DOI:10.13300/j.cnki.cn42-1648/s.2026.09.009

有机微量元素锰锌的协同作用及其在蛋鸡养殖中的应用研究进展

李腾腾[1],何万领[2*],任振东[3]
1.河南科技大学动物科技学院,河南洛阳 471023;
2.河南省生物发酵微量元素添加剂工程技术研究中心,河南鹤壁 456250;
3.河南岐伯实业有限公司,河南鹤壁 456250

摘要 锰、锌是维持蛋鸡正常生理代谢不可或缺的微量矿物元素,参与蛋壳结构形成、机体免疫调控与抗氧化防御等关键生理过程。相较于传统无机微量元素,氨基酸螯合物、蛋白盐、酵母结合态等有机锰锌具备吸收利用率高、理化性质稳定、环境负担更小等优势,目前是家禽营养领域的研究热点。本文系统梳理有机锌、锰的生理功能、分子调控机制与协同作用,分阶段总结其在蛋鸡不同生长周期内的应用价值,阐述其优化蛋品品质、提升机体免疫及抗氧化水平的实际效果;同时分析有机微量元素减量替代模式带来的减排优势与生态价值,客观梳理现阶段实际应用中存在的争议及各类影响因素,为有机锰锌在蛋鸡养殖中的科学应用提供参考。

关键词 有机锌;有机锰;蛋鸡;生物学功能;微量元素;蛋品质;免疫水平;抗氧化能力

Research progress on the synergistic effects of organic trace elements manganese and zinc and their application in laying hens

Li Tengteng[1], He Wanling[2*], Ren Zhendong[3]
1.College of Animal Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2.Henan Province Engineering Research Center of Bio-Fermentation Trace Element Feed Additives, Hebi 456250,China; 3.Henan Qibo Industrial Co.,Ltd., Hebi 456250, China

Abstract Zinc and manganese are essential trace minerals sustaining the normal physiological metabolism of laying hens, participating in core physiological processes including eggshell formation, immune regulation and antioxidant defense. Compared with conventional inorganic trace minerals, organic manganese and zinc such as amino acid chelates, proteinates and yeast-bound complexes feature higher bioavailability, stable physicochemical properties and lower environmental pressure, which have become research hotspots in poultry nutrition. This paper systematically reviews the physiological functions, molecular regulatory mechanisms and synergistic interactions of organic zinc and manganese, summarizes their application values across different growth stages of laying hens, and elaborates their practical effects on optimizing egg quality and boosting the immune and antioxidant capacity of hens. It also analyzes the emission reduction benefits and ecological value

收稿日期:2026-04-03
基金项目:河南省青年科学基金项目(212300410136);河南岐伯实业有限公司重点研发项目(4025-22010074)
作者简介:李腾腾,女,1997年生,硕士研究生。*通信作者:何万领,男,1976年生,教授,硕士生导师。

brought by partial replacement of inorganic minerals with organic trace minerals, objectively sorts out existing controversies and various influencing factors in practical application, and prospects future research directions, providing theoretical references for scientific and rational application of organic manganese and zinc in laying hen breeding.

Keywords　organic zinc; organic manganese; laying hen; biological function; trace element; egg quality; immune status; antioxidant capacity

近年来，随着全球范围内畜牧业的飞速发展，如何提高微量元素的利用率成为当前动物营养领域关注的重要课题之一；而蛋鸡作为世界上重要的家禽种类之一，其微量营养元素不仅关系到蛋鸡养殖业的经济效益、鸡蛋的质量以及生态环境保护等方面，还关系到人类的健康水平。其中，锌和锰是机体内许多重要酶类的辅基或激活剂，参与蛋鸡机体的生长发育、免疫应答、抗氧化以及骨骼和蛋壳的形成[1-3]。传统无机微量元素（如硫酸锌、硫酸锰）虽成本低廉，但存在化学结构不稳定、生物效价低、在肠道内易受拮抗与沉淀影响等问题，导致无机锌、锰的利用率偏低不足 20%[4-5]。大量未能被吸收利用的无机物质经由粪便排出体外，既造成资源浪费，也促使土壤中重金属积聚并引发环境污染。

