



袁捡云,曹盼盼,曾春,等.荷叶碱在畜禽类养殖中的作用机制及研究进展[J].中兽医学杂志,2025,60(2):19-27.
YUAN J Y,CAO P P,ZENG C,et al.Mechanism and research progress of nuciferine in livestock and poultry[J].Traditional Chinese veterinary medicine,2025,60(2):19-27.

荷叶碱在畜禽类养殖中的作用机制 及研究进展

袁捡云,曹盼盼,曾春,胡国良,庄煜*

(江西农业大学 动物科学技术学院,江西 南昌 330045)

摘要:荷叶碱作为植物莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)干燥叶的主要生物碱类活性成分,近年来因其天然、低毒和多靶点的药理特性,在畜禽养殖领域的应用潜力受到广泛关注。梳理和综述荷叶碱在抗炎、抗氧化及调节机体代谢等方面的作用机制与研究进展。研究显示,荷叶碱可通过抑制NF- κ B、MAPK等炎症信号通路,降低TNF- α 、IL-6等促炎因子表达,发挥抗炎作用;通过激活Nrf2/ARE通路,增强SOD、GSH-Px等抗氧化酶活性,缓解氧化应激损伤。在代谢调控方面,荷叶碱能够调节AMPK/PI3K/Akt等通路,改善脂质代谢紊乱、减少脂肪沉积,并提高胰岛素敏感性。此外,荷叶碱还可通过调节肠道菌群结构、增强肠道屏障功能,提高营养物质的消化吸收率,从而改善畜禽生长性能与肉质品质。然而,荷叶碱在畜禽体内的具体代谢途径、适宜添加剂量,以及与其他饲料成分的互作效应仍需进一步研究。未来,荷叶碱有望作为一种绿色饲料添加剂,在中兽医理论指导下,为畜禽健康养殖与疾病防控提供新思路。

关键词:荷叶碱;畜禽养殖;作用机制;饲料添加剂

中图分类号:S816.75 文献标志码:A 文章编号:1003-8655(2025)02-019-09

Mechanism and research progress of nuciferine in livestock and poultry

YUAN Jianyun, CAO Panpan, ZENG Chun, HU Guoliang, ZHUANG Yu*

(College of Animal Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: Nuciferine, the primary alkaloid active constituent derived from the lotus leaf (*Nelumbo nucifera* Gaertn.), has garnered increasing attention in recent years for its potential application in livestock and poultry due to its natural origin, low toxicity, and multi-target pharmacological properties. A systematic review and summary of the mechanisms and research progress of nuciferine in anti-inflammatory, antioxidant, and metabolic regulation effects. Research indicates that nuciferine exerts anti-inflammatory effects by inhibiting

基金项目:国家自然科学基金项目(32373090、32460910)、江西省自然科学基金项目(20224BAB215053)和江西省研究生创新专项基金项目(YC2025-S432)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (32373090 and 32460910), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20224BAB215053) and Jiangxi Provincial Postgraduate Innovation Special Fund Project (YC2025-S432)

作者简介:袁捡云,硕士生, orcid.org/0009-0009-9618-8901, 13766405267@163.com; *通信作者:庄煜,副教授,博士,主要从事动物营养代谢病与中毒病研究, orcid.org/0000-0002-9640-9366, zhuangyu201212@163.com。

©《中兽医学杂志》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

inflammatory signaling pathways such as NF- κ B and MAPK, thereby reducing the expression of pro-inflammatory factors like TNF- α and IL-6. Additionally, they activate the Nrf2/ARE pathway to enhance the activity of antioxidant enzymes including SOD and GSH-Px, thereby alleviating oxidative stress damage. In terms of metabolic regulation, nuciferine can modulate pathways such as AMPK/PI3K/Akt, improve lipid metabolism disorders, reduce fat deposition, and enhance insulin sensitivity. Additionally, nuciferine can improve livestock growth performance and meat quality by regulating gut microbiota composition, enhancing intestinal barrier function, and increasing the digestibility and absorption rate of nutrients. However, the specific metabolic pathways of nuciferine in livestock and poultry, their optimal additive dosage, and their interactions with other feed components require further investigation. In the future, nuciferine holds promise as a green feed additive, offering new approaches to healthy livestock and poultry farming and disease prevention and control under the guidance of traditional Chinese veterinary medicine theory.

Keywords: nuciferine; livestock and poultry; mechanism of action; feed additive

荷叶碱(nuciferine)是一种从植物莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)干燥叶中提取的生物碱^[1]。荷叶在多数地区兼具药食两用传统。其味苦涩、性平,归肝、脾、胃、心经,具有清热利湿、生津止渴、凉血止血等功效,常作为草药或茶饮使用。研究^[2]表明,荷叶中含有多种生物碱,其中荷叶碱被认为是发挥其调节代谢作用的关键功效成分之一。受益于传统中医药的长期实践及其所蕴含的独特药理活性,荷叶碱近年来在畜禽健康养殖领域展现出前所未有的应用潜力。荷叶碱具有多重生物活性,其研究焦点集中于降脂、抗肥胖、改善肝脏脂肪变性、调节血糖、降低尿酸、抗肿瘤、抗炎、抗病毒以及抗氧化等多个方面^[2]。荷叶碱不仅在人类疾病防治方面具有显著的药物开发价值,也为解决畜牧业中的动物代谢健康、免疫调节及产品品质提升等关键问题提供了潜在天然解决方案。推动畜禽健康养殖已成为现代畜牧业转型的核心目标,可有效回应社会对食品安全和环境可持续性日益增长的需求。在当前畜禽养殖环境中,抗生素的不当使用,导致病原微生物耐药性不断增强,由此衍生的各类畜产品中药物残留问题突出,持续引发公众对食品安全与公共卫生的深刻担忧^[3]。因此,积极探索并开发安全、有效的抗生素替代品,已成为畜牧行业的迫切需求。在这一背景下,植物源性饲料添加剂因其来源天然、功能多元且不易诱导耐药性等特点,被视为极具潜力的替代解决方案,受到了广泛的关注。

