

硒的生物学功能及其在家禽生产中的应用

杨开红¹ 田超¹ 张才^{2*}

(1. 河南农业职业学院宠物科技学院, 河南 郑州 451450; 2. 河南科技大学动物科技学院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 硒作为家禽生长发育过程所必需的微量营养元素, 通过参与谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、脱碘酶 (DIO) 等多种硒蛋白的合成, 在维持机体氧化稳态、调控免疫功能和改善生长性能等方面发挥核心作用。传统家禽养殖中应用广泛的无机硒 (如亚硒酸钠) 存在生物利用率低和安全范围窄等缺点, 已难以满足现代高效健康养殖及优质富硒禽产品生产的需求。近年来, 蛋氨酸硒、酵母硒等有机硒及纳米硒凭借吸收效率高、组织沉积效率高和毒性低等优势, 逐渐成为无机硒的理想替代方案。文章综述了硒的生物学功能及其在肉鸡、蛋鸡、鸭、鹅生产中的应用效果, 旨在整合近年来硒在家禽营养领域的研究成果, 为家禽养殖中硒的精准营养调控提供参考, 推动家禽养殖业向高效、健康、优质方向发展。

关键词: 硒; 硒蛋白; 肉鸡; 蛋鸡; 生物学功能

中图分类号: S816.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-2813 (2026) 03-0174-05

Doi: 10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2026.03.031

Biological functions of selenium and its applications in poultry production

YANG Kaihong TIAN Chao ZHANG Cai

Abstract: Selenium, an essential trace nutrient for poultry growth and development, plays a pivotal role in maintaining oxidative homeostasis, regulating immune function, and improving growth performance by participating in the synthesis of various selenoproteins such as glutathione peroxidase (GSH-Px) and deiodinase (DIO). Inorganic selenium compounds (such as sodium selenite), widely used in traditional poultry farming, suffer from low bioavailability and narrow safety margins, rendering them inadequate for modern high-efficiency, healthy farming practices and the production of premium selenium-enriched poultry products. In recent years, organic selenium sources like selenomethionine and selenium yeast, along with nanoselenium, have emerged as ideal alternatives to inorganic selenium due to their high absorption and retention rates, superior tissue deposition efficiency, and low toxicity. This article summarizes the biological functions of selenium and its application outcomes in broilers, laying hens, ducks, and geese, aims to integrate recent research findings on selenium in poultry nutrition, providing reference for precise nutritional regulation of selenium in poultry farming to advance the industry toward high efficiency, health, and premium quality.

Keywords: selenium; selenoproteins; broilers; laying hens; biological functions

硒是GSH-Px、DIO等多种重要酶的组成成分, 在动物机体抗氧化、免疫调节和生长发育等方面均具有重要作用^[1]。在畜禽生产中, 硒缺乏易引发白肌病、营养性肝坏死和繁殖障碍等疾病, 严重影响畜牧业的经济效益。随着集约化养殖模式的推广以及消费者对富硒鸡蛋、低脂高蛋白禽肉等优质产品需求的增长, 如何通过精准营养调控优化家禽生产效率、增强抗逆能力已成为行业焦点。在传统家禽生产中, 亚硒酸钠等无机硒存在生物利用率低、安全范围窄和使用过量易中毒等问题。近年来,

随着纳米技术与生物技术的突破, 硒的应用形式持续创新。例如, 硒代蛋氨酸和酵母硒等有机硒凭借更高的吸收存留率、组织沉积效率及生物活性, 逐渐成为无机硒的替代方案; 纳米硒则以毒性低、生物利用率高的优势成为潜在硒源^[2]。目前, 硒在家禽生产中的研究已积累大量成果, 但不同硒源的代谢特性对比、应用效果差异, 以及不同家禽品种、生理阶段对硒需求的适配性, 尚缺乏系统性梳理与总结。因此, 本文整合近年来硒在家禽营养领域的研究进展, 旨在系统梳理不同形态硒在家禽生产中的应用效果, 为硒在畜牧业中的应用提供参考, 推动家禽养殖向精准营养与高效健康方向发展。

