

Huang H, Wang Z R, Zhou Q B, *et al.* Selenium yeast on growth, tissue selenium content, and antioxidant capacity of *Monopterus albus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(2): 022615. [黄浩, 王自蕊, 周秋白, 等. 酵母硒对黄鳝生长、抗氧化和组织硒含量的影响 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(2): 022615.]

## 酵母硒对黄鳝生长、抗氧化和组织硒含量的影响

黄浩<sup>1</sup> 王自蕊<sup>1,2,3</sup> 周秋白<sup>1,2,3</sup> 陈恺文<sup>1</sup> 陈希环<sup>1</sup> 郭晓涵<sup>1</sup>  
张旭婷<sup>1</sup> 蔡惠玲<sup>1</sup> 刘瑜<sup>4</sup>

(1. 江西农业大学动物科学技术学院, 南昌 330045; 2. 江西农业大学特种水产研究所, 南昌 330045; 3. 南昌市特色水生生物营养生理与健康养殖重点实验室, 南昌 330045; 4. 佛山大学动物科技学院, 佛山 528225)

**摘要:** 为阐明饲料硒水平对黄鳝(*Monopterus albus*)生长及抗氧化性能的影响和生产富硒黄鳝, 设计了6组实验, 每组4个重复, 每个重复放养35尾黄鳝[均重(7.71±0.01) g]。以酵母硒(硒含量2000 mg/kg)为硒源在基础饲料(对照组, 硒水平0.92 mg/kg)中添加硒, 配制硒实测值为1.39、1.85、2.91、4.59、9.08 mg/kg五组实验饲料, 进行了8周的养殖实验。结果: (1)不同硒水平饲料对黄鳝存活率、增重率、特定生长率及饲料系数均无显著影响( $P>0.05$ ); (2) 1.85—9.08 mg/kg组血清谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活力、1.85 mg/kg组血清总超氧化物歧化酶(T-SOD)及过氧化氢酶(CAT)活力及4.59 mg/kg组总抗氧化能力(T-AOC)均显著高于对照组( $P<0.05$ ), 2.91—4.59 mg/kg组肝脏GSH-px活力、1.85 mg/kg组T-SOD、T-AOC及CAT活力均显著高于对照组( $P<0.05$ ); (3)以血清及肝脏GSH-px活力为评价指标, 黄鳝饲料适宜硒含量为2.68—2.93 mg/kg; (4) 1.39—2.91 mg/kg组全鱼粗脂肪含量显著低于对照组( $P<0.05$ ); (5) 1.39—9.08 mg/kg组肌肉、肝脏及肠道硒含量、1.85—9.08 mg/kg组肾脏及皮肤硒含量以及2.91—9.08 mg/kg组脾脏硒含量均显著高于对照组( $P<0.05$ ), 各组织硒蓄积量: 肝脏>皮肤>肾脏>脾脏>肌肉>肠道。结果表明: 黄鳝对饲料酵母硒具有较好的耐受力, 饲料硒含量低于9.08 mg/kg对黄鳝生长性能无显著影响; 适量提升饲料硒含量可改善黄鳝抗氧化能力, 7.71 g幼鳝适宜饲料硒含量为2.68—2.93 mg/kg。此外, 提高饲料硒含量可促进黄鳝肌肉硒沉积, 有利于生产富硒黄鳝, 但需避免过量硒对黄鳝抗氧化功能的抑制效应。

**关键词:** 硒; 生长性能; 抗氧化性能; 组织硒含量; 黄鳝

**中图分类号:** S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)02-022615-10

**doi:** 10.3724/1000-3207.2025.2025.0124 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.0000.0000



硒具有抗氧化、抗衰老、保护细胞损伤、提高免疫力、预防癌变等多重生物学功能, 在1973年被世界卫生组织列入人体必需微量营养目录<sup>[1-4]</sup>。人体硒摄入量与当地土壤硒含量密切相关, 中国是世界上缺硒最为严重的国家之一, 51%的地域处于硒资源匮乏状态<sup>[5]</sup>。中国不同地区居民硒元素平均摄入量为44.6 μg/d, 低于WS/T 578.3-2017《中国居民膳食营养素参考摄入量》推荐硒摄入量60 μg/d标准<sup>[6]</sup>。因此, 生产富硒食品对改善人均硒摄入量不足现状具有重要意义。肉类和谷物类是我国居

民摄入硒的主要食物源, 积极开展富硒农产品的研究与利用对提高我国居民硒营养状况具有重要意义<sup>[7]</sup>。酵母(Yeast)可以从环境中吸收硒离子, 并将其稳定的整合到细胞结构之中而积累大量硒, 其有机硒含量可高达95%左右, 且以硒代蛋氨酸为主要形式<sup>[7,8]</sup>。酵母硒是经过美国FDA和欧盟认证的有机硒源, 在清除氧自由基、抑制脂质过氧化、激发免疫反应等多方面的效果均明显优于无机硒<sup>[9,10]</sup>。酵母硒在满足动物对硒的生理需求后可以硒代蛋氨酸的形式储存于动物体内的蛋白质中, 在机体缺

收稿日期: 2025-04-18; 修订日期: 2025-08-11

基金项目: 国家特色淡水鱼产业技术体系(CARS-46)资助 [Supported by the China Agriculture Research System (CARS-46)]

作者简介: 黄浩(1999—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 2471231361@qq.com

通信作者: 周秋白(1965—), 男, 博士, 教授; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: zhouqiubai@163.com

硒时通过降解含硒代蛋氨酸的蛋白质维持自身对硒的生理需求<sup>[11, 12]</sup>。研究发现, 适当提高饲料酵母硒含量可以有效提高斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)<sup>[10]</sup>鱼体硒含量; 饲料中添加酵母硒能够增加杂交鲟(*Acipenser baerii* ♂ × *Acipenser schrenckii* ♀)幼鱼全鱼及肝脏硒含量, 提高血浆谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性; 饲料中添加酵母硒可提升鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)及尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)全鱼、肌肉、肝脏等组织硒含量<sup>[13–15]</sup>。富硒水产品可作为人类补充硒的一种有效途径, 鱼肉硒含量高且主要以有机形式存在可以被人体高效地吸收保留<sup>[13]</sup>。然而, 硒也具有一定毒性, 硒摄入过量可扰乱机体抗氧化系统机能的平衡, 造成组织氧化损伤<sup>[16, 17]</sup>。硒的生理毒性与其化学状态密切相关, 在饲料硒含量相同条件下, 无机硒对大西洋鲑(*Salmo salar*)的生理毒性强于有机硒<sup>[18]</sup>。

黄鳝(*Monopterus albus*)营养丰富, 味甘咸, 性温, 具有补气养血、温阳健脾、滋补肝肾、祛风通络、强筋壮骨等医疗保健功能, 鳝血、鳝肉均有药用价值; 此外, 黄鳝含肉率高且无肌间刺, 深受消费者喜爱, 是我国重要的名特经济鱼类<sup>[19]</sup>。2023年全国黄鳝养殖总产量已达35.5万吨<sup>[20]</sup>。随着黄鳝养殖业的迅猛发展, 黄鳝营养需求研究也取得了长足进步, 但目前黄鳝对硒的需要量仍然未知。因此, 本研究评估了不同硒含量饲料对黄鳝生长、抗氧化性能和组织硒含量的影响, 旨在探究黄鳝对酵母硒的需要量及硒在黄鳝组织的沉积规律。研究结果可为黄鳝配合饲料及富硒黄鳝的科学生产提供数据支撑, 助力黄鳝养殖业的发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