近年来，由于有机微量元素（如氨基酸螯合锌、锰，蛋白盐等）具有结构稳定性好、生物利用率高、拮抗能力强的特点，在应用方面其逐渐取代无机微量元素。国内外的较多研究表明，有机锌、锰可以提高蛋鸡的生产性能，增强机体免疫力及改善蛋品质，并且减少粪便中的微量元素排放[6-7]。然而，不同有机形态（如甘氨酸锌、蛋氨酸锰等）在蛋鸡各生理阶段（育雏、育成、产蛋期）的适宜添加水平尚未达成共识，且在低排放日粮中的精准应用策略与环境效益评估仍需深入探讨。

本文系统梳理有机锌、锰在家禽主要是蛋鸡上的使用情况及作用机制，重点阐述蛋鸡不同生理阶段的适宜添加量、与其他营养素的互作关系以及生态效益等问题，旨在为蛋鸡锌、锰的精准营养方案的制定提供参考依据，促进蛋鸡精准营养与高效生产发展。

1　锌、锰的生理功能及其在蛋鸡营养中的重要性

1.1　锌的生理功能及缺乏症

锌是蛋鸡体内超过 300 种酶的辅助因子，参与蛋白质合成、能量代谢、细胞分裂、机体免疫调节等重要的生理过程[8]。锌刺激垂体分泌促性腺激素，从而促进激素的合成和分泌（胰岛素、性激素、生长激素等），对性腺起着调节作用，并且参与骨骼发育、羽毛生长和食欲调节[9]。锌在抗氧化系统中起着核心的作用，维持细胞的氧化还原平衡[10]。锌缺乏会引起物质代谢障碍和造血功能异常，临床表现为蛋壳变薄、孵化率下降，鸡胚胎出现骨骼发育不全和畸形，雏鸡成活率低[11]。肉鸡缺锌就会引起羽毛磨损、生长受阻等现象[12]。

1.2　锰的生理功能及缺乏症

作为动物机体内众多营养代谢不可或缺的一种元素，锰既是许多酶的激活剂和构成成分，也是碳水化合物、脂肪及蛋白质代谢过程中的重要参与者，并对骨骼发育、繁殖性能及抗氧化防御有至关重要的影响[13]。锰还参与蛋壳基质中酸性黏多糖和糖蛋白的形成，锰可以促进蛋壳有机框架形成，从而影响蛋壳的机械强度及抗裂性能；除此之外，锰还可以通过调控抗氧化酶活性以及免疫相关的信号通路途径，来维持细胞的正常生理功能[14]。

缺锰会导致蛋鸡血浆雌激素和孕酮含量减少，影响繁殖性能，并伴随着产蛋率下降和鸡胚死亡率上升。在母鸡日粮中添加 120 mg/kg 的有机锰可以提高机体抗凋亡基因 *BCL2* mRNA 和蛋白质的表达，并增强胚胎心脏锰超氧化物歧化酶的（Mn-SOD）活性，进而提高胚胎的抗氧化和抗凋亡能力；最后提高胚胎的孵化率及成活率[15]。蛋鸡严重缺锰会引发骨短粗症、滑腱症，影响雏鸡骨代谢相关激素水平，并导致骨质疏松症的发生[16]。此外，锰缺乏还会抑制胸肌发育，表现为肌纤维直径减小和生长迟缓[17-20]。

尽管锌、锰对蛋鸡健康与生产至关重要，但其营养效能的发挥高度依赖于其在动物体内的吸收与代谢效率。不同化学形态的锌、锰在生物利用度上存在显著差异。

2 有机锌、锰与无机锌、锰的多重对比

2.1 综合特性

有机锌、锰（氨基酸/小肽螯合物等）与无机锌、锰（硫酸盐、氧化物等）在化学结构、吸收效率、营养互作、环境影响、成本工艺等方面存在显著差异，直接决定其在蛋鸡日粮中的应用效果与适用场景。两类微量元素的综合特性具体见表1。

