

在畜禽饲料生产、储存和运输过程中面临的全球性挑战是霉菌污染问题,其引发的饲料霉变不仅对畜牧业造成经济损失,更可能通过霉菌毒素(如黄曲霉毒素、赭曲霉毒素等)对动物健康、生产性能及人类食品安全构成威胁。

近年来,随着对饲料防霉技术的不断研究,逐步形成以物理、化学及生物方法为核心的多维防治体系。当前防霉制剂的研究仍处于发展阶段,其作用机制、复配剂量及多组分协同机制仍需深入,并且各类防霉剂的实际应用效果参差不齐,部分产品因抑菌谱狭窄或稳定性不足导致防霉效能有限,而另一些产品则可能存在成本过高或安全隐患等问题。这种效果的显著差异不仅削弱了市场对防霉剂推广应用的信心,还在一定程度上制约了行业技术升级的进程,使得养殖企业在选择防霉方案时面临诸多顾虑与挑战。

防治霉菌毒素污染 保障饲料产品安全

口姚华伟 白光一 乔彬 李登云

饲料霉菌毒素对畜禽生产性能的影响

饲料原料如玉米、大豆、小麦等在生长、加工和储存的过程中会出现发霉变质的现象,其在发霉过程中霉菌会产生有毒的代谢产物,主要包括黄曲霉毒素(AFT)、呕吐毒素(DON)和玉米赤霉烯酮(ZEN)等,可导致动物出现免疫力低下、拉黑粪、流产、呕吐、肠胃炎、腺胃炎、肝功能减退等问题。霉菌毒素可通过母猪的乳汁传递给仔猪,导致仔猪出现腹泻、拉稀、消瘦以及生长缓慢等症状。同时,霉菌毒素还可以残留在猪肉制品中,也可以蓄积在屠宰后的动物中,从而引发食品安全危机。霉菌毒素还会降低家禽的生产性能,导致内脏器官损伤、免疫抑制等问题,严重威胁家禽健康。家禽若食用被霉菌毒素污染过的饲料,常出现免疫抑制、繁殖机能障碍、抵抗力低下等病症。此外,饲料霉变还会影响动物的主要饲料来源,在储存和运输过程中可能受到霉菌毒素的污染。有研究表明,霉菌毒素会对羊的组织器官造成严重损伤,尤其是胃肠道、睾丸和肝脏等组织,进而导致饲养价值降低。

研究表明,霉变饲料会导致羊的育肥期显著延长,同时降低育肥羊的出栏率和饲料转化率,并增加疾病暴发风险,最终导致死亡率上升。然而,这些毒素具有极高的稳定性,不仅能够耐受饲料加工过程中的高温、高压处理,还能在pH2—9的范围内保持活性,难以被常规处理方法破坏。霉菌毒素污染已成为影响畜禽健康、降低养殖效益和威胁食品安全的重要因素。

畜禽饲料霉菌毒素的防治技术

饲料防霉剂

在饲料中添加防霉剂是预防饲料腐败变质且有效的方法。孙春华等研究发现,丙酸盐-丙酸复合型、丙酸型、丙酸盐型3种防霉剂均能降低霉菌数量。除了丙酸型的防霉剂外,其他防霉剂也具有很好的防霉效果。研究发现,在饲料中添加磷酸二氢钠和磷酸氢二钠可抑制储存期内高乳清粉熟化软颗粒教槽料的霉菌总数,有效防止教槽料发霉。

靳双星等发现,质量浓度为4.0毫克/毫升的双乙酸钠和丁酸钠能很好杀

灭黄曲霉,而双乙酸钠与山梨酸钾(2:1)复配后有协同杀菌作用。此外,复合防霉剂既拓宽了抑菌谱,又可协同增效,这种多靶点协同的防霉模式不仅克服了单一成分抑菌范围有限的缺陷,还减少了高剂量使用带来的安全风险,在规模化养殖的饲料储存场景中展现出显著的实用价值与技术优势。