基础饲料配方及营养成分见表1, 对照组饲料粗蛋白49.86%, 鱼粉、豆粕和玉米蛋白粉为主要蛋白源; 粗脂肪含量7.82%, 鱼油、豆油1:1混合作为脂肪源。另在基础饲料中分别添加0.5、1、2、4、8 mg/kg酵母硒, 一共配制6种实验饲料。实验所用酵母硒购自江西大佑农生物科技有限公司。所有原料均经粉碎后过80目筛, 按配比(表1)进行称量, 将碎米粉作为酵母硒载体预先混匀, 随后以逐级混匀法将所有固态原料混匀, 然后加入鱼油和豆油, 20%的水混匀后用60型螺旋挤压机(江西省普菲通进出口贸易有限公司)制粒, 待自然风干后于阴凉干燥处保存。各组饲料硒实测含量分别为0.92、1.39、1.85、2.91、4.59和9.08 mg/kg。鱼粉和油类购自江西大佑农生物科技有限公司, 预混料和复合

表1 基础组配方(干物质)

Tab. 1 Basic feed formulation (dry matter)

| 原料Ingredient                                          | 含量 Content (%) |
|-------------------------------------------------------|----------------|
| 鱼粉Fishmeal <sup>1</sup>                               | 50             |
| 豆粕Soybean meal <sup>2</sup>                           | 12             |
| 复合蛋白粉Concentrate protein meal <sup>3</sup>            | 5              |
| 玉米蛋白粉Corn gluten meal                                 | 3              |
| 小麦Wheat meal <sup>4</sup>                             | 21             |
| 碎米Broken rice                                         | 3              |
| 磷酸二氢钙Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | 2              |
| 预混料Premix <sup>5</sup>                                | 0.5            |
| 鱼油:豆油Fish oil:Soybean oil (1:1)                       | 3              |
| 氯化胆碱Choline chloride                                  | 0.5            |
| 营养成分Proximate composition                             |                |
| 粗蛋白Crude protein                                      | 49.86          |
| 粗脂肪Crude lipid                                        | 7.82           |
| 灰分Ash                                                 | 13.06          |
| 硒水平Selenium content (mg/kg)                           | 0.92           |

注: <sup>1</sup>鱼粉为65%秘鲁蒸汽鱼粉The fish meal was 65% Peru steam fish meal; <sup>2</sup>豆粕为46%散装豆粕Soybean meal is 46% bulk soybean meal; <sup>3</sup>复合蛋白粉由鸡肉粉、蚯蚓粉、大豆浓缩蛋白按照1:1:3组成The compound protein powder is composed of chicken powder, earthworm powder and soybean protein concentrate according to 1:1:3; <sup>4</sup>小麦为散装二级小麦Wheat is bulk secondary wheat; <sup>5</sup>预混料为每千克饲料提供The premix provide the following per kg of diets: VA 6000.0 IU, VD 2000.0 IU, VK 5.0 mg, VB<sub>1</sub> 15.0 mg, VB<sub>2</sub> 15.0 mg, 烟酸niacin 30.0 mg, VB<sub>6</sub> 10.0 mg, 泛酸pantothenate acid 25.0 mg, 叶酸folic acid 0.2 mg, VB<sub>12</sub> 0.03 mg, 生物素biotin 0.2 mg, 肌醇inositol 100 mg, VC 200.0 mg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.4 mg, KI 0.8 mg, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 10.0 mg, MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 20.0 mg, ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 50.0 mg, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 150.0 mg, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 500.0 mg, NaCl 1000.0 mg

蛋白粉为本实验自制, 其余原料均购自南昌市经济技术开发区诚信饲料店。

### 1.2 实验鱼及养殖管理

实验中使用的黄鳝是江西农业大学水产养殖基地人工培育的鳝苗, 从中筛选出840尾体质健壮、均重为(7.71±0.01) g的鳝苗随机分到24个长×宽×高: 88 cm×66.5 cm×64 cm的饲养箱中, 每个饲养箱放35尾, 分成6组, 每组4个重复。饲养箱中放置覆盖面积约占水面2/3水葫芦用以净化水质并给黄鳝提供隐蔽环境, 饲养箱水深30 cm。实验养殖场所设在江西农业大学水产养殖基地, 时间为2023年9月6日至2023年10月31日合计56d。每日18:00于食台定点投喂实验黄鳝至表观饱食后停止投喂, 并记录每次投饲量。饲养管理: 每日投喂前测定记录水温及黄鳝摄食状况(22.3—32.5℃); 每周抽测pH 6.5—7.5, 溶解氧4—6 mg/L, 氨氮含量<0.2 mg/L, 亚硝酸盐<0.10 mg/L, 根据测定结果进行换水, 换水

频率为1—2次/周以保持养殖箱内水质良好。

### 1.3 样品采集

在养殖实验结束后停食1d, 随后进行各饲养箱黄鳢的称重计数, 用于计算黄鳢生长性能指标。每个饲养箱中随机取4尾黄鳢(合计每组16尾)运至实验室解剖取样。解剖取样流程: (1)采血, 准确称重、测量体长后将黄鳢固定进行断尾采血, 用5 mL 无酶EP管收集血液样品后将其转入4℃冰箱静置12h, 待解剖取样结束后在4℃条件下以3500 r/min离心15min获取血清样本, 将血清样本-80℃冻存用于检测抗氧化指标; (2)解剖, 采血完成后将黄鳢置于无菌冰盘上, 依次取内脏团、肝脏、肠道、脾脏、性腺组织及胴体称重用于计算形态学参数; 剪取部分肝脏样品搜集于1.5 mL冻存管中, 液氮速冻后转移至-80℃超低温冰箱保存用于后续肝脏抗氧化指标检测; (3)用自封袋搜集各组取样鳢鱼剩余脾脏、肾脏、肝脏、肠道、皮肤及肌肉样品, -20℃保存用于后续各组织硒含量检测; (4)全鱼营养成分样品, 每组搜集4尾黄鳢全鱼样品, -20℃保存用于检测全鱼营养组成。

### 1.4 生长性能及形态参数计算

存活率(SR, %)= $N_t/N_0 \times 100$

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

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

饲料系数(FCR)= $W_f/(W_t - W_0)$

摄食率RL (%/d)= $100 \times W_f/[t \times (W_1 + W_2)/2]$

脏体比(VSI)= $W_v/W \times 100$

肝体比(HSI)= $W_h/W \times 100$

胴体比(CP)= $W_c/W \times 100$

肠体比(ESI)= $W_e/W \times 100$

性体指数(GSI)= $W_g/W \times 100$

肥满度(CF, g/cm<sup>3</sup>)= $W/L^3 \times 100$

式中,  $N_t$ 与 $N_0$ 分别为实验黄鳢终末及初始尾数,  $W_t$ 、 $W_0$ 、 $W_f$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 分别为实验黄鳢终末平均重量、初始平均重量、摄入饲料重量、初始总重、终末总重(g),  $t$ 为实验养殖天数(d);  $W_v$ 、 $W_h$ 、 $W_c$ 、 $W_e$ 、 $W_g$ 、 $W$ 及 $L$ 分别代表被取样黄鳢的内脏重、肝脏重、胴体重、肠道重、性腺重、全鱼重(g)和体长(cm)。

