



王真,徐娅,李潇,等. 酵母硒对克氏原螯虾生长性能、抗氧化能力与免疫功能的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):634-642.
Wang Z, Xu Y, Li X, et al. Effects of yeast selenium addition on growth characteristics, antioxidant capacity and immunity function of crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(3): 634-642.

酵母硒对克氏原螯虾生长性能、抗氧化能力与免疫功能的影响

王真¹, 徐娅², 李潇², 张慧^{2*}

(1. 苏州大学苏州医学院, 江苏 苏州 215123; 2. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 211800)

摘要: [目的] 本文旨在探讨酵母硒添加量对克氏原螯虾生长特征及生理代谢酶的影响, 为克氏原螯虾健康养殖提供配方成分, 以促进克氏原螯虾养殖的绿色高效发展。 [方法] 在克氏原螯虾饲料中分别设置 0、0.15、0.30、0.45、0.60 mg·kg⁻¹ 酵母硒添加量, 分析克氏原螯虾生长特征和不同组织抗氧化酶、免疫酶、消化酶活性及不同组织硒含量与不同生理指标的相关性。 [结果] 与不添加酵母硒相比, 0.30 mg·kg⁻¹ 酵母硒添加量的克氏原螯虾终末体重、增重率和特定生长率分别显著提高了 78.88%、97.34% 和 35.29%, 但饲料系数下降 33.82%, 克氏原螯虾产量提高 100.37%。随着酵母硒添加量增加, 克氏原螯虾肝胰腺和血淋巴总抗氧化能力 (T-AOC) 和超氧化物歧化酶 (SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、过氧化氢酶 (CAT) 活性呈现出先升高再下降的趋势, 以 0.30 mg·kg⁻¹ 酵母硒添加量处理活性最大; 丙二醛 (MDA) 含量变化则相反。酸性磷酸酶 (ACP)、碱性磷酸酶 (AKP) 和溶菌酶 (LZM) 活性与抗氧化酶活性变化相似, 肝胰腺抗氧化酶活性和酸性、碱性磷酸酶活性以及消化酶的胰蛋白酶 (TRY)、淀粉酶 (AMS) 和脂肪酶 (LPS) 活性分别高于血淋巴和肠道相应酶的活性。克氏原螯虾不同组织硒含量从高到低依次为肝胰腺、整虾、肌肉、血淋巴, 并随着酵母硒剂量的增加而增加; 不同组织以肝胰腺 T-AOC 和 GSH-Px、CAT、ACP、AKP、TRY、AMS 活性指标与产量之间相关性高于血淋巴、肠道。 [结论] 适量添加酵母硒能促进克氏原螯虾的生长, 提高其抗氧化、免疫和消化酶活性, 0.30 mg·kg⁻¹ 酵母硒添加量对克氏原螯虾生长和生理代谢最为适宜; 从抗氧化力、免疫和消化酶活性与产量相关性表明克氏原螯虾养殖过程中保护肝胰腺最为关键。

关键词: 克氏原螯虾; 酵母硒; 生长性能; 免疫功能; 抗氧化酶; 消化酶; 组织硒

中图分类号: S963.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2026)03-0634-09

Effects of yeast selenium addition on growth characteristics, antioxidant capacity and immunity function of crayfish (*Procambarus clarkii*)

WANG Zhen¹, XU Ya², LI Xiao², ZHANG Hui^{2*}

(1. Suzhou Medical College, Soochow University, Suzhou 215123, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: [Objectives] The paper aimed to investigate the effect of yeast selenium addition on the growth characteristics and some physiological metabolic enzyme activities of crayfish, so as to provide feed formula for green and healthy breeding of crayfish. [Methods] The growth characteristics, the enzyme activities of antioxidant, immune and digestive, selenium content in different tissues, and the relationship between different physiological indicators were analyzed by supplementing feed with different doses (0, 0.15, 0.30, 0.45 and 0.60 mg·kg⁻¹) of yeast selenium addition. [Results] Compared with no yeast selenium addition, the final weight, weight gain rate and specific growth rate of crayfish were 0.30 mg·kg⁻¹ yeast selenium addition significantly increased by 78.88%, 97.34% and 35.29%, respectively. Meanwhile, the feed conversion ratio decreased by 33.82%, and yield increased by 100.37%. With the increase of yeast selenium addition, total antioxidant capacity (T-AOC), superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GSH-Px), and catalase (CAT) activities in the hepatopancreas and hemolymph showed a trend of increasing first and then decreasing, with peak activities observed in the 0.30 mg·kg⁻¹ yeast selenium addition; the change of malondialdehyde (MDA) content showed an opposite trend. The changes in the activities of acid phosphatase (ACP), alkaline phosphatase (AKP) and lysozyme (LZM) were similar to those of antioxidant enzymes. The activities of antioxidant, phosphatase, and digestive enzymes of trypsin (TRY), amylase (AMS) and lipase (LPS) in the hepatopancreas were higher than those in the corresponding hemolymph and intestine respectively. The selenium content in different tissues followed the order of hepatopancreas, whole crayfish, muscle, hemolymph, and

收稿日期: 2025-10-26

基金项目: 国家外国专家计划项目 (H20250586); 2025 安徽 1+5 农业科技创新计划项目; 江苏省大学生创新创业计划项目 (S202510307323X); 2024 天长科技成果转化项目

* 通信作者: 张慧, 实验师, 研究方向为种养循环农业, E-mail: zhanghui@njau.edu.cn。

increased with rising levels of yeast selenium addition. The correlation between T-AOC, the activities of GSH-Px, CAT, ACP, AKP, TRY, AMS, and yield in different tissues were higher in the hepatopancreas than in the hemolymph or intestine. [Conclusions] Appropriate yeast selenium addition promoted the growth and antioxidant, immune and digestive enzyme activities of crayfish, thereby increasing the final weight. Excessive yeast selenium addition inhibited the growth and physiological metabolic capacity. The yeast selenium addition of $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the most suitable for the growth and physiological metabolism of crayfish. The correlation between antioxidant capacity, immune and digestive enzyme activities and yield showed that it was most critical to protect the hepatopancreas during crayfish breeding.

