

田茂杰, 马金帅, 魏翔宇, 等. 抗氧化剂在生猪生产上的应用研究进展[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(5): 1064-1072.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.019

抗氧化剂在生猪生产上的应用研究进展

田茂杰¹, 马金帅², 魏翔宇¹, 杨红文³, 张依裕¹, 肖礼华⁴

(1. 贵州大学动物科学学院高原山地动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室/贵州大学香猪研究所, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵阳市黔灵山公园管理处, 贵州 贵阳 550003; 3. 贵州省畜禽遗传资源管理站, 贵州 贵阳 550001; 4. 遵义市畜牧渔业站, 贵州 遵义 563000)

摘要: 集约化生猪养殖过程中, 生猪易受环境、营养、生理及病理等多种应激因子的共同作用, 导致机体氧化还原稳态失衡, 诱发氧化应激, 进而降低生产效益。抗氧化剂作为一种新型饲料添加剂, 具备清除自由基、抑制脂质过氧化、维持细胞氧化还原稳态等生物学活性, 能够缓解氧化应激引起的机体损伤, 提升生猪的抗氧化能力和整体健康水平, 从而有效改善生产性能, 减少经济损失。本文系统阐述了抗氧化剂的分类与作用机制, 综述了其在生猪生产中的应用研究进展, 以期期为抗氧化剂在生猪绿色健康养殖中的进一步发展提供理论依据。

关键词: 抗氧化剂; 氧化应激; 生猪; 生产性能

中图分类号: S828 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)05-1064-09

Research progress on the application of antioxidants in pig production

TIAN Maojie¹, MA Jinshuai², WEI Xiangyu¹, YANG Hongwen³, ZHANG Yiyu¹, XIAO Lihua⁴

(1. Key Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction in the Plateau Mountainous Region of Ministry of Education, College of Animal Science, Guizhou University/Xiang Pig Research Institute, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Management Office of Qianlingshan Park, Guiyang 550003, China; 3. Guizhou Provincial Livestock and Poultry Genetic Resources Management Station, Guiyang 550001, China; 4. Zunyi Animal Husbandry and Fishery Station, Zunyi 563000, China)

Abstract: In intensive pig breeding, pigs are susceptible to the combined effects of multiple stressors including environmental, nutritional, physiological and pathological factors, which disrupt the body's redox homeostasis, induce oxidative stress, and consequently reduce production efficiency. As a new type of feed additive, antioxidants possess biological activities such as scavenging free radicals, inhibiting lipid peroxidation and maintaining cellular redox homeostasis. They can alleviate body damage caused by oxidative stress, improve the antioxidant capacity and overall health status of pigs, and thereby effectively enhance production performance and reduce economic losses. This paper systematically expounds the classification and action mechanisms of antioxidants, and reviews the research progress of their application in pig production, aiming to provide a theoretical basis for the further development and application of antioxidants in green and healthy pig farming.

Key words: antioxidant; oxidative stress; pigs; production performance

收稿日期: 2026-02-02

基金项目: 贵州省生猪产业科技创新项目[黔农计财(2025)9号];

贵州省生猪产业技术体系健康养殖功能实验室和遵义综合试验站建设项目(GZSZCYJSTX-03、GZSZCYJSTX-07)

作者简介: 田茂杰(2001-), 男, 贵州德江人, 硕士研究生, 主要从事单胃动物肠道营养调控研究。(E-mail) 1206997073@qq.com

通讯作者: 张依裕, (E-mail) 27292665@qq.com

随着中国经济的持续发展和人民生活水平的提高, 消费者对畜禽产品的需求不断增长, 推动了畜禽养殖业向规模化、集约化和高效化方向快速发展。在养殖过程中, 生猪受到环境、营养、生理及病理等

多种应激因子的刺激时,体内活性氧(ROS)和活性氮(RNS)累积过量,超出抗氧化防御系统的清除能力,进而诱发氧化应激^[1]。氧化应激不仅会降低生猪的生产性能和抗病力,诱发多种疾病,严重时可导致其死亡,还会对猪肉品质产生不利影响,表现为肉色和口感变差、水分含量下降、营养成分流失等,最终影响生猪产品的市场价值和经济效益^[2]。抗氧化剂是一类能够抑制或延缓氧化反应的化学物质,通过清除体内过多的ROS和RNS,阻断自由基链式反应,维持细胞内的氧化还原平衡,从而减轻氧化应激对生猪造成的损害。在现代养殖模式下,动物常处于高密度、高应激的生产环境中,其内源性抗氧化系统容易处于超负荷状态,难以完全抵御氧化损伤。因此,通过饲料补充外源性抗氧化剂,已成为缓解氧化应激、维持动物健康、提高生产性能的重要手段^[3-4]。

本文系统阐述了不同类型抗氧化剂的作用机制及其在生猪生产中的应用现状,以期对生猪养殖中抗氧化剂的应用提供理论依据。

1 抗氧化剂的分类

1.1 天然抗氧化剂

天然抗氧化剂是指动物机体能够自身合成,或从天然产物中获取的具有抗氧化活性的物质。这类物质安全性高、易于代谢,并兼具营养调节和免疫调节功能。根据来源不同,天然抗氧化剂可分为内源性抗氧化剂和外源性抗氧化剂^[5]。内源性抗氧化剂是动物机体在代谢过程中自身合成的物质,主要由酶类和非酶类两部分构成,共同组成机体的内源性抗氧化防御系统,是抵御氧化应激的第一道防线。其中,酶类抗氧化剂包括超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶(GR)等;非酶类抗氧化剂包括谷胱甘肽(GSH)、铁蛋白(Ferritin)等^[6]。外源性抗氧化剂是指动物自身无法合成、必须通过摄入饲料才能获得的物质,外源性抗氧化剂主要分为维生素类、微量元素类、类胡萝卜素、多酚类等。

1.2 合成抗氧化剂

合成抗氧化剂是指通过化学合成方法制备、能够有效抑制氧化反应的化合物,具有抗氧化效率高、化学性质稳定、成本较低以及易于规模化生产等优点。其中,酚类化合物是畜牧业应用最广泛的合成