荷叶碱作为一种从传统药用植物中提取的天然活性成分,在市场需求与宏观趋势下,在畜禽健康养殖中发挥关键作用,展现出巨大潜力。本文将聚焦于荷叶碱,系统梳理其生物学功能与作用机制,评述在动物生产中的应用效果与前景,探讨其应用安全性及当前面临的挑战,并对未来研究方向进行展望,为促进荷叶碱的产业化应用与畜牧业的高质量、可持续发展提供科学依据与理论支撑。

1 荷叶碱的植物来源及化学结构

1.1 植物来源

荷叶碱是一种在生物医学和畜牧科学领域引起广泛关注的天然化合物。该物质常从干燥莲叶片中提取。莲在亚洲地区具有悠久的药食同用历史,其叶片是获取荷叶碱最主要的原料来源。在睡莲属、萍蓬草属以及千金藤属等植物中都可提炼出该活性成分,综合比较其含量水平与资源可获得性,莲叶目前是最具规模化开发价值的天然植物来源。

1.2 化学结构

荷叶碱备受瞩目的一个重要原因在于其独特的四环化学结构,该特征性骨架与其所展现出的广泛生物活性密切相关,构成了其在多个学科领域中进行深入研究的物质基础。植物化学分析表明,莲叶所含的生物碱可构成一个结构丰富的大家族,其成员主要涵盖原阿朴啡类、阿朴啡类、氧化阿朴啡类、去氢阿朴啡类、单苄基异喹啉类以及双苄基异喹啉类等多种类型^[4]。在众多化合物中,荷叶碱被明确归为典型的阿朴啡类生物碱,是莲叶中主要的活性成分之一。该化合物的分子式为 $C_{19}H_{21}NO_2$,其相对分子质量为295.38,具体化学结构见图1。该化合物具有刚性平面结构,由2个苯环(A环与D环)与1个环己烯环

(B环与C环)通过稠合方式连接而成,此结构特征是其与多种生物靶点发生相互作用的分子基础。目前,工业化获取荷叶碱主要依赖于从天然植物中提取。标准化提取纯化工艺流程包含以下关键环节:首先对原材料莲叶进行干燥和粉碎预处理;随后采用乙醇或甲醇等适宜溶剂通过浸提或热回流等方法进行初步提取^[5];继而分离纯化粗提物,纯化方法采用酸碱分配法进行初步富集,再结合硅胶柱层析、大孔吸附树脂层析或制备型高效液相色谱(HPLC)等精制技术,最终获得符合研究或应用要求的高纯度荷叶碱(通常为米黄色或白色的晶体)。值得注意的是,荷叶碱在莲体内的生物合成途径已得到初步解析。研究^[4]表明,一种特定的N-甲基转移酶在该途径中扮演关键角色,它能高效催化前体物质N-去甲荷叶碱发生甲基化反应,从而生成荷叶碱。对这一关键酶学机制的阐明,不仅深化了对植物次生代谢的理解,更为未来运用合成生物学或代谢工程策略,定向改造生物合成途径以提升荷叶碱产量,奠定了坚实的理论与技术基础。

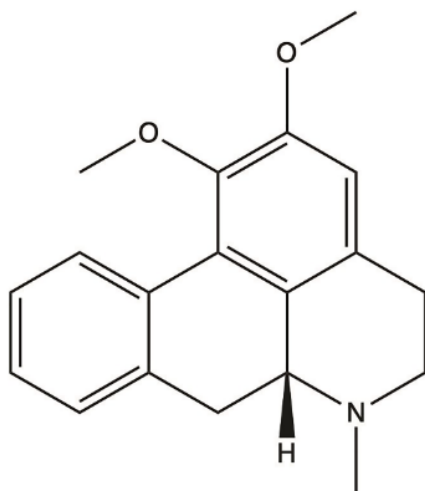


图1 荷叶碱的化学结构^[1]

