

侯太江, 李端端, 赵良, 等. 肉鸡木质化胸肌发生机制及其调控研究进展 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (11): 136-144.

HOU T J, LI D D, ZHAO L, et al. Progress in studies on the pathogenesis mechanisms and regulatory technologies of wooden/woody breast myopathy in broiler chickens [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (11): 136-144.

肉鸡木质化胸肌发生机制及其调控研究进展

侯太江, 李端端, 赵良, 张林, 高峰, 邢通*

(南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 快大型白羽肉鸡木质化胸肌 (wooden/woody breast, WB) 作为近年来一类发生率高、品质特性差的异质肉, 给全球肉鸡产业造成了严重的经济损失。目前, 国内外学者已对 WB 开展了较多研究。本文主要综述了 WB 的品质特性和发生率, 重点讨论了 WB 形成的影响因素及其潜在的发生机制, 并总结了缓解其发生的相关饲养管理和营养调控技术, 以期为深入理解 WB 的发生机制和开发相应的防控技术提供参考和思路。

关键词: 肉鸡; 木质化胸肌; 品质特性; 发生机制; 调控技术

中图分类号: S831.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2025)11-0136-09

Progress in studies on the pathogenesis mechanisms and regulatory technologies of wooden/woody breast myopathy in broiler chickens

HOU Taijiang, LI Duanduan, ZHAO Liang, ZHANG Lin, GAO Feng, XING Tong*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China)

Abstract: The occurrence of wooden/woody breast (WB) in fast-growing broilers with high incidence and deteriorated meat quality has resulted in substantial economic losses to the global broiler industry in recent years. Global studies have been conducted to investigate multiple aspects of WB. Herein, we provided a comprehensive review of meat quality characteristics and the incidence of WB, emphasizing factors involved in the formation of WB and the underlying pathological mechanisms. Additionally, we summarized relevant breeding management and nutritional regulation strategies to mitigate WB. This review offers reference for a deeper understanding of the pathogenesis of WB and insights into developing regulatory strategies to cope with WB.

Keywords: broiler; wooden/woody breast; quality characteristics; pathogenesis; regulation technology

随着遗传育种、饲料营养和饲养管理等现代畜牧业技术的持续发展, 商品白羽肉鸡的生长速度和胸肌产量得到了极大的提升, 但这也伴随着肉鸡应激敏感性增加以及一些原发性或特发性胸肌缺陷出现, 由此引发鸡肉品质下降和异质鸡胸肉高发等行业难题^[1]。木质化胸肌 (wooden/woody breast, WB) 作为近年来全球范围内一类发生率高的异质鸡胸肉, 不仅外观可接受度低, 影响消费者的购买欲望; 且由于营养价值下降和加工特性降低, 根据美国、欧洲、巴西以及中国等世界上主要鸡肉生产国的报道, 保守估计 WB 每年会对全球肉鸡产业造成数亿美元的损失^[2]。如何有效降低 WB 发生率和严重程度已成为当前肉鸡产

业亟须解决的难题。高通量测序技术已被广泛应用于研究 WB 发生机制, 发现涉及的多种生理代谢过程相互依赖、互相影响, 发生的时间顺序和因果关系错综复杂, 共同作用于 WB 的发生和发展进程。深入理解这些过程有助于揭示 WB 的发生机制, 从而为实施有效控制 and 减少损失提供关键前提。因此, 本文从品质特性、影响因素、潜在的发生机制和调控技术几个方面对 WB 的研究进展进行论述, 以期为深入理解 WB 的发生机制和开发相应的防控技术提供参考和思路。

1 WB 的主要特性

1.1 WB 的外观和组织学特征

WB 主要发生于快大型白羽肉鸡的胸大肌部位, 其外观主要表现为触感坚硬、尾部有脊状突起, 木质化严重度较高的胸肌表面常伴有白纹、黏液以及淤血点的出现^[3]。在宏观形态学特征方面, WB 头端、中端和尾端区域的切面高度显著高于正常肉^[4]。WB 的组织病理学特征主要是规则的多边形肌纤维数量减

收稿日期: 2024-10-13; 修回日期: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32272900); 江苏现代农业产业技术体系建设专项 (JATS [2024])

第一作者: 侯太江, 男, 硕士研究生

*通信作者: 邢通, 博士, 副教授, 研究方向为畜产品质量控制与动物营养生理调控, E-mail: xingtong@njau.edu.cn。

少,部分肌纤维退化和坏死,同时出现静脉炎和炎性细胞浸润;坏死的肌纤维组织再生后被胶原蛋白、结缔组织以及脂肪组织替代,表现出纤维化和脂肪沉积等特点^[3]。Papah 等^[5]对不同时间点的 WB 进行 RNA-seq 分析,研究发现了正常胸肌 (normal breast, NB) 和 WB 间的差异表达基因主要显著富集在能量代谢失调、炎症反应、血管疾病和细胞外基质重塑等生物过程中。Zhao 等^[6]利用 scRNA-seq 技术对 WB 进行了深入分析后发现了 WB 中巨噬细胞的分布和基因表达模式与正常胸肌存在显著差异,且 WB 中肌细胞凋亡和脂肪合成信号通路的基因表达发生变化,这与组织中观察到的 WB 中肌细胞数量减少和脂肪沉积相一致;此外,研究还发现 WB 中胶原蛋白家族基因的表达水平升高。Wang 等^[7]利用空间转录组学揭示了脂质负载巨噬细胞 (lipid-laden macrophages, LLM) 在 WB 中显著增加,并且在肌肉炎症和修复中发挥重要作用,而且还识别到 WB 的炎症区域中溶酶体相关基因显著上调。研究表明, WB 属于一种进行性疾病,病情的发生最早可见于肉鸡 1-2 周龄,最初表现为急性静脉炎、脂肪浸润以及部分肌纤维退化的局灶性病变阶段;病情发生后,随着日龄的增加逐渐恶化,于 5-7 周龄发展成上述扩散的慢性纤维化阶段^[8-9]。此外, WB 发生的严重程度也不尽相同,根据其外观和坚硬程度可分为正常 (0 分),胸肌整体柔软有弹性,无任何坚硬部分;轻度 (1 分),胸肌头部和近尾部出现轻微硬度变化,头部较为坚硬;中度 (2 分),胸肌整体较为坚硬,中部至尾部有弹性;重度 (3 分),胸肌整体表现出坚硬特征,表面出现淤血和黏性分泌物且病变特征在胸肌中呈现不均匀分布,一般由胸大肌表面向内部逐渐减弱^[10-11]。