1 硒与硒蛋白关系

硒的生物学功能主要通过硒蛋白介导, 在抗氧化、抗炎、抗凋亡及调节免疫反应等方面发挥重要作用^[3]。目前, 在人、猪、牛、羊等哺乳动物体内已经鉴定出

第一作者: 杨开红, 博士, 副教授, 研究方向为兽医临床。

通信作者: 张才, 博士, 教授, 硕士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (项目编号: 2024YFE0111600)

收稿日期: 2025-10-05

25种硒蛋白,包括5个GSH-Px,3个DIO,3个硫氧还蛋白家族(TrxR)、硒磷酸合成酶2(SEPHS2)、蛋氨酸亚硒还原酶B1(MSRB1)、硒蛋白H、硒蛋白I、硒蛋白K、硒蛋白M、硒蛋白N、硒蛋白O、硒蛋白P、硒蛋白S、硒蛋白T、硒蛋白V、硒蛋白W和硒蛋白F^[4]。与哺乳动物相比,鸡体内缺失SEPHS2、硒蛋白V和GSH-Px6,但拥有硒蛋白U和硒蛋白P2^[5]。

2 硒的种类、代谢与分布

2.1 硒的种类

无机硒是传统畜牧业中常用的硒补充剂,主要为亚硒酸钠。无机硒在动物体内经还原反应才能被利用,生物利用率相对较低,吸收率仅为34.7%~37.6%^[6]。无机硒安全范围较窄,过量使用易导致中毒,其利用率还会受动物种类、年龄、健康状况及饲料组成等多种因素影响^[7],使其难以满足现代高效、健康的养殖需求。

有机硒主要包括蛋氨酸硒、半胱氨酸硒及酵母硒等。其中,蛋氨酸硒可以通过非特异性吸收进入动物体内,并整合到体蛋白中形成稳定的硒储备^[8]。这一特性使其在畜禽体内的吸收率和存留率显著优于无机硒,在家禽体内吸收率可达70.9%~72.0%^[6]。

纳米硒是一种新型硒补充剂,具有比表面积大、表面能高、生物利用率高等特点^[9]。纳米硒的制备方法主要包括物理、化学和生物合成法等,其中生物合成纳米硒因药理活性丰富、天然稳定性高、生态可行性好等优势更受关注。LIU等^[10]研究发现,在肉鸡中,纳米硒的相对生物学效价虽高于亚硒酸钠,但低于酵母硒、蛋氨酸硒及羟基-硒代蛋氨酸。但因纳米硒的毒性低与生物学活性高,仍是极具潜力的硒补充形式。

2.2 硒的代谢方式

膳食中的硒主要通过胃肠道吸收,但其吸收效率与化学形态密切相关。蛋氨酸硒和半胱氨酸硒,其吸收机制与蛋氨酸、半胱氨酸一致,主要通过主动运输穿过肠道屏障,因此生物利用度更高^[11];而无机硒则因缺乏特异性吸收途径,需要在体内转化为有机硒或硒蛋白才能被有效利用^[12]。硒经肠道吸收后,主要通过门静脉进入肝脏,肝脏作为硒代谢的核心器官,负责合成血浆硒蛋白P,进而调控全身硒的转运与分配^[12]。

2.3 硒在体内的分布与沉积

硒在体内代谢后会选择性沉积于多种组织及产品中。在蛋鸡中,硒不仅是鸡蛋的重要硒来源,也会在胸肌、皮肤、血清、肝脏、肾脏等组织中积累^[13]。肝脏合成的硒蛋白参与蛋黄的形成,输卵管则能利用硒代蛋氨酸参与蛋清合成^[14]。相比无机硒,有机硒的沉积效率更高,一方面源于其主动运输机制,另一方面则是其能够通过蛋氨酸代谢途径高效整合到鸡蛋蛋白和机体组织中^[15]。