Keywords: crayfish; yeast selenium; growth characteristics; immune function; antioxidant enzyme; digestive enzyme; selenium in tissues

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)俗称小龙虾,是我国重要的淡水养殖品种。截至目前,全国养殖面积达 203 万 hm^2 ,年产量 345 万 t,位列淡水水产品产量第 4 位^[1]。“龙虾经济”已成为推动农业绿色发展、助力乡村振兴的重要产业支柱。克氏原螯虾为杂食性甲壳动物,主要摄食水草、杂鱼、有机碎屑及配合饲料,适宜条件下摄食率较高。蛋白质是其生长必需的核心营养物质,不仅能促进机体组织细胞新陈代谢^[2],还可加快脱壳频率,进而提升个体规格与养殖产量。已有研究表明,饲料营养水平对其生长性能影响显著。张家宏等^[3]发现,以鱼粉和豆粕为蛋白源,当饲料蛋白质水平为 28%、脂肪水平为 6%时,克氏原螯虾的增重率、特定生长率、总氨基酸及必需氨基酸含量均达到最高,饲料系数最低;夏思瑶等^[4]则指出,随着饲料蛋白质水平升高,克氏原螯虾的增重率和特定生长率呈先升后降的趋势,其中蛋白质水平为 30.09%时生长性能最优。然而,克氏原螯虾在春夏生长旺季面临突出问题:该阶段摄食量大,生长速度快,大量投喂高蛋白饲料后,若遭遇外界温度波动大与昼夜温差大等环境胁迫,易导致其生理代谢活力下降,营养物质吸收利用率降低,进而打破体内活性氧自由基的动态平衡。氧化应激引发的脂肪过度氧化会产生具有生物毒性的丙二醛,造成机体组织损伤,最终诱发“老头虾”(个体生长停滞)、“五月瘟”(大规模病害暴发)等严重问题,制约产业健康发展。

硒是维持动物正常生理功能的必需微量元素,在自然环境中主要以无机硒(硒酸盐、亚硒酸盐)和有机硒(酵母硒、硒代蛋氨酸)2种形式存在。无机硒易获取,但存在毒性较强、代谢利用率低的缺陷;而有机硒具有吸收效率高、毒性低、生物活性强、代谢利用率高等显著优势^[5]。硒的生理功能主要通过参与硒蛋白合成实现:在动物体内,硒与氨基酸结合形成硒代氨基酸或硒蛋白,进而发挥增强机体免疫、调节生理代谢等作用^[6]。饲料中添加适宜剂量的硒,可有效改善动物生长性能,弥补硒缺乏导致的不良性状^[7]。对于水产动物而言,适宜水平的硒能促进生长发育,提升免疫与抗氧化能力;缺硒则会引发生长速率降低、氧化胁迫加剧、免疫机能下降、代谢紊乱等问题,如大黄鱼幼鱼^[8]、黄颡鱼^[9]等均存在类似现象。需注意的是,硒的安全剂量范围较窄,超过临界浓度会产生毒害作用^[10]。酵母硒作为有机硒,具有独特的吸收优势:它通过肠道内专门的 Na^+ 依赖性转运蛋白以主动运输方式吸收,较无机硒更易被肠道组织摄取,且作用时间长,其生物利用率是无机硒的 7 倍左右^[11]。被吸收的酵母硒可在肝胰腺中转化为硒代氨基酸或硒蛋白^[12],最终以非共价键结合或肽链嵌入的形式参与生命活动调节,兼具高吸收、高安全、高效率的特点^[13-14]。因此,确定饲料中酵母硒的适宜添加量,对维持水产品正常生命活动和避免农户“乱投药”造成的生态风险至关重要。目前,关于酵母硒对克氏原螯虾生长及生理调节的研究尚未见报道。本试验通过在饲料中添加不同剂量的酵母硒,系统探究其对克氏原螯虾的促生长效应及生理代谢机制,旨在为克氏原螯虾健康养殖提供科学的营养调控依据,推动产业绿色可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验风干饲料的配方和营养成分见表 1。基础饲料硒含量为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在基础饲料中添加不同剂量酵母硒,5 个处理分别为 YSe0、YSe15、YSe30、YSe45 和 YSe60,酵母硒添加量分别为 0、0.15、0.30、0.45 和 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。酵母硒来源于安琪酵母股份有限公司,有效硒含量为 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

克氏原螯虾苗来自南京丰谷园农场,每只虾苗 5 g 左右,个体健壮、附肢完整、体表洁净。采用塑料箱养殖,塑料箱大小为 $2.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,水深 30 cm,每箱放置一块石棉瓦($0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$)为克氏原螯虾提供隐蔽场所,每箱放养 20 只虾,每个试验组 6 箱。饲养时间从 4 月 6 日至 6 月 5 日,共 60 d。

表 1 试验饲料原料组成及营养组成水平

Table 1 Feed ingredient composition and nutrients composition level

组成 Composition	饲料中酵母硒添加量/(mg·kg ⁻¹) Yeast selenium addition in feed				
	0	0.15	3.0	0.45	0.60
原料组成 Ingredients composition					
鱼粉 Fish meal	10	10	10	10	10
豆粕 Soybean meal	25	25	25	25	25
小麦粉 Wheat flour	18	18	18	18	18
米糠 Rice bran	12	12	12	12	12
菜籽饼 Rapeseed cake	12	12	12	12	12
玉米粉 Corn flour	12	12	12	12	12
豆油 Soybean oil	3	3	3	3	3
维生素预混料 Vitamin premix	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
矿物质预混料 Mineral premix	2	2	2	2	2
磷酸二氢钙 Calcium dihydrogen phosphate	1	1	1	1	1
甜菜碱 Betaine	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
海藻酸钠 Sodium alginate	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
氯化胆碱 Choline Chloride	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
无硒酵母粉 Yeast selenium-free	2.00	1.85	1.70	1.55	1.40
酵母硒 Yeast selenium	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60
营养组成 Nutrients composition					
粗蛋白 Crude protein	35.74	35.93	36.04	35.79	35.82
粗脂肪 Crude lipid	5.58	5.66	5.64	5.61	5.63
水分 Moisture	10.27	10.32	10.25	10.33	10.23

1.3 饲养管理

试验期间,每天投喂 1 次饲料,用量为虾体重 5%左右。在投料 2 h 后回收未吃完的饲料并进行干燥后称重。根据水质情况进行 1/3 换水。试验期间 pH 值为 7.2,利用增氧泵维持溶氧高于 5 mg·L⁻¹。

1.4 样品采样与分析方法

在 60 d 进行采样,采样前禁食 24 h,采集的克氏原螯虾肝胰腺(hepatopancreas,HP)样品,按质量体积比 1:9 加入预冷 90 g·L⁻¹生理盐水,进行冷冻研磨,3 min 研磨充分后取出,用超低温冷冻离心机 2 500 r·min⁻¹离心 20 min,制成 10%的组织匀浆,待测。采集的血淋巴(hemolymph,HM)样品加入有抗凝剂的离心管中,用超低温冷冻离心机 3 000 min⁻¹离心 10 min,取上清液在-20 ℃保存。