抗氧化剂,主要包括丁基羟基茴香醚(BHA)、二丁基羟基甲苯(BHT)、没食子酸丙酯(PG)和乙氧喹(EQ)等。这些化合物主要通过酚羟基提供氢原子以中断自由基链式反应,或通过螯合具有促氧化作用的金属离子发挥作用,从而高效阻断脂质氧化^[7]。然而,随着食品安全监管的加强,部分合成抗氧化剂在动物生产中的使用逐渐受到限制。目前,许多合成抗氧化剂已在部分国家和地区被禁用。在此背景下,安全性更高、利用效率更好的新型抗氧化剂逐渐成为研究热点。

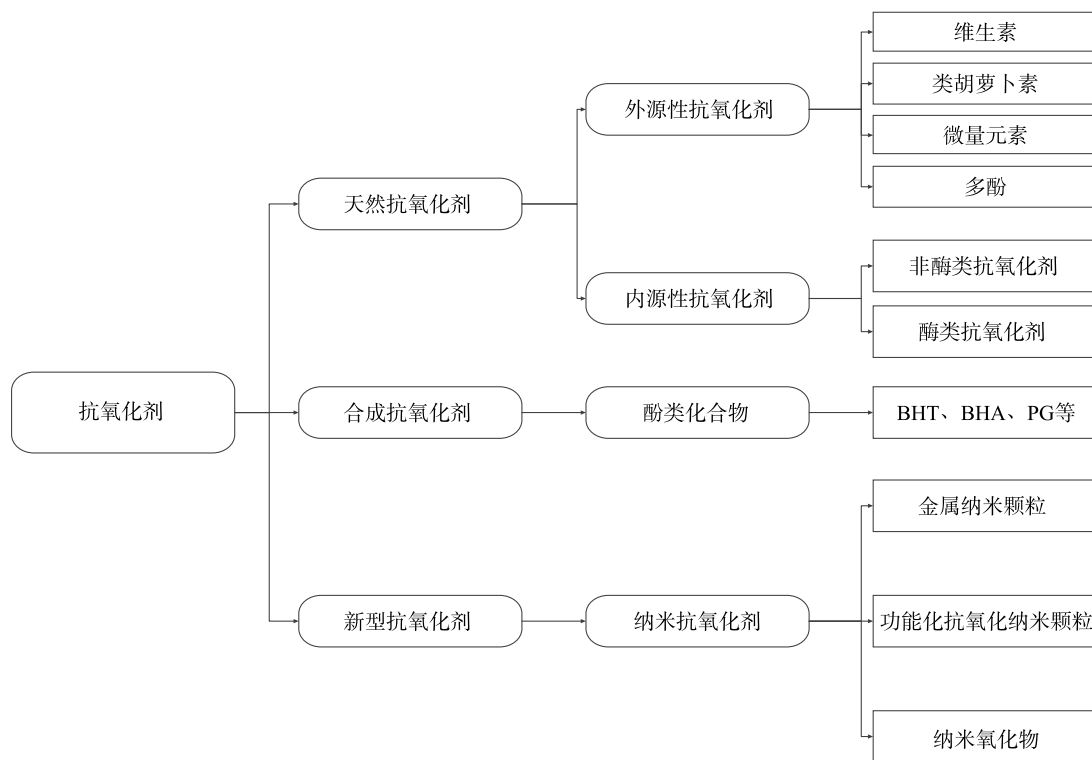
1.3 新型抗氧化剂

新型抗氧化剂是指借助纳米技术、微胶囊技术、生物发酵或复合配伍等现代手段开发的一类抗氧化物质,具有生物利用率高、靶向性强、剂量低、效率高以及环境友好等特点^[8]。纳米抗氧化剂包括纳米硒、纳米锌、纳米维生素E以及纳米化植物提取物等。其中,纳米硒和纳米锌是畜牧业中最受关注的纳米抗氧化剂。与传统无机或有机形式的硒、锌相比,纳米硒和纳米锌粒径更小、比表面积更大,能够更高效地穿越生物膜,提高机体对硒和锌的吸收效率,增强抗氧化酶活性,同时降低高剂量矿物质带来的毒性风险^[9]。尽管新型抗氧化剂在动物生产中展现出良好的应用前景,但目前仍处于研究阶段,其安全性、适宜剂量、长期使用效果以及生产成本仍有待进一步评估。抗氧化剂分类如图1所示。

2 抗氧化剂的作用机制

2.1 阻断自由基链式反应

抗氧化剂的作用方式是阻断自由基链式反应,具体可分为化学性阻断与物理性阻断两类。在化学性阻断方面,酚类抗氧化剂等分子通常含有活泼的羟基(-OH),可作为还原剂提供氢原子或电子,与氧化性自由基结合,从而阻断自由基的连锁反应($ROO \cdot + AH \rightarrow ROOH + A \cdot$)。此外,槲皮素、柠檬酸和乙二胺四乙酸(EDTA)等物质能够通过配位键,与具有促氧化作用的金属离子形成稳定的五元环或六元环螯合物。这种螯合作用占据了金属离子的配位点,改变其氧化还原电位,从而阻止芬顿反应($Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + \cdot OH + OH^-$)的发生^[10]。在物理性阻断方面,类胡萝卜素、生育酚与胆红素等抗氧化剂通过物理淬灭机制,吸收激发态的单线态氧(1O_2)的能量,使其转化为基态氧。在此过程中,抗



BHT:二丁基基甲苯;BHA:丁基基茴香醚;PG:没食子酸丙酯。

图 1 抗氧化剂类别

Fig.1 Categories of antioxidants

氧化剂自身从基态跃迁至激发态,随后通过转动、振动弛豫等方式将多余能量以热能等形式耗散,自身恢复基态,从而可再次参与反应^[11]。

除化学性阻断与物理性阻断外,抗氧化剂还可通过以下机制抑制链式氧化过程。当自由基浓度较高时,2个自由基可直接结合生成稳定的非自由基产物,从而终止链反应,如2个脂过氧自由基结合生成过氧化物并释放氧气($ROO\cdot + ROO\cdot \rightarrow ROOR + O_2$)^[12]。在链式反应的传播阶段,脂质自由基($L\cdot$)与氧分子结合生成脂过氧自由基($LOO\cdot$), $LOO\cdot$ 继续攻击邻近的脂质分子,产生新的自由基,使氧化反应不断扩散。抗氧化剂通过向 $LOO\cdot$ 提供氢原子,生成稳定的脂过氧化物($LOOH$)和稳定的抗氧化剂自由基($A\cdot$),从而切断传播路径^[13]。具体过程如图2所示。