### 1.5 营养成分及硒含量检测方法

全鱼及饲料粗蛋白、粗脂肪、粗灰分及水分测定均参照国家标准, 标准号分别为GB5009.5—2016、GB/T 6433—2025、GB/T 6438—2007及GB/T 6435—2014。饲料及黄鳢不同组织硒含量检测采用国家标准(GB 5009.93—2017)中第三法, 即电感耦合等离子体质谱法。硒含量检测同时参考了

唐永春等<sup>[21]</sup>描述的方法进行适当调整, 饲料及不同组织样品均采用石墨消解法进行消解, 每组不同样品均制备6个检测平行: (1)冷消解, 准确称取0.5 g样品(精确至0.001 g)于消化管中, 加入8 mL HNO<sub>3</sub>和4 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 室温静置24h; (2)加温消解, 按照先后顺序设置程序为100℃, 120min; 120℃, 60min; 150℃, 120min, 最后在170℃下进行赶酸, 直至试样剩余量约0.5—1.0 mL(切勿烧干)后取出, 待溶液冷却后转移至50 mL容量瓶中并用蒸馏水定容。测定仪器电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国赛默飞世尔科技公司), 将消解液注入电感耦合等离子体质谱仪中测定, 采用碰撞模式(KED)下定性、定量分析。最终结果表示为每千克样品的硒含量。

### 1.6 肝脏和血清抗氧化能力测定

肝脏和血清抗氧化参数均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒, 所有样品测定过程严格按照试剂盒说明书进行, 包括总抗氧化能力(T-AOC, 试剂盒编号A015-2-1)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-px, 试剂盒编号A005-1-2)、总超氧化物歧化酶(T-SOD, 试剂盒编号)及过氧化氢酶(CAT, 试剂盒编号A001-3-2)活性, 丙二醛(MDA, 试剂盒编号A003-1-2)及肝脏总蛋白(TP, 试剂盒编号A045-2-2)含量。

### 1.7 数据处理及分析

结果以平均值±标准误(mean±SE)进行表示, 用SPSS 23.0统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并采用Duncan氏多重比较,  $P < 0.05$ 为差异显著。不同组织硒沉积规律参照周磊涛等<sup>[22]</sup>描述的方法, 基于组织硒含量与饲料硒水平进行线性拟合分析, 以斜率大小为评估标准, 分析黄鳢各组织硒沉积规律。采用周磊涛等<sup>[22]</sup>使用的折线回归分析法, 以肝脏及血清GSH-px活性为评价指标计算黄鳢适宜硒添加量。

## 2 结果

### 2.1 不同硒水平饲料对黄鳢生长性能及形态参数的影响

如表2所示, 饲料硒水平在9.08 mg/kg以内对黄鳢幼鳢的成活率、增重率、特定生长率、饲料系数、摄食率及形态参数(肥满度、胴体比、脏体比、肝体比、肠体比及性体指数)均无显著影响( $P > 0.05$ )。

### 2.2 不同硒水平饲料对黄鳢组织硒含量的影响

由表3所示, 1.39—9.08 mg/kg组黄鳢肌肉、肝脏与肠道硒含量均显著高于对照组( $P < 0.05$ ), 1.85—9.08 mg/kg组黄鳢皮肤及肾脏硒含量均显著高于对

对照组( $P<0.05$ ), 2.91—9.08 mg/kg组黄鳝脾脏硒含量显著高于对照组( $P<0.05$ )。此外, 各组织硒含量均随酵母硒添加量增加呈上升趋势, 在9.08 mg/kg组最高。各组织硒含量与饲料硒水平线性拟合分析结果如图1所示, 以线性拟合方程斜率作为硒沉积难易程度评估标准可知黄鳝不同组织硒沉积规律: 肝脏(斜率0.1505)>皮肤(0.1476)>肾脏(0.1393)>脾脏(0.1271)>肌肉(0.1266)>肠道(0.1157)。

### 2.3 不同硒水平饲料对黄鳝血清、肝脏抗氧化性能的影响

如表4所示, 黄鳝血清T-SOD、CAT活力在1.85 mg/kg组最高且显著高于对照组( $P<0.05$ ); T-AOC活力在4.59 mg/kg组最高且显著高于对照组及9.08 mg/kg组( $P<0.05$ ); GSH-px活力在1.85—9.08 mg/kg组均显著高于对照组( $P<0.05$ ); MDA在1.39 mg/kg组最低, 但未产生显著差异( $P>0.05$ )。黄鳝肝脏T-

SOD、T-AOC、CAT活力在1.85 mg/kg组最高且均显著高于对照组( $P<0.05$ ); GSH-px活力在2.91—4.59 mg/kg组均显著高于对照组及9.08 mg/kg组( $P<0.05$ ); MDA在1.39 mg/kg组最低且显著低于9.08 mg/kg组( $P<0.05$ )。以血清及肝脏GSH-px活力为评价指标, 通过折线方程分析得出黄鳝饲料适宜硒含量为2.68—2.93 mg/kg (图2)。

### 2.4 不同硒水平饲料对黄鳝全鱼营养成分的影响

由表5可知, 饲料硒水平低于9.08 mg/kg对黄鳝幼鳝全鱼水分、粗蛋白和灰分均无显著影响( $P>0.05$ ); 1.39—2.91 mg/kg组黄鳝全鱼粗脂肪含量显著低于对照组( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同硒水平饲料对黄鳝生长性能的影响

已有研究表明硒对鱼类的促生长作用与硒的

表2 饲料硒水平对黄鳝生长性能及形态参数的影响

Tab. 2 Effects of dietary Se levels on growth and morphological parameters of *Monopterus albus* (mean±SE,  $n=4$ )