Fig.1 The chemical structure of nuciferine

2 荷叶碱的作用机制

2.1 代谢调节作用

荷叶碱的代谢调节作用是其最为突出的药理特性之一,尤其在调节脂质与糖代谢紊乱方面展现出显著潜力,已成为抗肥胖、降血脂及改善糖尿病等代谢综合征的研究热点。荷叶碱通过调控多条关键信号通路,构建了一个多靶点、多层次的脂质代谢调节网络,其作用机制涵盖从抑制脂肪生成到促进脂肪分解的完整代谢环节。研究^[6]证明,荷叶碱能显著降低肉鸡的脂肪沉积,通过抑制脂肪合成路径、促进脂肪酸氧化与胆固醇代谢,并通过调节甲状腺激素与胰高血糖素水平改善肝脏脂质积累,从而减少全身脂肪沉积。大量研究发现,在抑制脂肪积累方面,荷叶碱通过干预脂肪细胞的生命周期发挥关键作用,尤其是它能有效抑制脂肪细胞的增殖及分化过程。这一作用部分通过调控丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)等增殖相关信号通路实现。荷叶碱在调控脂肪代谢方面的一个重要机制在于其可作为过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (peroxisome proliferator-activated receptor gamma, PPAR γ)的功能性拮抗剂^[7]。PPAR γ 是调控脂肪细胞分化的主导转录因子。荷叶碱通过拮抗PPAR γ 的活性,有效抑制其转录功能,从而在源头上阻断了前体脂肪细胞向成熟脂肪细胞的分化进程,最终达到限制脂肪组织过度扩增的目的。

除了对PPAR γ 的拮抗作用,荷叶碱还能干预PI3K-Akt-mTORC1这条调控细胞生长与合成代谢的核心信号轴。荷叶碱通过抑制该通路的传导,进而抑制了其下游关键转录因子——固醇调节元件结合蛋白-1c(sterol regulatory element-binding protein 1c, SREBP-1c)的活化。SREBP-1c活性的降低,直接导致其下游靶基因,如脂肪酸合酶(fatty acid synthase, FAS)的表达下调,从而有效遏制了脂肪的从头合成途径。同时,在促进既有脂肪储备的动员与消耗方面,荷叶碱的作用机制涉及激活细胞内关键的能量感

应枢纽——腺苷酸活化蛋白激酶(AMP-activated protein kinase, AMPK)。研究^[8]证明,荷叶碱能够通过激活 LKB1/AMPK 信号通路,有效缓解高浓度 NEFA 诱导的牛乳腺上皮细胞脂毒性损伤。AMPK 的激活上调了参与脂肪酸 β -氧化过程的关键酶系基因表达,从而加速脂肪酸的分解与能量转化,通过抑制乙酰辅酶 A 羧化酶(acetyl-CoA carboxylase, ACC)等脂肪合成限速酶的活性,遏制了新的脂质生成。研究^[9]证实,其还能通过激活肝脏中的 PPAR α /PGC1 α 信号通路发挥关键效能。该机制涉及上调过氧化物酶体增殖物激活受体 α (peroxisome proliferator-activated receptor alpha, PPAR α)及其共激活因子过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子 1 α (peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1-Alpha, PGC1 α)的表达,直接增强 PPAR α 的转录活性,进而促进一系列脂肪酸氧化相关基因的转录,显著加强了肝脏的脂肪酸分解代谢能力。这一通路被认为是荷叶碱减轻肝脏脂肪变性、降低肝脏与血浆甘油三酯水平,并全面改善脂质谱的核心分子基础。这种对脂肪代谢促进分解与抑制合成的双向精准调控^[10],共同促进了脂质储积的减少(图 2)。此外,荷叶碱能够改善胰岛素敏感性的作用,有助于间接恢复整体的脂质代谢平衡。

除了参与脂代谢的直接调节,荷叶碱对与脂质紊乱密切相关的血管病变也显示出干预潜力,特别是在延缓动脉粥样硬化(atherosclerosis, AS)方面。AS 的发展与血管平滑肌细胞(vascular smooth muscle cells, VSMCs)的病理性增殖、迁移及表型转换紧密相关。研究^[11]表明,荷叶碱能够通过调节 Calm4/MMP12/AKT 信号通路来抑制 VSMCs 的异常活性。具体而言,其可能通过下调钙调蛋白 4(calmodulin like 4, Calm4)的表达,影响基质金属蛋白酶 12(matrix metalloproteinase 12, MMP12)的功能,并最终抑制蛋白激酶 B(Ak strain transforming/protein kinase B, AKT)信号通路的磷酸化激活。对 AKT 通路的抑制可有效阻遏 VSMCs 的增殖与迁移,有助于稳定动脉斑块,从而延缓动脉粥样硬化的病理进展。

