒 Se	维生素 E vitamin E
超氧化物歧化酶 SOD			
k_A	186.26 ^c	223.46 ^b	253.00 ^a
k_B	246.01 ^b	235.57 ^a	239.36 ^a
k_C	277.31 ^a	250.55 ^a	217.22 ^b
极差值 range value	91.05	27.29	35.78
丙二醛 MDA			
k_A	0.94 ^b	0.92 ^b	1.01 ^a
k_B	0.94 ^b	0.92 ^b	0.82 ^b
k_C	0.99 ^a	1.12 ^a	1.14 ^a
极差值 range value	0.05	0.20	0.32

注: k_A 、 k_B 、 k_C 分别代表各指标中每个试验因子 A、B、C 3 个浓度梯度下的平均值。极差值代表每个项目下的极差分析结果(最大 k 值-最小 k 值)。同一指标下同列不同小写字母上标代表差异显著($P<0.05$)。
Note: k_A , k_B , and k_C are the means of each parameter under concentration levels A, B and C, respectively. The range value refers to the result of extreme analysis (maximum k - minimum k) for each item. Values of the same index in the same collum with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

为硒, 最后为锌。不同浓度维生素 E 对肝脏 MDA 影响的方差分析结果显示为浓度 A、C 高于 B; 不同浓度硒及锌的方差分析结果都显示, 对 MDA 平均值的影响从大到小为浓度 C 高于 A、B。综合 SOD 和 MDA 两个指标的分析, 40 mg/kg 锌、1.03 mg/kg 硒、270 mg/kg 维生素 E 的组合最有利于黄鳝肝脏抗氧化能力的提高。

3 讨论

3.1 微量元素硒对雌鳝生长性能的影响

在生长性能测定中, 当饲料中硒浓度逐渐升高时, 黄鳝的生长性能逐渐下降, 并且当硒浓度提高至 1.97 mg/kg 时, 黄鳝的生长受到了显著抑制(表 4)。该研究结果与以往的研究结果较为相似, 即饲料中硒浓度过高时会抑制水产动物的生长。在日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)中, 当饲料中添加硒浓度达到 1.17 mg/kg 时, 其生长受到抑制^[15]。Wang 等^[16]的研究表明, 当饲料硒浓度大于 1.55 mg/kg 时皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)的生长性能逐渐下降。另外, 在石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)中, 其生长性能同样随着饲料中硒浓度的升高而逐渐下降, 其最适锌需求为 0.80 mg/kg^[17]。不同水产动物对硒的耐受浓度不一样, 这可能是由于各研究中饲料硒的添加形式及添加量存在差异。另外, 试验动物的品种、体重差异以及养殖环境的不同也可能影响其对硒的最适需求浓度。

3.2 微量元素锌、维生素 E 对雌鳝性腺发育的影响

性腺指数(GSI)是反映水产动物繁殖性能的重要指标。微量元素作为营养素中的重要组成部分, 对动物繁殖性能的影响已经有了大量研究, 但是锌对雌性水生动物繁殖性能的影响研究目前还较少。仅在日本沼虾的研究中发现, 饲料中锌含量为 60 mg/kg 时, 雌虾血清中雌二醇及孕酮含量均有最大值, 并且可以保持卵巢组织结构的完整性^[18]。笔者对雌鳝的研究也显示, 微量元素锌是影响雌鳝性腺指数的第一要素, 并且当饲料中锌含量为 60 mg/kg 时, 雌鳝的 GSI 最高(表 4)。该研究结果与日本沼虾中的研究结果较为一致, 推测锌可能通过控制性激素的合成与分泌以及发育

相关基因的表达量来发挥对性腺发育的影响^[18]。

另外已有研究证明,维生素 E 可通过调节鱼类性腺中类固醇类激素的生物合成、维持卵膜结构的完整性等,发挥对亲体繁殖性能的促进作用^[19]。在斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)亲鱼饲料中添加维生素 E,其受精卵卵径和油球直径显著增大,并且仔鱼全长显著增加^[20]。添加维生素 E 还能够提高黄河鲈雌鱼的孵化率,改善雄鱼精子质量^[21]。当饲料中维生素 E 添加量为 200 mg/kg 时,雌性黄鳝的性腺系数、产卵力和孵化率指标相比低浓度添加组显著提高,繁殖性能得到有效改善^[12]。本研究的结果也显示 170 mg/kg 维生素 E 添加时,雌鳝的性腺指数最高,并且更高浓度的维生素 E 并没有进一步提高黄鳝的性腺指数(表 4)。这表明,当饲料中维生素 E 的含量可以满足黄鳝繁殖期的营养需求时,可提高其繁殖性能,过量添加对其繁殖性能无明显促进作用。