| 指标Index                      | 饲料硒水平Dietary selenium level (mg/kg) |              |              |              |              |              |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                              | 0.92                                | 1.39         | 1.85         | 2.91         | 4.59         | 9.08         |
| 生长性能Growth performance       |                                     |              |              |              |              |              |
| 初始体重(g)                      | 7.71±0.09                           | 7.71±0.09    | 7.71±0.09    | 7.71±0.09    | 7.71±0.09    | 7.71±0.03    |
| 终末体重(g)                      | 27.29±1.77                          | 28.59±1.11   | 26.68±1.37   | 28.19±1.97   | 26.98±0.54   | 26.25±1.55   |
| 存活率SR (%)                    | 97.14±1.65                          | 98.57±0.82   | 96.43±2.14   | 97.14±2.02   | 92.86±6.23   | 96.43±1.37   |
| 增重率WGR (%)                   | 246.52±26.04                        | 265.20±14.31 | 233.07±16.79 | 255.56±28.99 | 223.51±16.92 | 240.20±20.87 |
| 特定增长率SGR (%/d)               | 2.20±0.13                           | 2.31±0.07    | 2.14±0.09    | 2.25±0.15    | 2.09±0.98    | 2.15±0.11    |
| 饲料系数FCR                      | 0.97±0.04                           | 0.90±0.03    | 0.98±0.05    | 0.95±0.06    | 0.88±0.02    | 0.93±0.04    |
| 摄食率RL (%/d)                  | 1.53±0.05                           | 1.56±0.15    | 1.53±0.09    | 1.34±0.11    | 1.59±0.05    | 1.65±0.15    |
| 形态参数Morphological parameters |                                     |              |              |              |              |              |
| 肥满度CF (g/cm <sup>3</sup> )   | 0.23±0.01                           | 0.23±0.01    | 0.23±0.01    | 0.22±0.01    | 0.23±0.01    | 0.21±0.01    |
| 胴体比CP                        | 78.88±1.51                          | 81.38±0.46   | 80.93±0.36   | 80.99±0.51   | 81.23±0.28   | 80.59±0.83   |
| 脏体比VSI                       | 10.83±0.36                          | 11.04±0.25   | 11.45±0.21   | 10.77±0.25   | 11.31±0.35   | 10.58±0.29   |
| 肝体比HSI                       | 7.48±0.32                           | 7.57±0.22    | 7.96±0.14    | 7.34±0.18    | 7.48±0.39    | 7.13±0.24    |
| 肠体比ISI                       | 1.60±0.06                           | 1.57±0.07    | 1.71±0.08    | 1.73±0.07    | 1.68±0.07    | 1.64±0.06    |
| 性体指数GSI                      | 0.50±0.06                           | 0.45±0.63    | 0.46±0.08    | 0.47±0.07    | 0.37±0.05    | 0.48±0.06    |

注: 同一行相同右上角含有不同英文上标字母表示有显著差异( $P<0.05$ ); 下同

Note: Different superscripts in the upper right corner indicate significant differences ( $P<0.05$ ); The same applies below

表3 不同硒水平饲料对黄鳝组织硒含量的影响

Tab. 3 Effects of different dietary selenium levels on selenium content in tissues of *Monopterus albus* (mean±SE,  $n=6$ )

| 指标Index     | 饲料硒水平Dietary selenium level (mg/kg) |                        |                        |                        |                        |                        |
|-------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             | 0.92                                | 1.39                   | 1.85                   | 2.91                   | 4.59                   | 9.08                   |
| 肌肉Muscle    | 0.11±0.00 <sup>a</sup>              | 0.19±0.00 <sup>b</sup> | 0.45±0.01 <sup>c</sup> | 0.58±0.01 <sup>d</sup> | 0.95±0.01 <sup>e</sup> | 1.16±0.03 <sup>f</sup> |
| 肝脏Liver     | 0.29±0.01 <sup>a</sup>              | 0.51±0.01 <sup>b</sup> | 0.62±0.02 <sup>c</sup> | 0.88±0.04 <sup>d</sup> | 1.02±0.07 <sup>e</sup> | 1.62±0.01 <sup>f</sup> |
| 皮肤Skin      | 0.29±0.01 <sup>a</sup>              | 0.35±0.01 <sup>a</sup> | 0.43±0.01 <sup>b</sup> | 0.60±0.01 <sup>c</sup> | 0.75±0.03 <sup>d</sup> | 1.51±0.05 <sup>e</sup> |
| 肾脏Kidney    | 0.33±0.00 <sup>a</sup>              | 0.39±0.01 <sup>a</sup> | 0.57±0.04 <sup>b</sup> | 0.73±0.01 <sup>c</sup> | 0.88±0.02 <sup>d</sup> | 1.50±0.04 <sup>e</sup> |
| 肠道Intestine | 0.41±0.02 <sup>a</sup>              | 0.59±0.03 <sup>b</sup> | 0.65±0.02 <sup>c</sup> | 0.88±0.02 <sup>d</sup> | 1.09±0.02 <sup>e</sup> | 1.41±0.02 <sup>f</sup> |
| 脾脏Spleen    | 0.59±0.04 <sup>a</sup>              | 0.65±0.02 <sup>a</sup> | 0.83±0.09 <sup>a</sup> | 1.18±0.16 <sup>b</sup> | 1.33±0.17 <sup>b</sup> | 1.64±0.01 <sup>c</sup> |

生物学功能密切相关, 硒对含硒蛋白的正向调节可有效改善鱼类组织细胞生长速率及生长激素的分泌<sup>[23-25]</sup>。饲料中补充硒元素已经被证实能够改善斜带石斑鱼<sup>[10]</sup>、鲫(*Carassius auratus gibelio*)<sup>[26]</sup>、大西洋鲑<sup>[18]</sup>及军曹鱼(*Rachycentron canadum*)<sup>[27]</sup>等多种鱼类的生长性能。硒对鱼类生长性能的促进作用与其提升鱼类对饲料养分的利用率高度相关。一方面, 硒能够改善鱼类肠道抗氧化功能, 抑制肠道氧化损伤、维持肠道正常结构及功能; 另一方面, 硒还可有效提升肠道蛋白酶和淀粉酶活性, 增加可溶性蛋白含量和微绒毛数量, 促进肠道对饲

料养分的消化吸收<sup>[28]</sup>。在本实验中, 饲料中添加酵母硒对黄鳝成活率、增重率及特定生长率均无显著影响, 可能与对照组基础饲料硒水平(0.92 mg/kg, 50%鱼粉)已经满足黄鳝硒需求有关。与本研究结果相似, 卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)及杂交鲟幼鱼基础饲料硒元素含量较高时, 额外补充硒元素对二者的生长性能均无显著影响<sup>[13, 29]</sup>。