3 硒的生物学功能

3.1 抗氧化功能

硒的抗氧化功能主要通过硒酶系统发挥作用,其中GSH-Px与TrxR是关键效应分子。GSH-Px可以催化还原型谷胱甘肽转化为氧化型谷胱甘肽,进而清除过氧化氢及脂质过氧化物,从而保护细胞膜和生物大分子免受氧化损伤^[16]。其中,GSH-Px1利用硒代半胱氨酸来还原过氧化物、调节活性氧水平,以维持细胞的氧化还原平衡^[17]。TrxR则通过还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸依赖的二硫键还原反应,维持硫氧还蛋白的还原态,并参与调节转录因子(如核因子κB)的活性^[16]。这一氧化还原循环有助于维持细胞内稳态,保护细胞免受氧化应激,并在应激条件下支持细胞的修复和存活过程^[18]。此外,硒缺乏会导致这些抗氧化酶活性降低,氧化应激水平升高,表现为脂质过氧化产物丙二醛(MDA)积累、蛋白质氧化损伤和DNA氧化损伤加剧^[19]。

3.2 免疫调节

硒是免疫系统的重要调控因子,通过调控硒蛋白的表达,影响先天免疫和适应性免疫的多个环节^[20]。具体机制包括提高抗氧化酶活性以减少免疫细胞氧化损伤,以及调节细胞因子表达来增强免疫反应强度^[21]。硒能通过抑制核因子κB信号通路,降低促炎细胞因子白细胞介素-1β和肿瘤坏死因子的含量^[22],同时通过调节T细胞表面白细胞介素-2受体表达,促进T细胞增殖和应答^[23]。在母体饲料中调节纳米硒可能通过抑制后代雏鸡的NOD样受体热蛋白结构域相关蛋白3通路基因表达,间接发挥免疫保护作用^[24]。硒对硒蛋白表达的调控也与免疫功能密切相关。酵母硒和蛋氨酸硒均能够提高多数硒蛋白的mRNA表达水平,其中蛋氨酸硒的效果更显著,且GSH-Px2、TrxR、SELENOK和SELENOS的表达量与抗氧化及免疫特性呈强正相关^[25]。硒缺乏会导致脾脏中硒蛋白和细胞因子的表达下调,从而影响免疫系统的正常功能^[26]。

3.3 抑菌和抗癌作用

纳米硒作为一种新型抗菌剂,其作用机制主要涉及对细菌细胞膜的破坏和对细胞内关键代谢酶的抑制^[27]。纳米硒通过生成活性氧,诱导细菌细胞发生氧化应激,导致细胞膜渗透性改变和细胞内容物的泄漏,最终导致细菌死亡^[27-28]。研究表明,纳米硒对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌和多重耐药铜绿假单胞菌等耐药菌株具有显著抑制作用^[28-29]。硒及其化合物通过抑制核因子κB信号通路的激活和下调3-磷酸肌醇依赖性蛋白激酶1的表达,诱导癌细胞凋亡^[30]。纳米硒在前列腺、乳腺、宫颈、肺、结直肠和肝癌细胞系中表现出抗癌活性,其机制主要涉及细胞凋亡和细胞周期阻滞,还可以通过抑制癌细胞的迁移和侵袭,发挥抗转移作用^[31]。

4 硒在家禽生产中的应用

硒作为家禽必需的微量元素,在促进生长、改善产品品质及维护肠道健康方面发挥积极作用。硒的应用效果受硒源类型、添加剂量、家禽品种及生理阶段等因素影响。研究表明,肉鸡饲料中亚硒酸钠的适宜添加量为0.2 mg/kg,有机硒为0.3~0.5 mg/kg;蛋鸡饲料中有机硒适宜添加量多为0.3 mg/kg,富硒乳酸菌的安全有效剂量为1.5 mg/kg,高剂量(6.0 mg/kg 酵母硒、3.0 mg/kg 富硒乳酸菌)可能导致器官损伤^[32-33];仔鹅饲料中亚硒酸钠适宜添加量为0.28~0.35 mg/kg^[34],过量添加(2.0 mg/kg、5.0 mg/kg 亚硒酸钠)会引发中毒^[35]。