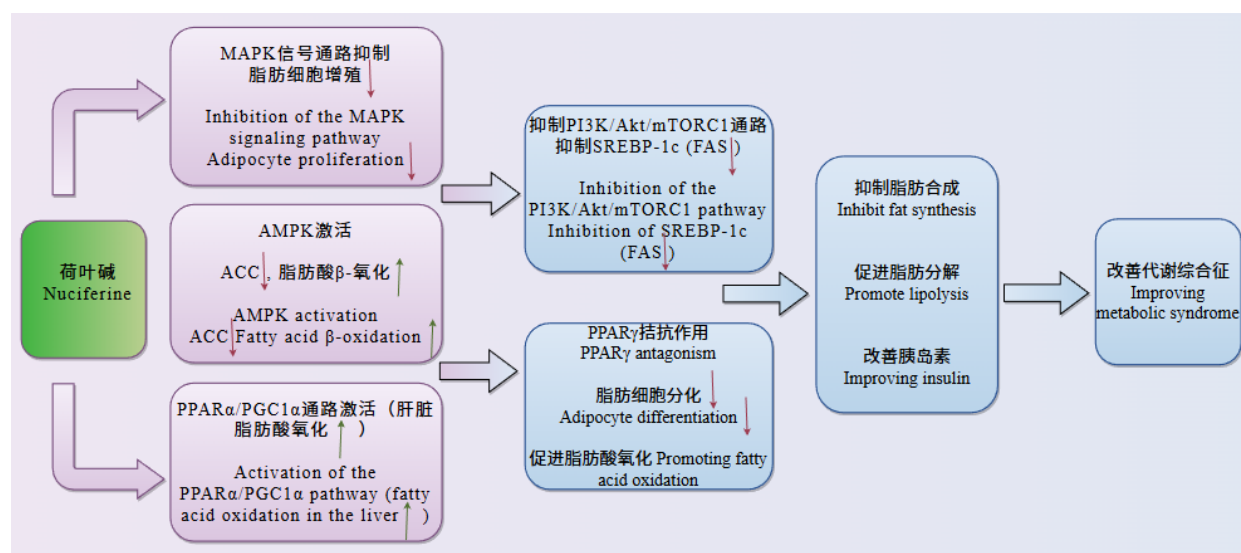


图 2 荷叶碱的代谢调节作用

Fig.2 The Metabolic Regulation of nuciferine

2.2 抗炎作用机制

炎症作为机体应对损伤或感染的基本防御反应,具有双重特性。适度的急性炎症是清除病原、启动修复所必需的;当这一反应失控,发展为慢性或过度激活状态时,则会转化为持续损害组织功能、影响动物健康与生产性能的关键病理因素。在寻找调控此类炎症失衡的天然解决方案中,荷叶碱的抗炎活性得到了实证研究的支持,其抗炎作用涉及对多个关键炎症信号通路的协同干预(图 3)。细菌脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)作为革兰氏阴性菌细胞壁成分,能够强烈刺激天然免疫系统,可诱导免疫细胞大量分泌出一氧化氮(nitric oxide, NO)、前列腺素 E2(prostaglandin E2, PGE2)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)和白介素-6(interleukin-6, IL-6)等核心促炎介质。荷叶碱能以剂量依赖性地显著抑制炎症介质的生成。在信号转导层面,这种抑制作用与荷叶碱对丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)家族中 p38 通路的调控密切相关^[12]。其次,荷叶碱是 NF- κ B 信号通路的有效抑制剂,能够有效抑制由 LPS

触发的经典炎症级联反应,Zhang等^[13]研究表明,荷叶碱能显著抑制LPS诱导的NF- κ B活化,同时逆转TNF- α 、白细胞介素-1 β (Interleukin-1 Beta, IL-1 β)、PGE2和NO的表达。进一步研究表明,荷叶碱调控PPAR- γ 的表达。使用PPAR- γ 特异性抑制剂GW9662进行功能分析,该抑制剂可减弱LPS诱导的促炎介质(如TNF- α , IL-1 β , PGE2和NO)的分泌。综上,荷叶碱可以有效抑制LPS诱导的BV2小鼠小胶质细胞系(BV2 murine microglial cell line, BV2)细胞炎症。

研究^[14]表明,荷叶碱能有效缓解高棕榈油饲料引起的大黄鱼肠道形态损伤和炎症反应,其通过抑制p38 MAPK信号通路,减少促炎因子表达,增强肠道屏障功能,从而缓解PO/PA诱导的肠道炎症和损伤。通过阻断这条信号轴,荷叶碱从上游抑制了驱动多种炎症基因表达的转录程序。此外,荷叶碱的抗炎与免疫调节作用还延伸至其他重要通路。研究^[15]表明,其能够调控JAK2/STAT3信号通路,这是一条与细胞因子信号传导和免疫细胞功能密切相关的途径。荷叶碱还可通过显著抑制Janus激酶2(Janus kinase 2, JAK2)的磷酸化活性,有效阻断其下游信号转导与转录激活因子3(signal transducer and activator of transcription 3, STAT3)的磷酸化及核转位过程。通过这些多靶点的干预,荷叶碱实现了对炎症因子网络的广泛抑制和对免疫细胞功能的精细调控,从而为缓解动物机体的慢性炎症状态提供了潜在的作用机制。

