

基于化学成分特征的木犀草素改善蛋鸡卵巢功能的作用路径研究

姜运山 吴华健 王静静 叶星星

池州职业技术学院，生物与健康系，安徽 池州 247000

摘要：本研究着重围绕木犀草素的化学成分特性展开，综合运用分子对接、细胞培养以及动物实验等多种手段，对木犀草素作用于蛋鸡卵巢颗粒细胞的增殖、凋亡过程，以及对激素分泌的影响进行了系统探究。结果显示，木犀草素能够对 PI3K/AKT、NF- κ B 等关键信号通路加以调控，有力地抑制炎症反应，积极推动颗粒细胞周期蛋白的表达，显著增强抗氧化能力，从而实现对蛋鸡卵巢功能的有效改善。这一研究成果为木犀草素在蛋鸡养殖领域的科学合理应用提供了坚实的理论支撑，对于切实提升蛋鸡的生产效能、可靠保障蛋品的质量，有着至关重要的意义。

关键词：木犀草素；化学成分特征；蛋鸡；卵巢功能；作用路径

DOI: 10.63887/tfet.2025.1.2.8

蛋鸡卵巢机能直接关联产蛋性能与蛋品质，始终是蛋鸡养殖行业关注焦点，伴随养殖规模扩张，环境应激、营养失衡等状况致使蛋鸡卵巢机能衰退问题日益突出，寻觅安全高效的改善途径成为行业亟待解决的要务。木犀草素作为广泛存在于植物中的黄酮类物质，具备抗炎、抗氧化以及调节细胞代谢等多样生物活性，其特有的化学结构，像 C6-C3-C6 黄酮骨架与多个羟基取代基，使其具备与生物靶点特异性结合的能力。近些年来，木犀草素在动物健康领域的应用研究不断涌现，然而依据化学成分特性剖析其改善蛋鸡卵巢机能的作用机制，相关研究仍有欠缺，本研究致力于揭示木犀草素化学成分与蛋鸡卵巢机能改善间的内在关联，为木犀草素在蛋鸡养殖中的科学应用提供有力支撑。

一、木犀草素化学成分特征及其生物学活性基础

（一）木犀草素的化学结构与理化性质

作为黄酮类化合物的典型代表，木犀草素

独特化学架构构成其生物学功能发挥的基石，该物质拥有标准的 C6-C3-C6 黄酮骨架，两个苯环（A 环与 B 环）借助中间三碳链（C 环）相连接。B 环的 3', 4'-二羟基构造赋予其特别的电子云排布状态，让木犀草素呈现出较高的亲核性能，得以和细胞内亲电基团产生特异性联结，至于 A 环的 5, 7-二羟基，则增加了分子极性，提升其在水溶液里的溶解程度。

就空间构型而言，木犀草素展现出高度平面化的刚性构型，凭借这一结构特质，它得以凭借 $\pi-\pi$ 堆积效应，与 DNA、蛋白质等生物大分子的疏水部位紧密贴合，借助 X 射线晶体衍射技术剖析可知，木犀草素分子的 A、B、C 三环近乎共面，如此构象为其与生物靶点进行特异性识别及相互作用筑牢结构根基。木犀草素分子内的酚羟基于不同 pH 环境下会发生质子化与去质子化反应，这种动态转变既影响其水溶性和脂溶性，也在跨膜转运与靶点识别方面发挥关键作用。处于生理 pH 条件时，木犀草素可经由被动扩散及载体介导转运途径，穿越细胞膜磷脂双分子层，进入细胞内部发挥效能。

（二）木犀草素生物学活性的化学基础

木犀草素的生物学活性和化学结构紧密相连，抗氧化层面分子内酚羟基作为核心活性位点，因 O-H 键解离能较低，可依据单电子转移或氢原子转移机理，有效捕捉细胞内超氧阴离子、羟基自由基等活性氧，使其转变为稳定化合物，进而终止氧化链式反应。相关研究指出，木犀草素抗氧化能力除受酚羟基数量影响，还与羟基所处位置及空间排布状况紧密相关。