3.3 微量元素锌对雌鳝肌肉粗脂肪含量的影响

脂类物质代谢是能量代谢的重要组成部分,脂类为生物体提供能量以维持生理稳定及能量平衡^[22-23]。在黄颡鱼(*Perca flavescens*)中,饲料中高水平的锌元素添加降低了组织中粗脂肪的含量^[24]。西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)肌肉中粗脂肪含量随着饲料锌水平的增加而逐渐下降^[25]。同样地,饲料中高水平的锌含量使得河蟹肝胰腺及肌肉组织中脂肪沉积下降^[26]。在本研究条件下,微量元素锌是影响黄鳝肌肉粗脂肪含量的第一影响要素,并且高浓度锌(60 mg/kg)造成肌肉粗脂肪含量的显著下降(表 6)。

3.4 微量元素锌、硒、维生素 E 对雌鳝抗氧化能力的影响

抗氧化酶是生物体抗氧化系统的重要组成部分,在虹鳟中,饲料锌的缺乏导致肝脏 SOD 活性显著降低^[27]。在建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)中,随着饲料锌浓度逐渐提高至 40.80 mg/kg,其血清和肝胰腺中 SOD 活性逐渐升高^[28]。在本研究中,饲料锌浓度是影响 SOD 活性的第一主要因子,并且随着锌浓度的升高 SOD 活性逐渐上升(表 8)。这说明微量元素锌的加入提高了黄鳝肝脏的抗氧化能力,锌元素主要通过抵御蛋白糖化,诱导金

属硫蛋白形成以及与一些抗氧化酶相互作用发挥抗氧化保护作用^[29]。丙二醛(MDA)含量是另外一个可以反映机体抗氧化能力的可靠指标,在本研究中,饲料中高浓度的锌、硒、维生素 E 都引起了黄鳝肝脏 MDA 含量的显著上升(表 8)。综合 SOD 活性和 MDA 含量两个指标,最高浓度维生素 E (370 mg/kg)添加可造成黄鳝肝脏 SOD 活性下降及 MDA 含量上升,这暗示当维生素 E 添加过量时,会引起肝脏过氧化反应升高从而对黄鳝肝脏性能造成损害。而饲料中高浓度锌(60 mg/kg)、硒(1.97 mg/kg)添加则引起黄鳝 SOD 以及 MDA 的增加,但是锌、硒对 MDA 含量的影响极差值小于维生素 E (表 8),因此主要以维生素 E 对 MDA 的影响作为参考,并得出最有利于黄鳝肝脏抗氧化能力提高的组合为 40 mg/kg 锌、1.03 mg/kg 硒、270 mg/kg 维生素 E 添加。

4 结论

通过对生长性能、肌肉营养成分及肝脏抗氧化能力指标的分析发现,根据黄鳝不同的养殖目的,3 个微量元素在饲料中的添加量应适当调整。最有利于黄鳝生长的饲料添加量为 0.66 mg/kg 硒、20 mg/kg 锌、170 mg/kg 维生素 E;饲料中添加 40 mg/kg 锌、1.03 mg/kg 硒、270 mg/kg 维生素 E 可显著提高黄鳝肝脏的抗氧化能力。

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] Lin S M, Lin X, Yang Y, et al. Comparison of chelated zinc and zinc sulfate as zinc sources for growth and immune response of shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture*, 2013, 406-407: 79-84.
- [3] Wang J, Wang W X. Optimal dietary requirements of zinc in marine medaka *Oryzias melastigma*: Importance of daily net flux[J]. *Aquaculture*, 2015, 448: 54-62.
- [4] Antony Jesu Prabhu P, Schrama J W, Kaushik S J. Mineral requirements of fish: A systematic review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2016, 8(2): 172-219.
- [5] Council N R. Nutrient Requirements of Fish[M]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1993.