### 3.2 不同硒水平饲料对黄鳝组织硒含量的影响

已有研究表明, 动物摄取硒后由小肠进行吸收, 如硒代蛋氨酸(Se-Met), Se-Met是大多数动物摄食硒的主要化学形式, 它是由主动转运机制在前肠被

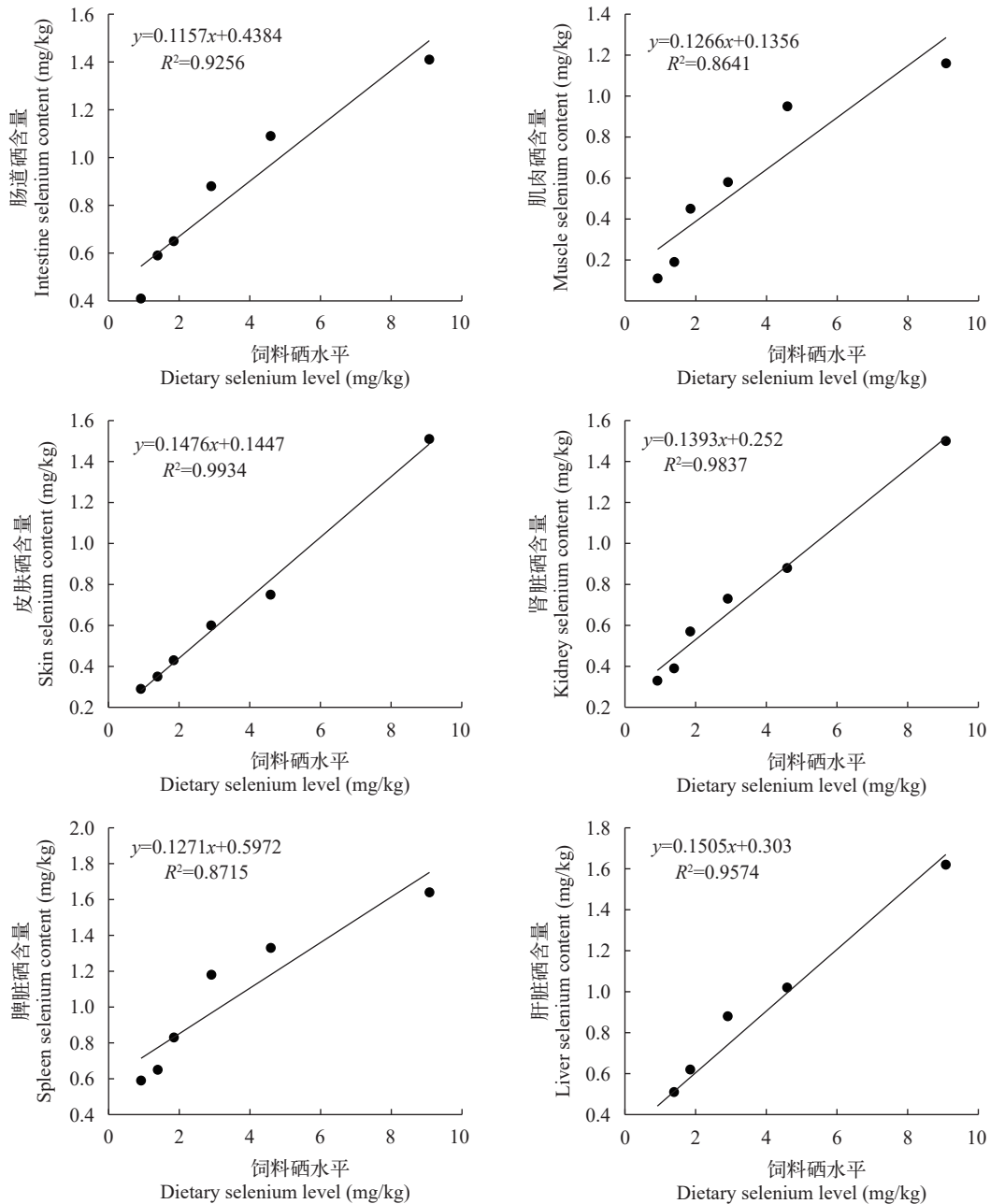


图1 黄鳝不同组织硒含量与饲料硒水平的关系

Fig. 1 Relationship between selenium content in different tissues of *Monopterus albus* and dietary selenium content

吸收,随后转运至肝脏进一步代谢和利用,其中部分Se-Met可非特异性地取代蛋氨酸(Met)结合到蛋白质中<sup>[30,31]</sup>。肝脏和肾脏是鱼类调节硒代谢的主要器官,血浆中的硒运输至肝脏代谢,经肝脏合成为硒蛋白后运输到肝外组织或由肾脏排泄<sup>[31]</sup>。在本实验中,随着饲料硒水平的升高,硒在黄鳝皮肤、肝脏、肾脏、肠、脾组织含量显著升高,投喂对照组饲料(50%鱼粉)8周后,黄鳝不同组织中的硒浓度:脾(0.59 mg/kg)>肠道

(0.41 mg/kg)>肾脏(0.33 mg/kg)>肝脏(0.29 mg/kg)>皮肤(0.29 mg/kg)>肌肉(0.11 mg/kg)。将各组织硒含量与饲料硒水平进行相关分析,比较不同直线的斜率大小作为组织硒沉积难易程度的标准可得:肝脏(0.1505)>皮肤(0.1476)>肾脏(0.1393)>脾脏(0.1268)>肌肉(0.1266)>肠道(0.1157)。与本实验对照组研究结果相似,黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)不同组织硒元素沉积规律同样为脾脏>肝脏>肾脏>前肠,在其他组织中则含量较低<sup>[32]</sup>。类

表 4 饲料硒水平对黄鳝血清、肝脏抗氧化指标的影响

Tab. 4 Effects of dietary selenium levels on antioxidant indexes in serum and liver of *Monopterus albus* (mean±SE, n=4)

| 指标Index                     | 饲料硒水平Dietary Selenium level (mg/kg) |                            |                           |                           |                           |                            |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                             | 0.92                                | 1.39                       | 1.85                      | 2.91                      | 4.59                      | 9.08                       |
| 血清Serum                     |                                     |                            |                           |                           |                           |                            |
| 总超氧化物歧化酶T-SOD (U/mL)        | 22.00±1.35 <sup>a</sup>             | 23.30±0.90 <sup>ab</sup>   | 25.51±0.77 <sup>b</sup>   | 23.70±0.80 <sup>ab</sup>  | 24.04±1.50 <sup>ab</sup>  | 23.77±0.60 <sup>ab</sup>   |
| 谷胱甘肽过氧化物酶GSH-px (U/mL)      | 398.94±8.67 <sup>a</sup>            | 410.58±5.89 <sup>a</sup>   | 469.84±15.66 <sup>b</sup> | 533.33±3.67 <sup>d</sup>  | 492.06±9.16 <sup>bc</sup> | 507.94±16.50 <sup>cd</sup> |
| 总抗氧化能力T-AOC (mmol/L)        | 0.28±0.02 <sup>a</sup>              | 0.32±0.04 <sup>ab</sup>    | 0.33±0.04 <sup>ab</sup>   | 0.34±0.03 <sup>ab</sup>   | 0.39±0.02 <sup>b</sup>    | 0.29±0.01 <sup>a</sup>     |
| 过氧化氢酶CAT (U/mL)             | 234.42±18.56 <sup>a</sup>           | 285.47±37.71 <sup>a</sup>  | 399.73±20.05 <sup>b</sup> | 266.94±24.87 <sup>a</sup> | 227.59±17.00 <sup>a</sup> | 212.37±6.41 <sup>a</sup>   |
| 丙二醛MDA (nmol/mL)            | 5.75±0.56                           | 4.38±0.14                  | 4.96±0.25                 | 5.17±0.58                 | 5.29±0.52                 | 5.57±0.34                  |
| 肝脏Liver                     |                                     |                            |                           |                           |                           |                            |
| 总超氧化物歧化酶T-SOD (U/mg prot)   | 43.69±2.08 <sup>a</sup>             | 45.29±0.45 <sup>ab</sup>   | 48.06±1.13 <sup>b</sup>   | 45.25±0.69 <sup>ab</sup>  | 45.07±0.42 <sup>ab</sup>  | 45.03±0.41 <sup>ab</sup>   |
| 谷胱甘肽过氧化物酶GSH-px (U/mg prot) | 119.91±1.08 <sup>ab</sup>           | 120.68±11.36 <sup>ab</sup> | 139.58±1.60 <sup>bc</sup> | 156.13±8.00 <sup>c</sup>  | 149.26±3.80 <sup>c</sup>  | 103.79±8.35 <sup>a</sup>   |
| 总抗氧化能力T-AOC (mmol/g)        | 0.36±0.01 <sup>a</sup>              | 0.36±0.01 <sup>a</sup>     | 0.40±0.01 <sup>b</sup>    | 0.36±0.01 <sup>a</sup>    | 0.35±0.01 <sup>a</sup>    | 0.36±0.01 <sup>a</sup>     |
| 过氧化氢酶CAT (U/mg prot)        | 173.82±7.61 <sup>a</sup>            | 202.83±33.67 <sup>a</sup>  | 267.92±19.80 <sup>b</sup> | 190.26±10.36 <sup>a</sup> | 150.13±9.21 <sup>a</sup>  | 169.78±12.38 <sup>a</sup>  |
| 丙二醛MDA (nmol/mg prot)       | 2.61±0.40 <sup>ab</sup>             | 1.67±0.06 <sup>a</sup>     | 2.10±0.40 <sup>ab</sup>   | 2.27±0.31 <sup>ab</sup>   | 2.21±0.20 <sup>ab</sup>   | 3.19±0.63 <sup>b</sup>     |