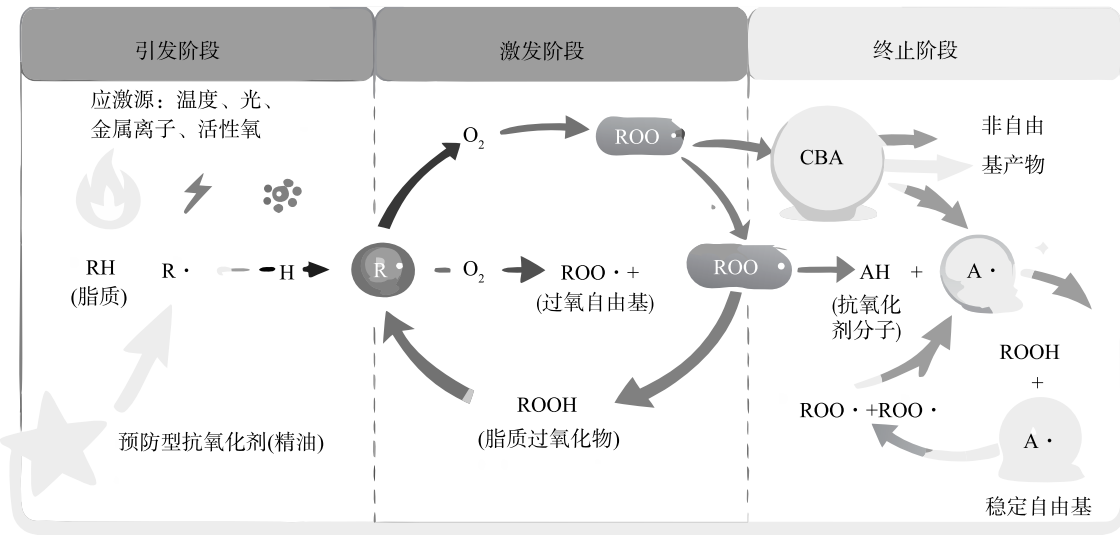
2.2 增强抗氧化酶活性

许多天然抗氧化物质能够通过调节机体或细胞内抗氧化酶系统的表达或活性,从而强化内源性的抗氧化防御能力。多糖类、多酚类和微量元素等能显著提高动物机体血清及组织中 *SOD*、*GSH-Px*、*CAT*

等抗氧化酶活性,加速 ROS 的代谢与清除,并降低脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量^[14]。天然抗氧化化合物如多酚类、白藜芦醇、类胡萝卜素以及大豆肽等不仅能够直接清除自由基,还可通过调节细胞内信号传导通路促进抗氧化酶基因的表达,加速 ROS 的清除,减少氧化损伤^[15]。此外,微量元素硒作为 *GSH-Px* 等含硒抗氧化酶的组成部分,可显著增强抗氧化酶系统的功能,在动物或细胞体系中补充适量硒能够提高 *GSH-Px*、*SOD* 和 *CAT* 等抗氧化酶的活性^[16]。外源抗氧化剂增强氧化酶活性机制如图3所示。

2.3 分子信号通路调控

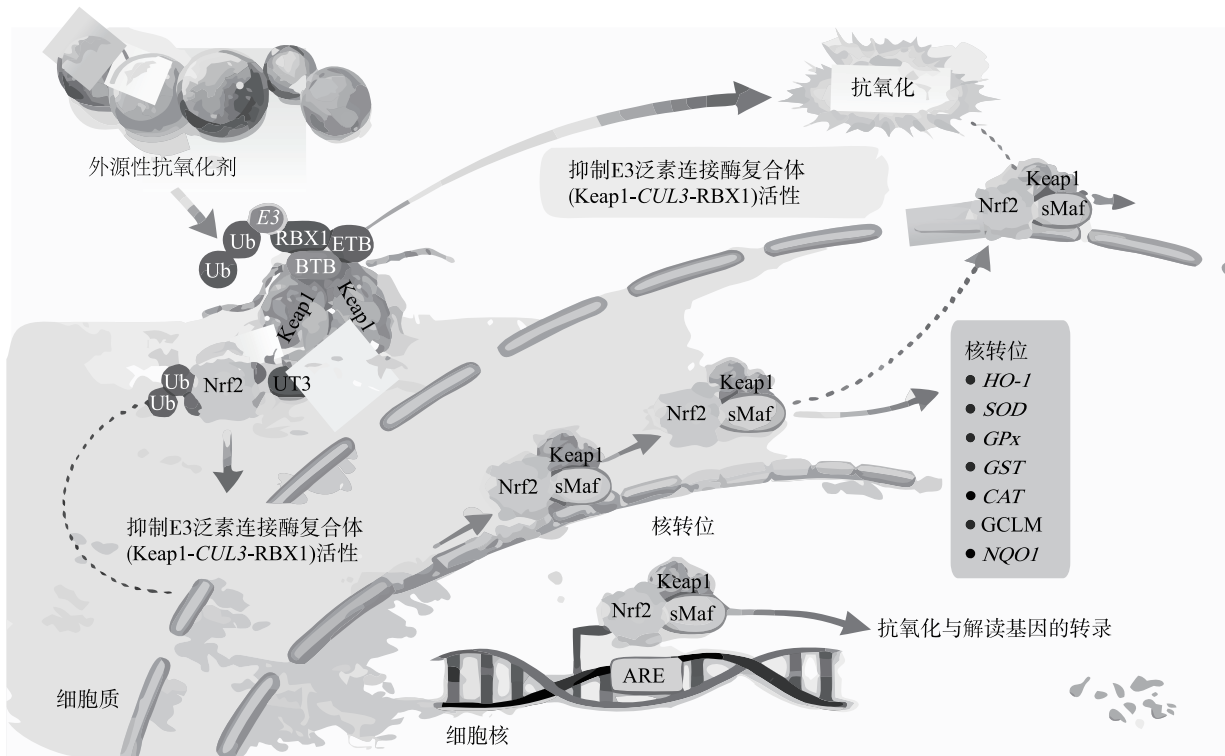
在生理稳态条件下,核转录因子 Nrf2 与 Keap1 形成复合物,Keap1 作为底物识别亚基,将 Nrf2 招募至 E3 泛素连接酶复合体,促进 Nrf2 的泛素化降解,使其在细胞质内保持较低水平。当机体受到氧化胁迫或外源性抗氧化剂刺激时,Keap1 中的半胱氨酸残基发生氧化或共价修饰,导致其构象改变并与 Nrf2 解偶联,游离的 Nrf2 迁移至细胞核,与小 Maf 蛋白形成二聚体,识别并结合抗氧化反应元件