2.2 环境排放差异性

为兼顾蛋鸡养殖生产效益、养殖环境生态保护与蛋鸡机体健康，有机锌锰的减量添加成为蛋鸡微量元素营养调控的重要研究方向。相关研究证实，按无机微量元素（铁 75 mg/kg、锰 60 mg/kg、锌 60 mg/kg、铜 6 mg/kg、硒 0.3 mg/kg）添加量的 60% 添加小肽螯合铁、铜、锰、锌，在不影响蛋鸡生产性能的前提下，可显著降低粪便中微量元素的排泄量，减少养殖环境中的重金属污染[34]。

表1 有机锌、锰与无机锌、锰的综合特性比较

项目	有机锌、锰（如氨基酸、小肽螯合物）	无机锌、锰（如硫酸盐、氧化物）	文献来源
化学形态与稳定性	以配位键与有机配体（如氨基酸、小肽）形成稳定螯合物，在胃肠道 pH 范围内溶解度与稳定性高，不易解离	简单盐类或氧化物，在消化道内易受 pH 及植酸等影响，发生水解或沉淀，化学性质不稳定	［21-24］
吸收途径与效率	主要通过氨基酸或小肽转运系统（如 PepT1）以完整分子形式被主动吸收，吸收效率高，生物学效价显著高于无机形式	主要以游离离子形式通过被动扩散或离子通道吸收，吸收过程易受拮抗物干扰，吸收率低且波动大	［25］
对营养物质的影响	化学性质温和，对饲料中维生素、脂肪等其他营养成分破坏小	高浓度游离离子具有催化氧化等活性，可加速饲料中维生素（如维生素 A、E）的氧化降解	［26-29］
环境影响	吸收率高，粪便中排出量少，对土壤和水体的重金属污染风险较低	大量未被吸收的金属离子随粪便排出，长期使用易造成土壤重金属（如锌、锰）累积，环境污染风险高	［30］
成本与工艺	生产工艺复杂，涉及螯合或络合反应，单位元素成本较高	生产工艺简单，原料易得，单位元素成本低廉	［30］
主要优势	吸收快、效价高、稳定性好、环境污染小、有助于减少饲料中总微量元素添加量	成本低、供应稳定、在促生长（如高锌）或特定疾病防控（如氧化锌）中应用经验丰富	［30］
主要局限	单位成本高；不同产品螯合强度与质量参差不齐，原料稳定性差，储运过程中容易失效。影响效果稳定性	吸收利用率低，无机锌的吸收率仅为 14%～67%；需超量添加造成浪费；环境污染压力大；破坏饲料中其他养分	［31-33］

此外，采用30%～50%添加量的氨基酸螯合铁、铜、锰、锌替代蛋鸡无机微量元素常规量（如铁 60 mg/kg、铜 10 mg/kg、锰 80 mg/kg、锌 80 mg/kg）时，不仅不会对蛋鸡的生产性能产生负面影响，还能有效提升蛋鸡的蛋品质、增强蛋鸡机体抗氧化与免疫性能、促进矿物质在机体内的沉积，同时进一步减少微量元素的排放，实现养殖效益与生态效益的双重提升[35-36]。

3 有机锌、锰的协同作用

3.1 生理功能层面

微量元素中的锌可以激活碳酸酐酶（carbonic anhydrase，CA），促进蛋壳腺 HCO_3^- 的生成与钙沉积；锰是糖基转移酶的辅酶，参与蛋壳中有机基质（糖胺聚糖、糖蛋白）合成，两者协同构建“基质+钙化”完整的蛋壳结构，并且一起参与骨胶原的合成与矿化，保障骨骼的强度，减少产蛋期的骨质疏松、骨折的发生[37]。但单一微量元素作用效果有限，有机锌和有机锰可共同调节蛋鸡体内的相关生理通路，达到“1+1＞2”的增效效果。研究发现，以硫酸盐的形式往蛋鸡日粮中添加无机锌（32 mg/kg）、锰（32 mg/kg），有助于改善蛋鸡的初始生产性能，促进初卵龄达到最佳状态，并对生殖系统产生积极影响[38]。11 mg/kg有机锌（羟基蛋氨酸锌）+8 mg/kg有机锰（羟基蛋氨酸锰）组，蛋壳强度较无机组提升11.21%，破蛋率下降7.29%[39]。