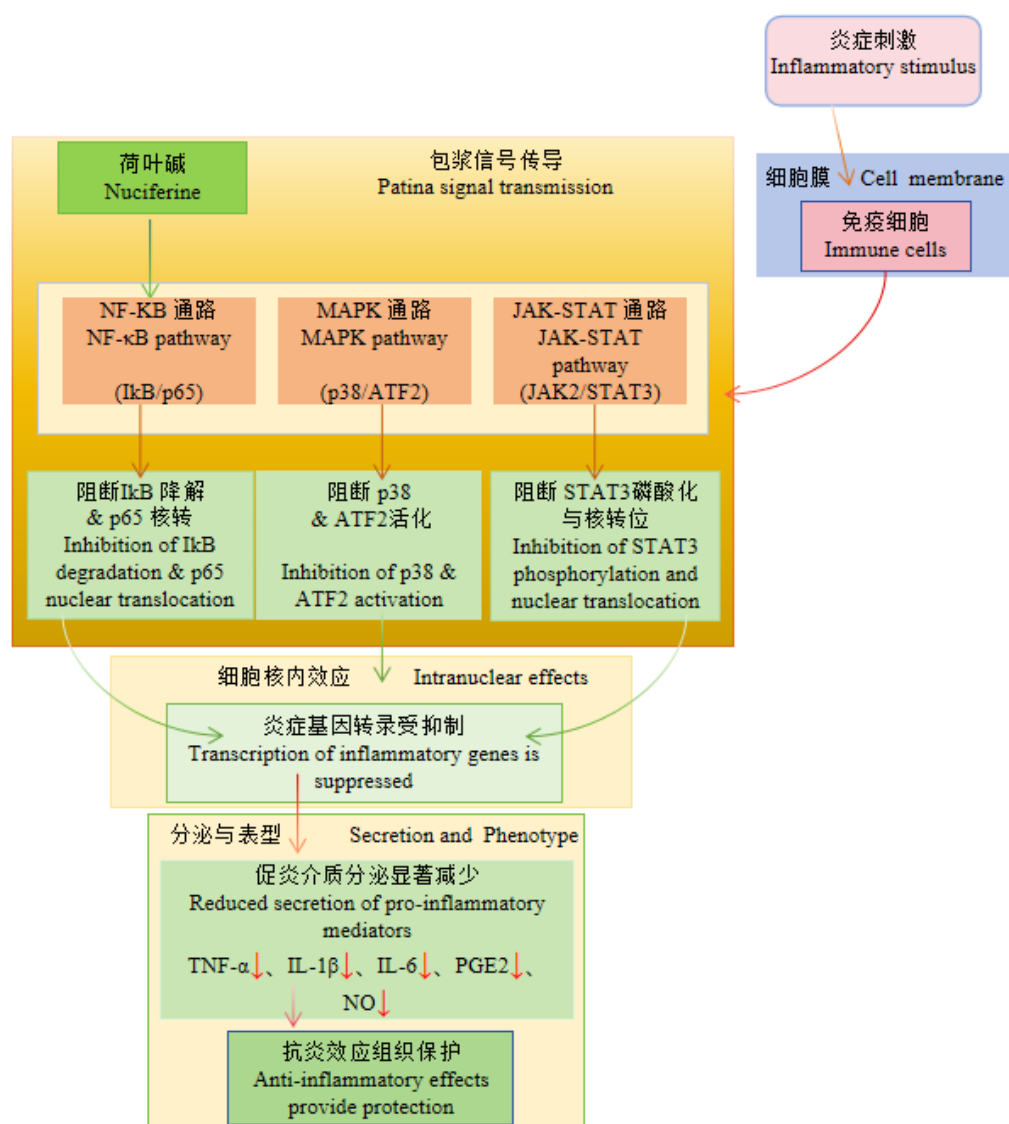


图3 荷叶碱的抗炎作用机制

Fig.3 The anti-inflammatory effects of nuciferine

2.3 抗氧化与免疫调节机制

氧化应激可导致细胞结构损伤、免疫功能紊乱及生长效率降低。研究^[1,16]表明,荷叶碱具有明确的抗氧化能力,其作用机制包括直接淬灭活性氧自由基,同时上调超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPx)等内源性抗氧化酶系统的表达与活性,从而有效缓解氧化应激所致的组织损伤。氧化应激与脂质代谢紊乱是多种慢性病的关键诱因。已有研究^[17]表明,荷叶碱能够减轻小鼠肝脏细胞的氧化应激和炎症反应。经荷叶碱处理后,小鼠肝脏细胞中丙二醛(malondialdehyde, MDA)和过氧化氢(hydrogen peroxide, H₂O₂)含量显著降低,磷酸化核因子κB(phospho-nuclear factor kappa-B, p-NF-κB)的蛋白丰度减少,同时细胞内抗氧化酶,如SOD和GPx的活性增强,从而保护肝脏细胞免受氧化损伤。在抗肿瘤方面,荷叶碱亦显示出潜在的应用价值^[18]。网络药理学分析与试验验证相结合的研究提示,其可能通过干预特定的信号通路抑制肿瘤进展。此外,荷叶碱还表现出神经保护潜力。在缺血性脑卒中模型中,它能够通过抑制JAK2/STAT3信号通路,减轻血脑屏障的破坏^[15,19]。

3 荷叶碱在畜禽健康养殖中的研究前景

3.1 促进生长性能

饲料中添加植物源性提取物在提升畜禽养殖综合效益方面受到持续关注^[3]。研究表明,迷迭香提取物被证实可增强肉鸡的生长表现并提升其抗氧化能力^[20],甘草提取物则能够提高饲料利用率和营养物质的消化率^[21]。荷叶碱也可作为保护奶牛乳腺健康、维持产奶量的天然候选物质。有研究^[22]结果显示,在菌群结构层面,经荷叶碱干预后,肥胖模型小鼠肠道中的厚壁菌门/拟杆菌门比值显著下降,提示整体菌群结构趋于改善。同时,别普雷沃菌属(*Alloprevotella*)、泰泽菌属(*Turicibacter*)和乳杆菌属(*Lactobacillus*)相对丰度明显升高,螺杆菌属(*Helicobacter*)的相对丰度降低。*Helicobacter*感染与肥胖发病率、血脂异常及胰岛素抵抗密切相关,其丰度降低对代谢健康有益。*Alloprevotella*能通过短链脂肪酸改善胰岛素敏感性、抑制脂肪合成及减少摄食。*Lactobacillus*有助于调节体脂与血糖稳态,*Turicibacter*也被证实对改善肥胖具有积极作用。这些菌群的协同变化为通过微生物干预调控机体代谢提供了重要依据。基于代谢调节机制推导的假设,荷叶碱作为具有明确抗炎与代谢调节功能的生物碱,其改善动物生长性能的作用可通过多重间接途径实现。荷叶碱凭借其抗炎与抗氧化特性,有助于减轻肠道炎症反应和氧化应激损伤,维护肠道结构与功能的完整性,从而为营养物质的充分吸收与高效利用创造有利条件。同时,通过调节肠道微生态平衡、增强机体整体免疫功能,营造更利于生长的内部生理环境。目前,以荷叶碱单一成分直接用于促生长的针对性研究仍相对有限,但上述作用机制为其在养殖生产中的潜在应用提供了理论支持。