肝胰腺和血淋巴抗氧化能力检测指标:总抗氧化能力(T-AOC),超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性和丙二醛(MDA)含量;肝胰腺和血淋巴免疫功能检测指标:酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)和溶菌酶(LZM)活性;肝胰腺和肠道消化酶检测指标:胰蛋白酶(TRY)、淀粉酶(AMS)和脂肪酶(LPS)活性。以上指标采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。硒含量测定采用《GB/T 13883—2008 饲料中硒的测定》中电感耦合等离子体质谱法进行。

生长性能指标计算公式:增重率(WGR)=(终末体重-初始体重)×100%/初始体重;特定生长率(SGR)=(ln 终末体重-ln 初始体重)×100%/时间;饲料系数(FCR)=饲料投入量×100%/(终末体重-初始体重);成活率(SR)=(终末虾尾数/初始虾尾数)×100%。

1.5 数据处理与统计分析

试验数值用平均值±标准误($\bar{x}\pm SE$)表示,利用 OriginPro 2024 软件进行数据处理和统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 多重比较法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 酵母硒添加量对克氏原螯虾生长性能的影响

如表 2 所示:随着酵母硒添加量增加,克氏原螯虾平均终末体重呈现出先增加后降低的趋势。在生长 60 d 收获的时候,YSe30 处理克氏原螯虾终末体重最大,较 YSe0 显著增加 78.88% ($P<0.05$);而过量的酵母硒添加量,克氏原螯虾终末体重低于 YSe0。增重率、特定生长率与终末体重呈现相似变化趋势。随着酵母硒添加量增加,投喂的饲料系数显著下降($P<0.05$),YSe30 处理较 YSe0 下降 33.82%,YSe60 处理较 YSe0 下降 41.91%。成活率的变化趋势也与终末体重变化趋势相似,呈现出先升高后降低的趋势。

表 2 酵母硒添加量对克氏原螯虾生长性能的影响

Table 2 Effect of yeast selenium addition on growth performance of crayfish

处理 Treatments	初始体重/g Initial weight	终末体重/g Final weight	增重率/% Weight gain rate	特定生长率/(%·d ⁻¹) Specific growth rate	饲料系数 Feed conversion ratio	成活率/% Survival rate
YSe0	5.02±0.01	25.62±0.12 ^d	410.77±3.61 ^d	2.72±0.011 ^d	1.36±0.03 ^a	83.33±2.89 ^{bc}
YSe15	5.04±0.01	36.27±0.09 ^b	620.19±2.52 ^b	3.29±0.006 ^b	1.12±0.04 ^b	88.33±7.64 ^{ab}
YSe30	5.03±0.01	45.83±0.11 ^a	810.60±0.70 ^a	3.68±0.001 ^a	0.90±0.03 ^c	93.33±2.89 ^a
YSe45	5.01±0.03	28.77±0.14 ^c	474.32±1.41 ^c	2.91±0.004 ^c	0.82±0.03 ^d	78.33±5.77 ^{cd}
YSe60	5.03±0.03	21.54±0.07 ^e	328.30±1.28 ^e	2.42±0.005 ^e	0.79±0.02 ^e	73.33±7.64 ^d

注:YSe0、YSe15、YSe30、YSe45、YSe60 表示饲料中酵母硒添加量分别为 0、0.15、0.30、0.45 和 0.60 mg·kg⁻¹。处理间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:YSe0,YSe15,YSe30,YSe45,YSe60 mean that the yeast selenium added in the feed is 0,0.15,0.30,0.45 and 0.60 mg·kg⁻¹, respectively. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$).The same below.

由图 1 可知:不同酵母硒添加量处理的最终克氏原螯虾产量,YSe30 处理克氏原螯虾实际产量最高,较 YSe0 显著提高 100.37% ($P<0.05$),而过高的酵母硒添加量降低了克氏原螯虾产量,YSe45 处理较 YSe0 仅提高 5.54%,YSe60 处理较 YSe0 下降 25.99%。利用二次曲线趋势图算出克氏原螯虾理论产量最高的酵母硒添加量在 0.28 mg·kg⁻¹时,能够促进克氏原螯虾的健康生长。

2.2 酵母硒添加量对克氏原螯虾抗氧化能力的影响

图 2 显示不同酵母硒添加量对克氏原螯虾不同组织抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响。T-AOC 反映克氏原螯虾体内氧化应激能力的状况。由图 2 可知,随着酵母硒添加量的增加,克氏原螯虾肝胰腺和血淋巴 T-AOC 呈现出先升高再下降的趋势,以 YSe30 处理最高,分别比 YSe0 高 72.15% 和 159.86% ($P<0.05$),而过高的酵母硒添加量降低了 T-AOC,YSe60 处理最低。肝胰腺 T-AOC 是血淋巴的 2.72~4.84 倍。SOD、GSH-Px、CAT 活性具有相似的变化趋势;除 SOD 活性在肝胰腺和血淋巴之间无明显规律外,肝胰腺 GSH-Px、CAT 活性是血淋巴的 1.04~1.34 倍。这说明