CBA:断链型抗氧化剂。

图2 抗氧化剂阻断自由基链式反应机制

Fig.2 Mechanism of antioxidants blocking free radical chain reaction



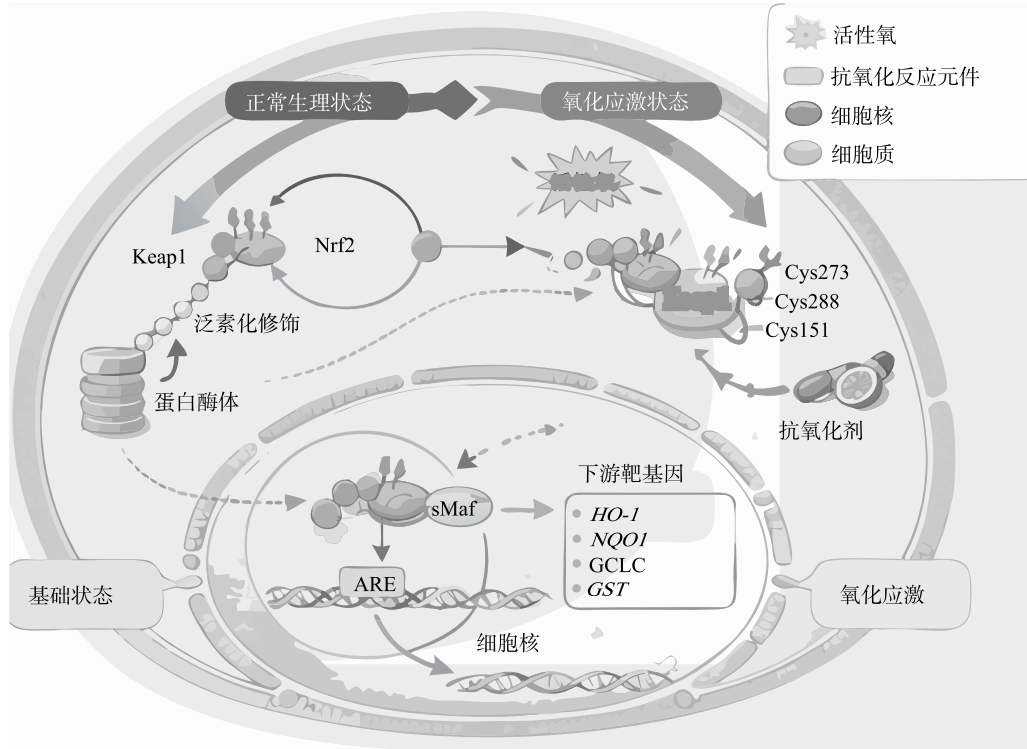
Nrf2:核因子 E2 相关因子 2;Keap1:Kelch 样 ECH 相关蛋白 1;sMaf:小 Maf 蛋白;ARE:抗氧化反应元件;RBX1:RING 盒蛋白 1;BTB:BTB 结构域;CUL3:泛素连接酶 Cullin3;ETB:ETB 结构域;Ub:泛素;UT3:泛素结合位点;HO-1:血红素氧合酶-1;SOD:超氧化物歧化酶;GPx:谷胱甘肽过氧化物酶;GST:谷胱甘肽过氧化物酶;CAT:过氧化氢酶;GCLM:谷氨酸-半胱氨酸连接酶修饰亚基;NQO1:还原型辅酶醌脱氢酶 1。

图3 抗氧化剂增强抗氧化酶活性机制

Fig.3 Mechanism of antioxidants enhancing antioxidant enzyme activity

(ARE),启动抗氧化和解毒基因的转录,从而从基因水平增强细胞对氧化性损伤的防御能力^[17]。Nrf2-Keap1-ARE 信号通路不仅响应氧化应激的动态变化,还受多种信号分子调控,如蛋白激酶 PKC、PI3K、AMPK 等可促进 Nrf2 磷酸化,增强其稳定性

及核转位效率。同时,Keap1 的半胱氨酸残基是多个亲电化合物和天然抗氧化剂的作用靶点,通过特异性修饰这些残基可促进 Nrf2 释放和 ARE 介导的转录激活,从而实现长效抗氧化^[18]。抗氧化剂调控 Nrf2-Keap1-ARE 信号通路机制如图 4 所示。



Keap1: Kelch 样 ECH 相关蛋白; Nrf2: 核因子 E2 相关因子 2; sMaf: 小 Maf 蛋白; ARE: 抗氧化反应元件; HO-1: 血红素氧合酶-1; NQO1: 还原型辅酶醌脱氢酶 1; GCLC: 谷氨酸-半胱氨酸连接酶催化亚基; GST: 谷胱甘肽过氧化物酶。

图 4 抗氧化剂调控 Nrf2-Keap1-ARE 信号通路机制

Fig.4 Mechanism of antioxidants regulating Nrf2-Keap1-ARE signaling pathway

3 抗氧化剂在生猪生产上的应用

3.1 抗氧化剂在哺乳仔猪中的应用

新生仔猪是生猪养殖中发病率和死亡率最高的群体,也是机体免疫系统与抗氧化能力最为薄弱的阶段。在妊娠及哺乳期母猪饲料中添加中草药,其活性成分可调节母猪激素水平、清除自由基并提升抗氧化酶活性,从而增强母猪的抗氧化及免疫功能。这些活性成分经胎盘或乳汁传递至仔猪,进而提高仔猪免疫细胞活性、促进免疫蛋白合成并增强抗氧化酶活性^[19-20]。此外,饲喂益生菌可改善母猪生理状态、降低氧化应激和炎症反应,促进仔猪肠道微生物正向发育和营养吸收能力,进而增强其免疫和抗