1.2 WB 的品质特性

1.2.1 营养品质

WB 的发生会造成肌肉基本组分和功能特性的改变,进而对其营养价值造成较大的影响。与正常胸肌相比, WB 中水分、粗脂肪和胶原蛋白含量显著增加,粗蛋白和粗灰分含量显著下降^[12]。Soglia 等^[10]研究还发现 WB 中钠和钙的含量高于正常胸肌,而钾和磷的含量低于正常胸肌。另外, WB 对胸肌中氨基酸的含量和组成有很大影响。Dalle 等^[13]发现, WB 中总氨基酸含量相比于正常胸肌显著降低约 18.1%;精氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸和缬氨酸等必需氨基酸以及丙氨酸、天

冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸和牛磺酸等非必需氨基酸的含量显著下降。此外, WB 中脂肪、蛋白质和核酸等生物大分子物质的氧化程度高,长期摄入可能会加剧机体氧化应激,造成慢性疾病的发生^[14-15]。

1.2.2 食用品质

食用品质与肉品内在质量密切相关,主要反映在肉的色泽、保水性、质构、风味等方面。色泽是肌肉内部生化变化的外部表现,是消费者判断肉品质和新鲜度最直观的依据。Cai 等^[16]表明 WB 的亮度值 (lightness, L^*)、红度值 (redness, a^*) 和黄度值 (yellowness, b^*) 均显著高于正常肉。Chatterjee 等^[17]和 Xing 等^[18]发现与正常肉相比,中度和重度 WB 鸡胸肉 L^* 和 b^* 无显著差异, a^* 显著升高。可见,目前关于 WB 病变对肉色影响的研究结论并不一致。肉的保水性一般可以用滴水损失、蒸煮损失和贮藏损失等指标来反映。Soglia 等^[10]发现 WB 的蒸煮损失比正常肉高出近 30%。Xing^[18]等研究表明 WB 贮藏损失和蒸煮损失随着其严重程度的增加而增大,其中,重度 WB 的贮藏损失是正常肉的 2.5 倍,蒸煮损失比正常肉高出 36.8%。在质构特性方面,Chatterjee 等^[17]发现与正常肉相比, WB 的硬度显著升高,粘聚性显著降低;煮熟后, WB 的硬度、弹性和咀嚼性均显著高于正常胸肌,而粘聚性无显著差异。

1.2.3 加工品质

WB 因感官特性差,消费者可接受度低,因此禽肉加工业通常将这类异质肉用于生产深加工制品,但研究人员发现 WB 肌病会严重降低鸡胸肉的加工特性,主要表现为腌制液吸收率低、保水能力差、出品率低等^[19]。据报道,重度 WB 在真空滚揉时对腌制液的吸收率和 24 h 后腌制液的保留能力均显著低于正常肉,烤箱加热后蒸煮损失显著升高,最终产品得率比正常肉降低 20%^[20]。Aguirre 等^[21]对鸡胸肉进行 15% 的腌制液注射时发现重度 WB 和正常肉对腌制液的吸收率无显著差异,但重度 WB 对腌制液的保留能力显著低于正常肉,加热后蒸煮损失也显著升高。

1.3 WB 的发生率

近年来,美国、欧洲、巴西以及中国等世界上主要鸡肉生产国相继报道了快大型肉鸡 WB 病变的发生,且发生率和严重程度有逐年上升的趋势^[19,22]。如表 1 所示,列举了近年来一些学者对世界上鸡肉主要生产地区 WB 发生率的研究结果。

表 1 肉鸡 WB 发生率相关研究

报道年份	国家/地区	样本数量/日龄	WB 发生率	参考文献
2014	美国	285 只 61 日龄高胸肌率肉鸡	发生率高达 96.1%，其中轻度、中度和重度的比例分别为 48%、28% 和 20%	[23]
2022	中国	300 只 AA 肉鸡	发生率高达 27.02%，其中轻度和重度的比例分别为 19.76% 和 7.26%	[24]
2017	意大利	474 只高胸肌率鸡胴体	发生率为 53.2%	[25]
2019	意大利	16 000 块鸡胸肉	42% 表现出中度，18% 表现出重度	[19]
2020	巴西	8959 只 Cobb 肉鸡	发生率为 20%~30%	[26]
2017	巴西	1200 只 Cobb 肉鸡	35 日龄 Cobb 肉鸡发生率为 85.9%；42 日龄 Cobb 肉鸡发生率为 89.2%	[27]
2020	中国	1135 块分割鸡胸肉	发生率超过 60%，其中有 30.8% 表现出中度至重度	[18]
2022	加拿大安大略省	9250 块鸡胸肉	发生率为 82.3%，其中中度和重度的发生率分别为 70.5% 和 11.8%	[28]

需要指出的是，由于上述研究中肉鸡的饲料、养殖条件和日龄并不一致，且对于 WB 的分级标准也不统一，这势必会造成 WB 发生率在一定范围内的较大变动。此外，为了提高对 WB 发生率监测的准确性，建议每个研究团队或企业在设定 WB 分级标准时，应结合产品等级要求和后续产品加工方式等进行综合考虑。

2 WB 形成的影响因素

2.1 遗传

全球鸡肉消费量的日益增长推动着肉鸡品种的选育向快速增长型和肌肉增生型方向发展。Bailey 等^[29]发现品种选育背景和胸肌产量不同的 2 个纯种品系的商品肉鸡在相同的日粮和饲养管理条件下，高产型肉鸡 WB 病变的发生率显著高于中产型肉鸡。Emambu 等^[30]研究发现快速生长品系（Cobb500）和慢速生长品系（L1986）在相同饲养模式下，Cobb500 肉鸡在出壳 21d 后就首次诊断到 WB，并且仅在 Cobb500 肉鸡中观察到 WB 发生。此外，Chen 等^[31]在研究 3 个现代肉鸡品系和 ACRB 肉鸡（1950 年未经选育肉鸡）WB 动态发病规律时发现，3 个现代肉鸡品系中 WB 病变最早可见于 2 周龄，病变随着日龄的增加逐渐严重，且严重程度与淋巴细胞性静脉炎和体重显著相关；ACRB 肉鸡在 8 周龄时胸大肌表现出与现代肉鸡品系 2 周龄时相似的部分肌纤维退化、再生和淋巴细胞性静脉炎等轻微肌病损伤。由上述研究可知，WB 发生率和严重程度与生长快速型和胸肌高产型肉鸡品种高度相关。