- [6] Watanabe T, Kiron V, Satoh S. Trace minerals in fish nutrition[J]. Aquaculture, 1997, 151(1-4): 185-207.
- [7] Yu H J, Liu J Q, Bock A, et al. Engineering glutathione transferase to a novel glutathione peroxidase mimic with high catalytic efficiency. Incorporation of selenocysteine into a glutathione-binding scaffold using an auxotrophic expression system[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2005, 280(12): 11930-11935.
- [8] Swain P, Das R, Das A, et al. Effects of dietary zinc oxide and selenium nanoparticles on growth performance, immune responses and enzyme activity in rohu, *Labeo rohita* (Hamilton)[J]. Aquaculture Nutrition, 2019, 25(2): 486-494.
- [9] Shi Q H. Interaction and mechanism of selenium and vitamin E[J]. Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary Medicine, 2010, 35(2): 12-13. [史清河. 硒与维生素 E 的互作及机理[J]. 浙江畜牧兽医, 2010, 35(2): 12-13.]
- [10] Le K T, Fotedar R, Partridge G. Selenium and vitamin E interaction in the nutrition of yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*): Physiological and immune responses[J]. Aquaculture Nutrition, 2014, 20(3): 303-313.
- [11] Tan Q S, He R G, Xie S Q, et al. Effect of dietary supplementation of vitamins A, D₃, E, and C on yearling rice field eel, *Monopterus albus*: Serum indices, gonad development, and metabolism of calcium and phosphorus[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2007, 38(1): 146-153.
- [12] Zhang G H, He R G, Zhang S P, et al. Effect of dietary vitamin E on the reproductivity of *Monopterus albus*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 25(2): 177-181. [张国辉, 何瑞国, 张世萍, 等. 维生素 E 对黄鳝繁殖性能的影响[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(2): 177-181.]
- [13] Feng L, Tan L N, Liu Y, et al. Influence of dietary zinc on lipid peroxidation, protein oxidation and antioxidant defence of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. jian)[J]. Aquaculture Nutrition, 2011, 17(4): e875-e882.
- [14] Yue C F, Wang T T, Wang Y F, et al. Effect of combined photoperiod, water calcium concentration and pH on survival, growth, and moulting of juvenile crayfish (*Procambarus clarkii*) cultured under laboratory conditions[J]. Aquaculture Research, 2009, 40(11): 1243-1250.
- [15] Kong Y Q, Ding Z L, Zhang Y X, et al. Dietary selenium requirement of juvenile oriental river prawn *Macrobrachium nipponense*[J]. Aquaculture, 2017, 476: 72-78.
- [16] Wang W F, Mai K S, Zhang W B, et al. Dietary selenium requirement and its toxicity in juvenile abalone *Haliotis discus Hannai* Ino[J]. Aquaculture, 2012, 330-333: 42-46.
- [17] Lin Y H, Shiao S Y. Dietary selenium requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus*[J]. Aquaculture, 2005, 250(1-2): 356-363.
- [18] Zhang M. Effect of dietary zinc on growth and development of female *Macrobrachium nipponense* [M]. East China Normal University, 2004: 22-25. [张梦. 饲料中添加锌对日本沼虾雌虾生长及发育的影响 [M]. 华东师范大学, 2004:22-25.]
- [19] Zhao L, Li Z Q, Wang S, et al. Application and prospect of vitamin E in aquaculture[J]. South China Agriculture, 2020, 14(2): 160-163. [赵琳, 李泽群, 王帅, 等. 维生素 E 在水产养殖中的应用与展望[J]. 南方农业, 2020, 14(2): 160-163.]
- [20] Xiao W P, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of vitamin E and vitamin C on spawning quality of broodstock for grouper *Epinephelus coioides*[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(S2): 214-217. [肖伟平, 刘永坚, 田丽霞, 等. 维生素 E 和维生素 C 对斜带石斑鱼亲鱼产卵质量的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(S2): 214-217.]
- [21] Lee K J, Dabrowski K. Long-term effects and interactions of dietary vitamins C and E on growth and reproduction of yellow perch, *Perca flavescens*[J]. Aquaculture, 2004, 230(1-4): 377-389.
- [22] Sun P, Jin M, Jiao L F, et al. Effects of dietary lipid level on growth, fatty acid profiles, antioxidant capacity and expression of genes involved in lipid metabolism in juvenile swimming crab, *Portunus trituberculatus*[J]. British Journal of Nutrition, 2020, 123(2): 149-160.
- [23] Zheng J L, Luo Z, Hu W, et al. Different effects of dietary Zn deficiency and excess on lipid metabolism in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Aquaculture, 2015, 435: 10-17.
- [24] Levesque H M, Moon T W, Campbell P G C, et al. Seasonal variation in carbohydrate and lipid metabolism of yellow perch (*Perca flavescens*) chronically exposed to metals in the field[J]. Aquatic Toxicology, 2002, 60(3-4): 257-267.
- [25] Moazenzadeh K, Rajabi Islami H, Zamini A, et al. Effects of dietary zinc level on performance, zinc status, tissue composition and enzyme activities of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* (Brandt 1869)[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(4): 1330-1339.
- [26] Luo J X, Zhou Q C, Zhang X S, et al. Dietary zinc levels affects lipid and fatty acid metabolism in hepatopancreas of mud crab (*Scylla paramamosain*)[J]. Aquaculture, 2021, 545: 737274.
- [27] Hidalgo M C, Expósito A, Palma J M, et al. Oxidative stress generated by dietary Zn-deficiency: Studies in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. The International Journal of