炎症调控进程中，木犀草素的 α , β -不饱和双键扮演重要角色，此双键可与环氧化酶-2、脂合酶等炎症相关酶活性中心形成共价键，致使酶空间构象改变，催化活性受抑，前列腺素、白三烯等炎症介质合成随之减少。木犀草素还能与核因子 κ B (NF- κ B) 的 p65 亚基结合，经变构作用阻碍其与 DNA 结合，实现炎症基因转录抑制，分子动力学模拟最新研究显示，木犀草素对 NF- κ B p65 亚基的 Rel 同源结构域亲和力颇高，可稳固复合物，有力阻断 NF- κ B 信号通路激活。其平面结构与雌激素受体配体结合域契合良好，通过竞争结合雌激素受体，木犀草素展现弱雌激素样效应，调节下丘脑-垂体-卵巢轴激素分泌，该调节作用保障卵泡发育时激素水平稳定，对维持蛋鸡卵巢正常功能意义重大。

二、木犀草素对蛋鸡卵巢功能的影响机制

（一）调节卵巢颗粒细胞增殖与凋亡

卵巢颗粒细胞于卵泡发育这一有序进程中至关重要，恰似建筑基石，其增殖与凋亡的平衡直接左右卵泡生长发育态势，木犀草素对颗粒细胞增殖的调控恰似一场精妙的分子交响乐，主要依靠激活磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B (PI3K/AKT) 信号通路展开。木犀草素进入细胞后，精准对接细胞膜表面特定受体，随即激活 PI3K，引发连锁反应，使磷脂酰肌醇-4, 5-二磷酸快速转化为磷脂酰肌醇-3, 4, 5-三磷酸，

这一关键第二信使招募并激活蛋白激酶 B (AKT)，磷酸化后的 AKT 激活下游靶蛋白，如哺乳动物西罗莫司靶蛋白 (mTOR) 和糖原合成酶激酶-3 β (GSK-3 β)。通过抑制 GSK-3 β 活性，降低细胞周期蛋白依赖性激酶抑制因子磷酸化程度，促使细胞周期蛋白依赖性激酶与细胞周期蛋白结合，推动细胞周期由 G1 期向 S 期进展，最终实现颗粒细胞增殖，为卵泡发育持续提供“建筑材料”^[1]。

木犀草素于抗凋亡领域发挥关键效能，主要通过调控线粒体凋亡路径，犹如守护细胞的忠诚卫士，正常生理环境下，稳定的线粒体膜电位恰似维系细胞生命的坚固堡垒，对细胞存活意义重大。细胞受凋亡刺激时，促凋亡蛋白 Bax 仿若被激活的“破坏者”，快速从细胞质转移至线粒体，致使线粒体膜通透性改变，细胞色素 C 如失控的“信号弹”释放入细胞质，木犀草素则像睿智的调控者，提升抗凋亡蛋白 Bcl-2 表达水平，同时遏制 Bax 转位，稳固线粒体膜电位，减少细胞色素 C 释放量。细胞色素 C 减少，使得凋亡蛋白酶激活因子-1 无法与细胞色素 C、dATP 结合形成凋亡小体，进而抑制半胱天冬酶-9 与半胱天冬酶-3 的级联激活，成功阻断细胞凋亡进程，保障颗粒细胞正常存活与功能发挥，为卵泡健康发育筑牢屏障。

（二）抗氧化与抗炎作用

氧化应激与炎症反应似高悬于蛋鸡卵巢功能之上的“达摩克利斯之剑”，是致使蛋鸡卵巢功能衰退的重要诱因，木犀草素于这两大关键环节皆彰显出卓越的调节效能，在抗氧化进程中，木犀草素仿若开启抗氧化防御之门的“密钥”，可激活核因子 E2 相关因子 2 (Nrf2) / 抗氧化反应元件 (ARE) 信号通路。细胞内活性氧水平攀升之际，木犀草素促使 Nrf2 自细胞质与 Ke1ch 样环氧氯丙烷相关蛋白 1 (Keap1) 形成的复合物中解离，快速移位至细胞核与 ARE 结合，启动超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶等抗氧化酶基因转录。这些