2.2 体重/日龄

据报道，随着体重的增加，肉鸡 WB 肌病的发生率逐渐升高，严重程度也逐渐增加^[8,27]。Dalle 等^[25]

发现肉鸡胸肌重量越大，肌纤维直径也越大，巨型纤维发生率越高，WB 肌病程度也越严重。Lilburn 等^[32]表明任何能降低肉鸡体重或减少胸肌增生的因素都可能会降低 WB 的发生率。日龄对肉鸡的生长速度和胸肌增生影响显著，因而对 WB 发生也会有一定的影响。Kuttappan 等^[33]研究发现 9 周龄肉鸡 WB 发生率显著高于 6 周龄肉鸡；其中，中度和重度 WB 发生率也均显著升高。此外，大量研究发现 WB 肉鸡在生长期内胸肌组织形态呈现动态病理变化特征，生长前期仅出现局部静脉炎和部分肌纤维退化，后期才发展到慢性纤维化阶段^[8,34]。这表明了日龄与肉鸡 WB 发生率和严重程度高度相关。

2.3 性别

Trocino 等^[35]研究发现雄性肉鸡 WB 发生率是雌性肉鸡的 2 倍。这可能是由于雄性肉鸡相比于雌性肉鸡，其胸大肌产量更高、体重更大、生长速度更快^[36]。在此基础上，Brothers 等^[37]利用 RNA 测序技术发现雄性和雌性肉鸡中共有 260 个差异表达基因，雄性肉鸡中有 189 个基因表达上调（103 个基因位于 Z 染色体上）；此外，雄性肉鸡中高表达基因主要富集在脂代谢、氧化应激、抗血管生成以及结缔组织增生等生物过程。这表明雄性肉鸡中存在某些生物学特性，可能会导致其更容易发生 WB 肌病。但 Radaelli 等^[38]表明性别对生长期肉鸡胸大肌肌纤维退化比例、严重程度以及凋亡细胞核数量无显著影响，这与上述研究存在一定的矛盾。因此，关于性别因素对 WB 发生率的影响及其内在机制还需要进一步研究。

2.4 营养水平与饲养管理

Cruz 等^[27]在评估饲料中可消化赖氨酸（dLys）水平对肉鸡白条纹和 WB 严重程度的影响时，发现在 12~28 d 和 28~42 d 随着提高肉鸡饲料中 dLys 水平，

WB 平均评分会发生显著提高。此外, Lackner 等^[39]研究发现, 将饲料中可消化回肠 (SID) His 和 Lys 比例调整至 0.45 时肉鸡 WB 的发生率较低, 而 SID His: Lys 过高或过低均容易导致 WB 的发生。Iwasa-ki^[40]等发现在 0~12 d 饲喂低营养水平日粮的肉鸡, 更容易出现翅膀无法背对背接触的情况, 而在无法实现翅膀背对背接触的肉鸡中, WB 病变的评分往往更高, 这表明了不适当的起始饲料营养水平可能会增加肉鸡 WB 的发生率。另外, 饲养管理技术也是影响动物生长代谢和组织器官发育的重要因素, 对维持机体健康、提高生产效率以及降低饲料成本有重要意义。Livingston 等^[41]在肉鸡 7~42 d 进行了饲养方式比较, 发现自由采食组肉鸡出栏时活体重、屠宰率、胸肌率、料重比和胸肌 WB 评分均显著高于限饲组。Radaelli 等^[38]在 13~21 d 对肉鸡进行限饲 (饲喂的饲料量为自由采食组肉鸡前一天耗料量的 80%), 发现自由采食组 21 d 肉鸡胸肌肌纤维退化的发生率显著高于限饲组。此外, Cui 等^[42]研究发现, 相较于笼养肉鸡, 散养模式下的肉鸡表现出更嫩的肉质和更小的肌纤维横截面积, 并且通过整合代谢组学和转录组学分析出散养肉鸡肌肉品质的改善主要是与骨骼肌分化增强有关。

3 WB 的发生机制

3.1 缺氧与血管化异常

肉鸡胸肌中 IIB 型快速酵解纤维直径较大, 这会导致血液中氧气和营养物质到肌纤维中心的扩散距离增大^[11]; 随着日龄的增加, 肉鸡肌纤维直径不断变大, 但血管总数却逐渐下降^[43-44]。因此, 肉鸡肌纤维肥大的同时, 血管化程度不足可能会造成胸肌中营养物质和 O₂ 供给不足以及 CO₂ 和代谢废物排放受阻, 进而引发氧化应激和代谢紊乱^[45]。Lake 等^[46]发现, 相比于正常肉鸡, WB 肉鸡血液中氧分压和氧饱和度降低, 二氧化碳分压和二氧化碳总量升高; 此外, 随着肉鸡 WB 严重程度的加剧, 血液中氧分压逐渐降低, 二氧化碳总量和碳酸氢盐浓度呈升高趋势^[47]。这表明肉鸡 WB 发生与机体缺氧有直接关系。在肉鸡生长中期 (18~24 d), 正常胸肌中血管总数显著高于 WB, 表明血管数量的大幅度降低是 WB 病情早期的一个重要特征。Sihvo 等^[34]指出 WB 在出现临床症状之前主要开始于血管病变, 主要病理学特征是淋巴细胞静脉炎和血管周围的脂肪浸润, 此外, WB 中血管内皮细胞代谢活性和生物合成旺盛以及血管内皮分泌内皮细胞特异性分子 1 (ESM1) 表达量显著升高导致的血管功能障碍和病变也可能是导致 WB 胸肌供血不足, 进而引发缺氧的重要原因^[48]。