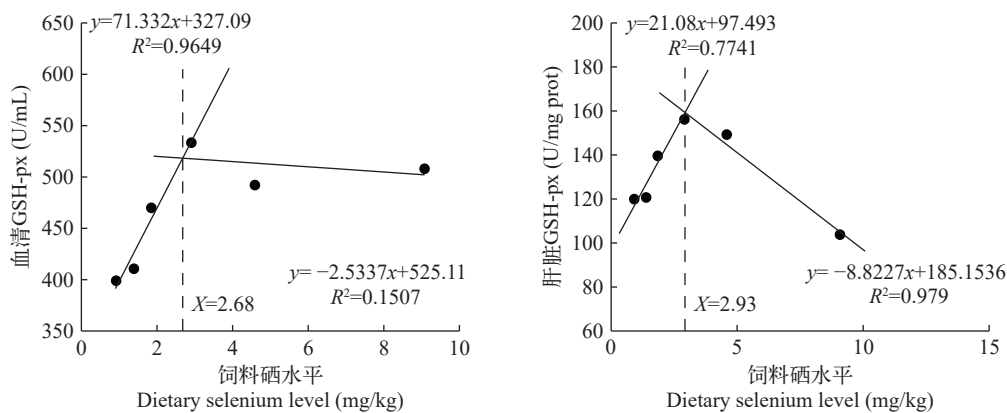


图 2 肝脏及血清GSH-px活性与饲料硒水平的关系

Fig. 2 The relationship between GSH-px activity in liver and serum and dietary selenium level

表 5 饲料硒水平对黄鳝全鱼营养成分的影响

Tab. 5 Effects of dietary selenium levels on the whole-body nutritional components of *Monopterus albus* (mean±SE, n=4)

| 成分Composition (%) | 饲料硒水平Dietary Selenium level (mg/kg) |                        |                        |                        |                         |                         |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                   | 0.92                                | 1.39                   | 1.85                   | 2.91                   | 4.59                    | 9.08                    |
| 水分Moisture        | 70.40±1.08                          | 71.48±0.38             | 71.62±0.21             | 71.45±0.78             | 71.15±0.81              | 71.57±0.57              |
| 粗蛋白Crude protein  | 17.31±0.22                          | 17.00±0.13             | 17.07±0.05             | 17.17±0.33             | 17.11±0.07              | 17.88±0.03              |
| 粗脂肪Crude lipid    | 7.6±0.32 <sup>b</sup>               | 5.80±0.30 <sup>a</sup> | 6.17±0.40 <sup>a</sup> | 6.17±0.34 <sup>a</sup> | 7.00±0.63 <sup>ab</sup> | 7.03±0.27 <sup>ab</sup> |
| 粗灰分Crude ash      | 3.14±0.39                           | 2.75±0.17              | 2.92±0.07              | 2.72±0.15              | 2.84±0.16               | 2.95±0.11               |

似的,在杂交鲟、军曹鱼的研究中也发现,提升饲料硒水平能够增加鱼体组织硒含量<sup>[13, 27]</sup>。

肌肉是黄鳢主要可食用部分,其含肉率超过70%<sup>[33]</sup>。因此,肌肉硒沉积量可作为评估富硒黄鳢的主要参数,但目前尚未形成富硒黄鳢评估标准。

《富硒农产品》(GH/T 1135-2024)与《湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002-2021)中对富硒水产品要求分别为0.15—0.50 mg/kg及0.20—0.50 mg/kg。参照上述标准,本实验中1.39 mg/kg硒含量饲料即可使黄鳢肌肉含量(0.19 mg/kg)达到国家富硒水产品标准,进一步提升饲料硒含量至1.85 mg/kg则可使黄鳢肌肉硒含量(0.45 mg/kg)达到国家标准及湖北省标准富硒水产品上限。这些结果表明,酵母硒可作为生产富硒黄鳢的高效硒源。

### 3.3 不同硒水平饲料对黄鳢血清、肝脏抗氧化能力的影响

硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性中心, GSH-Px可通过分解机体内过量的过氧化氢,预防氧化应激、提高机体抗氧化能力<sup>[34]</sup>。GSH-Px、T-SOD及CAT具备清除氧自由基以减少氧化损伤的功能,在免疫系统中发挥关键作用; T-AOC是评估机体抗氧化防御系统整体功能的重要参数,而MDA是活性氧自由基(ROS)造成脂质过氧化和氧化损伤的标志物<sup>[27, 35, 36]</sup>。因此, T-AOC、GSH-Px、T-SOD及CAT活性, MDA含量常用于评估机体抗氧化功能。硒摄入量超过鱼类生理阈值时会产生极强的毒性,其可通过破坏ROS产生和清除之间的平衡诱导细胞或组织氧化损伤<sup>[16, 37]</sup>。在本实验中,提升饲料硒含量至1.85—4.59 mg/kg不同程度地提高了黄鳢肝脏和血清T-SOD、GSH-Px、T-AOC及CAT活力,但饲料硒水平继续增加至9.08 mg/kg,黄鳢血清和肝脏T-SOD、GSH-Px、T-AOC及CAT活力均呈下降趋势,且伴有MDA含量增加现象。这些结果表明,适宜硒含量饲料可以增强黄鳢抗氧化功能,但饲料硒含量过高存在抗氧化功能抑制风险。类似的,饲料硒含量过高降低了团头鲂幼鱼(*Megalobrama amblycephala*)<sup>[34]</sup>及青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)<sup>[38]</sup>抗氧化功能。相反,不同硒含量饲料对杂交鲟幼鱼血浆SOD及CAT活性无显著影响<sup>[13]</sup>;不同硒含量饲料对西伯利亚鲟(*Acipenser baeri*)肝脏MDA含量同样无显著影响<sup>[39]</sup>;不同硒含量饲料对史氏鲟幼鱼(*Acipenser schrencki*)肝脏CAT和SOD活性均无显著影响<sup>[40]</sup>。这些证据表明,硒对鱼类抗氧化功能的调节作用同样与鱼类品种密切相关,但具体机制仍需进一步探究。