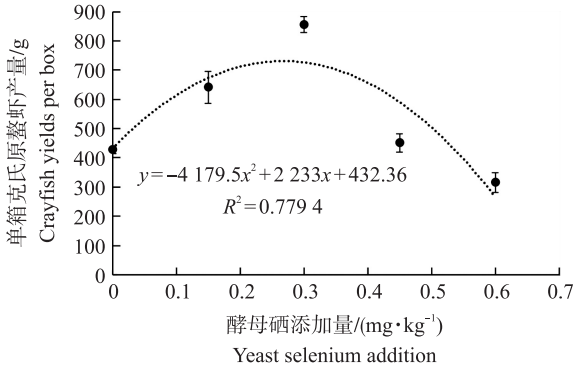


图 1 酵母硒添加量与克氏原螯虾产量的回归分析

Fig. 1 Regression analysis between yeast selenium addition and crayfish yield

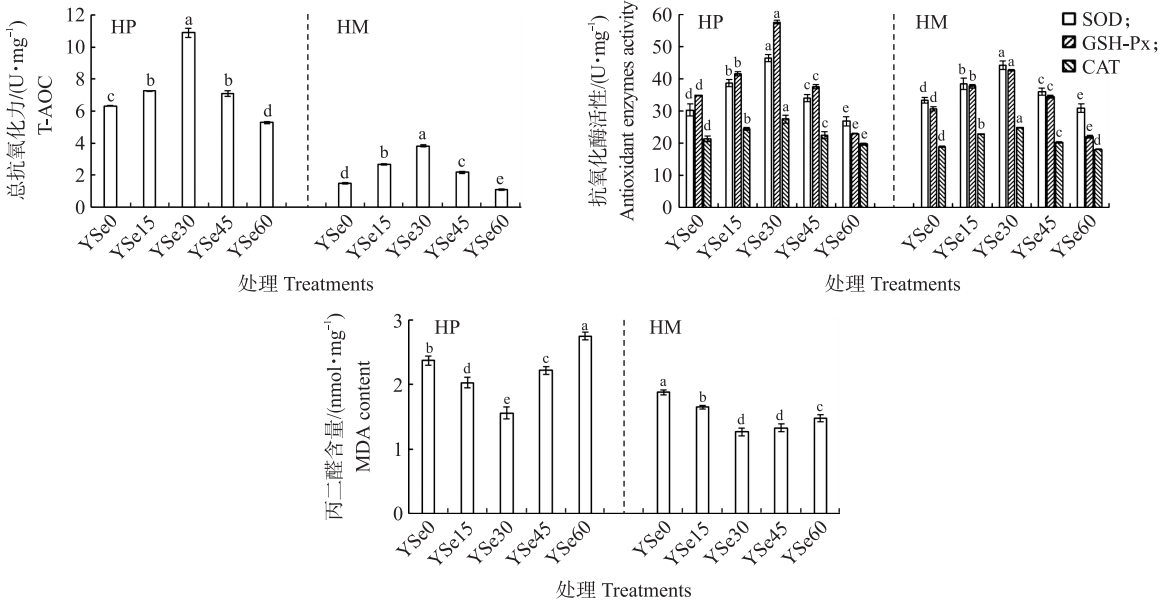


图 2 酵母硒添加量对克氏原螯虾肝胰腺(HP)和血淋巴(HM)T-AOC、抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effect of yeast selenium addition on T-AOC, antioxidant enzymes activities and MDA content of the hepatopancreas(HP) and hemolymph(HM) of crayfish

相同组织不同处理间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters between different treatments within the same tissue indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

酵母硒具有显著抗氧化促进作用。

MDA 是克氏原螯虾氧化应激的主要产物,反映了生物体脂质过氧化和细胞损伤程度。图 2 显示,随着酵母硒添加量增加,肝胰腺和血淋巴 MDA 含量均呈现出先降低后增加的趋势,以 YSe30 处理 MDA 含量最低,肝胰腺和血淋巴 MDA 含量较 YSe0 分别下降 34.18% 和 32.45% ($P<0.05$),而 YSe45 和 YSe60 处理肝胰腺 MDA 含量增加较多,YSe45 和 YSe60 处理血淋巴 MDA 含量增加较少,但均低于 YSe0。

2.3 酵母硒添加量对克氏原螯虾免疫功能的影响

酵母硒添加量对克氏原螯虾肝胰腺和血淋巴免疫功能具有显著影响(图 3)。随着酵母硒添加量的增加,克氏原螯虾肝胰腺和血淋巴 ACP 活性呈现出先升高后降低的趋势,YSe30 处理活性最高,肝胰腺、血淋巴 ACP 活性较 YSe0 分别提高 34.85%、96.22%,而 YSe60 处理肝胰腺、血淋巴 ACP 活性低于 YSe0,分别下降了 5.72% 和 11.13%。肝胰腺 ACP 活性是血淋巴 ACP 的 17.05~24.26 倍。

随着酵母硒添加量的增加,肝胰腺和血淋巴 AKP 活性也呈现出先升高后降低的趋势,YSe30 处理活性最高,肝胰腺、血淋巴 AKP 活性较 YSe0 分别增加 165.01%、53.04%,而 YSe60 处理肝胰腺、血淋巴 AKP 活性低于 YSe0,分别下降 17.97% 和 6.09%。另外,肝胰腺 AKP 活性是血淋巴 AKP 的 20.88~41.39 倍。

随着酵母硒添加量的增加,肝胰腺和血淋巴 LZM 活性同样呈现出先升高后降低的趋势,YSe30 处理活性最高,肝胰腺、血淋巴 LZM 活性较 YSe0 分别提高 50.14%、26.96%,而 YSe60 处理肝胰腺、血淋巴 LZM 活性低于 YSe0,分别下降了 12.68% 和 9.27%。另外,血淋巴 LZM 活性是肝胰腺的 1.29~1.59 倍。