3.2 肌肉损伤

缺氧会导致机体活性氧自由基 (reactive oxygen species, ROS) 产生增加^[49], Pan 等^[50]近期研究也发现, WB 胸肌中 ROS 生成量显著升高。此外, 缺氧状态下 ROS 生成量增加会引发线粒体功能障碍, 造成机体的氧化应激^[44,50]。此外, 在缺氧状态下, ATP 生成量会下降, 导致钠泵的效率下降, 大量的 Na⁺ 滞留在细胞内, 导致胞内离子稳态失衡, 造成细胞肿胀^[51]。此时, 为了维持胞内的离子平衡, 细胞膜上的 Na⁺/Ca²⁺ 交换器会发生逆转, Ca²⁺ 内流, 但由于 ATP 生成量减少, Ca²⁺-ATPase 不能将 Ca²⁺ 泵出细胞, 由此造成细胞内 Ca²⁺ 的积聚。大量的 Ca²⁺ 内流会激活胞内的磷脂酶, 破坏细胞膜结构, 加剧细胞损伤。此外, Ca²⁺ 过载也会破坏线粒体的完整性, 诱导肌细胞凋亡^[52]。Bordini 等^[53]利用 RNA-seq 技术识别了 NB 与 WB 之间的差异表达基因 (DEGs), 发现 WB 中糖原代谢过程、糖异生和三羧酸循环的基因表达下调, 也证实了 WB 肌肉中能量代谢失调。据此, 我们推测缺氧引发 ATP 生成量的下降会造成胞内发生离子紊乱, 导致肌细胞结构损伤和功能紊乱。

3.3 炎症反应

肌肉损伤后会在损伤部位诱发一系列炎症反应, 免疫系统与炎症反应在肌肉修复与再生过程中发挥重要作用。大量研究发现 WB 损伤处出现巨噬细胞、异嗜白细胞和淋巴细胞等炎症细胞浸润的病理特征^[3,12]; 而且 WB 中巨噬细胞密度显著高于正常胸肌细胞, 且随着 WB 严重程度的增加而增多^[54]。除了先天免疫细胞外, 适应性免疫细胞也参与肌肉再生过程。随着肌肉损伤修复的进展, 辅助性 T 细胞 (T helper cell, Th) 浸润至损伤部位后会分泌肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α), 干扰素- γ (interferon- γ , IFN- γ), 白细胞介素-4 (interleukin 4, IL-4) 等细胞因子, 促进肌肉干细胞的增殖与分化^[55]。正常生理状态下, Th1 和 Th2 类细胞产生的炎性因子会相互调节, 调控免疫系统作出适宜的免疫反应; 但当机体发生功能异常时, Th1/Th2 平衡状态被打破, 很可能造成细胞因子网络的动态平衡被破坏, 进而引起许多疾病的产生和发展。我们近期研究发现, WB 中 IL-1 β 、TNF- α 及 IL-6 等促炎因子表达量增加, 而 IL-4 和 IL-10 表达量降低, 表明 Th1/Th2 平衡的破坏, 这可能进一步导致机体免疫紊乱和炎症反应的加剧^[14]。肌肉干细胞是肌肉再生和修复的主要贡献者, 而在此过程中炎症反应对肌肉干细胞分化和增殖的调控尤为关键, 尽管其并非肌肉干细胞分化所必需, 但是它可以大大促进肌肉干细胞的分化以及肌肉特异基因的表达。

3.4 肌肉再生修复与卫星细胞功能障碍

家禽出壳时总肌纤维数目已经固定，出壳后一般不会再形成新的肌纤维，因而出壳后家禽肌肉的发育主要依靠现有肌纤维的增粗和变长^[56]。肌纤维的肥大主要依赖于卫星细胞 (satellite cells, SCs)，SCs 激活后会进行增殖和肌源性分化为成肌细胞，融入邻近的肌纤维中，或者彼此融合，使得肌纤维得以肥大和延伸^[57]。成年动物正常生理状态下，大多数 SCs 处于休眠和不活跃状态，当肌肉损伤时 SCs 能够被激活重新进入细胞周期，大量增殖和分化，参与受损部位肌纤维的再生^[58-59]。因此，SCs 的活性和功能对肌肉损伤后良好的修复至关重要。

配对盒 7 (paired box 7, Pax7) 是静息期和增殖期 SCs 特异表达的转录调控因子，是 SCs 常用的分子标记物。此外，Pax7 在调控 SCs 功能和肌肉再生过程中不可或缺，Pax7 表达缺失会阻碍肌肉损伤后的再生过程^[60]。有研究发现，大体重肉鸡胸肌中 Pax7+ 细胞数量仅为小体重肉鸡的 1/3，胸腺嘧啶核苷类似物 BrdU 标记的 SCs 比例显著降低，8 周龄时体重大的肉鸡分离出的 SCs 体外培养时几乎失去融合为肌管的能力；通过肌肉注射 BaCl₂ 诱导胸肌损伤，5 周龄小体重肉鸡在术后 3 d 胸肌再生能力显著高于大体重肉鸡，8 周龄大体重肉鸡胸肌几乎完全丧失再生能力，表明 SCs 数量减少以及功能障碍是诱发大体重肉鸡胸肌肌病发生的重要原因^[61]。重度 WB 中肌源性因子 5 (myogenic factor 5, Myf5)，肌源性分化蛋白 (myogenic differentiation, MyoD) 以及 Pax7 阳性 SCs 占总细胞核的比率显著低于轻度 WB，表明随着 WB 严重程度的增加，肌肉自我修复再生能力逐渐衰退^[54]。由此可见，WB 中 SCs 功能障碍可能是导致其肌纤维损伤后再生修复受阻的重要原因。

3.5 肌肉重塑

胶原蛋白和细胞外基质 (extracellular matrix, ECM) 沉积造成组织纤维化以及脂肪沉积是 WB 最为典型的组织病理学特征^[14,62]。转录组学研究发现 WB 胸肌中有大量参与 ECM 重塑 [血小板衍生生长因子受体 α (PDGFRA)、纤连蛋白 1 (fibronectin 1)、肌腱蛋白 C (tenascin C)、结缔组织生长因子 (CTGF)] 以及调控成纤维细胞增殖或功能 [成纤维细胞激活蛋白 (FAP α)、成纤维细胞生长因子受体样蛋白 1 (FGFRL 1)、成纤维细胞生长因子结合蛋白 1 (FGFBP 1)] 相关的基因表达上调^[37,63]；另外，WB 中 TGF- β /Smad 信号的激活能促进纤维化基因如 I 型胶原蛋白 (collagen-I)、 α -平滑肌肌动蛋白 (α -SMA)、结缔组织生长因子 (CTGF) 的转录，进一步增加 ECM 沉积^[14]。此外，催化胶原蛋白生物