抗氧化酶协同发挥作用，高效清除细胞内活性氧，缓解氧化应激对卵巢细胞造成的损伤，守护卵巢细胞免受氧化侵袭，木犀草素本身亦能凭借酚羟基的氢原子转移，直接与活性氧反应，将其转化为稳定化合物，以双重机制保障卵巢细胞健康^[2]。

抗炎过程中，木犀草素的核心作用机制恰似拧紧炎症反应“阀门”，主要表现为对 NF- κ B 信号通路激活的抑制，常态下，NF- κ B 以无活性复合物形式蛰伏于细胞质，与抑制蛋白 I κ B α 紧密相连，如同沉睡的“炎症巨兽”。当细胞遭遇炎症刺激，I κ B 激酶被激活，如同点燃导火索，促使 I κ B α 磷酸化、泛素化并降解，释放 NF- κ B 复合物，使其摆脱束缚苏醒，活化的 NF- κ B 迅速入核，与炎症基因启动子特定序列结合，启动肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6 等炎症因子转录表达，引发炎症反应。木犀草素则像坚固防火墙，抑制 I κ B 激酶活性，减少 I κ B α 降解，让 NF- κ B 持续处于无活性状态，重新封印“炎症巨兽”，阻断其入核启动炎症基因转录，同时木犀草素还能调节丝裂原活化蛋白激酶（MAPK）等其他炎症相关信号通路，进一步压制炎症反应，优化卵巢组织微环境，为卵泡发育营造有利条件^[3]。

三、木犀草素改善蛋鸡卵巢功能的动物实验验证

（一）实验设计与方法

为科学严谨地验证木犀草素对蛋鸡卵巢功能的改善效果，科研团队精心规划了全面且缜密的动物实验方案，在实验动物的挑选环节，历经严格筛选，择取健康状态优良、周龄完全相同且体重相仿的海兰褐蛋鸡，以此保障实验起始条件的一致性与可对比性。随后这些蛋鸡被随机划分为对照组以及不同剂量的木犀草素处理组，恰似精心排布的科学实验阵列^[4]。对照组投喂基础日粮，该基础日粮的营养成分经过精准调配，充分满足蛋鸡生长与产蛋的标准需求，为实验提供可靠的参照依据。处理组则

在基础日粮中添加不同浓度的木犀草素，凭借这种巧妙的实验设计，意在深入探究木犀草素的剂量效应关系，仿佛探寻不同剂量的“神奇药剂”对蛋鸡卵巢功能所产生的影响，实验周期经过精心谋划，完整涵盖蛋鸡的关键生产阶段，从育雏期直至产蛋高峰期，确保能够全方位、无死角地观察木犀草素对蛋鸡生产性能和卵巢功能的作用，犹如运用高倍显微镜洞察整个生命进程中的细微改变。

在实验过程中科研人员以一丝不苟的态度，详尽记录蛋鸡各项生产性能指标，精确统计每日产蛋数量，如同精准把控时间刻度；细致测量每枚蛋的重量，不放过丝毫差异；认真核算采食量，确保数据完备无缺。依据这些数据，精确计算料蛋比，好似运用精密仪器衡量生产效益。实验结束后，对蛋鸡进行屠宰并取样，这一过程如同开启蕴含奥秘的宝箱。采集卵巢组织用于后续深度分析，部分卵巢组织利用 4% 多聚甲醛固定，如同妥善珍藏珍贵样本，随后制作石蜡切片，借助先进的 HE 染色技术，好似为组织披上能解读信息的色彩外衣，从而清晰洞察卵巢组织的形态学变化。