- Biochemistry & Cell Biology, 2002, 34(2): 183-193.
- [28] Feng L, Tan L N, Liu Y, et al. Influence of dietary zinc on lipid peroxidation, protein oxidation and antioxidant defence of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. jian)[J]. Aquaculture Nutrition, 2011, 17(4): e875-e882.
- [29] Faure P, Bouvard S, Roucard C, et al. Zinc protects HeLa-tat cells against free radical cytotoxicity induced by glucose[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS), 2005, 18(3): 269-276.

Effect of dietary zinc, selenium, and vitamin E on the growth and antioxidant activity of female *Monopterus albus*

YUE Huamei, FU Peng, DENG Haichao, RUAN Rui, YE Huan, LI Zhong, LI Chuangju

Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: The aim of this study was to evaluate the influence of dietary zinc, selenium, and vitamin E on the growth and antioxidant activity of female Chinese rice field eels (*Monopterus albus*). According to the L9 (3⁴) orthogonal experiment rule, three different concentrations of zinc (20 mg/kg, 40 mg/kg, and 60 mg/kg), selenium (0.66 mg/kg, 1.31 mg/kg, and 1.97 mg/kg), and vitamin E (170 mg/kg, 270 mg/kg, and 370 mg/kg) were chosen to make nine iso-nitrogenous and iso-energetic diets. A total of 1350 two-year-old female rice field eels with the average body weight of (19.67±1.59) g were selected and randomly allocated into nine groups with three replicates per group and 50 fish per replicate. Fish were fed the nine experimental diets for twelve weeks. The results indicated the following: (1) Female rice field eels grew the best when selenium was added at 0.66 mg/kg, compared to the other two graded concentrations ($P<0.05$). However, zinc and vitamin E supplements had no significant effect on growth performance ($P>0.05$). Thus, group 1, with 0.66 mg/kg selenium, 20 mg/kg zinc, and 170 mg/kg vitamin E, showed the best growth, with weight gain and specific growth rate values of 115.04±8.71 and 1.39±0.07, respectively. (2) Vitamin E was the main factor influencing the condition factor (CF). The CF value was higher in the 370 mg/kg vitamin E group than in the 170 mg/kg and 270 mg/kg groups ($P<0.05$). (3) Diets containing 60 mg/kg zinc, 1.31 mg/kg selenium, and 170 mg/kg vitamin E (group 8) showed the highest gonadosomatic index, which was 10.02±1.26. (4) The most important determining factor for the crude lipid parameter was zinc, and the group with 60 mg/kg zinc had higher crude lipid than the other two levels of zinc (20 mg/kg and 40 mg/kg) ($P<0.05$). (5) Fish fed diets containing 60 mg/kg zinc showed higher hepatic superoxide dismutase activity than the other two supplemented level groups ($P<0.05$). The hepatic malondialdehyde concentration was lower in the 270 mg/kg vitamin E group than in the other two added supplemented level groups ($P<0.05$), while the 60 mg/kg zinc group had a higher hepatic malondialdehyde level than the other two zinc addition concentration groups ($P<0.05$). In summary, a diet with 0.66 mg/kg selenium, 20 mg/kg zinc, and 170 mg/kg vitamin E was most suitable for the growth of female *M. albus*. Dietary additions of 40 mg/kg zinc, 1.03 mg/kg selenium, and 270 mg/kg vitamin E significantly improved the antioxidant capacity of female *M. albus*.

Key words: *Monopterus albus*; zinc; selenium; vitamin E; growth; antioxidant capacity

Corresponding author: LI Chuangju. E-mail: lcj@yfi.ac.cn