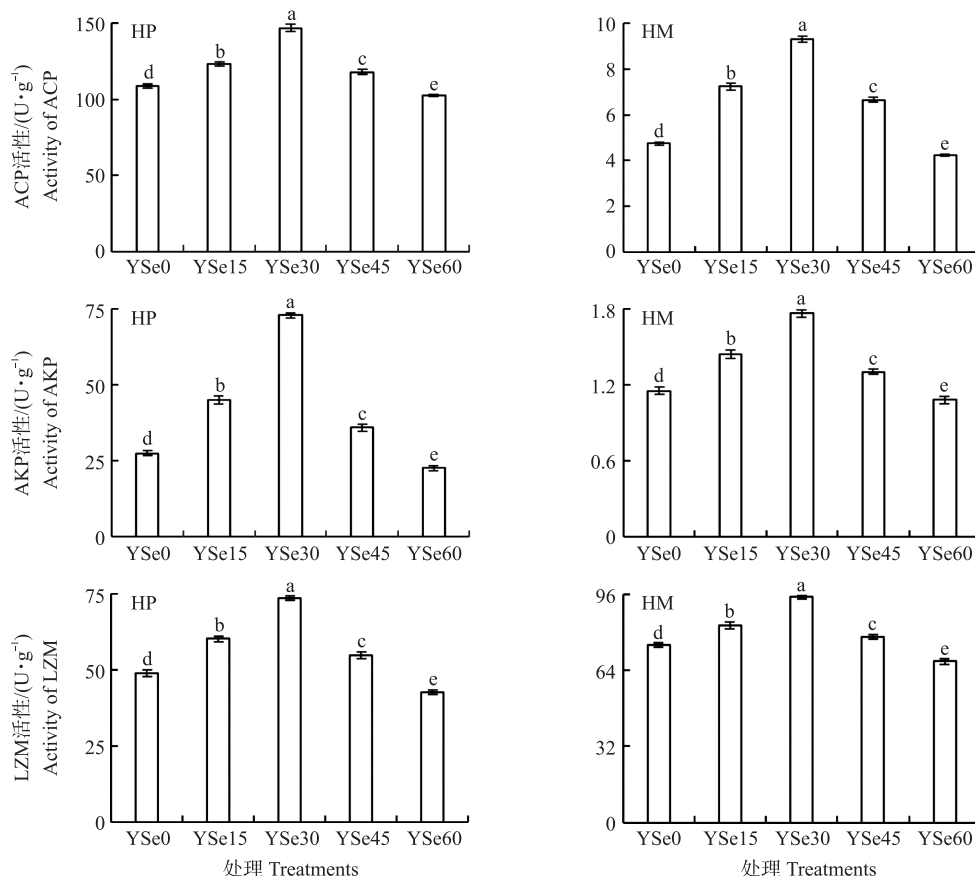


图 3 酵母硒添加量对克氏原螯虾肝胰腺(HP)和血淋巴(HM)酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)和溶菌酶(LZM)活性的影响

Fig. 3 Effect of yeast selenium addition on the activities of acid phosphatase(ACP), alkaline phosphatase(AKP) and lysozyme(LZM) of the hepatopancreas(HP) and hemolymph(HM) of crayfish

2.4 酵母硒添加量对克氏原螯虾消化酶活性的影响

从图 4 可知,随着酵母硒添加量增加,TRY 活性表现为先升高后降低的趋势,YSe30 处理达到最大活性,YSe15 和 YSe30 处理肝胰腺 TRY 活性分别较 YSe0 显著提高 49.74% 和 75.32% ($P<0.05$),肠道 TRY 活性提高 73.71% 和 135.29% ($P<0.05$),而 YSe60 处理较 YSe0 分别下降 19.11% 和 18.03%。另外,肝胰腺 TRY 活性高出肠道 17.67%~38.66%。然而,随着酵母硒添加量的增加,LPS 活性呈现出先下降后升高的

趋势, YSe30 处理活性最低, 较肝胰腺和肠道 YSe0 分别显著下降 30.76% 和 27.50% ($P < 0.05$), 而肝胰腺和肠道 YSe60 处理较 YSe0 分别提高 9.01% 和 6.51%。另外, 随着酵母硒添加量的增加, AMS 活性表现为先升高后降低的趋势, YSe30 处理活性最大, 较肝胰腺和肠道 YSe0 处理分别显著提高 38.89% 和 39.51% ($P < 0.05$), 而 YSe60 处理活性较 YSe0 处理分别下降 14.29% 和 8.64%。另外, 肝胰腺 AMS 活性比肠道高 31.48% ~ 35.71%。

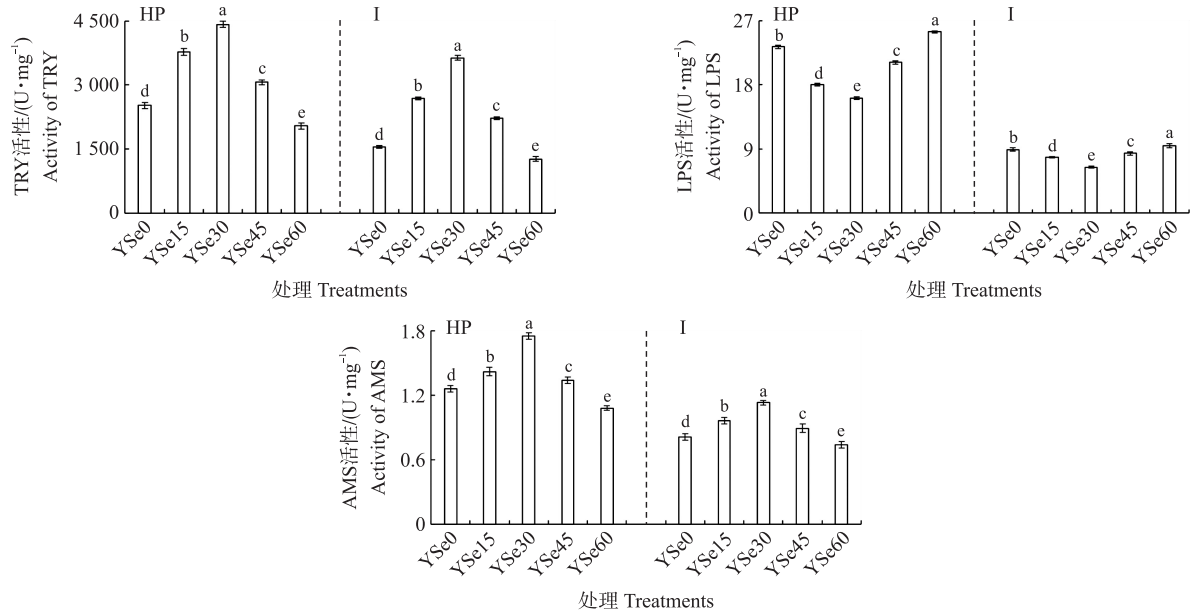


图4 酵母硒添加量对克氏原螯虾肝胰腺(HP)和肠道(I)胰蛋白酶(TRY)、脂肪酶(LPS)和淀粉酶(AMS)活性影响

Fig. 4 Effect of yeast selenium addition on the activities of trypsin (TRY), lipase (LPS) and amylase (AMS) of the hepatopancreas (HP) and intestine (I) of crayfish

2.5 酵母硒添加量对克氏原螯虾不同组织硒含量的影响

如图5所示:酵母硒添加量对克氏原螯虾不同组织硒含量有显著影响,组织硒含量以肝胰腺最高,整虾次之,肌肉再次之,血淋巴最低。不同组织硒含量均随着酵母硒添加量增加而增加,肝胰腺硒含量 YSe30 处理低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而血淋巴硒含量在所有处理中都较低,肌肉和整虾硒含量 YSe60 处理超过 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中以血淋巴硒含量变化幅度较大,整虾硒含量变化幅度较小。酵母硒添加量处理与不同组织平均硒含量的线性关系相关性从大到小依次为肝胰腺 ($y = 0.099x - 0.025, R^2 = 0.9973$)、血淋巴 ($y = 0.043x - 0.027, R^2 = 0.9898$)、整虾 ($y = 0.091x - 0.039, R^2 = 0.9844$)、肌肉 ($y = 0.075x - 0.069, R^2 = 0.9233$)。