合成和分子间交联 [脯氨酰 4-羟化酶亚基 α 1 (P4HA1)、赖氨酰氧化酶 (LOX)、核心蛋白聚糖 (DCN)] 相关基因的差异表达以及 MMPs/TIMPs 系统的调节异常对 WB 中 ECM 沉积和重塑都有重要影响^[14]。纤维脂肪形成祖细胞 (fibro/adipogenic precursors, FAPs) 有产生成纤维细胞和脂肪细胞的潜能，但不能分化成肌原细胞，在损伤后的肌肉再生中通常通过清除碎片和促进肌肉细胞融合成新的肌纤维。肌肉正常修复再生时，尽管 FAPs 处于增殖状态，但不会进行分化；SCs 可以抑制 FAPs 分化，并在肌肉修复后诱导 FAPs 凋亡；在病理状态下，SCs 数量减少或功能障碍无法抑制 FAPs 的分化，FAPs 会分化为成纤维细胞或脂肪细胞^[64]。可见，FAPs 的激活与 WB 中异位脂肪沉积和纤维化病理特征的形成密切相关。因此，减少 FAPs 的过度积累或抑制 FAPs 脂肪和纤维化的生成，从而调控肌肉重塑过程，可能是缓解 WB 的有效突破口。

4 WB 的调控技术

4.1 饲养管理技术

限饲作为一种有效的饲养管理策略，能够在一定程度上减缓肉鸡的生长速度，减少腹水、跛行等代谢性疾病的发生，从而提高生产效率。通过限制饲料摄入，可以在一定程度上调控肉鸡的生长速率，进而对胸肌的形态和功能产生影响。Trocino 等^[35]的研究发现，限饲可以减少肉鸡的最终体重和饲料转化率，但对 WB 的影响则不显著。此外，Gratta 等^[65]发现，前期 (13 至 23 日龄) 和后期 (27 至 37 日龄) 限制饲料摄入对胸肌肌纤维退化有显著影响，且后期限饲对胸肌重量和比例有负面影响。而 Ayansola 等^[66]的研究表明，间歇性限饲和禁食策略能够通过促进肌肉血管生成、增加肌肉卫星细胞数量，预防 WB 的发生，同时减少胸肌脂肪沉积和纤维化发生，而不影响肉鸡的生长性能。这些研究结果表明，限饲策略在调控 WB 发生方面具有一定的潜力，但其效果受到限饲时间、程度和遗传背景等因素的影响。

4.2 营养调控技术

4.2.1 氨基酸

饲料中精氨酸与赖氨酸的比例被认为对 WB 有显著影响。Zampiga 等^[67]研究发现，通过在肉鸡日粮中补充 L-精氨酸，将可消化精氨酸与赖氨酸的比例提高约 30%，发现这不仅减少了 WB 和 WS 的发生率，而且对肉鸡的生产性能和肉质特性没有负面影响。此外，有研究指出，精氨酸通过其代谢产物 NO 发挥血管舒张作用，从而增加肌肉内部血液供应，改善氧气输送，减少肌肉损伤。然而，并非所有研究都支持补

充精氨酸对改善胸肌木质化有积极作用。Boerboom 等^[68]通过代谢组学分析发现, WB 可能与多种代谢途径的紊乱有关, 而不仅仅是精氨酸-NO 途径。这表明, WB 的调控可能涉及多种氨基酸和代谢途径。在氨基酸调控 WB 发生的研究中, 也出现了一些不一致的结果。Meloche 等^[69]发现, 通过降低日粮中可消化赖氨酸的水平, 可以在一定程度上减少 WB 的发生, 但这可能会对肉鸡的生产性能产生负面影响。综上所述, 氨基酸在调控肉鸡 WB 发生中的作用是较为复杂的, 氨基酸的种类、比例以及代谢途径等都会影响 WB 发生。

4.2.2 维生素与微量元素

维生素和微量元素在肉鸡饲养中扮演着至关重要的角色, 它们不仅影响肉鸡生长性能和机体健康, 还与 WB 等肌变的发生有着密切的联系。研究发现, 通过补充维生素 E, 可以减轻肉鸡的氧化应激和炎症反应, 从而降低 WB 发生率和严重程度^[70-71]。维生素 E 作为一种脂溶性抗氧化剂, 能有效保护细胞膜不受自由基的损害, 减少氧化损伤。研究表明, 维生素 E 的补充可以提高肉鸡血浆中的 α -生育酚浓度, 改善肠道形态, 并通过调节与肌肉营养转运、结构和炎症相关的基因表达来减少 WB 发生^[70]。微量元素硒 (Se) 在调控肉鸡肌肉健康方面也扮演着重要作用。硒是谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成部分, 这种酶在保护细胞免受氧化损伤方面发挥着关键作用。补充有机硒源, 如锌-L-硒代蛋氨酸, 能够提高肉鸡的生长性能、改善胴体和胸肌产量, 并且可能通过提高肌肉中硒的沉积来降低 WB 发生^[71]。然而, 硒补充过量可能会加剧 WB 的严重程度。Cemin 等^[72]研究发现, 随着日粮中硒水平的提高, 肉鸡胸肌病变评分呈现二次方增加, 表明在达到最大生长性能的同时, 也可能增加了 WB 发生率和严重程度。此外, 锌、锰和铜等其他微量元素对肉鸡肌肉健康也有一定的影响。它们参与多种酶的活性中心, 影响肌肉结构蛋白的合成和代谢。研究表明, 有机微量元素 (organic trace minerals, OTM) 与无机微量元素 (inorganic trace minerals, ITM) 相比, 具有更高的生物利用率和更低的环境污染风险^[73]。尽管有机微量元素在提高肉鸡生产性能方面显示出一定的优势, 但关于它们对 WB 等肌肉病变的具体影响, 还需要进一步研究。

4.2.3 其他非营养性物质

植酸酶作为一种非营养性添加剂, 已被证明可以通过改善肌肉中的葡萄糖摄取和代谢来减少 WB 的严重程度^[74]。Kuttappan 等^[75]研究发现, 饲料中添加乙氧基喹啉 (ethoxyquin, ETX) 可以减少氧化脂肪引起的严重 WB 发生。且当 ETX 与矿物质蛋氨酸羟基