氧化能力^[21-22]。此外,直接给哺乳仔猪饲喂植物多糖与植物提取物等抗氧化剂,可通过刺激免疫系统、改善能量代谢,发挥抗氧化、抗炎和抗菌作用,提升抗病能力、降低死亡率,并促进仔猪皮毛发育和整体健康水平^[23-24]。

3.2 抗氧化剂在断奶仔猪中的应用

断奶是仔猪面临的最严峻的综合应激,涉及营养(母乳转固体饲料)、心理(母子分离)、环境(温湿度)及免疫的多重剧变,可能引发严重的肠道氧化损伤,表现为绒毛萎缩、紧密连接蛋白减少、屏障功能受损,进而导致仔猪采食量骤降、腹泻率高及生长缓慢,甚至死亡^[25-26]。因此,在日粮中添加外源性抗氧化剂已成为缓解断奶应激的核心措施。天然植

物提取物具有多种生物活性,将其添加到日粮,能够提高断奶仔猪的生长性能、免疫功能及抗氧化能力。具体为,通过提高采食量、降低料重比、促进肠道发育、促进消化酶分泌及营养物质的消化吸收,从而提高仔猪的生长性能;通过提高免疫球蛋白与抗炎因子的含量,增强仔猪的免疫功能;通过提高血清中 *SOD*、*GSH-Px*、*CAT* 等抗氧化酶含量并激活 *NRF-2* 通路,提升仔猪抗氧化能力^[27-29]。在断奶仔猪日粮中添加螯合态微量元素,可提升抗氧化酶活性、降低 *MDA* 和促炎症因子的含量,从而增强断奶仔猪的抗氧化与抗炎能力^[30]。此外,补充维生素 A 和维生素 D 可改善断奶仔猪肠道屏障功能、生长性能及抗氧化能力^[31-33]。

3.3 抗氧化剂在种公猪中的应用

种公猪作为种猪群体中的关键组成部分,其精液质量与性功能稳定性、健康状况及营养水平对猪群繁殖效率具有决定性影响。在猪精液稀释液中添加抗氧化酶、维生素、氨基酸、植物提取物等抗氧化剂,能够有效清除 ROS、增强内源性抗氧化防御系统、保护生物膜结构、维持线粒体正常功能与减少 DNA 损伤^[34]。王琳琳等^[35]发现,甲磺酸水托醌(*MitoQ*)能穿过质膜在线粒体内部直接清除自由基,在猪精液稀释液中添加 50 $\mu\text{mol/L}$ 甲磺酸水托醌能够局部高效降低氧化损伤,进而保护线粒体结构和功能。维甲酸(*RA*)能通过提高 *SOD* 活性和降低 *MDA* 含量增强精子抗氧化能力,在猪精液中添加该物质可缓解热应激导致的精子氧化损伤及活力下降^[36]。陈志英等^[37]研究发现,冷冻前,在猪精液中添加 0.10 mmol/L 他克林(*Tacrine*)能够提高抗氧化能力、*SOD* 活性、糖激酶(*HK*)活性、维持丙酮酸(*PA*)与总胆固醇(*TC*)水平,从而改善解冻后精子的质量。肉碱(*Carnitine*)能够调节抗氧化酶基因和凋亡相关基因的表达、维持精子质膜完整性、促进线粒体提供能量,猪精液中添加肉碱能显著提高猪冷冻精液的质量、抗氧化能力与抗凋亡能力^[38]。冯妮等^[39]的研究结果表明,枸杞多糖(*LBP*)通过调节 *SOD1* mRNA 和 *Caspase8* mRNA 的表达提高获能精子的 *SOD* 活性和抗氧化能力,减少精子损伤。

3.4 抗氧化剂在能繁母猪中的应用

能繁母猪的繁殖性能直接影响到猪场的生产效益与经济效益。氧化应激会导致母猪体内自由基积累,损伤细胞结构和功能,进而干扰卵泡发育、胚胎

着床及胎儿发育等关键环节。在妊娠过程中,繁殖母猪体内代谢波动大,容易出现代谢紊乱;尤其是在妊娠后期,胎儿快速生长发育,导致母体代谢负担加重,引发胚胎存活率降低、产仔数下降、泌乳量不足及断奶后发情延迟等问题^[40]。在产前母猪日粮中添加 100 mg/kg 茯苓多糖,能激活免疫细胞,促进免疫球蛋白 A (*IgA*) 和免疫球蛋白 M (*IgM*) 分泌、同时提高 *SOD*、*CAT* 活性,增强自身抗氧化能力^[41]。酿酒酵母发酵产物可激活抗氧化酶系统以缓解母猪氧化应激,同时维持能量代谢和蛋白质合成,并降低初乳和常乳中 *MDA* 含量,提升乳汁品质,从而更好地支持仔猪健康生长^[42]。在围产期母猪饲料中补充丝氨酸,能促进谷胱甘肽的合成,调节谷胱甘肽过氧化物酶活性,并促进 *GCLM* 和 *GPx4* 等基因的 mRNA 表达,降低 *MDA* 含量,从而提高母猪抗氧化能力,并通过乳汁将抗氧化能力传递给仔猪^[43]。象草(*Napier grass*)富含膳食纤维,在妊娠晚期母猪饲料中添加象草,可显著提高母猪的抗氧化能力、免疫功能以及有益肠道菌群丰度^[44-45]。