马天等研究发现,苜蓿草捆贮藏60天后,添加由0.3%丙酸钙、0.3%丙酸钠和0.4%双乙酸钠组成的复合防霉剂,可有效抑制草捆中的霉菌数量及种类,对高水分苜蓿草捆的综合品质保护效果最佳。杜莉等研究发现,3种防霉剂(主要成分为丙酸、山梨酸、柠檬酸、丙酸铵、乳酸、谷氨酸钠、丙酸、山梨酸钾)均可提高颗粒饲料的含水量和硬度,延长饲料的储存时间。由此可见,防霉剂在饲料领域应用广泛,可有效抑制饲料中霉菌的生长繁殖。此外,杨燕燕等研究发现,随着贮藏时间延长,苜蓿草捆中霉菌数量呈现先上升后下降的趋势,而脱氢乙酸钠处理可显著降低贮藏0—50天的霉菌数量,其中添加0.10%脱氢乙酸钠对苜蓿干草的防霉效果最佳。乔煦等研究发现,在饲料中添加防霉剂可延缓饲料的气味改变;当添加量为1.2千克/吨时,饲料可存放90天以上且霉菌总数无明显增长。然而,防霉剂的防霉效果除与自身特性相关外,还受饲料类型(如粉剂、颗粒料)的影响。孙春华等研究发现,当储存时间超过50天时,不同类型饲料在常温环境下的保存试验表明,粉料的霉菌总数显著高于其他类型饲料,而添加1.5倍剂量防霉剂的防霉效果更为理想。

饲料防霉剂抑制霉菌生长的分子机制主要通过以下多途径协同实现:破坏细胞结构与膜功能,有机酸类(丙酸、山梨酸)中的羧基根阴离子破坏霉菌细胞膜蛋白功能;抑制关键代谢酶活性,丙酸盐和苯甲酸抑制琥珀酸脱氢酶/丙酮酸脱氢酶复合体活性,中断腺苷三磷酸(ATP)合成;干扰遗传物质与蛋白合成,山梨酸通过嵌入DNA双螺旋,干扰复制与转录。

霉菌毒素吸附剂

防霉剂可以通过制造酸性环境或破坏霉菌的细胞壁而达到抑制霉菌繁殖生长与产毒的效果,但不能吸附已经产生的霉菌毒素。目前,饲料中的

脱毒方法有生物法、化学法和物理法,其中物理法主要有吸附剂、微波、电磁波辐射和超声波降解等,而饲料中通常采用吸附剂来去除其中的霉菌毒素,吸附剂具有性质稳定、比表面积大、吸附效率高、来源广泛、价格低廉且可大规模应用的优点。

常见的霉菌毒素吸附剂有蒙脱石(膨润土)、沸石、埃洛石、滑石和硅藻土等,通过向饲料中添加吸附剂,可固定其中的霉菌毒素,使其无法发挥毒性作用,最终使霉菌毒素与吸附剂一同排出体外。肖莎等研究表明,内蒙古膨润土(N-Mt)在黄曲霉毒素B1(AFB1)初始质量浓度为1.5毫克/升、吸附剂用量为5.0毫克条件下对黄曲霉毒素B1的饱和吸附量为1.153毫克/克。此外,改性后的蒙脱石的吸附效果显著增强,如通过水热法制备的坡缕石——蒙脱石改性材料,对黄曲霉毒素B1的吸附率高达95.65%。另外,葡甘露聚糖改性蒙脱石与壳聚糖改性蒙脱石对霉菌毒素具有较高的吸附率,不仅能降低发霉日粮中霉菌毒素对蛋鸡的毒害作用,缓解其引发的肝脏损伤,还对蛋鸡的健康具有显著的促进作用。

