

肉鸡低蛋白日粮中应用包被丁酸钠的研究: 机制与前景分析

高帅¹ 王西刚² 付秀玲¹

1 天康生物股份有限公司 2 吉林省锦泓工程咨询服务有限公司

DOI:10.12238/as.v8i9.3312

[摘要] 随着畜牧业可持续发展需求的日益增长,降低日粮蛋白质水平已成为减少氮排放和节约资源的重要策略。然而,低蛋白日粮可能对家禽生长性能和肠道健康带来潜在挑战。包被丁酸钠作为一种经过加工处理的添加剂,能够克服普通丁酸钠的局限性,实现后肠靶向释放。本文系统探讨了包被丁酸钠在肉鸡低蛋白日粮中应用的潜在价值,重点分析其对肠道屏障功能的维护机制及对生长性能的改善作用,为该领域的进一步研究提供理论参考。

[关键词] 肉鸡生产; 低蛋白日粮; 包被丁酸钠; 肠道完整性; 生长效能

中图分类号: R378.2 文献标识码: A

Application of Coated Sodium Butyrate in Low-Protein Diets for Broilers: Mechanisms and Prospects

Shuai Gao¹ Xigang Wang² Xiuling Fu¹

1 Tiankang Biotechnology Co., LTD. 2 Jilin Jinhong Engineering Consulting Service Co., LTD

[Abstract] With the increasing demand for sustainable development in animal husbandry, reducing dietary protein levels has become an important strategy to decrease nitrogen emissions and conserve resources. However, low-protein diets may pose potential challenges to the growth performance and intestinal health of poultry. Coated sodium butyrate, as a processed additive, can overcome the limitations of ordinary sodium butyrate and achieve targeted release in the hindgut. This paper systematically explores the potential value of coated sodium butyrate in low-protein diets for broilers, focusing on its mechanisms in maintaining intestinal barrier function and improving growth performance, thereby providing theoretical references for further research in this field.

[Key words] Broiler production; Low-protein diets; Coated sodium butyrate; Intestinal integrity; Growth efficiency

前言

现代畜禽养殖面临减少环境污染、提高资源利用效率和保障动物健康的多重目标。实施低蛋白日粮方案,通过补充合成氨基酸平衡营养需求,已被证明是降低氮排放的有效方法。然而,研究表明,蛋白质水平的显著降低可能影响畜禽的生长速率和饲料转化效率,特别是可能对肠道形态和功能完整性产生不利影响。

肠道作为营养物质吸收的主要场所和机体防御的重要屏障,其健康状态直接影响动物的生产表现。因此,在推进低蛋白日粮应用的同时,寻求有效的营养干预措施以维持肠道健康显得尤为重要。

丁酸钠作为短链脂肪酸的代表,在维持肠道细胞能量代谢、抑制病原菌增殖和调节炎症反应等方面具有重要作用。然而,普通丁酸钠存在易在消化道前段被吸收、具有特殊气味等应用限制。通过包被技术处理后的丁酸钠能够有效克服这些不足,

实现在后肠段的精准释放。基于以上背景,本研究旨在探讨包被丁酸钠在肉鸡低蛋白日粮中应用的潜在价值,分析其可能的作用机制,为相关研究提供理论基础。

1 研究现状分析

1.1 低蛋白日粮的应用特点

低蛋白日粮配制需要遵循理想氨基酸模式原则,在降低粗蛋白水平的同时,通过添加合成氨基酸满足动物的氨基酸需求。适量降低日粮蛋白质水平(通常降低1-3个百分点)可显著减少氮排放量,同时保持正常的生产性能。

然而,当蛋白质水平降低过多或氨基酸平衡不当时,可能产生负面影响。研究表明,过低蛋白日粮可能导致肉鸡肠道形态改变,表现为肠绒毛高度降低、隐窝深度增加,从而影响养分吸收效率。此外,日粮组成的改变可能影响肠道内容物的理化特性,进而影响微生物区系平衡。

1.2 包被丁酸钠的技术优势

包被技术通过使用特定材料(如脂质或纤维素衍生物)对丁酸钠进行处理,使其能够耐受胃部酸性环境,在小肠后段和结肠中释放。这种技术处理不仅解决了丁酸钠的适口性问题,更重要的是提高了其生物利用度,使其能够在肠道后段发挥最大效应。