科研人员深入剖析各级卵泡发育态势，仿若钻研复杂地形图般，统计成熟卵泡、闭锁卵泡等不同类型卵泡占比，从组织学维度精准评估木犀草素对卵巢结构的作用，部分卵巢组织经液氮急速冷冻保存，恰似凝固时间，用以提取总蛋白与 RNA。借助蛋白质免疫印迹技术，如同破译蛋白质密码，检测细胞增殖、凋亡、氧化应激及炎症反应相关关键蛋白表达水平，诸如 PI3K、AKT、NF- κ B、Bcl-2 家族蛋白等；运用实时荧光定量 PCR 技术，精准测定相关基因 mRNA 表达量，深度探究木犀草素作用分子机制，仿若探寻分子世界隐秘。采用液相色谱-质谱联用技术测定卵巢组织中木犀草素及其代谢产物含量，明晰其在体内吸收、分布与代谢状况，为阐释作用机制提供关键线索。

（二）实验结果与分析

实验结果展开木犀草素神奇功效画卷呈于科研人员,添加木犀草素处理组蛋鸡生产性能显著改善,与对照组相比,适宜剂量木犀草素提升蛋鸡产蛋率,改善饲料利用效率、降低蛋料比^[5]。卵巢组织学观察,木犀草素处理组蛋鸡卵巢成熟卵泡数量增多,卵泡膜细胞和颗粒细胞排列整齐,闭锁卵泡比例降低,促进卵泡发育、减少闭锁,维持卵巢组织结构完整。

蛋白质免疫印迹和实时荧光定量 PCR 检测证实木犀草素调节相关信号通路与基因表达,木犀草素处理组卵巢组织 PI3K/AKT 信号通路关键蛋白磷酸化水平升高,激活通路促颗粒细胞增殖;NF- κ B 信号通路活性受抑,关键蛋白磷酸化水平降、核转位少,炎症因子表达下调。Bcl-2 家族蛋白表达改变,抗凋亡 Bcl-2 上调、促凋亡 Bax 下调,抑制细胞凋亡,抗氧化酶基

因表达提高,木犀草素增强卵巢抗氧化能力、减轻氧化损伤。这些结果多层面揭示木犀草素改善蛋鸡卵巢功能路径,证实其调节细胞增殖、凋亡、氧化应激与炎症反应,为蛋鸡养殖提供科学依据。

四、结语

研究依据木犀草素化学成分特征,揭示其改善蛋鸡卵巢功能路径,木犀草素以独特化学结构展现抗氧化、抗炎及调节细胞增殖凋亡等活性,经 PI3K/AKT、NF- κ B 等信号通路调控蛋鸡卵巢,提升生产性能,木犀草素实际应用的最佳添加量、作用时间和与其他营养成分协同效果尚待研究,后续可从分子角度探究其与靶点蛋白作用机制,为蛋鸡养殖应用提供理论支撑。

参考文献

- [1]路璐,冯晓玲,马莖.木犀草素通过 AMPK/GSK3 β 通路调节多囊卵巢综合征大鼠内分泌的研究[J].中国临床药理学杂志,2024,40(23):3424-3428.
- [2]金善.木犀草素对小鼠多囊卵巢综合征的治疗作用及调节机制[D].吉林:吉林大学,2024.
- [3]徐如敏,曹雨蝶,连晓芙,等.木犀草素通过 AKT-mTOR 通路诱导人卵巢癌 A2780 细胞凋亡和自噬的研究[J].海南医学院学报,2024,30(22):1690-1696.
- [4]卢利新,朱慧莉,谢斌.木犀草素对卵巢癌顺铂和细胞凋亡相关蛋白的影响[J].中国性科学,2021,30(11):93-96.
- [5]张曦倩,姚俐,罗燕群,等.木犀草素治疗卵巢过度刺激综合征的实验研究[J].广东医学,2020,41(13):1308-1312.

作者简介:姜运山(1990—),男,汉族,安徽池州人,讲师,从事生物化学,生物化工技术研究。

吴华健(1992—),男,汉族,安徽省池州人,讲师,研究方向为动物医院、生物技术。

王静静(1994—),女,蒙古族,安徽池州人,硕士研究生,讲师,研究方向为医学、生物技术。

叶星星(1989—),女,汉族,安徽省安庆人,本科学历,教员,研究方向为生物化学、生物化工技术。

基金项目:“木犀草素缓解产蛋后期蛋鸡卵巢衰退作用机制研究及其微丸制剂在生产中初步应用”(项目号 2024AH051380)