3.5 抗氧化剂在育肥猪中的应用

育肥阶段是生猪体重增长的关键时期,高温应激、高密度养殖等因素易引发氧化应激,严重损害生猪的生长性能、肠道健康、生理状态和肠道菌群平衡,同时还会影响肉品的色泽、嫩度、风味和营养价值等^[46-47]。在育肥猪饲料中添加角鲨烯能直接中和自由基、激活 *Nrf2-Keap1* 信号通路,促进抗氧化酶的合成,进而提高生长性能与抗氧化能力^[48]。银杏叶具有广泛的生物学活性,给育肥猪日粮中添加银杏叶,可促进抗氧化酶基因表达以保护不饱和脂肪酸,从而改善脂肪沉积、调节脂肪酸组成,并增强肌肉抗氧化能力^[49]。在饲料中添加栀子粉,能够减少 ROS 的生成,激活 *PI3K/Akt/Nrf2-ARE* 通路,从而显著提高育肥猪的生长性能并改善其肉品质^[50]。甜菊残渣提取物、发酵松针与大蒜粉等天然抗氧化剂可增强血清抗氧化酶活性、激活抗氧化信号通路,作为饲料添加剂可显著改善生猪的生产性能,提高其抗氧化能力,且对育肥猪的肠道健康及肉品质无负面影响^[51-52]。在育肥猪基础日粮中添加 30 mg/kg 壳寡糖(*COS*),可显著降低料重比,提高饲料转化率,增加背最长肌中肌苷酸和鲜味氨基酸含量,改善肉品质^[53]。此外,*COS* 能显著增强血清抗氧化能力,并改善肠道黏膜形态,从而提升猪整体健康水

平和生产效益。日粮中添加 30~60 mg/kg 葡萄籽原花青素(GSP)可增强抗氧化能力、调节脂质代谢与糖代谢,进而提高育肥猪的生长效率、屠宰性能及肉质^[54]。在日粮中添加 0.2% 无毒硫(NTS)能改善育肥猪生长性能,提高育肥猪抗氧化性及其毛发中蛋氨酸含量^[55]。

合成抗氧化剂作为饲料添加剂同样展现出一定的应用效果。在育肥猪饲料中添加羟基硒代蛋氨酸与三丁酸甘油酯,可提升生猪的生长性能及抗氧化能力,减轻氧化应激对其生长和健康的不利影响^[56-57]。Xiong 等^[58]发现,以 30%~60% 的氨基酸螯合有机微量矿物质替代全量无机微量矿物质,能有

效提升生猪抗氧化能力、改善养分消化率,并显著降低矿物质的排放量。Chen 等^[59]的研究结果表明,在玉米-豆粕型日粮中,补充 20%~40% 的蛋氨酸螯合类似物螯合微量矿物质,可有效提升生猪机体抗氧化防御能力和免疫功能,并显著降低粪便中微量矿物质的排放量。Xu 等^[60]研究发现,在育肥猪日粮中以 70% 的有机微量元素替代全部无机微量元素,可改善肉质、增强免疫功能、降低粪便中微量元素排放量、改善肠道菌群,且对育肥猪的生长性能无负面影响。生猪各生长阶段的常用抗氧化剂如表 1 所示。

表 1 适用于生猪生长各阶段的抗氧化剂

Table 1 Antioxidants suitable for various growth stages of pigs

生长阶段	适用抗氧化剂	主要功能	作用机制	参考文献
哺乳期仔猪	中草药活性成分及提取物、益生菌、维生素 E、硒	提高免疫与抗氧化能力,降低腹泻和死亡率,促进早期生长发育	清除自由基,提高 SOD、GSH-Px、CAT 活性;促进免疫细胞活性和免疫蛋白合成;通过母体胎盘和乳汁向仔猪传递抗氧化保护;调节肠道菌群	[19]~[25]
断奶期仔猪	植物提取物、茶多酚、螯合态微量元素、维生素 C、维生素 E、谷胱甘肽前体	缓解断奶应激,改善肠道健康,提高生长性能和抗病性	激活 Nrf2-ARE 信号通路,提高抗氧化酶活性;抑制丙二醛生成;改善肠绒毛结构与紧密连接蛋白;调节炎症因子表达与免疫球蛋白分泌	[26]~[33]
种公猪	甲酸磺酸水托醌、维甲酸、肉碱、他克林、枸杞多糖、维生素 E、硒、锌	提高精液品质,增强精子抗氧化能力和存活率	清除 ROS;保护线粒体功能;提高 SOD 活性和抗氧化能力;调控抗凋亡与能量代谢相关基因的表达;减少 DNA 与膜脂氧化损伤	[34]~[39]
能繁母猪	茯苓多糖、酿酒酵母发酵产物、丝氨酸、象草提取物、维生素 E、硒	改善繁殖性能,提高乳液品质,增强母猪和仔猪抗氧化能力与免疫水平	激活抗氧化酶系统;促进谷胱甘肽合成;降低丙二醛含量;增强免疫细胞活性;通过乳汁向仔猪传递抗氧化保护	[40]~[45]
育肥猪	角鲨烯、银杏叶提取物、栀子粉、葡萄籽原花青素、壳寡糖、有机微量元素、维生素 E、合成抗氧化剂	提高生长性能与饲料转化率,增强抗氧化能力,改善猪肉品质	清除自由基并激活 Nrf2-Keap1 通路;促进抗氧化酶基因表达;抑制脂质过氧化;调节肠道菌群与能量代谢;提高肌肉和脂肪的抗氧化能力	[46]~[60]

SOD:超氧化物歧化酶;GSH-Px:谷胱甘肽过氧化物酶;CAT:过氧化氢酶;ROS:活性氧。

4 小结与展望

随着生猪养殖集约化程度的不断提高,生猪健康与生产性能的调控面临日益复杂的挑战。氧化应激作为影响生猪繁殖、生长及肉品质度的关键因素,其有效防控已成为行业关注的重点。抗氧化剂在缓解生猪氧化损伤、改善生产性能方面展现出显著潜力,可应用于生猪生长的各个阶段,以解决氧化应激引发的各类健康及生产问题,进而提高生猪的生产性能与经济效益。因此,未来关于抗氧化剂在生猪生产中应用的研究,应立足于不同生理阶段实施精准化、系统化的营养调控,同时关注抗氧化剂的剂量

控制与残留风险,以保障猪肉安全与品质。

参考文献:

- [1] KIRAN T R, OTLU O, KARABULUT A B. Oxidative stress and antioxidants in health and disease[J]. Journal of Laboratory Medicine, 2023, 47(1): 1-11.
- [2] OKE O E, AKOSILE O A, ONI A I, et al. Oxidative stress in poultry production[J]. Poultry Science, 2024, 103(9): 104003.
- [3] LIU Z H, LI N, ZHENG Z, et al. Influence of *Lonicera japonica* and *Radix Puerariae* crude extracts on the growth performance, antioxidant capacity, and immunological functions of finishing pigs[J]. Livestock Science, 2022, 12(16): 2109.
- [4] 梁姝婕,江云飞,左建军,等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇对畜禽的氧化损伤及外源抗氧化剂的保护作用[J]. 动物营养学报, 2024,