类似物螯合物 (mineral methionine hydroxy analog chelate, MMHAC) 联合使用时, 可以进一步降低肌肉脂质过氧化, 提高肌肉抗氧化状态。此外, 肌酸前体物质——胍基乙酸 (guanidinoacetate, GAA) 的添加, 也被证明可以通过提高肌肉中肌酸的水平, 改善肉质和减少 WB 发生^[76]。胍基乙酸通过促进肌肉细胞的能量供应和减少氧化应激, 有助于维持肌肉结构的完整性, 减少肌肉纤维的损伤和脂肪的异常沉积, 从而降低 WB 发生。通过合理利用非营养性物质, 可以在不牺牲肉鸡生长性能的前提下, 有效调控和减少 WB 发生, 这对于提高肉鸡产业的整体经济效益和产品质量具有重要意义。

5 小结

综上所述, 白羽肉鸡 WB 作为近年来全球范围内一类发生率高、品质特性差的异质肉, 给肉鸡屠宰和肉类加工业造成了严重的经济损失, 已成为当前肉鸡产业亟须解决的难点问题。综合分析当前研究, 我们总结了 WB 形成与遗传、体重/日龄、性别、营养水平以及饲养管理等因素之间的复杂关系, 并进一步探讨了缺氧、血管化异常、肌细胞损伤、炎症反应、肌肉再生修复与卫星细胞功能障碍、肌肉重塑等在 WB 发生发展中的潜在作用机制。此外, 本文还总结了饲养管理和营养调控技术在减少 WB 发生中的潜力, 这为研发 WB 高效控制技术提供了理论基础。后续研究应当在现有报道基础上, 加强对 WB 发生发展中涉及的关键差异基因功能和分子调控网络进行挖掘, 以期研发靶向营养调控技术或利用遗传选育来降低 WB 发生率和严重程度。

参考文献:

- [1] 潘晓娜, 张林, 李蛟龙, 等. 白纹肉与木质化鸡胸肉的研究进展 [J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55 (4): 1-6.
- [2] KUTTAPPAN V A, HARGIS B M, OWENS C M. White striping and woody breast myopathies in the modern poultry industry: a review [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (11): 2724-2733.
- [3] SIHVO H K, IMMONEN K, PUOLANNE E. Myodegeneration with fibrosis and regeneration in the pectoralis major muscle of broilers [J]. *Vet Pathol*, 2014, 51 (3): 619-623.
- [4] MUDALAL S, LORENZI M, SOGLIA F, et al. Implications of white striping and wooden breast abnormalities on quality traits of raw and marinated chicken meat [J]. *Animal*, 2015, 9 (4): 728-734.
- [5] PAPA M B, BRANNICK E M, SCHMIDT C J, et al. Gene expression profiling of the early pathogenesis of wooden breast disease in commercial broiler chickens using RNA-seq [J]. *PLoS One*, 2018, 13 (12): e0207346.

- [6] ZHAO D, SONG Z, SHEN L, et al. Single-cell transcriptomics and tissue metabolomics uncover mechanisms underlying wooden breast disease in broilers [J]. *Poult Sci*, 2024, 103 (12): 104433.
- [7] WANG Z, KHONDOWE P, BRANNICK E, et al. Spatial transcriptomics reveals alterations in perivascular macrophage lipid metabolism in the onset of Wooden Breast myopathy in broiler chickens [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 3450.
- [8] PAPAHA M B, BRANNICK E M, SCHMIDT C J, et al. Evidence and role of phlebitis and lipid infiltration in the onset and pathogenesis of Wooden Breast Disease in modern broiler chickens [J]. *Avian Pathol*, 2017, 46 (6): 623-643.
- [9] VELLEMAN S G, CLARK D L, TONNIGES J R. Fibrillar collagen organization associated with broiler wooden breast fibrotic myopathy [J]. *Avian Dis*, 2017, 61 (4): 481-490.
- [10] SOGLIA F, LAGHI L, CANONICO L, et al. Functional property issues in broiler breast meat related to emerging muscle abnormalities [J]. *Food Res Int*, 2016, 89: 1071-1076.
- [11] VELLEMAN S G, CLARK D L. Histopathologic and myogenic gene expression changes associated with wooden breast in broiler breast muscles [J]. *Avian Dis*, 2015, 59 (3): 410-418.
- [12] SOGLIA F, MUDALAL S, BABINI E, et al. Histology, composition, and quality traits of chicken *Pectoralis major* muscle affected by wooden breast abnormality [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (3): 651-659.
- [13] DALLE ZOTTE A, RICCI R, CULLERE M, et al. Research note: effect of chicken genotype and white striping - wooden breast condition on breast meat proximate composition and amino acid profile [J]. *Poult Sci*, 2020, 99 (3): 1797-1803.
- [14] XING T, LUO D, ZHAO X, et al. Enhanced cytokine expression and upregulation of inflammatory signaling pathways in broiler chickens affected by wooden breast myopathy [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101 (1): 279-286.
- [15] ESTÉVEZ M. Oxidative damage to poultry: from farm to fork [J]. *Poult Sci*, 2015, 94 (6): 1368-1378.
- [16] CAI K, SHAO W, CHEN X, et al. Meat quality traits and proteome profile of woody broiler breast (pectoralis major) meat [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (1): 337-346.
- [17] CHATTERJEE D, ZHUANG H, BOWKER B C, et al. Instrumental texture characteristics of broiler pectoralis major with the wooden breast condition 1 [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (10): 2449-2454.
- [18] XING T, ZHAO X, ZHANG L, et al. Characteristics and incidence of broiler chicken wooden breast meat under commercial conditions in China [J]. *Poult Sci*, 2020, 99 (1): 620-628.
- [19] PETRACCI M, SOGLIA F, MADRUGA M, et al. Wooden - breast, white striping, and spaghetti meat: causes, consequences and consumer perception of emerging broiler meat abnormalities [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18 (2): 565-583.
- [20] BOWKER B C, MAXWELL A D, ZHUANG H, et al. Marination and cooking performance of portioned broiler breast fillets with the wooden breast condition [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (8): 2966-2970.
- [21] AGUIRRE M E, OWENS C M, MILLER R K, et al. Descriptive sensory and instrumental texture profile analysis of woody breast in marinated chicken [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (4): 1456-1461.
- [22] ZANETTI M A, TEDESCO D C, SCHNEIDER T, et al. Economic losses associated with wooden breast and white striping in broilers [J]. *Semina: Ciênc Agrár*, 2018, 39 (2): 887-892.
- [23] TIJARE V V, YANG F L, KUTTAPPAN V A, et al. Meat quality of broiler breast fillets with white striping and woody breast muscle myopathies [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (9): 2167-2173.
- [24] 康克浪. 基于单细胞测序和多组学联合解析木质化鸡胸肉的形成机制及营养调控 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [25] DALLE ZOTTE A, TASONIERO G, PUOLANNE E, et al. Effect of “Wooden Breast” appearance on poultry meat quality, histological traits, and lesions characterization [J]. *Czech J Anim Sci*, 2017, 62 (2): 51-57.
- [26] DE CARVALHO L M, MADRUGA M S, ESTÉVEZ M, et al. Occurrence of wooden breast and white striping in Brazilian slaughtering plants and use of near - infrared spectroscopy and multivariate analysis to identify affected chicken breasts [J]. *J Food Sci*, 2020, 85 (10): 3102-3112.
- [27] CRUZ R F A, VIEIRA S L, KINDLEIN L, et al. Occurrence of white striping and wooden breast in broilers fed grower and finisher diets with increasing lysine levels [J]. *Poult Sci*, 2017, 96 (2): 501-510.
- [28] CHE S, WANG C, VARGA C, et al. Prevalence of breast muscle myopathies (spaghetti meat, woody breast, white striping) and associated risk factors in broiler chickens from Ontario Canada [J]. *PLoS One*, 2022, 17 (4): e0267019.
- [29] BAILEY R A, WATSON K A, BILGILI S F, et al. The genetic basis of pectoralis major myopathies in modern broiler chicken lines [J]. *Poult Sci*, 2015, 94 (12): 2870-2879.
- [30] EMAMBU M, HARON A, LOKSHTANOV D, et al. Effects of genetic selection for fast growth on the development of wooden breast myopathy in broilers [J]. *Br Poult Sci*, 2023, 64 (6): 773-780.
- [31] CHEN L R, SUYEMOTO M M, SARSOUR A H, et al. Temporal characterization of wooden breast myopathy (“woody breast”) severity and correlation with growth rate and lymphocytic phlebitis in three commercial broiler strains and a random-bred broiler strain [J]. *Avian Pathol*, 2019, 48 (4): 319-328.
- [32] LILBURN M S, GRIFFIN J R, WICK M. From muscle to food: oxidative challenges and developmental anomalies in poultry breast muscle [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (10): 4255-4260.
- [33] KUTTAPPAN V A, OWENS C M, COON C, et al. Incidence of broiler breast myopathies at 2 different ages and its impact on selected raw meat quality parameters [J]. *Poult Sci*, 2017, 96 (8): 3005-3009.
- [34] SIHVO H K, LINDÉN J, AIRAS N, et al. Wooden breast myodegeneration of pectoralis major muscle over the growth period in broilers [J]. *Vet Pathol*, 2017, 54 (1): 119-128.
- [35] TROCINO A, PICCIRILLO A, BIROLO M, et al. Effect of genotype, gender and feed restriction on growth, meat quality and the occurrence of white striping and wooden breast in broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2015, 94 (12): 2996-3004.
- [36] SCHEUERMANN G, BILGILI S, HESS J, et al. Breast muscle development in commercial broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2003, 82 (10): 1648-1658.
- [37] BROTHERS B, ZHUO Z, PAPAHA M B, et al. RNA-seq analysis