在众多改性蒙脱石中,膨润土经STAC(一种季铵盐类改性剂)改性制备的蒙脱石对喷雾玉米皮中黄曲霉毒素B1和玉米赤霉烯酮有较高的吸附效率,降低了喷雾玉米皮中的黄曲霉毒素B1和玉米赤霉烯酮含量。研究还发现,穿心莲内酯与聚乙二醇改性蒙脱石能促进大肠杆菌的菌体裂解,大大增强了抑菌效果。霉菌毒素吸附剂主要通过以下分子机制吸附霉菌毒素:一是蒙脱石/膨润土主要通过静电吸附和阳离子交换发挥吸附作用;二是物理吸附,改性后的蒙脱石依靠更高比表面积和层电荷数物理吸附霉菌毒素。

酸化剂

随着饲料添加剂的不断发展,酸化剂的用途也在拓展。酸化剂除了具有抑菌、杀菌和改善胃肠道微生态环境的作用,还能有效抑制生物发酵饲料中霉菌的生长繁殖及霉菌毒素的分泌,减少微生物发酵饲料腐败变质的情况,进而延长其保质期,提升饲料品质。

程皇座等研究发现,每吨饲料喷洒由2千克液体酸(主要成分为甲酸、丙酸、表面活性剂、保水剂等)与8千克水组成的混合液,可抑制高水分条件下颗粒饲料中的霉菌生长,改善储存期间饲料品质下降的问题。郭艳萍等报道,在青贮饲料中添加0.3%丙酸,可提高乳酸比例、降低pH值,从而延长青贮饲料的保存时间。此外,苗苕若研究发现,在饲料中添加0.5%的复合酸化剂提高饲料的酸度值和新鲜度,降低饲料中pH值并抑制常见霉菌的生长。因此,酸化剂发挥防霉作用的机制主要有:有机酸分子穿透细胞膜;细胞内毒性作用机制;环境协同抑制效应。

益生菌

生物防霉剂是通过生物学的途径,有效降低霉菌数量和霉菌毒素含量,预防霉菌的滋生和生长。“以菌治菌”在生物防霉技术中也发挥了重要作用。

用。有研究发现,发霉玉米中存在可高效降解玉米赤霉烯酮的功能菌株。这类菌株通过分泌特异性降解酶,可在有氧条件下将玉米赤霉烯酮的内酯环结构分解为无毒代谢产物,在饲料生物防霉领域展现出重要的应用潜力。杨雪研究发现,奇异变形杆菌和枯草芽孢杆菌都能降解玉米赤霉烯酮,其中,奇异变形杆菌主要靠胞外物质发挥关键作用,而枯草芽孢杆菌则主要依靠胞内物质降解毒素,这两种菌对玉米赤霉烯酮的体外降解率高达98%。孟祥昕研究发现,乳酸菌不仅能高效吸附玉米赤霉烯酮,还能显著抑制禾谷镰刀菌、拟枝孢镰刀菌、层出镰刀菌等产毒真菌的生长及其主要镰刀菌毒素的合成,导致镰刀菌菌丝表面出现皱缩甚至断裂的形态学改变。

由此可见,“以菌治菌”是一种颇具潜力的防霉途径。益生菌可通过产生有机酸、抑菌素等代谢产物破坏菌体结构,进而杀灭有害菌及霉菌,这表明益生菌在抑菌防霉领域具有显著的应用价值。李佳晖研究发现,贝莱斯芽孢杆菌A2与戊糖片球菌xy46联合使用时,可拮抗发霉饲料引起的肉鸡体重和采食量下降,减轻发霉饲料导致的生产性能降低;同时,益生菌的联合应用还能改善发霉饲料造成的肉鸡肠道屏障损伤,并缓解霉菌毒素引发的肠道炎症反应。此外,孟祥昕研究发现,乳酸菌1-10、6-3、1.7-1、9-2、11-1、14-4、16-2在玉米样品中对玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的抑制效果最为显著,抑制率达90%的菌株占比有70%。乳酸菌11-1对4种毒素的综合抑制率表现突出。张家林研究还发现,筛选出的芽孢杆菌对AFB1、ZEN、DON等霉菌毒素具有良好的脱毒效果,且其复合菌剂在霉菌毒素中毒的防治中表现出显著效果。赖根生研究发现,利用芽孢杆菌BL-17-27、BL-24、NJ8和RS1进行耗氧发酵饲料3天,对饲料原料中黄曲霉毒素B1和呕吐毒素的降解率分别达到81.75%和79.86%,对玉米赤霉烯酮的降解率更是高达100%。此外,复合益生菌不仅能通过竞争性排斥作用抑制霉菌在饲料中的定植与繁殖,还可通过分泌抗菌肽、有机酸等代谢产物,既能破坏霉菌细胞结构,又能抑制霉菌孢子萌发,还能延缓饲料氧化变质的进程,使其在饲料防霉领域展现出独特的应用潜力。徐凯文研究发现,接种复合菌可促进发酵过程中乳酸菌的生长,添加0.4%的双乙酸钠对发酵颗粒料中的主要功能性乳酸菌无不良影响。因此,益生菌抑制霉菌生长的分子机制主要通过以下多途径协同作用实现:有机酸介导的细胞内酸化;特异性抑菌物质干扰;竞争性抑制与屏障强化;基因表达调控。