3.2 细胞与分子层面

锌通过金属硫蛋白参与抗氧化作用，除可直接清除自由基、抑制羟基自由基（·OH）生成外，其释放的 Zn^{2+} 还可以作为关键的信号分子，与其他微量

元素如锰协同作用，在更广泛的信号通路网络中，将抗氧化与免疫调节的功能整合起来发挥作用。具体而言，金属硫蛋白（MT）会通过自身的半胱氨酸残基（cysteine residue，Cys）高效结合锌离子，形成金属硫蛋白－锌离子复合物（metallothionein-zinc ion complex，MT-Zn^{2+}）复合物，这种复合物可以直接清除·OH、过氧亚硝基阴离子等活性氧和活性氮物质，并且在这个过程中会促使锌离子释放；释放出来的Zn^{2+}可以作为1种信号分子来活化金属调节转录因子1（MTF-1）进而诱导金属硫蛋白（metallothionein，MT）自身以及铜锌超氧化物歧化酶（Cu/Zn-SOD）等抗氧酶基因表达，形成1个自我强化的正向调控循环[39]。另外，MT还能螯合Cu^{+}/Fe^{2+}来减少芬顿（Fenton）反应的发生从而防止·OH的产生[40]。同时释放的锌离子，会和锰这种必需微量元素一起，在细胞信号通路中起到核心调控作用，让抗氧化防御与机体的免疫、炎症反应紧密联系在一起[41-42]。锌参与Cu/Zn-SOD和谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase，GSH-Px）的合成，锰是Mn-SOD的主要组成成分，并共同发挥着清除活性氧（ROS）的作用，减轻氧化应激；同时调节T/B淋巴细胞增殖和细胞因子的分泌，提高机体的抗感染力，减少产蛋期的免疫抑制。成廷水等[43]研究表明，与不添加Zn的对照组相比，在蛋鸡饲粮中按照60 mg/kg水平添加氨基酸锌能显著提高肝脏和脾脏组织Cu/Zn-SOD和总SOD活性（$P<0.05$）。

3.3　与其他营养素的互作关系

锌、锰等二价离子在肠道内主要是通过二价金属离子转运体1（divalent metal transporter 1，DMT1）转运蛋白吸收，彼此之间具有竞争性抑制作用，当其中一种元素过量时，会抑制其他元素的吸收，进而物理性地阻碍其他元素的吸收及转运，导致后者吸收率降低[44-46]。有机微量元素因其吸收路径不同，比如通过肽转运体1（peptide transporter 1，PepT1）转运，有效地避免了与无机离子的直接竞争，提高了联合使用的效率[47]。