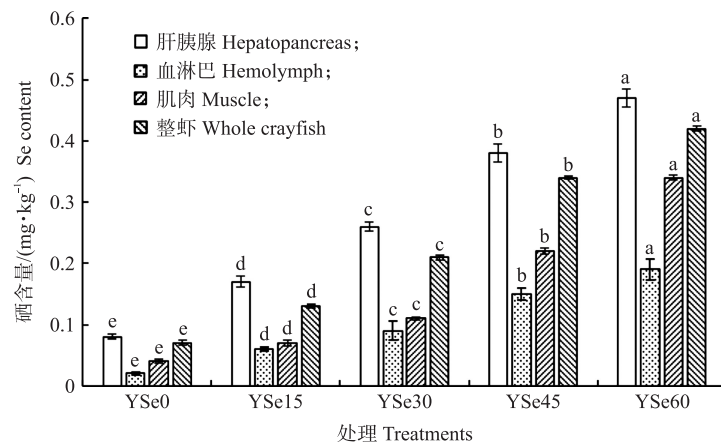


图5 酵母硒添加量对克氏原螯虾不同组织硒含量的影响

Fig. 5 Effect of yeast selenium addition on selenium content in different tissues of crayfish

2.6 克氏原螯虾不同生理代谢因子关联性分析

图6显示酵母硒投喂后克氏原螯虾不同生理指标之间具有明显的关联性。从整体上来看,丙二醛含量和脂肪酶活性与最终产量之间呈负相关性,其他指标如抗氧化酶、免疫酶和消化酶等呈现出显著正相关

性,且肝胰腺的多数生理指标相关性高,部分血淋巴和肠道的指标相关性也较高,如血淋巴的总抗氧化力、碱性磷酸酶活性、溶菌酶活性和肠道淀粉酶活性与产量的相关性高于其他指标。血淋巴的谷胱甘肽氧化酶活性与丙二醛含量之间及不同组织硒含量与产量之间的相关性虽然呈现出负相关,但都不显著。

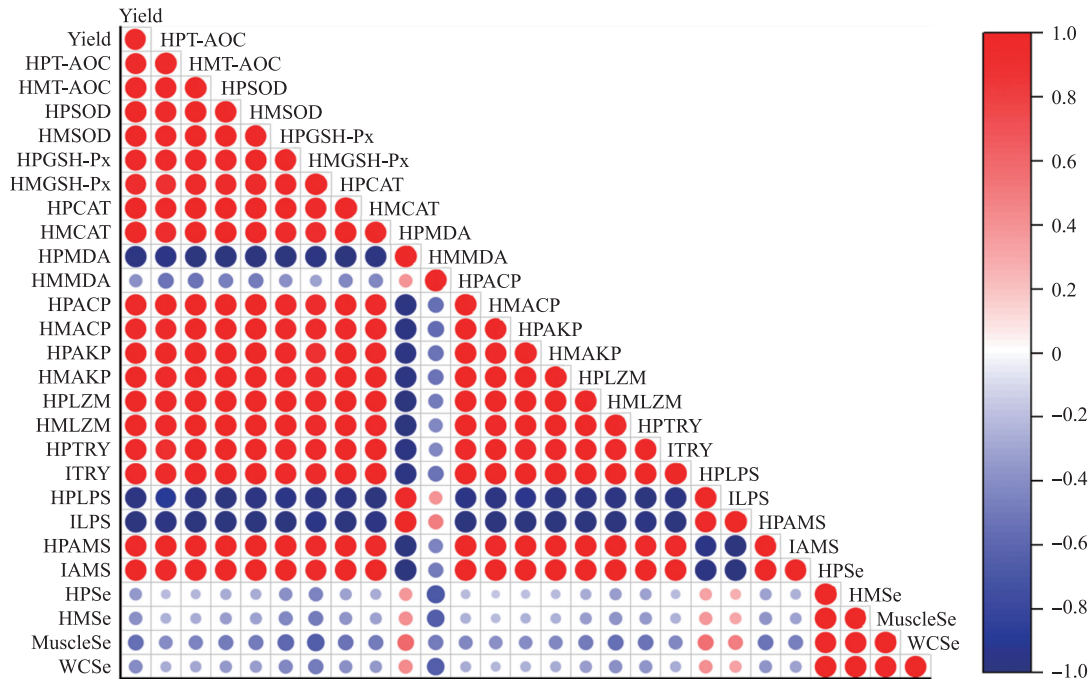


图6 克氏原螯虾产量及不同生理指标间的相关性分析

Fig. 6 Correlation of yield and different physiological indicators of crayfish

Yield: 克氏原螯虾产量 Crayfish yield; HPT-AOC: 肝胰腺总抗氧化力 Hepatopancreas total antioxidant capacity; HMT-AOC: 血淋巴总抗氧化力 Hemolymph total antioxidant capacity; HPSOD: 肝胰腺超氧化物歧化酶活性 Activity of hepatopancreas superoxide dismutase; HMSOD: 血淋巴超氧化物歧化酶活性 Activity of hemolymph superoxide dismutase; HPGSH-Px: 肝胰腺谷胱甘肽过氧化物酶活性 Activity of hepatopancreas glutathione peroxidase; HMGSHPx: 血淋巴谷胱甘肽过氧化物酶活性 Activity of hemolymph glutathione peroxidase; HPCAT: 肝胰腺过氧化氢酶活性 Activity of hepatopancreas catalase; HMCAT: 血淋巴过氧化氢酶活性 Activity of hemolymph catalase; HPMDA: 肝胰腺丙二醛含量 Hepatopancreas malondialdehyde content; HMMDA: 血淋巴丙二醛含量 Hemolymph malondialdehyde content; HPACP: 肝胰腺酸性磷酸酶活性 Activity of hepatopancreas acid phosphatase; HMACP: 血淋巴酸性磷酸酶活性 Activity of hemolymph acid phosphatase; HPAKP: 肝胰腺碱性磷酸酶活性 Activity of hepatopancreas alkaline phosphatase; HMAKP: 血淋巴碱性磷酸酶活性 Activity of hemolymph alkaline phosphatase; HPLZM: 肝胰腺溶菌酶活性 Activity of hepatopancreas lysozyme; HMLZM: 血淋巴溶菌酶活性 Activity of hemolymph lysozyme; HPTRY: 肝胰腺胰蛋白酶活性 Activity of hepatopancreas trypsin; ITRY: 肠道胰蛋白酶活性 Activity of intestine trypsin; HPLPS: 肝胰腺脂肪酶活性 Activity of hepatopancreas lipase; ILPS: 肠道脂肪酶活性 Activity of intestine lipase; HPAMS: 肝胰腺淀粉酶活性 Activity of hepatopancreas amylase; IAMS: 肠道淀粉酶活性 Activity of intestine amylase; HPSe: 肝胰腺硒含量 Hepatopancreas selenium content; HMSe: 血淋巴硒含量 Hemolymph selenium content; MuscleSe: 肌肉硒含量 Muscle selenium content; WCSe: 整个克氏原螯虾硒含量 Whole crayfish selenium content.

