

25-羟基维生素 D₃ 的增效作用：改善高峰期蛋鸭蛋壳质量与骨骼健康

李 耘 王华清 付秀玲

天康生物股份有限公司

DOI:10.12238/as.v8i9.3310

[摘 要] 产蛋高峰期蛋鸭面临着巨大的钙磷代谢压力,常导致蛋壳质量下降与胫骨强度受损,造成经济损失。25-羟基维生素D₃(25-(OH)D₃)作为维生素D₃(VD₃)的主要代谢产物,因其吸收效率高、无需肝脏羟化等优势,在改善禽类钙磷代谢方面展现出巨大潜力。本文综述了近年来关于在高峰期蛋鸭日粮中添加25-(OH)D₃的研究进展,重点探讨其对蛋壳超微结构(如乳突层、栅栏层)的改善作用,以及对胫骨强度与骨代谢的增强机制。作用机理主要涉及上调肠道与壳腺中钙结合蛋白(CaBP-D28k)的表达、优化钙磷吸收与转运、调节成骨与破骨细胞活性等。本文旨在为25-(OH)D₃在蛋鸭健康养殖中的科学应用提供理论依据。

[关键词] 25-羟基维生素D₃; 蛋鸭; 蛋壳超微结构; 胫骨强度; 骨代谢; 综述

中图分类号: R977.2+4 **文献标识码:** A

Efficacy of 25-Hydroxyvitamin D₃: Improving Eggshell Quality and Skeletal Health in Laying Ducks during the Peak Production Period

Xian Li Huaqing Wang Xiuling Fu

Tiankang Biotechnology Co., LTD.

[Abstract] During the peak laying period, laying ducks face significant calcium and phosphorus metabolic pressures, which often lead to declines in eggshell quality and impairments in tibial strength, resulting in economic losses. 25-Hydroxyvitamin D₃ (25-(OH)D₃), the major metabolite of vitamin D₃ (VD₃), exhibits great potential in improving calcium and phosphorus metabolism in poultry due to its high absorption efficiency and bypass of hepatic hydroxylation. This review summarizes recent research progress on the supplementation of 25-(OH)D₃ in the diets of laying ducks during the peak production period, with a focus on its beneficial effects on eggshell ultrastructure (e.g., mammillary layer, palisade layer) and the mechanisms by which it enhances tibial strength and bone metabolism. The mechanisms primarily involve upregulating the expression of calcium-binding protein (CaBP-D28k) in the intestine and shell gland, optimizing calcium and phosphorus absorption and transport, and modulating osteoblast and osteoclast activities. This review aims to provide a theoretical basis for the scientific application of 25-(OH)D₃ in the healthy farming of laying ducks.

[Key words] 25-Hydroxyvitamin D₃; laying ducks; eggshell ultrastructure; tibial strength; bone metabolism; review

引言

蛋鸭养殖是我国重要的畜牧业组成部分。产蛋高峰期(通常指开产后至40周左右)的蛋鸭,其繁殖机能旺盛,产蛋率持续维持在高位(90%以上)。然而,极高的产蛋率意味着大量的钙质会随着蛋壳的形成而流失。每产一枚蛋,约需分泌2.0-2.5g的碳酸钙用于形成蛋壳,这无疑对机体的钙磷代谢稳态构成了严峻挑

战。若日粮中的钙、磷或调节其代谢的关键营养素供给不足或利用效率低下,极易引发一系列问题,主要表现为:蛋壳质量下降(如蛋壳变薄、强度降低、破损率升高)和胫骨强度减弱(如骨质疏松、易骨折),俗称“产蛋疲劳症”。