相关研究显示,包被处理后的丁酸钠在改善动物生长性能和肠道健康方面表现出比普通丁酸钠更好的效果。这主要是因为包被技术确保了丁酸钠能够到达其最主要的作用部位——后肠道。

2 潜在作用机制

包被丁酸钠在肉鸡低蛋白日粮中的应用,其核心价值在于通过多靶点、多层次的作用路径维持肠道稳态,从而抵消低蛋白日粮可能带来的负面影响。其作用机制是一个复杂的网络系统,可从以下四个维度进行深入阐述:

2.1 强化物理屏障: 从能量供给到基因表达

肠道物理屏障是防御病原和毒素入侵的第一道防线。包被丁酸钠通过其独特的缓释特性,将丁酸精准递送至后肠。

细胞能量源与形态优化: 后肠(尤其是盲肠和结肠)上皮细胞首选利用丁酸作为能量物质,而非葡萄糖。丁酸通过 β -氧化产生大量ATP,高效地为肠上皮细胞的增殖、分化和修复提供能量基础。这一过程直接促进了肠绒毛的发育和维持,降低隐窝深度,从而显著优化绒毛高度/隐窝深度(V/C)比值。增高的V/C比值意味着肠黏膜具有更强的消化吸收能力和更低的细胞更新能耗,这对于本就处于营养限制(低蛋白)状态的肉鸡至关重要。

紧密连接蛋白的调控: 物理屏障的完整性高度依赖于肠上皮细胞间的紧密连接。研究表明,丁酸是一种有效的组蛋白去乙酰化酶抑制剂(HDACi)。通过抑制HDAC,丁酸能促使组蛋白高度乙酰化,松弛染色质结构,从而激活多种紧密连接蛋白(如Occludin、ZO-1、Claudin-1)的转录表达。这意味着包被丁酸钠能够从表观遗传学层面上上调这些“门锁”蛋白的合成,增强细胞间的连接紧密性,有效降低肠道通透性,阻止内毒素(如LPS)的易位。

2.2 重塑微生物屏障: 创造有益菌优势环境

低蛋白日粮可能改变后肠发酵模式,包被丁酸钠的介入能够主动引导菌群向健康方向发展。

抑制病原菌: 丁酸解离后降低后肠pH值,创造了一个不利于大肠杆菌、沙门氏菌等酸敏感病原菌生存的酸性环境。更为重要的是,丁酸分子本身能够直接抑制这些病原菌的毒力基因表达。例如,研究发现丁酸能显著抑制沙门氏菌的*hlyA*基因(侵袭性基因表达的关键调控因子),从而降低其定植和入侵肠道黏膜的能力。

促进有益菌: 丁酸是肠道微生物发酵的终产物,同时也是许多有益菌(如某些乳酸杆菌、双歧杆菌)所需的“交叉喂养”底物。一个健康的、以丁酸为主要产物的微生物生态系统,其本身就更倾向于抑制病原菌的过度生长。包被丁酸钠通过增加后肠中丁酸的浓度,为正反馈调节这个良性循环提供了启动动力。

2.3 调节免疫炎症反应: 从根源上降低代谢消耗

低蛋白日粮可能因营养不平衡或抗原问题引发轻微的、慢性的肠道炎症,这种亚临床炎症会持续消耗养分,降低生长效率。

抑制NF- κ B通路: 丁酸最显著的免疫调节作用是其强大的抗炎特性。在分子层面,丁酸能够通过激活G蛋白偶联受体(如GPR109A)或直接进入细胞核,有效抑制核因子 κ B(NF- κ B)的活化。NF- κ B是炎症反应的“主开关”,其被抑制会导致下游一系列促炎细胞因子(如TNF- α , IL-1 β , IL-6)的生成大幅减少。这意味着包被丁酸钠能够从信号通路源头“熄火”,缓解肠道黏膜的免疫应激,将更多的能量和氨基酸用于肌肉生长而非免疫激活。