3.2 提高产品品质

作为植物源性生物活性成分,荷叶碱在提升畜禽产品品质方面具有应用潜力。其作用机制主要通过明确的抗氧化活性,有效缓解动物体内的氧化应激状态,从而延缓宰后肉类的脂质氧化,有助于改善肉品风味并延长其货架期^[23]。研究^[6]证明,荷叶碱具有调节脂质代谢、抑制肉鸡脂肪沉积的能力,通过影响脂肪沉积模式与肌肉生长发育过程,进而从整体上改善畜禽产品的感官与营养品质。

3.3 增强免疫功能

植物多糖及多种植物提取物具备调控禽类免疫反应的能力,中兽药及植物提取物在传统应用中也常通过免疫调节来防治感染性疾病^[24]。基于同类物质机制推导的假设,荷叶碱作为一种具有明确抗炎与抗氧化活性的植物源生物碱,其免疫调节的潜力值得关注。荷叶碱可通过减轻过度的炎症反应,降低其对免疫细胞造成的直接损伤,同时缓解氧化应激状态,以减少对免疫器官及免疫效应细胞的功能抑制。以上2种机制的协同作用,有助于维护免疫系统的动态平衡与应答效率。

3.4 替代抗生素与减少耐药性

在畜禽养殖业中,抗生素长期、广泛且非治疗性地使用,已导致细菌耐药性问题日趋严峻。探索并开发安全、有效的非抗生素替代策略已成为畜牧业可持续发展的迫切任务。荷叶碱作为一种天然植物

源活性成分,具有抗菌与抗炎双重生物活性^[25]。基于机制推导的假设,其展现出作为传统抗生素潜在替代品的应用前景,有助于推动养殖业逐步减少对常规抗生素的依赖。

3.5 改善肠道健康

肠道健康是决定畜禽整体健康水平与生产性能的关键因素^[26]。研究^[27]证明,低分子量有机酸、亚精胺及腐植酸等添加剂已被证实能够有效调节肠道菌群组成、改善肠道形态结构,并增强肠道的抗氧化能力。基于荷叶碱已被证实的抗炎与抗氧化活性^[16-17]、传统中药成分普遍具有调节肠道微生物的特性以及抗炎和抗氧化作用机制推导的假设,推测其在改善肠道健康方面具有潜在作用。荷叶碱能有效缓解 PO/PA 诱导的大黄鱼肠道形态损伤、肠道机械屏障受损、黏膜屏障功能下降和肠道炎症^[14]。已有研究^[25]指出,包括荷叶在内的一些性味平和和微苦的中药及其所含生物活性化合物,能够通过调节肠道微生物群,进而影响宿主代谢产物与生理途径,最终改善肠道炎症等多种病症。荷叶碱对肠道健康产生积极影响是符合理论预期的,这为其在养殖实践中作为肠道功能调节剂的应用提供了依据。

3.6 减少环境污染

畜禽养殖过程中产生的粪污已成为环境污染的重要来源,常含有抗生素残留、重金属以及过量的氮、磷等污染物。降低抗生素使用量并提升饲料养分利用效率,是减少粪污中有害物质排放的关键策略。基于功能机制推导的假设,作为一种天然来源的饲料添加剂,荷叶碱的应用有助于减少养殖生产中对传统抗生素的依赖,从而直接降低随粪污排放至环境中的抗生素残留水平。

4 荷叶碱在畜禽健康养殖中的应用挑战与展望

4.1 应用挑战

荷叶碱的生物利用度受到其自身理化性质的显著制约,其较差的水溶性、在胃肠道环境中的不稳定性以及显著的首过效应,共同限制了其在靶组织达到有效治疗浓度并充分发挥药效的能力。目前,荷叶碱在畜禽体内的确切作用尚不明确,在不同物种、生理阶段及生产状态下的特异性机制仍缺乏系统而深入的研究。现有证据多源于体外细胞模型或啮齿类动物试验,而荷叶碱在不同畜禽中的有效剂量窗口与长期安全性尚未明确。作为一种生物活性物质,其剂量过低无法产生预期效益,过高则可能引发未知的毒副作用,因此将其结论直接外推至复杂的养殖场景需格外谨慎。从产业化应用角度考量,提取与纯化成本高是制约荷叶碱作为饲料添加剂经济可行性的关键因素。同时,作为天然提取物,其活性成分含量和产品纯度易受原料产地、采收时间、加工工艺等多种因素影响,存在显著的批次间差异性。因此,开发高效、低能耗且环境友好的规模化生产工艺至关重要。