另外，有机锌、锰与植酸酶、有机酸、维生素等联合使用，在肠道健康、抗氧化与免疫调节上可以起到协同作用，从而更好地促进营养物质的消化吸收与利用[48]。

4　有机锌、锰在蛋鸡不同生理阶段的应用效果

4.1　在育雏期的应用效果

育雏期是蛋鸡骨骼、免疫、消化系统发育的重要时期，育雏期锌、锰的充足供给和高效吸收，直接影响雏鸡生长发育指标及后期生产性能，有机锌、锰因为吸收效率高，在育雏期营养调控中具有明显优势。在1日龄的“大午金凤”蛋鸡日粮中添加复合有机微量元素（甘氨酸铜75 mg/kg、赖氨酸锌200 mg/kg、蛋氨酸锰28 mg/kg、甘氨酸铁200 mg/kg），可以提高雏鸡体重、胫骨长度，降低死淘率，并间接地提高其免疫水平[49]；另外，在23周龄的海兰褐蛋鸡日粮中，添加氨基酸螯合锌、锰可以通过母体效应来改善后代雏鸡的抗氧化能力以及微量元素沉积，其中以等量添加组（40 mg/kg）效果最好[50]。在1日龄的罗斯308代肉鸡饲粮中加入80 mg/kg的有机锌（甘氨酸锌、蛋氨酸锌）可以显著提高肉鸡前期日增重，降低料重比，提示在鸡育雏阶段也有应用前景[51]。程妮等[52]研究发现在1～6周罗曼褐壳蛋鸡日粮中加入103.31 mg/kg的锌和93.93 mg/kg的锰可以提高雏鸡日增重。综上所述，育雏期补充有机锌、锰或者复合有机微量元素，可以多方面改善雏鸡的生长发育、免疫性能和微量元素代谢水平，而且添加适宜剂量的有机锌、锰还可以通过母体效应影响后代，为蛋鸡全程生产性能奠定基础。

4.2　在育成期的应用效果

育成期蛋鸡处于骨骼、肌肉和内脏器官快速发育阶段，该阶段锌、锰的精准供给不仅关乎机体生长发育进程，更对组织抗氧化能力、免疫功能等生理指标具有重要调控作用，直接影响蛋鸡后续产蛋期生产性能。研究发现，13～17周龄京粉6号蛋鸡每日锌、锰需要量分别为0.29～0.40 mg/d和0.03～0.05 mg/d[53]。研究表明，在3周龄海兰褐蛋鸡日粮中添加40 mg/kg氨基酸锌，或复合氨基酸锌、铜、锰（分别为40、8、60 mg/kg）与添加相同剂量的硫酸锌组相比，氨基酸锌组显著降低了丙二醛（MDA）含量，提高了脾脏CuZn-SOD、T-SOD活性并降低了脾脏MDA含量；复合氨基酸组显著提高了18周龄肝脏TAOC、脾脏谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性，降低了肝脏MDA含量[43]。这说明育成期蛋鸡日粮中添加有机形态的锌（氨基酸锌）及锌锰复合有机微量元素，在改善肝脏、脾脏等组织的抗氧化

功能方面优于无机形态的锌(硫酸锌)。

4.3 在产蛋期的应用效果

随着产蛋周期的延长,蛋鸡的生产性能、蛋品质和免疫功能逐渐下降,而通过日粮优化补充有机微量元素,可针对性改善上述生理与生产问题。研究表明,在300日龄海兰褐蛋鸡日粮中添加有机微量矿物质(羟基蛋氨酸螯合锌、铁、锰、铜混合饲料)可促进锌在蛋壳腺沉积、增强碳酸酐酶活性,进而提高蛋壳钙化效率,增强蛋壳强度,破蛋率降低5.35%[54]。在150日龄大午金凤蛋鸡日粮中添加复合微量元素(如甘氨酸铜75 mg/kg、赖氨酸锌200 mg/kg、蛋氨酸锰28 mg/kg、甘氨酸铁200 mg/kg),与添加相同剂量的无机组相比,可降低蛋鸡产蛋期的死淘率,延长产蛋高峰期,蛋质量增加10.32%[49]。日粮中添加40、80 mg/kg蛋氨酸螯合锌对产蛋后期蛋鸡的生产性能没有显著影响,但可以降低死亡率,改善蛋壳质量且可提高血液中禽流感H5抗体的水平,延缓新城疫(ND)抗体、免疫球蛋白G和M呈下降的趋势[55]。锰是机体内一系列酶的激活剂,能影响蛋白质—黏多糖的合成,这一重要的糖蛋白是蛋壳基层的有机成分,影响着蛋壳钙化作用的启动,与蛋壳的抗裂强度有关。锌是碳酸酐酶的主要成分,在碳酸酐酶的催化作用下,细胞能生成二氧化碳,二氧化碳与钙结合并形成沉淀物,逐渐沉积到蛋壳膜上形成蛋壳。当机体中这2种元素不足时,蛋壳质量会降低;尤其是当日粮中锰含量低于7 mg/kg时,蛋壳会变薄且易碎,裂纹蛋和破蛋的比例会明显增加[56-57]。由此可见,锌、锰的补充形式与供给量对产蛋期的蛋鸡至关重要。综上所述,在产蛋期日粮中添加有机锌、锰可在一定程度上改善蛋壳质量,提高蛋壳强度和厚度,降低软破蛋率等。除了生长阶段,有机锌、锰的不同化学配体(如氨基酸螯合、小肽螯合等)也对其应用效果产生重要影响。