4.1 硒对家禽生长性能及生产性能的影响

在肉鸡生产中,亚硒酸钠适宜添加剂量为0.2 mg/kg,过量添加会导致生长性能下降^[36]。沈雨甜等^[37]研究发现,与对照组相比,添加0.15 mg/kg(以硒计)亚硒酸钠可使岭南黄肉鸡1~56日龄平均日增重提高3.42%,料重比降低2.75%;添加0.15 mg/kg(以硒计)蛋氨酸硒可使岭南黄肉鸡1~56日龄平均日增重提高8.31%,料重比降低7.80%。饲料添加硒代蛋氨酸可以提高太行鸡产蛋率,降低料蛋比,改善蛋品质^[38]。添加0.5 mg/kg 酵母硒可以缓解氧化应激对肉鸡生长造成的负面影响^[39]。纳米硒同样表现出良好效果,与对照组相比,添加0.5 mg/kg 纳米硒可使22~42日龄肉鸡料重比降低3.73%^[40];添加40 μg/kg 纳米硒可使肉鸡末重提高10.26%、料重比和能量效率比分别降低10.00%和10.51%^[41]。LI等^[25]在蛋鸡饲料中添加不同硒源,发现蛋氨酸硒组的产蛋率较亚硒酸钠组提高4.88%,较酵母硒组提高3.52%。WANG等^[8]研究发现,与对照组相比,在蛋鸡饲料中添加0.2 mg/kg L-硒代蛋氨酸后,种蛋孵化率提高1.5%。此外,在蛋鸡饲料中添加0.3 mg/kg 蛋氨酸硒、半胱氨酸硒和纳米硒均能显著提高后代7日龄存活率^[24]。但也有研究表明,饲料中添加酵母硒对蛋鸡的生产性能无显著影响^[42-43],这种差异可能与硒源纯度、蛋鸡品种及基础饲料营养水平相关。

研究表明,在育雏期饲料中正常添加0.3 mg/kg 亚硒酸钠的前提下,于育成期适当调整硒的添加水平,对29日龄江南白鹅公鹅的生长发育未产生显著影响。然而,与无机硒组相比,有机硒组在生长性能上表现出一定的优势^[44]。添加0.3%高负载硒丁酸梭菌后生元,北京鸭料重比降低10.89%,屠宰率和胸肌率分别提高4.21%、9.46%^[45]。添加1 mg/kg 富硒食用菌粉,肉鸭平均日增重和平均日采食量分别提高12.76%、11.69%^[46]。1~28日龄扬州鹅仔鹅饲料中硒的适宜添加水平为0.28~0.29 mg/kg,29~70日龄为0.33~0.35 mg/kg,此剂量可显著提高体重和平均日增重^[34]。在肉仔鹅生长早期添加0.35 mg/kg 硒时,生长性能最佳,与基础饲料相比,体重提高3.87%,平均日采食量提高0.26%,平均日增重提高3.75%^[47]。

4.2 硒对家禽产品品质的影响

4.2.1 硒对家禽肉品质的影响

羟基-硒代蛋氨酸能够改善肉鸡胸肌的保水性、pH值和肉色^[48]。与基础饲料相比,添加60 μg/kg 枯草芽孢杆菌生物合成的纳米硒颗粒,肉鸡胸肌含量提高19%,腹部脂肪含量降低24%^[41]。此外,5 mg/kg的纳米硒颗粒(硒含量为8%)可通过调节铁死亡通路,改善热应激对肉鸡腿肌品质造成的损伤^[49]。蛋氨酸硒能够提高29日龄江南白鹅公鹅肌肉pH值,降低失水率,改善肉品质^[44]。0.3%高负载硒植物乳杆菌及其后生元可使北京鸭胸肌pH值降低1.89%,红度值提高16.52%,蒸煮损失降低28.30%^[45]。酵母硒同样表现出改善效果,0.45 mg/kg 组肉鸭胸肌蛋白质含量较对照组提高8.27%^[50]。在鹅的研究中,与亚硒酸钠相比,不同添加水平的蛋氨酸硒可使胸肌失水率降低11.40%~45.14%,pH_{24h}值提高2.11%~5.39%,并显著提高胸肌硒含量,从而改善肉品质^[44]。