植物提取物

1、中药提取物。中药具有清热解表、消炎杀菌等生物学功能,其抑菌作用主要通过中药中的活性成分实现。李波研究发现,随着博落回提取物浓度的升高,黄曲霉的生长速度和产孢能力逐渐下降;当添加浓度为1.0微克/毫升时,可有效降低黄曲霉毒素B1

含量;而当质量浓度达到250.0微克/毫升时,黄曲霉及黄曲霉毒素基本未被检出。可见,低浓度博落回提取物对霉菌的产毒能力具有一定抑制作用,且该作用呈现剂量依赖性。此外,研究证实杜仲、大蒜、丁香等中药具有显著的抑菌防霉功效。其中,大蒜提取物不仅能有效抑制饲料中霉菌的增殖、延长饲料的霉变周期,还在酸性条件下表现出更优的防霉效果,可有效预防产品变质。总皂苷原酸作为甜叶菊的主要活性成分之一,不仅对大肠杆菌等有害菌表现出较强的抑菌活性,还能有效降低饲料中的霉菌总数。另外,高建杭研究还发现,龙脑樟叶粉添加到饲料中也具有一定的防霉作用。因此,中药中的活性成分通过多靶点机制抑制霉菌生长,具体分子机制如下:破坏细胞膜结构与功能;干扰关键代谢途径;次级效应。

2、植物精油。植物精油(EOs)是一类从植物细胞中提取的次级代谢产物,具有抗菌抗炎、杀虫防霉、抗氧化、易于降解等特点,是安全、无残留的绿色添加剂。研究表明,植物精油可抑制水果、粮食在收获及贮藏过程中滋生的霉菌,是一种极具潜力且绿色安全的新型防霉剂。研究显示,肉桂精油及其主要组分对饲料中常见真菌表现出广谱抑菌活性,其中抑菌活性较强的为肉桂醛和邻甲氧基肉桂醛,二者是肉桂精油的主要抑菌活性成分。陈梓云等研究发现,山苍子油微胶囊能延长玉米粉和小麦粉的保存时间,且在密闭条件下防霉效果更佳。Alma等研究发现,藏茴香和芫荽种子精油对黄曲霉毒素的抑制率分别为73.3%和99.6%,对黄曲霉的抑制率分别为64%和16%,说明二者均为可抗黄曲霉及其毒素的天然植物源抗真菌剂。周鹏等研究发现,复合精油配方中以小茴香精油与山苍子精油按1:5的比例复配为最佳配比,此时抑菌效果最强。Roberto等指出,柠檬草精油对真菌(尤其是青黴甘蔗中的霉菌和酵母菌)的抑制效果显著。戚雯雯等研究发现,香芹酚可改变指状青霉的菌丝形态、抑制孢子萌发、破坏细胞膜结构,导致菌体内可溶性糖外渗,从而抑制青霉菌的生长。刘德赞研究发现,单种精油的综合抑菌效果表现为:芥末精油、肉桂精油、大蒜精油、香茅精油;而芥末+大蒜复合精油、芥末+肉桂复合精油均在抑制增效作用,效果显著。尽管植物精油的抑菌活性较强,但植物精油在使用过程中应考虑其价格以及挥发性的问题。