4.2 未来展望

为推动荷叶碱在畜禽健康养殖中的深入开发与高效利用,未来的研究工作应致力于多个关键方向的突破。第一,应通过多组学整合分析策略,系统阐明荷叶碱调控“肠道微生物群—宿主代谢—免疫应答”这一复杂互作网络的作用机制,为其精准应用奠定理论基础。第二,应着力构建基于纳米技术的药物递送体系,设计具有靶向功能的纳米载体^[28],以有效克服其溶解性与稳定性限制,提升其在动物体内的生物利用度及组织特异性分布。第三,应面向养殖生产中的具体问题开展实证研究,通过实践验证其对畜禽腹泻、热应激等常见生产性疾病的干预效果,明确其在实际养殖环境下的应用价值^[29]。第四,应探索荷叶碱与益生菌、益生元或其他功能性饲料成分的协同配伍方案,通过复配应用以实现功效叠加或协同增效,提升整体应用效益。第五,需通过系统开展长期饲喂安全性评价及在动物源性产品中的残留分析,建立科学的休药期与安全使用规范,为核心食品安全提供保障。第六,应聚焦于开发环境友好、成本可控的规模化绿色生产工艺,并推动构建涵盖原料种植、提取加工、养殖应用及效果评估的全产业链可持续发展模式,为其产业化推广提供支撑。

5 结 论

荷叶碱作为一种源自天然植物的生物碱,在畜禽健康养殖领域展现出巨大的应用潜力。其多重生物活性,特别是调节代谢、抗炎、抗氧化、抗肿瘤及神经保护作用,有望成为替代传统抗生素、提升动物生产性能和产品品质、保障食品安全的关键天然饲料添加剂。尽管当前研究已取得显著进展,但荷叶碱在

生物利用度、作用机制解析、质量控制标准化,以及临床转化等方面仍面临挑战。未来研究应着力于整合多组学技术、优化药物递送系统、开展大规模动物试验,并探索其与现代养殖技术的结合,以期全面阐明荷叶碱的作用机制,推动其高效、安全地应用于畜禽养殖实践,为实现畜牧业的绿色、高效、可持续发展提供坚实的科学依据与技术支持。

参考文献 References:

- [1] HUANG X B, HAO N, CHEN G Q, et al. Chemistry and biology of nuciferine[J]. Industrial crops and products, 2022, 179: 114694.
- [2] ZHAO T, ZHU Y C, ZHAO R, et al. Structure-activity relationship, bioactivities, molecular mechanisms, and clinical application of nuciferine on inflammation-related diseases[J]. Pharmacological research, 2023, 193: 106820.
- [3] WANG J, DENG L F, CHEN M X, et al. Phytogetic feed additives as natural antibiotic alternatives in animal health and production: a review of the literature of the last decade[J]. Animal nutrition, 2024, 17: 244-264.
- [4] REN X S, CHEN H, WANG H B, et al. Advances in the pharmacological effects and mechanisms of *Nelumbo nucifera* Gaertn. extract nuciferine[J]. Journal of ethnopharmacology, 2024, 331: 118262.
- [5] 张洪欢, 杨琴, 邹玉惊, 等. 荷叶中荷叶碱的提取及其体外降血脂活性研究[J]. 化学工程师, 2025, 39(2): 13-17.
ZHANG H H, YANG Q, ZOU Y J, et al. Study on extraction of nuciferine in lotus leaf and its hypolipidemic activity *in vitro* [J]. Chemical engineer, 2025, 39(2): 13-17.
- [6] ZHOU Y Y, CHEN Z H, LIN Q M, et al. Nuciferine reduced fat deposition by controlling triglyceride and cholesterol concentration in broiler chickens[J]. Poultry science, 2020, 99(12): 7101-7108.
- [7] 汪晨冉, 王乐, 杨影, 等. 荷叶生物碱类有效成分抗非酒精性脂肪性肝病的研究进展[J]. 上海中医药杂志, 2023, 57(10): 76-82.
WANG C R, WANG L, YANG Y, et al. Research progress on alkaloid active ingredients in *Nelumbinis Folium* against non-alcoholic fatty liver disease[J]. Shanghai journal of traditional Chinese medicine, 2023, 57(10): 76-82
- [8] LI J X, ZHAO C C, LIU M L, et al. Nuciferine ameliorates nonesterified fatty acid-induced bovine mammary epithelial cell lipid accumulation, apoptosis, and impaired migration via activating LKB1/AMPK signaling pathway[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2022, 71(1): 443-456.
- [9] ZHANG C, DENG J J, LIU D, et al. Nuciferine ameliorates hepatic steatosis in high-fat diet/streptozocin-induced diabetic mice through a PPAR α /PPAR γ coactivator-1 α pathway[J]. British journal of pharmacology, 2018, 175(22): 4218-4228.
- [10] WANG C C, MU T, FENG X F, et al. Study on fatty acid binding protein in lipid metabolism of livestock and poultry[J]. Research in veterinary science, 2023, 158: 185-195.
- [11] XIAO M Z, XIAN C L, WANG Y, et al. Nuciferine attenuates atherosclerosis by regulating the proliferation and migration of VSMCs through the Calm4/MMP12/AKT pathway in ApoE^(-/-) mice fed with High-Fat-Diet[J]. Phytomedicine, 2023, 108: 154536.
- [12] KIM S M, PARK E J, LEE H J. Nuciferine attenuates lipopolysaccharide-stimulated inflammatory responses by inhibiting p38 MAPK/ATF2 signaling pathways[J]. Inflammopharmacology, 2022, 30(6): 2373-2383.
- [13] ZHANG L N, GAO J H, TANG P, et al. Nuciferine inhibits LPS-induced inflammatory response in BV2 cells by activating PPAR- γ [J]. International immunopharmacology, 2018, 63: 9-13.
- [14] ZHAO Z Q, LI X W, XU Y R, et al. Nuciferine supplement improved intestinal function and inflammatory response in juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed diets with high palm oil level[J]. Fish & shellfish immunology, 2025, 165: 110535.
- [15] LI J M, LIU M M, FAN M L, et al. Nuciferine ameliorates blood-brain barrier disruption post-ischemic stroke via inhibiting the JAK2/STAT3 pathway[J]. Phytomedicine, 2025, 143: 156829.
- [16] 王劼, 陈俊鹏, 陈鹏, 等. 日粮添加荷叶提取物对黄羽肉鸡抗氧化功能及肌肉品质的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(2): 17-20.
WANG J, CHEN J P, CHEN P, et al. Effects of dietary supplementation of lotus leaves extract on antioxidant ability and meat quality of yellow broilers[J]. China animal husbandry & veterinary medicine, 2011, 38(2): 17-20.
- [17] ZHU X Y, HAO R L, LYU X Q, et al. Nuciferine ameliorates high-fat diet-induced disorders of glucose and lipid metabolism