维生素D₃是调节钙磷代谢的核心营养素。传统日粮中普遍添加VD₃,但其生物效用受多种因素影响,如动物健康状况、肠

道吸收效率以及需经肝脏25-羟化酶羟化才能生成具有更高活性的25-(OH)D₃。25-羟基维生素D₃ (25-(OH)D₃, 商品名: 羟钙宝®等) 是VD₃在血液循环中的主要存在形式, 也是进一步合成1, 25-(OH)₂D₃ (活性形式) 的直接前体。近年来, 大量研究表明, 在禽类日粮中添加25-(OH)D₃相比VD₃, 能更高效地改善蛋壳品质和骨骼健康。本文旨在围绕25-(OH)D₃对高峰期蛋鸭蛋壳超微结构与胫骨强度的作用及机制进行系统综述, 以期为该营养素的高效应用提供参考。

1 25-羟基维生素D₃的生物学特性与代谢优势

25-(OH)D₃ (胆钙化醇) 是一种白色结晶粉末, 稳定性优于VD₃。其在动物体内的代谢过程相较于VD₃具有显著优势:

吸收效率高: VD₃的吸收依赖胆汁乳化, 而25-(OH)D₃具有更强的亲水性, 可通过门静脉系统直接被吸收, 吸收路径更高效, 尤其对于肠道功能受损或脂肪消化吸收不良的动物效果更为显著。

代谢无需经过肝脏25-羟化步骤, 利用率更高: VD₃必须首先在肝脏经25-羟化酶 (CYP2R1) 催化生成25-(OH)D₃, 此步骤可能受疾病、毒素或营养因素抑制。而外源补充的25-(OH)D₃可直接进入血液循环, 无需经过此步限速羟化, 因此其生物学效价显著高于VD₃。金永燕 (2023) 在其研究中测算, 25-(OH)D₃在改善蛋鸭蛋壳品质方面的相对生物学效价约为VD₃的1.5-2.5倍。

提高机体维生素D储备: 循环中的25-(OH)D₃半衰期较长, 是体内维生素D的主要储存形式, 能更稳定、持久地为靶器官 (如肾脏、肠道、骨骼、壳腺) 提供底物, 以根据生理需要合成活性的1, 25-(OH)₂D₃。

这些独特的代谢优势使得25-(OH)D₃成为一种能更高效、更快速应对钙磷代谢挑战的营养策略。

2 25-(OH)D₃对蛋鸭产蛋性能及蛋品质的影响

多项研究证实, 在高峰期蛋鸭日粮中添加25-(OH)D₃能对生产性能产生积极影响。广东省农业科学院团队 (2025) 研究发现, 在60-76周龄老龄蛋鸭日粮中添加69μg/kg的25-(OH)D₃, 可显著维持较高的产蛋率, 并降低料蛋比。这与金永燕 (2023) 的结论相一致, 其研究表明, 添加25-(OH)D₃可通过改善钙磷代谢状况, 为持续高产提供稳定的营养基础, 避免因钙磷缺乏导致的产蛋率下降。

在蛋品质方面, 改善效果尤为突出。蛋壳强度和蛋壳厚度是衡量蛋壳质量的核心指标。添加25-(OH)D₃为核心成分的配方, 可显著降低蛋鸭的破蛋率、软蛋率。其根本原因在于25-(OH)D₃为蛋壳的形成提供了更充足的钙源, 而蛋壳强度的提升与蛋壳超微结构的改善密不可分, 这将在下一节详细阐述。

3 25-(OH)D₃对蛋鸭蛋壳质量的改善作用与机制

蛋壳的形成是在输卵管子宫部进行的精密生物矿化过程, 其质量直接取决于蛋壳的超微结构。一枚质量上乘的蛋壳, 其超微结构通常包括: 内层的壳膜、其上的乳突层、以及外层的栅栏层 (或柱状层)。

利用扫描电镜 (SEM) 可以清晰地观察这些结构。研究表明, 蛋壳缺陷 (如强度不足) 往往与超微结构异常有关, 例如: 乳突层

结构松散、乳突核心间距过大、乳突层厚度占比过高 (>40%)、以及栅栏层结构不致密、气孔过多等。

日粮添加25-(OH)D₃能从根本上改善这一状况。其作用机制如下:

提供充足的钙源: 如前述, 25-(OH)D₃通过增强肠道对钙的吸收, 保证了血液中有充足的钙离子可供壳腺利用。

上调钙转运蛋白表达, 优化壳腺功能: 这是其最核心的机制。广东省农业科学院团队 (2025) 的研究深入揭示了其分子机制: 25-(OH)D₃及其后续代谢产物1, 25-(OH)₂D₃, 可与壳腺细胞内的维生素D受体 (VDR) 结合, 显著上调钙结合蛋白 (CaBP-D28k) 和钙泵 (PMCA, ATP2A2) 的基因和蛋白表达水平。CaBP-D28k负责将钙离子从血液侧转运至细胞质, 而PMCA则将细胞质内的钙离子主动泵入子宫液腔中, 形成极高的钙浓度梯度, 为碳酸钙 (CaCO₃) 的沉积结晶提供必要条件。

改善超微结构, 提升蛋壳力学性能: 上述分子层面的优化, 直接体现在蛋壳超微结构的物理改善上。添加25-(OH)D₃的蛋鸭, 其蛋壳的乳突层结构更规整、致密, 乳突宽度增加, 异常乳突比例减少, 同时栅栏层 (有效层) 的厚度和占比显著增加。栅栏层是由紧密排列的钙晶体构成的致密结构, 是赋予蛋壳抗破损能力的关键。更厚、更致密的栅栏层意味着蛋壳能承受更大的外部冲击力, 从而表现为蛋壳强度的显著提升。

4 25-(OH)D₃对胫骨强度及骨代谢的调控作用与机制

在蛋鸭产蛋高峰期, 日粮钙优先满足蛋壳形成的需要, 骨骼中的钙常被动员出来作为补充, 导致骨钙流失, 胫骨强度下降。25-(OH)D₃在强化骨骼方面同样发挥着不可替代的作用。

早期研究VD₃对产蛋初期蛋鸭胫骨的影响时, 证实充足的维生素D对维持骨密度至关重要。而25-(OH)D₃的效果更为卓越。梁铭其等 (2023) 在研究其他营养素对胫骨性状的影响时, 也为评价骨骼健康提供了方法学参考。

25-(OH)D₃增强胫骨强度的机制主要体现在两方面:

促进“骨形成”: 1, 25-(OH)₂D₃可刺激成骨细胞活性, 促进骨基质蛋白 (如骨钙素, BGP) 的合成和钙盐沉积。金永燕 (2023) 测定发现, 饲喂25-(OH)D₃的蛋鸭, 其胫骨中骨钙素 (BGP) 和I型前胶原羧基端肽 (PICP) 的含量显著升高, 这些都是骨形成的直接标志物。

抑制“骨吸收”: 1, 25-(OH)₂D₃可调节核因子κB受体活化因子配体 (RANKL) 与其假受体骨保护素 (OPG) 的比值。降低RANKL/OPG比值, 可有效抑制破骨细胞的分化和活化, 从而减少骨钙的溶出, 维持骨结构完整性。前述研究也发现, 添加25-(OH)D₃可显著降低破骨细胞标志物抗酒石酸酸性磷酸酶 (TRAP) 的活性。

提高骨矿物质密度和力学性能: 最终的宏观体现的是, 添加25-(OH)D₃的蛋鸭, 其胫骨骨密度、骨钙含量、胫骨最大承受力 (断裂力) 和刚度均得到显著改善。广东省农业科学院团队报道, 添加25-(OH)D₃可使老龄蛋鸭的胫骨强度提升高达32.7%。这极大地降低了高峰期蛋鸭发生骨折和瘫软的风险。

5 25-(OH)D₃与其他营养素的协同效应及应用前景

营养素的协同作用往往是实现最佳生产性能的关键。李兴光等(2024)的专利创新性地将25-(OH)D₃与复合酶制剂(提高整体养分消化率)、杜仲绿原酸和甜叶菊异绿原酸(具有抗炎、抗氧化功能)组合使用,声称能“大幅度提高蛋壳强度。这提示我们,25-(OH)D₃与改善肠道健康、抗氧化的添加剂联用,可能通过多通路协同,进一步放大其改善蛋壳和骨骼质量的效果。