5 结语与展望

有机锌、锰是高效、环保、功能齐全的微量元素添加剂,在蛋鸡的生产中应用,不仅可以从本质上改善蛋鸡健康状况、生产性能和蛋品质量,而且可以提高生物利用率来节约资源。特别是在蛋壳品质要求高、养殖业追求绿色可持续发展的背景下,科学合理地使用有机锌、锰是实现蛋鸡养殖提质增效和可持续发展的1种有效的营养策略。目前蛋鸡领域研究主要集中在有机微量元素和无机微量元素的比较上,对于不同配体有机锌锰在蛋鸡体内的吸收效率、代谢差异和适配性研究还比较少。未来应进一步研究不同配体有机锌锰的应用效果及适配规律,为蛋鸡养殖的高效、健康、可持续发展提供营养支持。

参 考 文 献

[1] 张积荣,张国庆,李涛,等.半胱胺锌在动物生产中的应用研究进展[J].养殖与饲料,2025,24(1):18-21.

[2] 李泳,占锋,李瑾,等.锌在家禽生产中的应用研究进展[J].中国饲料,2025(19):93-99.

[3] 王成义,梁明,陈星.四种有机微量元素在家禽生产中的应用[J].山东畜牧兽医,2022,43(8):78-80.

[4] 张兰,王良治,黄艳玲,等.饲粮微量元素添加模式对肉仔鸡生长和胴体性能及肌肉品质的影响[J].中国农业科学,2021,54(22):4906-4916.

[5] 李柄耀,韩君.氨基酸微量元素螯合物在蛋禽生产中的应用[J].饲料博览,2005(7):46-48.

[6] 蒋莎莎,杨征烽,杨海明,等.不同微量元素添加水平对蛋鸡生产性能、蛋品质和鸡蛋矿物元素沉积的影响[J].家禽科学,2021(6):10-16.

[7] 王张翔.饲粮添加有机微量元素对产蛋后期海兰褐蛋鸡生产性能、蛋品质量和沉积排放的影响[D].泰安:山东农业大学,2022:47.

[8] 张亚男,武书庚,张海军,等.蛋壳品质营养调控的研究进展[J].中国畜牧杂志,2012,48(21):79-83.

[9] Asnan M,Sharif M,Hamid M M A,et al.Effect of different sources and levels of zinc used in poultry birds:a review[J].J Anim Health Prod,2025,13(4):1016-1034.

[10] 侯爽,刘娇,王昕陟.饲粮中锌、锰和植酸酶水平对肉鸡生长性能、血清生化指标以及血清中锌、锰含量的影响[J].动物营养学报,2020,32(5):2397-2406.

[11] 王贝贝,郝二英,孙亚龙,等.有机锰铁铜锌复合制剂对蛋鸡产蛋性能、蛋品质、血液指标、卵泡发育和胫骨质量的影响[J].动物营养学报,2025,37(5):3055-3067.

[12] Abd El-Hack M E,Alagawany M,Arif M,et al.Organic or inorganic zinc in poultry nutrition:a review[J].Worlds Poult Sci J,2017,73(4):904-915.

[13] 谢亮,李晖,全雪容,等.锰的生物学功能及有机锰在畜禽养殖中的应用研究进展[J].现代畜牧兽医,2026(1):76-80.

[14] Khoshbin M R,Vakili R,Tahmasbi A M.Manganese-methionine chelate improves antioxidant activity,immune system and egg manganese enrichment in the aged laying hens[J].Vet Med Sci,2023,9(1):217-225.