### 3.4 不同硒水平饲料对黄鳢全鱼营养成分的影响

饲料是影响鱼体营养成分的主要因素之一,在本实验中,增加饲料酵母硒含量显著降低了黄鳢幼鱼鱼体粗脂肪含量。如前所述,MDA是脂质过氧化产物,本实验中1.39 mg/kg组全鱼粗脂肪含量下降与肝脏MDA含量最低结果相吻合。与本实验结果类似,提升饲料硒含量同样降低了绿鲟(*Acipenser medirostris*)鱼体脂质含量<sup>[41]</sup>,提高饲料硒含量也被报道可经单磷酸腺苷依赖蛋白激酶途径(AMPK)减少草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)肌肉脂质沉积<sup>[42]</sup>。此外,硒也被报道可经促进草鱼肝脏脂肪酸 $\beta$ 氧化及甘油三酯水解相关基因表达,加速脂肪分解抑制其在体内沉积<sup>[43]</sup>。相反,另有研究指出增加饲料硒含量会增加红鲟(*Pagrus major*)<sup>[44]</sup>、黄颡鱼<sup>[45]</sup>和青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)<sup>[46]</sup>鱼体脂肪含量,而在鲈(*Lateolabrax japonicus*)<sup>[47]</sup>的研究中发现,增加饲料硒含量对其鱼体粗脂肪含量无显著性影响。这些结果的差异表明,饲料硒对鱼类机体粗脂肪含量的影响同样与鱼类品种密切相关。

## 4 结论

综上所述,黄鳢对酵母硒具有较好的耐受能力,饲料中添加适宜酵母硒能够显著提高黄鳢抗氧化性能,以血清及肝脏GSH-Px活力为评价指标,7.71 g幼鳢适宜饲料硒含量为2.68—2.93 mg/kg。饲料中添加酵母硒可降低黄鳢粗脂肪含量,提高肝脏、皮肤、脾、肾脏、肌肉、肠道硒含量,黄鳢各组织对硒的蓄积量:肝脏>皮肤>肾脏>脾脏>肌肉>肠道。酵母硒可作为生产富硒黄鳢高效硒源,但需避免过量硒对黄鳢抗氧化功能的抑制效应。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

## 参考文献:

- [1] Hossain A, Skalicky M, Brestic M, *et al.* Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects [J]. *Molecules*, 2021, **26**(4): 881.
- [2] Ma X J, Zhang Y A. Research progress on the effects of selenium on human health [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2009, **25**(8): 1021-1023. [马秀杰, 张跃安. 硒对人体健康影响研究进展 [J]. 中国公共卫生, 2009, **25**(8): 1021-1023.]
- [3] Chen L, Yang F, Xu J, *et al.* Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, **50**(18): 5128-5130.
- [4] Yang H, Yang X, Ning Z, *et al.* The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-

- plant-human system: an overview [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022(422): 126876.
- [5] Dinh Q T, Cui Z, Huang J, *et al.* Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review [J]. *Environment International*, 2018(112): 294-309.
- [6] Ge X Y, Yang Z S, Zhang L J, *et al.* Preparation technology and quality evaluation of selenium-enriched pork jerky based on selenium carrageenan [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, **49**(2): 344-351. [葛鑫禹, 杨泽莎, 张立君, 等. 基于硒化卡拉胶的富硒猪肉脯制备工艺及品质评估 [J]. 安徽农业大学学报, 2022, **49**(2): 344-351.]
- [7] Tang C H, Zhao Q Y, Zhang K, *et al.* Promoting the development of nutritionally-guided agriculture in research and development of selenium-enriched agri-products in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(18): 3122-3133. [汤超华, 赵青余, 张凯, 等. 富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展 [J]. 中国农业科学, 2019, **52**(18): 3122-3133.]
- [8] Kieliszek M, Błażej S, Kurek E. Binding and conversion of selenium in *Candida utilis* ATCC 9950 yeasts in bioreactor culture [J]. *Molecules*, 2017, **22**(3): 352.
- [9] Li L, Wu W T, Xu Y, *et al.* Effects of different selenium sources on growth performance, antioxidant enzyme activity, muscle composition and selenium deposition of crucian [J]. *China Feed*, 2020(4): 95-98. [李雷, 吴伍涛, 许渊, 等. 不同硒源对鲫鱼生长性能、抗氧化酶活性、肌肉成分及硒沉积的影响 [J]. 中国饲料, 2020(4): 95-98.]
- [10] 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.]
- [11] Wei W Y, Liu J X, Li L Y, *et al.* Research progress on application of yeast selenium in aquaculture [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(19): 213-215. [魏文燕, 刘家星, 李良玉, 等. 酵母硒在水产养殖中的应用研究进展 [J]. 现代农业科技, 2019(19): 213-215.]
- [12] Tan L J, Ye J L, Ai J A. Research progress on the application of selenium yeast in livestock and poultry production [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(21): 13-15. [谭龙娟, 叶金玲, 艾建安. 酵母硒在畜禽生产中的应用研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(21): 13-15.]
- [13] 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.]
- [14] 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.
- [15] Chen H, Li J, Yan L, *et al.* Subchronic effects of dietary selenium yeast and selenite on growth performance and the immune and antioxidant systems in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(97): 283-293.
- [16] Uddin M H, Ritu J R, Putnala S K, *et al.* Selenium toxicity in fishes: a current perspective [J]. *Chemosphere*, 2024(364): 143214.
- [17] Misra S, Hamilton C, Niyogi S. Induction of oxidative stress by selenomethionine in isolated hepatocytes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Toxicology in Vitro*, 2012, **26**(4): 621-629.
- [18] Berntssen M H G, Sundal T K, Olsvik P A, *et al.* Sensitivity and toxic mode of action of dietary organic and inorganic selenium in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2017(192): 116-126.
- [19] Neog P R, Konwar B K. The distribution, economic aspects, nutritional, and therapeutic potential of swamp eel *Monopterus albus*: a review [J]. *Fisheries Research*, 2023(261): 106635.
- [20] Fisheries and Fisheries Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2024 China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 22-24. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 30-32.]
- [21] Tang Y C, Mo Y H, Hu X J, *et al.* Determination of 16 elements in breast milk by graphite digestion-collision mode-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Journal of Environment and Health*, 2024, **41**(9): 804-809. [唐永春, 莫延慧, 胡小键, 等. 母乳中16种元素的石墨消解-碰撞模式-电感耦合等离子体-质谱测定法 [J]. 环境与健康杂志, 2024, **41**(9): 804-809.]
- [22] Zhou L T, Huang G H, Zhou Q B, *et al.* Dietary zinc requirement of juvenile *Monopterus albus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(7): 1233-1244. [周磊涛, 黄广华, 周秋白, 等. 黄鳝幼鳝对饲料中锌需求量的研究 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(7): 1233-1244.]
- [23] McKenzie R C, Arthur J R, Beckett G J. Selenium and the regulation of cell signaling, growth, and survival: molecu-