4.2.2 硒对家禽蛋品质的影响

有机硒在蛋黄中的沉积效率显著高于无机硒。研究表明,0.3 mg/kg 蛋氨酸硒可使鸡蛋中硒含量提高约144%^[51],0.3 mg/kg 细菌硒可使蛋黄中硒含量提高约234.43%^[52]。不同有机硒源对沉积部位存在差异,酵母硒和蛋氨酸硒在蛋黄和蛋清中的沉积表现不同^[25],且蛋氨酸硒向鸡蛋的转移效率优于酵母硒和亚硒酸钠^[53-54]。尽管部分研究未发现硒对蛋壳强度、哈氏单位等常规蛋品质指标有显著影响^[55-56],但其对色泽等感官品质及内在健康的改善作用已得到证实。例如,MUHAMMAD等^[57]研究发现,与对照组相比,0.3 mg/kg 酵母硒使新鲜鸡蛋的黄度值提高3.03%、贮藏鸡蛋的黄度值提高6.40%。这种改善效果可能与有机硒通过维持氧化稳态、抑制细胞凋亡等机制,改善输卵管健康相关^[58]。

4.3 硒对家禽肠道健康的影响

在肉鸡中,有机硒能够改善十二指肠组织形态^[59],纳米硒可优化肠道黏膜形态^[60],而枯草芽孢杆菌生物合成的纳米硒颗粒能够减少肠道有害菌数量、增加乳酸菌数量^[41]。在蛋鸡中,酵母硒能够平衡回肠菌群组成、改善肠道环境^[61],通过提高抗炎相关菌群的相对丰度,减轻肠炎沙门氏菌等致病菌感染造成的损伤^[62]。研究发现,在北京鸭饲料中添加0.3%高负载硒丁酸梭菌,空肠、回肠绒毛高度分别提高21.22%、31.68%,绒毛高度/隐窝深度分别提高30.55%、44.56%,改善了十二指肠形态,同时提高了盲肠拟杆菌门和拟杆菌属的相对丰度,降低了厚壁菌门的相对丰度^[63]。综上所述,硒通过改善家禽肠道健康,增强了肠道消化吸收功能,为改善生长性能和增强免疫功能奠定基础。

5 结论

硒作为家禽必需的微量元素,其生物学效应受化学形态和添加水平等因素的影响。有机硒在生物利用度、

组织沉积及对家禽生产性能和产品品质的影响方面均优于传统无机硒。补充适宜剂量的有机硒能够增强家禽的抗氧化能力和免疫功能,而上调硒蛋白表达是实现这些功能作用的关键分子机制。不同组织中的硒蛋白对硒缺乏的敏感性存在差异。在实际应用中,从应用安全性与效率角度考量,富硒细菌或生物合成的纳米硒的应用前景更广阔。未来研究应进一步阐明不同硒形态的代谢机理及其与特定硒蛋白表达间的关联,为精准营养调控提供参考依据。