[15] Zhu Y W,Lu L,Liao X D,et al.Maternal dietary manganese protects chick embryos against maternal heat stress via epigenetic-activated antioxidant and anti-apoptotic abilities[J].Oncotarget,2017,8(52):89665-89680.

[16] 马元山,周明.缺锰及饲粮锰水平对鸡组织生化参数与生长性能的影响[J].安徽农业大学学报,2004,31(2):232-235.

[17] 唐亮.不同锰源预防肉鸡胫骨发育不良的应用研究[D].泰安:山东农业大学,2021:7.
[18] 战余铭,王诗民,张琳,等.一起雏鸡锰缺乏诊疗报告[J].山东畜牧兽医,2022,43(7):42-44.
[19] 戴届全.饲养家禽要防缺锰症[J].农村养殖技术,2011(1):38.
[20] Wang Z J, Wang L, Wang Z Y, et al. Effects of manganese deficiency on serum hormones and biochemical markers of bone metabolism in chicks[J].J Bone Miner Metab,2013,31(3):285-292.
[21] 魏启恒,陆唯,徐聪,等.有机微量元素在畜禽养殖上的应用研究进展[J].中国畜牧杂志,2025,61(2):15-19.
[22] Caetano-Silva M E, Cilla A, Bertoldo-Pacheco M T, et al. Evaluation of *in vitro* iron bioavailability in free form and as whey peptide-iron complexes[J].J Food Compos Anal,2018,68:95-100.
[23] 雷乔波.植酸酶对产蛋鸡生产性能、骨骼质量及养分利用率的影响[D].雅安:四川农业大学,2010:5.
[24] 张月平,张志美,马金祥,等.有机微量元素对父母代肉种鸡生产性能的影响[J].中国禽业导刊,2025,42(3):59-61.
[25] Kong J, Qiu T, Yan X, et al. Effect of replacing inorganic minerals with small peptide chelated minerals on production performance, some biochemical parameters and antioxidant status in broiler chickens[J].Front Physiol,2022,13:10278-10290.
[26] 邹晨浩,赵陆原,曹久爱,等.不同剂量和形式微量元素对浓缩料贮存过程油脂氧化稳定性的影响[J].中国畜牧杂志,2023,59(5):194-199.
[27] 马德英,卢文标,陈学豪,等.不同形式微量元素对鳗用复合预混料中维生素稳定性的影响[J].饲料工业,2021,42(22):31-36.
[28] 王湧,张钦强,李雪文,等.不同形式微量元素组合对油脂氧化酸败的影响[J].中国饲料添加剂,2021(2):39-41.
[29] 周俊华,李雅青.有机和无机微量元素对预混料中维生素稳定性的影响[J].中国饲料,2018(22):28-31.
[30] 杨龙帮.微生物富集态微量元素的制备及其对蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[D].洛阳:河南科技大学,2020:2-7.
[31] 任海英.有机微量元素在动物营养中的应用[J].湖北畜牧兽医,2014,35(11):62-63.
[32] 张亦菲,陈剑,李利,等.氨基酸微量元素螯合物质量评价方法研究进展[J].广东饲料,2025,34(5):39-42.
[33] Dobrzański Z, Jamroz D, Górecka H, et al. Bioavailability of selenium and zinc supplied to the feed for laying hens in organic and inorganic form[J].Electron J Pol Agric Univ,2003,6(2):1-6.
[34] 蔡超.不同剂量有机微量元素对蛋鸡生产性能、血清生化指标及蛋黄与粪中微量元素含量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2015:29-30.
[35] 张可可.低剂量有机复合微量元素对蛋鸡蛋壳质量、机体健康等应用效果的研究[D].太谷:山西农业大学,2020:40.
[36] 邱家凌.有机微量元素减量取代对蛋鸡生产、蛋品质和微量元素代谢的影响[D].杭州:浙江大学,2020:51.