- in obese mice based on the gut-liver axis[J].Food frontiers,2023,5(1):188-201.
- [18] ZOU B, LONG Y, GAO R S, et al. Nanodelivery system of traditional Chinese medicine bioactive compounds: application in the treatment of prostate cancer[J].Phytomedicine,2024,135:155554.
- [19] ZHAO D Y, MA L L, BROWN LIE J, et al. Neuroprotective potential of major alkaloids from *Nelumbo nucifera* (lotus): mechanisms and therapeutic implications[J].International journal of molecular sciences,2025,26(17):8280.
- [20] WANG P, WEI Q, ZHANG C Y, et al. Effect of rosemary on growth performance, meat quality, fatty acid content, intestinal flora, and antioxidant capacity of broilers[J].Animals,2024,14(17):2480.
- [21] ALAGAWANY M, ELNESR S S, FARAG M R, et al. Use of licorice (*Glycyrrhiza glabra*) herb as a feed additive in poultry: current knowledge and prospects[J].Animals,2019,9(8):536.
- [22] 熊万涛, 廖加抱, 杨智霞, 等. 荷叶碱对肥胖模型小鼠肠道菌群及慢性炎症的影响[J]. 中国中药杂志,2021,46(8):2104-2111.
- XIONG W T, LIAO J B, YANG Z X, et al. Effect of nuciferine on gut microbiota and inflammatory response in obese model mice[J].China journal of Chinese materia medica,2021,46(8):2104-2111.
- [23] 李颖, 余劼, 赵春江, 等. 荷叶饲料对蛋鸡生长性状的影响[J]. 当代畜牧,2020,(12):12-15.
- LI Y, YU J, ZHAO C J, et al. Effects of lotus leaf feed on growth traits of laying hens[J].Contemporary animal husbandry,2020,(12):12-15.
- [24] 孟赛, 巩林强, 李曙晖, 等. 荷叶碱通过 p38MAPK-PPAR γ /NF- κ B 信号通路对肝硬化大鼠的影响[J]. 中国免疫学杂志,2025,41(3):595-599.
- MENG S, GONG L Q, LI S H, et al. Effect of nuciferine on liver cirrhosis rats through p38MAPK-PPAR γ /NF- κ B signaling pathway[J].Chinese journal of immunology,2025,41(3):595-599.
- [25] SU W Q, YANG Y N, ZHAO X H, et al. Potential efficacy and mechanism of eight mild-natured and bitter-flavored TCMs based on gut microbiota: a review[J].Chinese herbal medicines,2024,16(1):42-55.
- [26] EL-SAADONY M T, YAQOOB M U, HASSAN F, et al. Applications of butyric acid in poultry production: the dynamics of gut health, performance, nutrient utilization, egg quality, and osteoporosis[J].Animal health research reviews,2022,23(2):136-146.
- [27] WANG Z L, JIANG D M, WANG X, et al. Spermidine improves the antioxidant capacity and morphology of intestinal tissues and regulates intestinal microorganisms in Sichuan white geese[J].Frontiers in microbiology,2023,14(14):1292984.
- [28] BHARATHI R, HARINI G, SANKARANARAYANAN A, et al. Nuciferine-loaded chitosan hydrogel-integrated 3D-printed polylactic acid scaffolds for bone tissue engineering: a combinatorial approach[J].International journal of biological macromolecules,2023,253:127492.
- [29] 叶谦. 中国养殖趋势及兽用中草药市场前景[J]. 中国畜牧杂志,2013,49(18):8-11.
- YE Q, et al. Trends in Chinese aquaculture and market prospects for veterinary Chinese herbal medicines[J].Chinese journal of animal science,2013,49(18):8-11.

(责任编辑:刘俊峰)