参考文献

- [1] SURAI P F, KOCHISH I I. Food for thought: Nano-selenium in poultry nutrition and health[J]. *Animal Health Research Reviews*, 2020, 21(2): 103–107.
- [2] GAO X L, YE C, MA H L, et al. Research advances in preparation, stability, application, and possible risks of nanoselenium: Focus on food and food-related fields[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(23): 8731–8745.
- [3] YE R H, HUANG J Q, WANG Z X, et al. The role and mechanism of essential selenoproteins for homeostasis[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(5): 973.
- [4] ZOIDIS E, SEREMELIS I, KONTOPOULOS N, et al. Selenium-dependent antioxidant enzymes: Actions and properties of selenoproteins[J]. *Antioxidants*, 2018, 7(5): 66.
- [5] LEI X G, COMBS G F J, SUNDE R A, et al. Dietary selenium across species[J]. *Annual Review of Nutrition*, 2022, 42: 337–375.
- [6] CHRISTENSEN M J, JANGHORBANI M, STEINKE F H, et al. Simultaneous determination of absorption of selenium from poultry meat and selenite in young men: Application of a triple stable-isotope method[J]. *The British Journal of Nutrition*, 1983, 50(1): 43–50.
- [7] MICHALAK I, DZIERGOWSKA K, ALAGAWANY M, et al. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry[J]. *Veterinary Quarterly*, 2022, 42(1): 68–94.
- [8] WANG Z X, KONG L L, ZHU L X, et al. The mixed application of organic and inorganic selenium shows better effects on incubation and progeny parameters[J]. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 1132–1141.
- [9] BANO I, SKALICKOVA S, ARBAB S, et al. Toxicological effects of nanoselenium in animals[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2022, 13(1): 72.
- [10] LIU G Q, CAO S M, HUANG L, et al. Relative bioavailability of selenium yeast, selenomethionine, hydroxyl-selenomethionine and nano-selenium for broilers[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2025, 11: 1542557.
- [11] OJEDA M L, CARRERAS O, NOGALES F, et al. The role of selenoprotein tissue homeostasis in MetS programming: Energy balance and cardiometabolic implications[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(2): 394.
- [12] DI NUNZIO M, BORDONI A, AURELI F, et al. Sourdough fermentation favorably influences selenium biotransformation and the biological effects of flatbread[J]. *Nutrients*, 2018, 10(12): 1898.
- [13] FANTA S, AMIR M, RIAU D P. The role of protocols in facilitating the activities of regional heads secretariat at the central Buton district[J]. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2024, 11(2): 4–9.
- [14] LV L, LI L A, ZHANG R B, et al. Effects of dietary supplementation of selenium enriched yeast on egg selenium content and egg production of north China hens[J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2018, 51(1): 49–55.
- [15] SURAI P F, KOCHISH I I. Nutritional modulation of the antioxidant capacities in poultry: The case of selenium[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(10): 4231–4239.
- [16] STEINBRENNER H, SPECKMANN B, KLOTZ L O. Selenoproteins: Antioxidant selenoenzymes and beyond[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2016, 595: 113–119.
- [17] LIU Z H. Antioxidant activity of the thioredoxin system[J]. *Biophysics Reports*, 2023, 9(1): 26–32.
- [18] HANDY D E, LOSCALZO J. The role of glutathione peroxidase-1 in health and disease[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2022, 188: 146–161.
- [19] HE X J, LIN Y C, LIAN S, et al. Selenium deficiency in chickens induces intestinal mucosal injury by affecting the mucosa morphology, SIgA secretion, and GSH-Px activity[J]. *Biological Trace Element Research*, 2020, 197(2): 660–666.
- [20] PECORARO B M, LEAL D F, FRIAS-DE-DIEGO A, et al. The health benefits of selenium in food animals: A review[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2022, 13(1): 58.
- [21] LI Z M, DONG Y P, CHEN S R, et al. Organic selenium increased gilts antioxidant capacity, immune function, and changed intestinal microbiota[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 723190.
- [22] DUNTAS L H, HUBALEWSKA-DYDEJCZYK A. Selenium and inflammation: Potential use and future perspectives[J]. *US Endocrinology*, 2015, 11(2): 97.
- [23] PETERSON L, EDNER N M, OVCINNIKOV V, et al. T cell/B cell collaboration and autoimmunity: An intimate relationship[J]. *Frontiers in Immunology*, 2018, 9: 1941.
- [24] CHEN Y H, ZHANG S S, GAO X Y, et al. Selenium nanoparticles affect chicken offspring's intestinal health better than other selenium sources[J]. *Poultry Science*, 2024, 103(12): 104367.
- [25] LI Y, MU T M, LI R, et al. Effects of different selenium sources and levels on the physiological state, selenoprotein expression, and production and preservation of selenium-enriched eggs in laying hens[J]. *Poultry Science*, 2024, 103(2): 103347.
- [26] KHOSO P A, ZHANG Y M, YIN H, et al. Selenium deficiency affects immune function by influencing selenoprotein and cytokine expression in chicken spleen[J]. *Biological Trace Element Research*, 2019, 187(2): 506–516.
- [27] HAMED A A, HAWWA M T, BARAKA D M, et al. Understanding antimicrobial activity of biogenic selenium nanoparticles and selenium/chitosan nano-incorporates via studying their inhibition activity against key metabolic enzymes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 298: 140073.
- [28] GRUDNIAK A, FOLCIK J, SZMYTKE J, et al. Mechanism of antioxidant activity of selenium nanoparticles obtained by green and chemical synthesis[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2025, 20: 2797–2811.
- [29] HAN H W, PATEL K D, KWAK J H, et al. Selenium nanoparticles as candidates for antibacterial substitutes and supplements against multidrug-resistant bacteria[J]. *Biomolecules*, 2021, 11(7): 1028.
- [30] XU X, HOU Y Q, LIN S M, et al. Sodium selenite inhibits