[37] Swiatkiewicz S, Koreleski J. The effect of zinc and manganese source in the diet for laying hens on eggshell and bones quality[J]. Veterinární Medicína,2008,53(10):555-563.
[38] Yang X J, Zhong L L, An X F, et al. Effects of diets supplemented with zinc and manganese on performance and related parameters in laying hens[J].Anim Sci J,2012,83(6):474-481.
[39] 喻礼怀,陈连民,丁洛阳,等.饲粮添加有机锌、锰对产蛋中后期蛋鸡蛋壳品质及血液生化指标的影响[J].动物营养学报,2015,27(10):3041-3046.
[40] Günther V, Lindert U, Schaffner W. The taste of heavy metals: Gene regulation by MTF-1[J].Biochim Biophys Acta BBA-Mol Cell Res,2012,1823(9):1416-1425.
[41] Thornalley P J, Vašák M. Possible role for metallothionein in protection against radiation-induced oxidative stress: kinetics and mechanism of its reaction with superoxide and hydroxyl radicals[J]. Biochim Biophys Acta BBA-Protein Struct Mol Enzymol, 1985, 827(1):36-44.
[42] Ruttkay-Nedecky B, Nejdl L, Gumulec J, et al. The role of metallothionein in oxidative stress[J]. Int J Mol Sci, 2013, 14(3): 6044-6066.
[43] 成廷水,冯于明,袁建敏.氨基酸锌及氨基酸锌、铜、锰复合对育成期蛋鸡生长性能及组织抗氧化机能的影响[J].中国畜牧杂志,2004,40(4):22-25.
[44] 王钢.不同形态锰对肉鸡锰吸收及相关基因表达的影响研究[D].重庆:西南大学,2017:10-12.
[45] 白世平.不同形态锰在肉仔鸡小肠中的吸收机理研究[D].北京:中国农业科学院,2008:70-71.
[46] 于昱.不同形态锌在肉仔鸡小肠中的吸收特点及机理研究[D].北京:中国农业科学院,2008:75-76.
[47] 徐伟伟,殷运菊,闫昭明,等.单胃动物微量矿物元素铁、铜、锰、锌吸收机制研究进展[J].畜牧与兽医,2023,55(11):132-137.
[48] 闫威东.有机微量元素和植酸酶对鸡生产性能和铜、锌排泄的影响研究[D].泰安:山东农业大学,2021:47.
[49] 赵亮.有机微量元素对蛋鸡育雏期生长发育及产蛋期产蛋性能的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022:31-34.
[50] 王振鑫,王玉,郝洋洋,等.有机锌锰对蛋雏鸡肝脏抗氧化酶活性及肠道紧密连接蛋白基因表达的影响[J].中国家禽,2019,41(24):49-52.
[51] Xie S X, Li Y P, Suo Y R, et al. Effect of organic, nano, and inorganic zinc sources on growth performance, antioxidant function, and intestinal health of young broilers[J]. Biol Trace Elem Res, 2024, 203(5):2776-2786.
[52] 程妮,姚军虎,张楠,等.复合微量元素对蛋鸡生产性能的影响[J].粮食与饲料工业,2005(5):35-37.
[53] 米小梅,王凌峰,程千惠,等.13～17周龄京粉6号蛋鸡微量元素需要量和动态预测模型研究[J].动物营养学报,2024,36(7):4316-4328.
[54] 张智浩,周凯,赵琼.有机微量矿物质对蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[J].中国禽业导刊,2025,42(3):51-53.
[55] 朱鹰鹏.有机锌对蛋鸡生产性能、蛋品质及免疫功能的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2017:5-20.
[56] 段瑞,王惠云,陈娟,等.不同锰源与水平对蛋鸡产蛋后期生产性能和蛋品质的影响[J].饲料研究,2020,43(3):108-112.
[57] 陆红新,薛雅婕,杨剑锋,等.不同锌源对产蛋后期蛋鸡锌沉积、碳酸酐酶活性、蛋壳钙含量、蛋壳质量和生产性能的影响[J].中国饲料,2023(5):72-76.

【责任编辑:赵琳琳】