- reveals spatial and sex differences in pectoralis major muscle of broiler chickens contributing to difference in susceptibility to wooden breast disease [J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 764.
- [38] RADAELLI G, PICCIRILLO A, BIROLO M, et al. Effect of age on the occurrence of muscle fiber degeneration associated with myopathies in broiler chickens submitted to feed restriction [J]. *Poult Sci*, 2017, 96 (2): 309–319.
- [39] LACKNER J, HESS V, STEF L, et al. Effects of feeding different histidine to lysine ratios on performance, meat quality, and the occurrence of breast myopathies in broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2022, 101 (2): 101568.
- [40] IWASAKI T, WATANABE T, HASEGAWA Y, et al. Nutrition during the early rearing period affects the incidence of wooden breasts in broilers [J]. *J Poult Sci*, 2021, 58 (3): 177–185.
- [41] LIVINGSTON M L, LANDON C, BARNES H J, et al. White striping and wooden breast myopathies of broiler breast muscle is affected by time-limited feeding, genetic background, and egg storage [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (1): 217–226.
- [42] CUI Z, AMEVOR F K, LAN X, et al. Integrative metabolomics and transcriptomics analysis revealed specific genes and metabolites affecting meat quality of chickens under different rearing systems [J]. *Poult Sci*, 2024, 103 (9): 103994.
- [43] JOINER K S, HAMLIN G A, LIEN A R J, et al. Evaluation of capillary and myofiber density in the pectoralis major muscles of rapidly growing, high-yield broiler chickens during increased heat stress [J]. *Avian Dis*, 2014, 58 (3): 377–382.
- [44] SIHVO H K, AIRAS N, LINDÉN J, et al. Pectoral vessel density and early ultrastructural changes in broiler chicken wooden breast myopathy [J]. *J Comp Pathol*, 2018, 161: 1–10.
- [45] CLARK D L, VELLEMAN S G. Spatial influence on breast muscle morphological structure, myofiber size, and gene expression associated with the wooden breast myopathy in broilers [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (12): 2930–2945.
- [46] LAKE J A, BRANNICK E M, PAPAHA M B, et al. Blood gas disturbances and disproportionate body weight distribution in broilers with wooden breast [J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 304.
- [47] LIVINGSTON M L, FERKET P R, BRAKE J, et al. Dietary amino acids under hypoxic conditions exacerbates muscle myopathies including wooden breast and white striping [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (3): 1517–1527.
- [48] ABASHT B, PAPAHA M B, QIU J. Evidence of vascular endothelial dysfunction in Wooden Breast disorder in chickens: insights through gene expression analysis, ultra-structural evaluation and supervised machine learning methods [J]. *PLoS One*, 2021, 16 (1): e0243983.
- [49] MCGARRY T, BINIECKA M, VEALE D J, et al. Hypoxia, oxidative stress and inflammation [J]. *Free Radic Biol Med*, 2018, 125: 15–24.
- [50] PAN X, ZHANG L, XING T, et al. The impaired redox status and activated nuclear factor-erythroid 2-related factor 2/antioxidant response element pathway in wooden breast myopathy in broiler chickens [J]. *Anim Biosci*, 2021, 34 (4): 652–661.
- [51] CHAVEZ L O, LEON M, EINAV S, et al. Beyond muscle destruction: a systematic review of rhabdomyolysis for clinical practice [J]. *Crit Care*, 2016, 20 (1): 135.
- [52] XING T, GAO F, TUME R K, et al. Stress effects on meat quality: a mechanistic perspective [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18 (2): 380–401.
- [53] BORDINI M, WANG Z, SOGLIA F, et al. RNA-sequencing revisited data shed new light on wooden breast myopathy [J]. *Poult Sci*, 2024, 103 (8): 103902.
- [54] FERREIRA T Z, KINDLEIN L, FLEES J J, et al. Characterization of pectoralis major muscle satellite cell population heterogeneity, macrophage density, and collagen infiltration in broiler chickens affected by wooden breast [J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 529.
- [55] FU X, XIAO J, WEI Y, et al. Combination of inflammation-related cytokines promotes long-term muscle stem cell expansion [J]. *Cell Res*, 2015, 25 (6): 655–673.
- [56] PETRACCI M, CAVANI C. Muscle growth and poultry meat quality issues [J]. *Nutrients*, 2012, 4 (1): 1–12.
- [57] VELLEMAN S G. Recent developments in breast muscle myopathies associated with growth in poultry [J]. *Annu Rev Anim Biosci*, 2019, 7: 289–308.
- [58] WANG Y X, RUDNICKI M A. Satellite cells, the engines of muscle repair [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2011, 13 (2): 127–133.
- [59] ZAMMIT P S, PARTRIDGE T A, YABLONKA-REUVENI Z. The skeletal muscle satellite cell: the stem cell that came in from the cold [J]. *J Histochem Cytochem*, 2006, 54 (11): 1177–1191.
- [60] VON MALTZAHN J, JONES A E, PARKS R J, et al. Pax7 is critical for the normal function of satellite cells in adult skeletal muscle [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110 (41): 16474–16479.
- [61] DAUGHTRY M R, BERIO E, SHEN Z, et al. Satellite cell-mediated breast muscle regeneration decreases with broiler size [J]. *Poult Sci*, 2017, 96 (9): 3457–3464.
- [62] PAMPOUILLE E, HENNEQUET-ANTIER C, PRAUD C, et al. Differential expression and co-expression gene network analyses reveal molecular mechanisms and candidate biomarkers involved in breast muscle myopathies in chicken [J]. *Sci Rep*, 2019, 9: 14905.
- [63] MUTRYN M F, BRANNICK E M, FU W, et al. Characterization of a novel chicken muscle disorder through differential gene expression and pathway analysis using RNA-sequencing [J]. *BMC Genomics*, 2015, 16 (1): 399.
- [64] NATARAJAN A, LEMOS D R, ROSSI F M V. Fibro/adipogenic progenitors: a double-edged sword in skeletal muscle regeneration [J]. *Cell Cycle*, 2010, 9 (11): 2045–2046.
- [65] GRATTA F, BIROLO M, SACCHETTO R, et al. Effect of feed restriction timing on live performance, breast myopathy occurrence, and muscle fiber degeneration in 2 broiler chicken genetic lines [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (11): 5465–5476.
- [66] AYANSOLA H, LUO Y, WAN Y, et al. Restricted feeding regimens improve white striping associated muscular defects in broiler chickens [J]. *Anim Nutr*, 2023, 12: 128–137.
- [67] ZAMPIGA M, SOGLIA F, PETRACCI M, et al. Effect of different arginine-to-lysine ratios in broiler chicken diets on the occurrence of breast myopathies and meat quality attributes [J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (6): 2691–2697.
- [68] BOERBOOM G, VAN KEMPEN T, NAVARRO-VILLA A, et al.