- lar and mechanistic aspects [J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2002, **4**(2): 339-351.
- [24] Wang L, Sagada G, Wang R, *et al.* Different forms of selenium supplementation in fish feed: The bioavailability, nutritional functions, and potential toxicity [J]. *Aquaculture*, 2022(549): 737819.
- [25] Ueno H, Kajihara H, Nakamura H, *et al.* Contribution of thioredoxin reductase to T-cell mitogenesis and NF-kappaB DNA-binding promoted by selenite [J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2007, **9**(1): 115-121.
- [26] Zhou X, Wang Y, Gu Q, *et al.* Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquaculture*, 2009, **291**(1/2): 78-81.
- [27] Yang Y Z, Nie J Q, Tan B P, *et al.* Effects of selenium source and selenium level on growth performance, liver and serum antioxidant indices and selenium content in tissues of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(12): 3894-3904. [杨原志, 聂家全, 谭北平, 等. 硒源与硒水平对军曹鱼幼鱼生长性能、肝脏和血清抗氧化指标及组织硒含量的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(12): 3894-3904.]
- [28] Nugroho R A, Fotedar R. Effects of dietary organic selenium on immune responses, total selenium accumulation and digestive system health of marron, *Cherax cainii* (Austin, 2002) [J]. *Aquaculture Research*, 2015, **46**(7): 1657-1667.
- [29] Wu Y B, Han H, Wang Y. Effects of selenium yeast addition level in feed on growth, food utilization and fish composition of pomfret ovata [J]. *Feed Industry*, 2013, **34**(12): 13-17. [吴玉波, 韩华, 王岩. 饲料中硒酵母添加水平对卵形鲳鲹生长、食物利用及鱼体组成的影响 [J]. 饲料工业, 2013, **34**(12): 13-17.]
- [30] Lei X J. Effects of two selenium sources on growth performance, muscle selenium content, antioxidant capacity and selenoprotein expression in yellowhead catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024: 1-10. [雷锡俊. 两种硒源对黄颡鱼生长性能和肌肉组织的硒含量、抗氧化能力以及硒蛋白表达的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2024: 1-10.]
- [31] Burk R F, Hill K E. Regulation of selenium metabolism and transport [J]. *Annual Review of Nutrition*, 2015, **35**: 109-134.
- [32] Song C C, Liu T, Zhong C C, *et al.* Distribution and contents of mineral elements in different tissues of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(8): 109-117. [宋长春, 刘涛, 仲崇超, 等. 黄颡鱼不同组织矿物元素的分布及含量 [J]. 水产学报, 2023, **47**(8): 109-117.]
- [33] Shi Y, Zhong L, Zhang J Z, *et al.* Substitution of fish meal with krill meal in rice field eel (*Monopterus albus*) diets: Effects on growth, immunity, muscle textural quality, and expression of myogenic regulation factors [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021(280): 115047.
- [34] Hao J, Lin Y, Pan W, *et al.* Dietary selenium enhances the growth and anti-oxidant capacity of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(101): 115-125.
- [35] Kuang S Y, Xiao W W, Feng L, *et al.* Effects of graded levels of dietary methionine hydroxy analogue on immune response and antioxidant status of immune organs in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2012, **32**(5): 629-636.
- [36] Qin Y, Hu B, Xiong P, *et al.* Effect of dietary methionine level on growth, biochemical indicators, digestive enzyme activity and antioxidant capacity of larval and juvenile hybrid snakehead (*Channa maculate* ♀ × *Channa Argus* ♂) [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2025, **40**(1): 126-134. [覃瑶, 胡波, 熊攀, 等. 饲料蛋氨酸水平对杂交鳢仔稚鱼生长、生化指标、消化酶活性和抗氧化能力的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2025, **40**(1): 126-134.]
- [37] Thomas J K, Janz D M. Dietary selenomethionine exposure in adult zebrafish alters swimming performance, energetics and the physiological stress response [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, **102**(1/2): 79-86.
- [38] Chen Y, He C, Yang Y, *et al.* Effects of dietary nano-selenium on the growth performance, antioxidant capacity, immunity and intestinal microbiota of Tibetan naked carp (*Gymnocypris przewalskii*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2024(39): 102431.
- [39] Pacini N, Elia A C, Abete M C, *et al.* Antioxidant response versus selenium accumulation in the liver and kidney of the Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(10): 2405-2412.
- [40] 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.]
- [41] De Riu N, Lee J W, Huang S S Y, *et al.* Effect of dietary selenomethionine on growth performance, tissue burden, and histopathology in green and white sturgeon [J]. *Aquatic Toxicology*, 2014(148): 65-73.
- [42] Liu S, Yu H, Zhu L, *et al.* Dietary nano-Se supplementation regulates lipid deposition, protein synthesis and muscle fibre formation in grass carp fed with high-fat diet [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2023, **130**(10): 1678-1688.
- [43] 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.
- [44] Dawood M A O, Koshio S, Zaineldin A I, *et al.* An evaluation of dietary selenium nanoparticles for red sea bream (*Pagrus major*) aquaculture: growth, tissue bioaccumulation, and antioxidative responses [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(30): 30876-30884.
- [45] 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.]
- [46] Zhang C, Jia X W, Qian P C, *et al.* Selenium-rich *Cardamine hupingshanensis* on growth, biochemical indices, selenium metabolism, antioxidant capacities and innate immunities in juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(3): 523-534. [张辰, 贾小巍, 钱鹏丞, 等. 富硒壶瓶碎米荠对青鱼幼鱼生长、生理生化、硒代谢、抗氧化及先天免疫的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(3): 523-534.]
- [47] 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.]

## SELENIUM YEAST ON GROWTH, TISSUE SELENIUM CONTENT, AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF *MONOPTERUS ALBUS*

HUANG Hao<sup>1</sup>, WANG Zi-Rui<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Qiu-Bai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Kai-Wen<sup>1</sup>, CHEN Xi-Huan<sup>1</sup>, GUO Xiao-Han<sup>1</sup>, ZHANG Xu-Ting<sup>1</sup>, CAI Hui-Ling<sup>1</sup> and LIU Yu<sup>4</sup>

(1. College of Animal Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Institute of Special Fisheries, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Nanchang Key Laboratory of Nutritional Physiology and Healthy Aquaculture of Characteristic Aquatic Organisms, Nanchang 330045, China; 4. College of Animal Science and Technology, Foshan University, Foshan 528225, China)

**Abstract:** To investigate the effects of dietary selenium (Se) levels on growth performance, antioxidant capacity, and Se-enriched production in Asian swamp eel (*Monopterus albus*), an 8-week feeding trial was conducted with six experimental groups [four replicates each, 35 eels per replicate; initial body weight: (7.71±0.01) g]. Five Se-supplemented diets (measured Se levels: 1.39, 1.85, 2.91, 4.59, and 9.08 mg/kg) were formulated by using selenium yeast (2000 mg/kg Se) added to a basal diet (control, 0.92 mg/kg Se). Results showed that: (1) No significant differences in survival rate, weight gain rate, specific growth rate, or feed conversion ratio among groups ( $P>0.05$ ); (2) Serum glutathione peroxidase (GSH-Px) activity in 1.85—9.08 mg/kg groups, serum total superoxide dismutase (T-SOD) and catalase (CAT) activities in 1.85 mg/kg group, and total antioxidant capacity (T-AOC) in 4.59 mg/kg group were significantly higher than that in the control. The selenium accumulation in tissues followed the order: liver>skin>kidney>spleen>muscle>intestine. *M. albus* showed good tolerance to dietary selenium yeast, with Se levels ≤9.08 mg/kg having no impact on growth. Optimal Se supplementation (2.68—2.93 mg/kg) enhanced antioxidant capacity in juvenile eels (7.71 g). Elevated dietary Se promoted muscle Se deposition, supporting Se-enriched production, though excessive Se may inhibit antioxidant function.

**Key words:** Selenium; Growth performance; Antioxidant capacity; Tissue selenium content; *Monopterus albus*