3 讨论与结论

3.1 酵母硒添加量对克氏原螯虾生长特征的影响

硒是动物机体生长必需的微量元素之一^[15]。本试验结果表明,添加 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 酵母硒对克氏原螯虾生长具有显著促进作用,过高的酵母硒添加量对克氏原螯虾的促生长效应显著下降,甚至起到抑制生长作用。这是饲料系数呈现下降趋势的主要原因,过高硒用量抑制了克氏原螯虾的正常生理代谢,胰蛋白酶和淀粉酶活性均下降明显,取食量变小。田文静等^[16]认为,当饲料硒含量为 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,幼蟹增重率、存活率最高,过高的酵母硒抑制了幼蟹生长。刘家星等^[17]研究显示,酵母硒对鲤鱼体重、增重率及特定生长率均随日粮中酵母硒添加量的增加逐渐增大,饲料系数则随日粮中酵母硒添加量的增加而降低。吴雷等^[18]研究表明,史氏鲟幼鱼饲料添加酵母硒使得幼鱼特定增长率、增重率和平均体重显著升高。曹辉^[19]认为,在草鱼基础饲料中添加 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 酵母硒能够使草鱼的增重率、试验末重和饲料转化率显著提高。李玉龙等^[20]认为,饲料中添加 $1\% \sim 4\%$ 酵母水解物对克氏原螯虾的存活率、最终体重、最终体长以及增重率、特定生长率有促进作用,其中 2% 最适于克氏原螯虾生长和生理代谢。Zhang 等^[21]指出, 0.30 和 0.60

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 酵母硒能够显著增加青鱼增重率和特定生长率。本试验结果与以上研究结论基本相似。然而,李小霞等^[22]研究表明,添加酵母硒对凡纳滨对虾增质量率、特定生长率、饲料系数、成活率均无显著影响。Xu等^[23]研究指出, $1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 酵母硒不利于鲈鱼的生长和肝脏发育,但有利于提高血细胞的抗氧化能力。这说明不同淡水水产品种养殖的酵母硒适宜添加量存在一些差异。从现有文献来看,适宜的酵母硒添加量为罗非鱼 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[11]、中华绒螯蟹幼蟹 $0.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]、鲤鱼 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17]、史氏鲟幼鱼 $6.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[18]、草鱼 $2\sim4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[19]、凡纳滨对虾 $0.98\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[22]、虹鳟 $3.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[24]等。本试验结果显示, $0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 酵母硒适宜于克氏原螯虾的生长。不同淡水水产品种需要因品种、饲料而选择适宜的酵母硒添加量。

3.2 酵母硒添加量对克氏原螯虾抗氧化、免疫和生理代谢影响

硒主要作用是清除生物体内过多的活性氧等自由基,保护细胞膜的正常功能,防止细胞膜受到过氧化物的破坏。T-AOC 和 SOD、GSH-Px 活性及 MDA 含量是反映机体抗氧化能力的重要指标,抗氧化酶系统可以分解过量的自由基,缓解机体产生的过氧化反应。由于克氏原螯虾体内缺少特异性的免疫球蛋白,其免疫反应主要依赖于机体分泌的多种细胞及体液免疫因子^[25],ACP 和 AKP 是重要的非特异性免疫酶类,在机体的体液免疫及疾病防御等方面发挥着重要作用^[26]。本试验结果表明,随着酵母硒添加量的增加,肝胰腺和血淋巴 T-AOC,抗氧化酶 SOD、GSH-Px 活性,免疫酶 ACP、AKP、LZM 活性以及消化酶 TRY、LPS、AMS 活性均呈现先上升后降低的变化趋势,且以 $0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 酵母硒添加量处理效应最高,并且肝胰腺 T-AOC 和 ACP、AKP、TRY、LPS、AMS 活性高于血淋巴的;MDA 含量变化则相反,肝胰腺组织的下降幅度大于血淋巴的。李玉龙等^[20]研究认为,饲料添加 2% 酵母水解物能够显著提高肝胰腺 T-AOC 和抗氧化酶 (CAT、SOD)、免疫酶 (ACP、AKP) 活性,并达到最大值,而 MDA 含量达到最小值。吴雷等^[18]认为,添加 $6.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒显著提高史氏鲟幼鱼肝脏 GSH-Px 活性,而肝脏和肌肉 SOD 和 CAT 活性呈上升趋势但没有达到显著水平。而李小霞等^[22]认为,添加酵母硒能够提高凡纳滨对虾肝胰腺 SOD 活性和 T-AOC 并降低 MDA 含量,也未达到显著水平。田文静等^[16]认为,肝胰腺和血清中的 GSH-Px 活性随着硒添加量的增加呈现出先升高后降低趋势,当硒添加量为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最高,MDA 含量变化则相反。本试验结果与以上研究总体趋势是相似的,有些差异主要可能是淡水品种类型和饲料硒含量不同产生的。以产量与抗氧化能力、免疫活性和消化酶活性为参数进行拟合发现, $0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 饲料酵母硒添加量显示出对克氏原螯虾最佳的促健康生长和提高生理代谢活力效应。

综上,适宜的酵母硒添加量能够显著提高克氏原螯虾的增重率、特定生长率和成活率,维持较高的抗氧化力、免疫酶和消化酶活性,并适当降低饲料系数。从与克氏原螯虾产量相关性来看,除了与血淋巴 T-AOC、AKP 和 LZM 活性、肠道 AMS 活性相关性高之外,其他均与肝胰腺的相关性高。这提示在克氏原螯虾的养殖中保护其肝胰腺很重要。饲料中酵母硒适宜添加量为 $0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时能够维持克氏原螯虾良好的生长效应和生理代谢活力。

参考文献 References:

- [1] 全国水产技术推广总站,中国水产学会. 中国小龙虾产业发展报告(2025)[J]. 中国水产,2025(7):10-16.
National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. Crayfish industry development report of China (2025) [J]. China Fisheries, 2025(7): 10-16 (in Chinese).
- [2] Wang Q S, Yu K L, Zhang H. Controlled-release fertilizer improves rice matter accumulation characteristics and yield in rice-crayfish coculture [J]. Agriculture, 2022, 12: 1674.
- [3] 张家宏,王守红,寇祥明,等. 饲料中蛋白质和脂肪水平对克氏原螯虾生长的影响研究[J]. 江西农业学报,2012,24(8):88-93.
Zhang J H, Wang S H, Kou X M, et al. Study on effect of dietary protein and lipid levels on growth of *Procambarus clarkii* [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(8): 88-93 (in Chinese with English abstract).
- [4] 夏思瑶,万金娟,孟祥龙,等. 饲料中蛋白质水平对克氏原螯虾生长性能及肌肉品质的影响[J]. 水产养殖,2021(3):6-12.
Xia S Y, Wan J J, Meng X L, et al. Effects of dietary protein levels on growth performance and muscle quality of red swamp crayfish [J]. Journal of Aquaculture, 2021(3): 6-12 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李欣,李文超,付玉洁,等. 酵母硒对肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质和抗氧化性能的影响[J]. 畜牧与兽医,2024,56(8):26-31.
Li X, Li W C, Fu Y J, et al. Effect of yeast selenium on growth performance, carcass traits, meat quality and antioxidant performance of broilers [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56(8): 26-31 (in Chinese with English abstract).
- [6] Wang L, Sagada G, Wang RL, et al. Different forms of selenium supplementation in fish feed: the bioavailability, nutritional functions, and

- potential toxicity[J]. *Aquaculture*, 2022, 549: 737819.
- [7] 吕国华,郑冰清,马学艳,等. 铜离子胁迫对淡水石首鱼幼鱼急性毒性、抗氧化及免疫相关酶活性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(5): 939–948. DOI:10.7685/jnau.202203047.
- Lü G H, Zheng B Q, Ma X Y, et al. Effects of copper ion stress on acute toxicity, antioxidation and immune related enzyme activities of juvenile *Aplodinotus grunniens*[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(5): 939–948 (in Chinese with English abstract).
- [8] 曹娟娟,张文兵,徐玮,等. 大黄鱼幼鱼对饲料硒的需求量[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(2): 241–249.
- Cao J J, Zhang W B, Xu W et al. Dietary selenium requirement of juvenile large yellow croaker *Larimichthys croceus*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(2): 241–249 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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.
- 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wang W F, Mai K S, Zhang W B, et al. Dietary selenium requirement and its toxicity in juvenile abalone *Haliotis discus* Hannailno [J]. *Aquaculture*, 2012, 330: 42–46.
- [11] Hadrup N, Ravn-Haren G. Absorption, distribution, metabolism and excretion of oral selenium from organic and inorganic sources: a review[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2021, 67: 126801.
- [12] Hariharan S, Dharmaraj S. Selenium and selenoproteins: its role in regulation of inflammation[J]. *Inflammopharmacology*, 2020, 28: 667–695.
- [13] Rathore S S, Murthy H S, Girisha S K, et al. Supplementation of nano-selenium in fish diet: impact on selenium assimilation and immune-regulated selenoproteome expression in monosex *Nile tilapia* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2021, 240: 108907.
- [14] Guo H H, Lin W, Wang L K, et al. The supplementation of dietary selenium yeast and green tea-derived polyphenols improves antioxidant capacity and immune response in juvenile Wuchang bream under ammonia stress[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51: 3790–3803.
- [15] Khana K U, Zuberi A, Nazir S, et al. Synergistic effects of dietary nano selenium and vitamin C on growth, feeding, and physiological parameters of mahseer fish (*Tor putitora*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2017, 5: 70–75.
- [16] 田文静,李二超,陈立侨,等. 酵母硒对中华绒螯蟹幼蟹生长、体组成分及抗氧化能力的影响[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(1): 92–100.
- Tian W J, Li E C, Chen L Q, et al. Growth, body composition and anti-oxidative status of juvenile Chinese mitten crabs, *Eriocheir sinensis* fed different dietary selenium levels[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(1): 92–100 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘家星,陶丽竹,杨马,等. 酵母硒对鲤鱼鱼种生长性能、肌肉硒沉积量及抗病能力的影响[J]. *中国饲料*, 2021(19): 43–48.
- Liu J X, Tao L Z, Yang M, et al. Effect of selenium yeast on growth performance, muscle selenium deposition and disease resistance of *Cyprinus carpio* fingerlings[J]. *China Feed*, 2021(19): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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.
- 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 (in Chinese with English abstract).
- [19] 曹辉. 饲料中添加酵母硒对草鱼生长性能的影响[J]. *江西水产科技*, 2022(2): 30–32.
- Cao H. Effect of adding yeast selenium to feed on growth performance of grass carp[J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2022(2): 30–32 (in Chinese).
- [20] 李玉龙,付运银,张恒,等. 酵母水解物对克氏原螯虾生长性能、消化、抗氧化和免疫能力的影响[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(3): 393–404.
- Li Y L, Fu Y Y, Zhang H, et al. Dietary yeast hydrolysate on growth, digestion, antioxidation and immunity of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(3): 393–404 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhang P H, Zhang C, Yao X F, et al. Selenium yeast improve growth, serum biochemical indices, metabolic ability, antioxidant capacity and immunity in black carp *Mylopharyngodon piceus* [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2024, 146: 109414.
- [22] 李小霞,陈锋,潘庆,等. 酵母硒对凡纳滨对虾生长和抗氧化性能的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2014, 35(6): 108–112.
- Li X X, Chen F, Pan Q, et al. Effects of yeast selenium on the growth and antioxidative performance in *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, 35(6): 108–112 (in Chinese with English abstract).
- [23] Xu Z X, Hu J R, Zhang Y F, et al. Evaluation of largemouth bass (*Micropterus salmoide*) fed selenium yeast diets: growth, histopathology, antioxidant ability, and apoptosis[J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 29: 101505.
- [24] Teng Z L, Zhang F, Wang L, et al. Dietary selenium requirement of triploid rainbow trout based on selenium yeast supplementation [J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53: 3365–3378.
- [25] Bouallegui Y. A comprehensive review on crustaceans' immune system with a focus on freshwater crayfish in relation to crayfish plague disease [J]. *Frontiers in Immunology*, 2021, 12: 667787.
- [26] Zhang J J, Yang H L, Yan Y Y, et al. Effects of fish origin probiotics on growth performance, immune response and intestinal health of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed diets with fish meal partially replaced by soybean meal[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(4): 1255–1265.