此外,在非常规原料(如棕榈粕、菊花粕)使用渐增的背景下,这些原料可能含有影响钙磷或维生素D代谢的抗营养因子,此时添加利用率更高的25-(OH)D₃,可能是一种有效的营养补偿策略。

6 总结与展望

综上所述,在高峰期蛋鸭日粮中添加25-羟基维生素D₃,相比传统维生素D₃,能凭借其更高的吸收率和代谢效率,通过上调钙转运蛋白表达、优化壳腺功能、调节骨代谢平衡等分子机制,有效改善蛋壳超微结构(增加栅栏层厚度、致密化乳突层)和显著增强胫骨强度,是解决高产蛋鸭钙磷代谢挑战的一种高效营养解决方案。

未来研究可进一步聚焦于:(1)确定不同产蛋阶段(如高峰期vs.产蛋后期)蛋鸭对25-(OH)D₃的最适添加量;(2)深入探索其与其他营养素(如维生素C、有机微量元素、功能性植物提取物)的互作效应及协同机制;(3)开展更多针对不同品种蛋鸭的应用研究,以制定更精准的营养方案。随着研究的深入,25-(OH)D₃必将在保障蛋鸭健康、提升养殖效益方面发挥更重要的作用。

[参考文献]

[1]金永燕.VD₃和25(OH)D₃对产蛋后期蛋鸭产蛋性能、蛋壳品质和骨代谢的影响[D].湛江:广东海洋大学,2023.

[2]夏焕婷,金永燕,陈伟,等.饲料添加维生素D₃对产蛋后期蛋鸭产蛋性能、蛋品质、脂质代谢和盲肠微生物的影响[J].动

物营养学报,2024,36(7):4350-4364.

[3]王绍清,曹红,曹宝森.扫描电镜法观察鸡蛋壳超微结构形貌[J].食品科学,2013,34(13):110-114.

[4]Zhang Y N,Xia H T,Wang S,et al.Dietary cholecalciferol and 25-hydroxyvitamin D₃ supplementation improved eggshell and bone quality of laying ducks during 60 to 76 weeks of age[J].Animal Nutrition,2025,22.

[5]李兴光,温少东.一种大幅度提高蛋壳强度的原料配方:CN118000307A[P].2024-04-09.

[6]王爽,张亚男,AHMED MOHAMED FOUAD,等.饲料棕榈粕添加水平对产蛋期蛋鸭产蛋性能、蛋品质、器官发育及抗氧化功能的影响[J].动物营养学报,2020,32(3):1196-1203.

[7]梁铭其,陈伟,张亚男,等.生物素对产蛋高峰期蛋鸭产蛋性能、蛋品质、血液生化指标、卵巢发育及胫骨性状的影响[J].中国畜牧兽医,2023,50(2):564-572.

[8]王爽,林映才,张军星,等.饲料维生素D水平对产蛋初期蛋鸭产蛋性能、血液生化及胫骨指标的影响[J].中国畜牧杂志,2013,49(5):22-26.

[9]阮栋,刘建高,陈伟,等.发酵饲料对蛋鸭产蛋性能、蛋品质、肠道消化酶活性及免疫功能的影响[J].动物营养学报,2019,31(12):5740-5749.

[10]王爽,张亚男,陈伟,等.菊花粕对蛋鸭产蛋性能、蛋品质及血浆生化、抗氧化和脂质代谢指标的影响[J].动物营养学报,2025,37(3):1810-1819.

作者简介:

李灿(1992—),女,汉族,河南商丘人,硕士,毕业院校:云南农业大学,动物养殖,工作单位:天康生物股份有限公司,研究方向:家禽饲料营养。