2.4 整合效应: 通向改善生长性能的最终路径

上述三大机制并非孤立存在,而是构成一个协同增效的有机整体,共同构成了包被丁酸钠改善肉鸡生长性能的生理基础。其整合效应可通过一个清晰的生理逻辑链来阐述:

首先,健康的物理屏障确保了养分的高效吸收。通过优化肠绒毛形态结构和增强上皮细胞间紧密连接,包被丁酸钠直接扩大了营养物质的吸收面积并降低了肠道通透性。这使得日粮中的蛋白质、能量和微量营养物质能够更充分地被摄取进入体内,为生长提供了物质基础。特别是对于低蛋白日粮而言,提高本就有限的蛋白质的消化吸收率显得至关重要。

第二,稳定的微生物屏障减少了对宿主免疫系统的持续挑战和能量竞争。健康的微生物生态系统能够有效抑制病原菌增殖,减少其与宿主争夺营养的现象(即“营养竞争”)。同时,稳定的菌群结构意味着产生更多有益的代谢产物(如其他短链脂肪酸),这些物质可作为额外的能量来源或信号分子,进一步支持肠道健康。更为重要的是,减少病原菌负荷相当于降低了免疫系统被持续激活的风险。

第三,平衡的免疫状态从代谢层面优化了营养分配。慢性、亚临床的肠道炎症会显著增加机体的维持需要,导致本可用于生长的氨基酸和能量被大量消耗于免疫激活和急性期蛋白合成等过程。包被丁酸钠通过其有效的抗炎机制,显著降低这种“免疫性浪费”,将更多的营养资源导向蛋白质沉积和肌肉生长,从而提高了饲料利用的经济效率。

最终,这三大机制的协同作用通过生理代谢过程,汇集成为两个最关键的生产性能指标:提高平均日增重(ADG)和降低料重比(FCR)。即使在低蛋白日粮条件下,通过包被丁酸钠的干预,肉鸡机体能够达到更优的“代谢效率”:一方面通过增强吸收获取更多养分,另一方面通过减少消耗降低维持需要。这种“开源节流”的效应最终表现为肉鸡能够更高效地将有限的饲料资源转化为体增重,从而在营养限制条件下仍能维持良好的生产性能,实现了环境效益(低氮排放)与经济效益(良好生长)的统一。

3 深入研究的设计框架与考量

为科学验证上述理论机制,需要构建一个严谨的试验研究方案。本节将详述关键的设计要素和考量点。

3.1 试验设计模型

为全面剖析日粮蛋白水平与包被丁酸钠添加量的主效应及其交互作用,建议采用2×3双因子完全随机设计或随机区组设计。具体试验因子与水平设置如表1所示。

表1 试验因子与水平设计

试验因子 (Factor)	水平 (Level)	处理说明 (Treatment Description)	设计目的 (Purpose)
A: 日粮蛋白水平	A1	正常蛋白日粮 (例如: 21% CP)	阴性对照, 提供基础参照, 评估低蛋白日粮本身的影响。
	A2	低蛋白日粮 (例如: 18% CP, 使用合成氨基酸平衡必需氨基酸)	基础日粮模型, 考察营养限制条件。
B: 包被丁酸钠添加量	B1	0 mg/kg (空白对照)	对照组, 用于评估单独使用低蛋白/正常蛋白日粮的效果。
	B2	500 mg/kg (推荐起始剂量)	效应验证组, 考察生产实践中常用添加剂量的效果。
	B3	800-1000 mg/kg (探索剂量)	剂量探索组, 用于探究更高剂量是否具有增量效益, 确定最佳添加量。

此设计将产生2×3=6个试验组。为增强试验的参考价值与实用性,可额外设置一个阳性对照组(正蛋白日粮+抗生素/其他益生元),用于对比包被丁酸钠在低蛋白日粮中的相对效益。