- proliferation of lung cancer cells by inhibiting NF- κ B nuclear translocation and down-regulating PDK1 expression which is a key enzyme in energy metabolism expression[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2023, 78: 127147.
- [31] MARTÍNEZ-ESQUIVIAS F, GUTIÉRREZ-ANGULO M, PÉREZ-LARIOS A, et al. Anticancer activity of selenium nanoparticles *in vitro* studies[J]. Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry, 2022, 22(9): 1658–1673.
- [32] ZHOU J M, OBIANWUNA U E, ZHANG L F, et al. Comparative effects of selenium-enriched lactobacilli and selenium-enriched yeast on performance, egg selenium enrichment, antioxidant capacity, and ileal microbiota in laying hens[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2025, 16(1): 27.
- [33] ZHANG L F, ZHOU J M, OBIANWUNA U E, et al. Optimizing selenium-enriched yeast supplementation in laying hens: Enhancing egg quality, selenium concentration in eggs, antioxidant defense, and liver health[J]. Poultry Science, 2025, 104(1): 104584.
- [34] 杨海明, 王志跃, 孙红暖, 等. 硒对仔鹅生长性能、血清生化指标、抗氧化能力、屠宰性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(12): 3699–3707.
- [35] 黄东璋, 刘明生, 王健, 等. 硒中毒对雏鹅免疫机能的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 218–220.
- [36] 袁斌香, 刘燕娜, 王娟, 等. 日粮中添加微量元素硒对肉鸡生长性能及抗氧化功能的影响[J]. 中国饲料, 2023(24): 74–77.
- [37] 沈雨甜, 张小东, 张玲, 等. 不同硒源对黄羽肉鸡生长性能和肠道形态及抗氧化功能、免疫功能和细胞凋亡的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(12): 7711–7722.
- [38] 李雪男. 不同硒源对太行鸡生产性能、硒沉积及基因表达的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [39] 张佳鑫, 陈继发. 酵母硒对氧化应激肉鸡盲肠菌群的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 107–113.
- [40] 姜毅峰, 王密. 纳米硒对AA肉鸡生长性能和肉品质的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(15): 40–44.
- [41] AL-QUWAIE D A. The influence of bacterial selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* DA20 on blood constituents, growth performance, carcass traits, and gut microbiota of broiler chickens[J]. Poultry Science, 2023, 102(9): 102848.
- [42] LU J, QU L, SHEN M M, et al. Effects of high-dose selenium-enriched yeast on laying performance, egg quality, clinical blood parameters, organ development, and selenium deposition in laying hens[J]. Poultry Science, 2019, 98(6): 2522–2530.
- [43] LU J, QU L, MA M, et al. Efficacy evaluation of selenium-enriched yeast in laying hens: effects on performance, egg quality, organ development, and selenium deposition[J]. Poultry Science, 2020, 99(11): 6267–6277.
- [44] 鞠耿越, 万晓莉, 杨海明, 等. 不同硒源和硒添加水平对鹅生长性能、屠宰性能、肉品质和胸肌硒含量的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 662–668.
- [45] 闫慧慧, 王宝维, 凡文磊, 等. 高负载硒丁酸梭菌及其后生元对肉鸭生长性能、屠宰性能、血清脂质指标及肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(1): 355–364.
- [46] 王萍, 金晶. 富硒食用菌粉对肉鸭生长性能、养分消化率及抗氧化能力的影响[J]. 中国饲料, 2023(10): 134–137.
- [47] 孙红暖, 巨晓军, 王志跃, 等. 硒对肉仔鹅早期生长性能、血清生化指标和器官发育的影响[J]. 中国家禽, 2015, 37(7): 29–33.
- [48] TANG J Y, HE Z, LIU Y G, et al. Effect of supplementing hydroxy selenomethionine on meat quality of yellow feather broiler[J]. Poultry Science, 2021, 100(10): 101389.