- 36(12):7513-7521.
- [5] ARSLAN N P, DAWAR P, ALBAYRAK S, et al. Fungi-derived natural antioxidants[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2025, 65(9):1593-1616.
- [6] JOMOVA K, ALOMAR S Y, ALWASEL S H, et al. Several lines of antioxidant defense against oxidative stress; antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants[J]. *Archives of Toxicology*, 2024, 98(5):1323-1367.
- [7] GAO X Y, XIAO Y, LI W, et al. Synergistic effects of antioxidant blends; a comparative study on oxidative stability of lipids in feed matrices[J]. *Antioxidants*, 2025, 14(8):981.
- [8] XUE Y, WANG T, LIU J P, et al. Recent trends in the development and application of nano-antioxidants for skin-related disease[J]. *Antioxidants*, 2024, 14(1):27.
- [9] KIM T, KIM M, LEE J, et al. Supplementation of nano-zinc in lower doses as an alternative to pharmacological doses of ZnO in weanling pigs[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2022, 64(1):70-83.
- [10] IDDRISU L, DANSO F, CHEONG K L, et al. Polysaccharides as protective agents against heavy metal toxicity[J]. *Foods*, 2024, 13(6):853.
- [11] KRUK J, SZYMANSKA R. Singlet oxygen oxidation products of carotenoids, fatty acids and phenolic prenyllipids[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2021, 216:112148.
- [12] KHAIRULLINA V, SAFAROVA I, SHARIPOVA G, et al. QSAR assessing the efficiency of antioxidants in the termination of radical-chain oxidation processes of organic compounds[J]. *Molecules*, 2021, 26(2):421.
- [13] VALGIMIGLI L. Lipid peroxidation and antioxidant protection[J]. *Biomolecules*, 2023, 13(9):1291.
- [14] 董笑言, 冉祥森, 高见红, 等. 植物源天然抗氧化剂缓解家畜早期胚胎氧化应激的作用机制与应用研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2025, 61(12):54-61.
- [15] GALANO A. Antioxidant activity at the molecular level: exploring ways of action and computational tools to investigate them[J]. *Chemical Science*, 2025, 16(42):19570-19593.
- [16] ELGENDEY F, AL WAKEEL R A, HEMEDA S A, et al. Selenium and/or vitamin E upregulate the antioxidant gene expression and parameters in broilers[J]. *BMC Veterinary Research*, 2022, 18(1):310.
- [17] ULASOV A V, ROSENKRANZ A A, GEORGIEV G P, et al. Nrf2/Keap1/ARE signaling: towards specific regulation[J]. *Life Sciences*, 2022, 291:120111.
- [18] BAIRD L, YAMAMOTO M. The molecular mechanisms regulating the KEAP1-NRF2 pathway[J]. *Molecular and Cellular Biology*, 2020, 40(13):e00099-20.
- [19] 彭雄, 李想, 伍蓉蓉, 等. 复方刺五加散对母猪和哺乳仔猪血清生化、抗氧化和免疫指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(5):2911-2923.
- [20] HE Z Z, LI C Y, XIAO X, et al. Effects of extracts of *Scutellaria baicalensis* and *Lonicerae flos* on reproductive performance, milk quality and serum indexes in sows and growth performance in suckling piglets[J]. *Livestock Science*, 2023, 275:105295.
- [21] MA C, AZAD M A K, TANG W, et al. Maternal probiotics supplementation improves immune and antioxidant function in suckling piglets via modifying gut microbiota[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 133(2):515-528.
- [22] JIANG Z P, SU W F, LI W T, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* 40 regulates piglet performance, antioxidant capacity, immune status and gut microbiota[J]. *Animal Nutrition*, 2022, 12:116-127.
- [23] WANG K L, ZHANG H R, HAN Q J, et al. Effects of astragalus and ginseng polysaccharides on growth performance, immune function and intestinal barrier in weaned piglets challenged with lipopolysaccharide[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2020, 104(4):1096-1105.
- [24] 张才, 陈文彬, 邵琦, 等. 甘草多糖对哺乳仔猪健康状况和血清抗氧化能力的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2):10-16.
- [25] LAURIDSEN C, SCHÖNHERZ A A, HØJSGAARD S. Effect of maternal dietary redox levels on antioxidative status and immunity of the suckling off-spring[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(3):478.
- [26] 魏盼琪, 陈良清, 冯卫东, 等. 断奶应激对仔猪健康的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2025(8):28-32.
- [27] 李燕, 肖杰, 王艳丰, 等. 黄芪多糖对仔猪生长性能、免疫调节和抗氧化指标的影响[J]. *中国饲料*, 2025, (12):17-20.
- [28] 赵宇琼. 菊芋多糖对仔猪生长性能、血清及肠道抗氧化指标的影响[J]. *中国饲料*, 2025(14):69-72.
- [29] 张琼, 白杨, 孙超, 等. 辣椒碱对断奶仔猪生长性能、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. *饲料工业*, 2025, 46(17):37-41.
- [30] 方晶子, 邹昆富, 陈娟, 等. 羧基蛋氨酸铁对断奶仔猪生长性能、铁吸收代谢、抗氧化功能和炎症因子的影响[J]. *饲料研究*, 2025, 48(15):140-144.
- [31] WU S N, WANG L, CUI B L, et al. Effects of vitamin A on growth performance, antioxidants, gut inflammation, and microbes in weaned piglets[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(12):2049.
- [32] O' DOHERTY J, DOWLEY A, CONWAY E, et al. Nutritional strategies to mitigate post-weaning challenges in pigs; a focus on glucans, vitamin D, and selenium[J]. *Animals*, 2023, 14(1):13.
- [33] CHEN J, HUANG Z Y, CAO X H, et al. Plant-derived polyphenols as Nrf2 activators to counteract oxidative stress and intestinal toxicity induced by deoxynivalenol in swine; an emerging research direction[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(12):2379.
- [34] 章利丰, 孙倩, 陈志荣, 等. 猪精液常温保存的影响因素及抗氧化剂的应用[J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(8):7-12.
- [35] 王琳琳, 李乐康, 戴乾, 等. 稀释液添加不同抗氧化剂对冷冻姜曲海猪精子质量的影响[J]. *畜牧与兽医*, 2024, 56(11):10-15.
- [36] 石一凡, 李晓彤, 刘俊泽, 等. 维甲酸对体外热处理猪精子活