不同精油的抑菌活性成分存在显著差异,这直接导致其对不同种类霉菌的抑制效果呈现特异性。这也意味着,在实际应用中需根据目标霉菌种类选择适配的精油类型。这种“成分—霉菌—效果”的对应关系,为开发精准化的天然防霉剂提供了理论依据。Gómez等研究发现,牛至精油、肉桂精油及其主要活性成分香芹酚、肉桂醛,不仅能抑制黄曲霉的生长繁殖,还能在一定程度上抑制黄曲霉毒素的合成。周鹏等在饲料原料玉米粉中添加200.0毫克/千克小茴香+山苍子复合植物精油,可显著抑制霉菌

生长、延长饲料原料的保存天数,且其防霉效果与新型复合防霉剂脱氢乙酸钠相当。余行等研究发现,复合植物精油对肠道主要致病菌及霉菌具有显著的抑制作用,将其添加到饲料中不仅能抑制霉菌生长,还能延长颗粒饲料的保质期。

张桂枝等研究发现,肉桂醛与丁香酚复合物对植物乳杆菌发酵饲料的防霉效果优于双乙酸钠及其与丁酸钠、山梨酸钾的复合物。程仁等在培养基中添加0.2毫克/毫升的柠檬醛、紫苏醛、烟草萜和香芹醇后,黄曲霉的生长抑制率及产毒能力在6天内呈逐渐下降趋势,但仍保持较高的抑制效应。综上所述,植物精油抑制霉菌的分子机制主要通过破坏细胞结构、干扰代谢途径及诱导氧化应激等多靶点协同实现,具体机制如下:破坏细胞膜完整性;抑制膜蛋白功能;干扰能量代谢与酶功能;诱导氧化应激损伤;抑制遗传物质合成与表达。

结语与展望

霉菌毒素污染已成为全球畜牧业面临的重大挑战,其危害从畜禽健康延伸至食品安全和公共健康领域。以黄曲霉毒素B1、玉米赤霉烯酮和呕吐毒素为代表的毒素,不仅会导致畜禽肝脏损伤、免疫抑制和繁殖障碍,还会通过食物链累积引发人类肝癌风险及肾脏毒性。欧盟EFSA数据显示,2023年谷物中黄曲霉毒素B1超标率达23%。玉米赤霉烯酮污染率高达47%,凸显出构建防控体系的紧迫性。

尽管目前已形成较为成熟的防霉技术体系,但仍存在多维度局限性:物理吸附剂存在特异性不足、作用环境受限的问题;化学防霉剂面临毒性及残留风险,以及环境与食品安全隐患;生物降解类方案受限于酶制剂稳定性不足和微生物制剂的环境适应性差;植物源防霉剂则存在成分挥发损耗、中药提取物成分复杂且作用机制模糊、质量控制难度大等挑战。此外,多毒素协同污染面临技术不足、防控成本与效益失衡、检测预警体系滞后等问题,也制约着综合防控策略的有效实施。

因此,必须构建系统化综合防控策略,从饲料源头污染控制到精准化添加剂应用,从单一物理吸附剂向生物降解与营养调控的协同技术升级。以改性蒙脱石为代表的高效吸附剂,与桉树精油等植物提取物及特异性降解酶协同作用,构建“防—控—治”三位一体的综合解决方案。未来研究应聚焦四大方向:深化生物降解机制研究,开发多毒素协同防控技术,推进快速检测与智慧化管理体系,拓展新材料与新技术应用场景,从而构建更安全、高效、绿色的霉菌毒素防控体系,为畜牧业可持续发展及食品安全提供保障。

(据《中国畜牧兽医报》)



资料图片

专家谈养殖