- [49] HUANG M Y, AN Y C, ZHANG S Y, et al. Metabolomic analysis reveals biogenic selenium nanoparticles improve the meat quality of thigh muscle in heat-stressed broilers is related to the regulation of ferroptosis pathway[J]. Poultry Science, 2024, 103(4): 103554.
- [50] 李红英, 欧阳清芳, 储玉双. 酵母硒添加水平对肉鸭胴体品质、组织硒含量及抗氧化性能的影响[J]. 中国饲料, 2018(18): 43–47.
- [51] ŚLUPCZYŃSKA M, JAMROZ D, ORDA J, et al. Long-term supplementation of laying hen diets with various selenium sources as a method for the fortification of eggs with selenium[J]. Journal of Chemistry, 2018, 3(7): 1–7.
- [52] MUHAMMAD A I, MOHAMED D A, CHWEN L T, et al. Effect of selenium sources on laying performance, egg quality characteristics, intestinal morphology, microbial population and digesta volatile fatty acids in laying hens[J]. Animals, 2021, 11(6): 1681.
- [53] JING C L, DONG X F, WANG Z M, et al. Comparative study of DL-selenomethionine vs sodium selenite and seleno-yeast on antioxidant activity and selenium status in laying hens[J]. Poultry Science, 2015, 94(5): 965–975.
- [54] DELEZIE E, ROVERS M, VAN DER AA A, et al. Comparing responses to different selenium sources and dosages in laying hens[J]. Poultry Science, 2014, 93(12): 3083–3090.
- [55] LIU H, YU Q F, FANG C K, et al. Effect of selenium source and level on performance, egg quality, egg selenium content, and serum biochemical parameters in laying hens[J]. Foods, 2020, 9(1): 68.
- [56] QIU K, ZHENG J J, OBIANWUNA U E, et al. Effects of dietary selenium sources on physiological status of laying hens and production of selenium-enriched eggs[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 726770.
- [57] MUHAMMAD A I, MOHAMED D A A, CHWEN L T, et al. Effect of sodium selenite, selenium yeast, and bacterial enriched protein on chicken egg yolk color, antioxidant profiles, and oxidative stability[J]. Foods, 2021, 10(4): 871.
- [58] YANG J Y, LIU Y M, HU W, et al. Dietary supplementation with selenium yeast mitigates diquat-induced oxidative damage in oviductal magnum of hens[J]. Poultry Science, 2025, 104(11): 105882.
- [59] 胡胜军. 硒和微生态制剂对肉鸡生长性能、肠道健康以及肉品质的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [60] 李丽伟, 马梦梦, 刘会超, 等. 不同硒源对肉鸡生长性能、组织硒含量、肠道抗氧化及菌群结构的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(2): 282–292.
- [61] LIU Z X, CAO Y T, AI Y, et al. Microbiome and ileum transcriptome revealed the boosting effects of selenium yeast on egg production in aged laying hens[J]. Animal Nutrition, 2022, 10: 124–136.
- [62] KANG R F, WANG W H, LIU Y F, et al. Dietary selenium sources alleviate immune challenge induced by *Salmonella enteritidis* potentially through improving the host immune response and gut microbiota in laying hens[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 928865.
- [63] 闫慧慧, 王宝维, 张名爱, 等. 高负载硒丁酸梭菌及其后生元对北京鸭免疫功能、肠道形态及盲肠菌群结构的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(10): 6766–6776.