- 力、抗氧化性能及其糖脂代谢的影响[J]. 畜牧与兽医, 2023, 55(11):1-10.
- [37] 陈志英, 胡传活, 唐胤晟, 等. 他克林对猪精子冻后质量、抗氧化能力及糖代谢的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(7):981-988.
- [38] 吕艳秋, 徐曼, 徐一超, 等. 肉碱对冻融猪精子总抗氧化能力、抗氧化酶基因及凋亡相关基因表达的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2020, 47(4):1121-1129.
- [39] 冯妮, 陈志英, 谢运法, 等. 枸杞多糖对获能新鲜和冻后猪精子抗氧化能力的影响[J]. 畜牧与兽医, 2021, 53(9):16-20.
- [40] YANG X Z, HU R Z, SHI M K, et al. Placental malfunction, fetal survival and development caused by sow metabolic disorder: the impact of maternal oxidative stress[J]. Antioxidants, 2023, 12(2):360.
- [41] 龚泽修, 张星, 谢凯, 等. 茯苓多糖对母猪繁殖性能、仔猪生长性能及血清免疫指标、抗氧化指标的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(6):27-30.
- [42] CHEN J, ZHANG Y F, YOU J M, et al. The effects of dietary supplementation of saccharomyces cerevisiae fermentation product during late pregnancy and lactation on sow productivity, colostrum and milk composition, and antioxidant status of sows in a subtropical climate[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2020, 7:71.
- [43] 曾思静, 刘永辉, 龙静, 等. 围产期母猪饲粮补充丝氨酸对泌乳母猪和哺乳仔猪血清生化指标和抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(4):1976-1985.
- [44] HUANG P F, MOU Q, YANG Y, et al. Effects of supplementing sow diets during late gestation with *Pennisetum purpureum* on antioxidant indices, immune parameters and faecal microbiota[J]. Veterinary Medicine and Science, 2021, 7(4):1347-1358.
- [45] LI Q H, YANG S W, CHEN F, et al. Nutritional strategies to alleviate oxidative stress in sows[J]. Animal Nutrition, 2021, 9:60-73.
- [46] LEE J, PARK S, PARK H, et al. Heat stress in growing-finishing pigs: effects of low protein with increased crystalline amino acids on growth, gut health, antioxidant status and microbiome[J]. Animals, 2025, 15(6):848.
- [47] BI C P, YIN J J, YANG W, et al. Effects of dietary γ -aminobutyric acid supplementation on antioxidant status, blood hormones and meat quality in growing-finishing pigs undergoing transport stress[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2020, 104(2):590-596.
- [48] 陈博, 王涤非, 杨雪曦, 等. 饲粮中添加角鲨烯对生长育肥猪生长性能、肉品质及抗氧化功能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2025, 52(9):4146-4154.
- [49] 桂文龙, 张广峰, 徐卫祥, 等. 饲料中添加银杏叶对育肥期苏姜猪生长性能、肌内脂肪沉积及肌肉抗氧化能力的影响[J]. 家畜生态学报, 2025, 46(7):39-46.
- [50] 唐佳希, 邱月琴, 熊云霞, 等. 栀子粉对生长育肥猪生长性能、肉品质、抗氧化能力及经济效益的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(7):4281-4292.
- [51] XIONG Y X, LIU S, XIAO H, et al. Dietary stevia residue extract supplementation improves the performance and antioxidative capacity of growing-finishing pigs[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(11):4724-4735.
- [52] MA W F, MA Z, MAO P, et al. Effects of feed supplemented with fermented pine needles (*Pinus ponderosa*) on carcass quality, meat quality, and antioxidant capacity of growing-finishing pigs[J]. Foods, 2025, 14(12):2046.
- [53] 苏维发, 周洪彬, 蒋登湖, 等. 壳寡糖对生长育肥猪生长性能、肉品质、抗氧化功能以及免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(5):2555-2567.
- [54] ZHENG Y Y, LI Y, YU B, et al. Dietary supplementation of grape seed proanthocyanidins improves growth performance, carcass traits, and meat quality in growing-finishing pigs[J]. Animal Nutrition, 2024, 20:200-210.
- [55] SHIN H W, JIN X H, GIM M J, et al. Inclusion of dietary nontoxic sulfur on growth performance, immune response, sulfur amino acid content and meat characteristics in growing-finishing pigs[J]. Animal Bioscience, 2023, 36(5):776-784.
- [56] JING J Z, YIN S G, LIU Y, et al. Hydroxy selenomethionine alleviates hepatic lipid metabolism disorder of pigs induced by dietary oxidative stress via relieving the endoplasmic reticulum stress[J]. Antioxidants, 2022, 11(3):552.
- [57] MARCHIORI M S, PAIANO D, ZATTI E, et al. Butyric acid glycerides as substitutes for antibiotics as growth enhancers in the diet of nursery piglets[J]. Research in Veterinary Science, 2024, 167:105110.
- [58] XIONG Y X, CUI B L, HE Z T, et al. Dietary replacement of inorganic trace minerals with lower levels of organic trace minerals leads to enhanced antioxidant capacity, nutrient digestibility, and reduced fecal mineral excretion in growing-finishing pigs[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2023, 10:1142054.
- [59] CHEN J, WANG H K, MA Y X, et al. Effects of the methionine hydroxyl analog chelated microminerals on growth performance, antioxidant status, and immune response of growing-finishing pigs[J]. Animal Science Journal, 2022, 93(1):e13730.
- [60] XU W W, ZHOU M, YANG Z K, et al. Organic trace elements enhance growth performance, antioxidant capacity, and gut microbiota in finishing pigs[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2024, 11:1517976.

(责任编辑:成纾寒)