3.2 多维度指标体系与检测方法

评价应涵盖从生产表现到分子机制的多层次指标如表2所示。

表2 多维度指标体系与检测方法表

评价维度	核心指标	检测方法
生长性能	平均日采食量 (ADFI)、平均日增重 (ADG)、料重比 (FCR)	定期称重、记录耗料量
肠道形态	十二指肠、空肠、回肠的绒毛高度 (V)、隐窝深度 (C)、V/C 比值	组织石蜡切片, H&E 染色, 图像分析系统
屏障功能	通透性: 血清 D-乳酸、二胺氧化酶 (DAO) 活性 分子水平: Occludin, ZO-1 等紧密连接蛋白的 mRNA 和蛋白表达量	ELISA 试剂盒 qRT-PCR, Western Blot
微生物区系	盲肠微生物 α 多样性 (Shannon, Chao1 指数)、β 多样性、F1/ 属水平群落结构	16S rRNA 基因高通量测序
免疫炎症	血清或肠黏膜中细胞因子含量 (TNF-α, IL-1β, IL-10)	ELISA 试剂盒
养分利用率	表观代谢能 (AME)、氮留存率	全收粪法

3.3 潜在挑战与应对策略

剂量效应: 包被丁酸钠的效果可能存在非线性剂量反应。需要进行剂量梯度试验来确定最佳添加量,避免剂量不足无效或过高造成浪费甚至抑制。

包被质量: 不同厂商产品的包被材料、工艺和稳定性差异巨大,直接影响效果。研究中应明确产品的包被率、体外释放度等参数,或选择信誉良好的品牌产品。

阶段特异性: 肉鸡不同生长阶段(育雏、生长期、育肥期)肠道发育需求和面临的挑战不同。包被丁酸钠的效果可能在肠道快速发育和微生物群建立的早期阶段(如第一周)最为显著,值得分阶段研究。

与其他添加剂的交互: 在无抗日粮中,包被丁酸钠常与益生菌、益生元、酶制剂等联合使用。探究其与这些添加剂的协同或拮抗作用,对于开发复合型解决方案具有重要实践意义。

4 结论

综合分析表明,在肉鸡低蛋白日粮中添加包被丁酸钠,可能通过多种途径改善肠道健康和生产性能。这一策略有望同时实现减少氮排放和维持动物健康的多重目标,为畜牧业可持续发展提供新的解决方案。然而,相关机制仍需通过严格的科学研究进一步验证和完善。

[参考文献]

[1]Bellocq, P., Meda, B., Lambert, W., Corrent, E., Juin, H., Lessire, M., & Tesseraud, S. (2017). Reducing the CP content in broiler feeds: impact on animal performance, meat quality and nitrogen utilization. *Animal*, 11(10), 1881–1889.

[2]Guilloteau, P., Martin, L., Eeckhaut, V., Ducatelle, R., Zabielski, R., & Van Immerseel, F. (2010). From the gut to the peripheral tissues: the multiple effects of butyrate. *Nutrition Research Reviews*, 23(2), 366–384.

[3]Van Immerseel, F., De Buck, J., Boyen, F., Bohez, L., Pasmans, F., Volf, J., ... & Ducatelle, R. (2004). Medium-chain fatty acids decrease colonization and invasion through hila suppression shortly after infection of chickens with *Salmonella enterica* serovar Enteritidis. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(6), 3582–3587.

[4]Hou J, Lu L, Lian L, Tian Y, Zeng T, Ma Y, Li S, Chen L, Xu W, Gu T, Li G and Liu X (2024) Effects of coated sodium butyrate on the growth performance, serum biochemistry, antioxidant capacity, intestinal morphology, and intestinal microbiota of broiler chickens. *Front. Microbiol.* 15:1368736.

[5]Wang, H., Zhang, C., Wu, G., Sun, Y., Wang, B., He, B., ... & Li, T. (2020). Glutamine enhances tight junction protein expression and modulates corticotropin-releasing factor signaling in the jejunum of weaned piglets. *Journal of Nutrition*, 150(2), 371–378.

[6]Zhang, W. H., Jiang, Y., Zhu, Q. F., Gao, F., Dai, S. F., Chen, J., & Zhou, G. H. (2011). Sodium butyrate maintains growth performance by regulating the immune response in broiler chickens. *British Poultry Science*, 52(3), 292–301.

作者简介:

高帅(1996—),男,汉族,河南平顶山人,硕士,毕业院校:四川农业大学,毕业专业:动物营养与饲料科学,工作单位:天康生物股份有限公司,研究方向:动物营养与饲料科学。