Unraveling the cause of white striping in broilers using metabolomics [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (11): 3977-3986.

[69] MELOCHE K J, FANCHER B I, EMMERSON D A, et al. Effects of reduced digestible lysine density on myopathies of the Pectoralis major muscles in broiler chickens at 48 and 62 days of age 1 [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (9): 3311-3324.

[70] WANG J, CLARK D L, JACOBI S K, et al. Effect of vitamin E and alpha lipoic acid on intestinal development associated with wooden breast myopathy in broilers [J]. *Poult Sci*, 2021, 100 (3): 100952.

[71] OVIEDO-RONDÓN E O, CÓRDOVA-NOBOA H A. The potential of guanidino acetic acid to reduce the occurrence and severity of broiler muscle myopathies [J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 909.

[72] CEMIN H S, VIEIRA S L, STEFANELLO C, et al. Broiler responses to increasing selenium supplementation using Zn-L-selenomethionine with special attention to breast myopathies [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (5): 1832-1840.

[73] SIRRI F, MAIORANO G, TAVANIELLO S, et al. Effect of different levels of dietary zinc, manganese, and copper from organic or inorganic sources on performance, bacterial chondronecrosis, intramuscular collagen characteristics, and occurrence of meat quality defects of broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2016, 95 (8): 1813-1824.

[74] WALK C L, MULLENIX G J, MAYNARD C W, et al. Novel 4th-generation phytase improves broiler growth performance and reduces woody breast severity through modulation of muscle glucose uptake and metabolism [J]. *Front Physiol*, 2024, 15: 1376628.

[75] KUTTAPPAN V A, MANANGI M, BEKKER M, et al. Nutritional intervention strategies using dietary antioxidants and organic trace minerals to reduce the incidence of wooden breast and other carcass quality defects in broiler birds [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 663409.

[76] DAYAN J, UNI Z, SOGLIA F, et al. Dietary guanidinoacetate reduces spaghetti meat myopathy risk in the breast muscle of broiler chickens [J]. *animal*, 2024, 18 (5): 101144.

• 信息 •

《畜牧与兽医》入选《2024 中国农林核心期刊目录》A 类期刊

2024 年，“中国农林核心期刊”评价遴选持续以期刊发展核心指标的定量评价与学科专家定性评价为综合评价依据。在此基础上对我国 853 种中、英文农林领域期刊进行了全面梳理和科学分类评价，共遴选出中文期刊 280 种、英文期刊 34 种，共计 13 类 314 种，其中 A 类 247 种，B 类 67 种。《畜牧与兽医》入选《2024 中国农林核心期刊目录》A 类期刊。

