



黄翠,兰静,赵琳,等. 饲用玉米镰孢菌毒素污染控制[J]. 黑龙江农业科学, 2024(6):107-112.

饲用玉米镰孢菌毒素污染控制

黄翠¹, 兰静¹, 赵琳¹, 李宛¹, 倪蓓¹, 赵红华¹, 柴孟龙²

(1. 黑龙江省农业科学院 农产品质量安全研究所/农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(哈尔滨), 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:玉米是全球主要的粮食作物之一,我国是世界第二大玉米生产国,也是玉米进口国。在玉米总产量中,饲用玉米占比高达63%。镰孢菌毒素是影响饲用玉米品质,导致浪费的主要原因。控制饲用玉米中镰孢菌毒素污染对于降低养殖成本,保障食品安全和提升我国玉米在国际上的竞争力具有重要意义。本文分析了饲用玉米种植、收获、运储和加工过程中镰孢菌毒素污染关键控制点,以及采取的相应控制措施。饲用玉米全产业链镰孢菌毒素的污染控制应以田间为源头,从产地环境到品种选择、从栽培技术到田间管理,都要建立标准化操作规程;收获、干燥、运输、贮藏中间环节需明确条件与要求,降低加工过程毒素浓缩风险;加快建立饲料脱霉剂标准评价体系,从而推动脱霉剂市场良性发展,以此保障饲用玉米品质。

关键词:饲用玉米;镰孢菌毒素;污染控制

玉米是畜禽饲料中的主要能量物质,占饲料产品的60%~70%,全球约63%的玉米用于生产饲料。近年受国际形势影响玉米流通紧张,价格持续走高,我国既是玉米出口国,也是进口国,国产玉米与进口玉米营养成分相近,真菌毒素是影响我国玉米质量,限制出口的关键因素^[1-2]。近十年,在我国收到的欧盟食品和饲料快速预警系统(RASFF)通报的全部危害事件类型中真菌毒素污染排第一位,占全部通报总数的24.58%^[3]。受全球气温变暖影响,粮饲中真菌毒素污染成为持久性难题^[4-5]。目前,我国大型乳品厂饲料玉米中黄曲霉毒素(AFL)已得到控制,镰孢菌毒素,如呕吐毒素(DON)、玉米赤霉烯酮(ZEN)和伏马毒素(FB),在饲用玉米中混合污染,危害大,难以去除,成为饲料厂和养殖场主要的防控目标^[6-8]。

镰孢菌属真菌种类多、侵染能力强,且几乎都有产毒能力。饲用玉米从田间到饲料成品经过种植、收获、运输、收储、加工等多个环节,每个环节都有可能受到镰孢真菌侵染并产生DON、ZEN和FB,直接危害畜禽和乳制品安全。因此,控制镰孢菌的侵染,去除饲用玉米中DON、ZEN和FB污染,是解决危害的根本方法。

粮食安全核心在饲料粮安全,饲用玉米价格关乎饲料成本与养殖成本,饲料安全关乎动物安全与食品安全^[9]。降低饲用玉米中镰孢菌毒素污染,减少浪费,对稳定玉米价格,保障我国粮饲安

全具有重要意义。本文对我国饲用玉米种植生产、收获、流通,以及加工过程中镰孢菌侵染及毒素富集风险点进行分析,并对相关对策进行归纳和探讨,以期为建立良好的饲用玉米种、收、运、储、加工全链条标准操作提供实施方案。

1 我国饲用玉米中镰孢菌毒素限量标准及污染现状

已知的能够侵染饲用玉米且产毒的镰孢菌种有禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)、串珠镰孢菌[*Gibberella fujikuroi* (Sawada) Wollenw.]、拟轮枝镰孢菌(*Fusarium verticillioides*)、黄色镰孢菌(*Fusarium thapsinum* Klittich, J. F. Leslie, P. E. Nelson & Mar)等,各镰孢菌种可以单独侵染,也可复合侵染玉米并产毒,不同镰孢菌种产生的优势毒素不同,同一镰孢菌种也可产生多种毒素。我国饲用玉米中普遍检出的镰孢菌毒素有DON、ZEN和FB,并存在2种或3种混合污染的情况。

DON是12,13-环氧基倍半萜烯化合物,为B型单端孢霉烯族毒素的一种,分子式为 $C_{15}H_{20}O_6$,易溶于甲醇、乙腈等极性有机溶剂,不易溶于水,不挥发,耐高温高压,200℃以上部分分解。日常烹饪加工方式无法去除DON,食品和饲料中DON很难去除,对人和动物危害较大。饲料中DON能引起动物拒食、呕吐、生长缓慢等不良反应,猪对DON尤为敏感。饲料中 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

收稿日期:2023-12-09

基金项目:黑龙江省农业科学院院级课题(2020YYF033)。

第一作者:黄翠(1989—),女,博士,助理研究员,从事农产品质量与安全研究。E-mail:478464034@qq.com。

通信作者:柴孟龙(1983—),男,博士,高级兽医师,从事动物健康养殖研究。E-mail:cml313@163.com。

DON 便能引起仔猪体重、采食量和饲料转化率的降低,并引起肠道微生物稳态的失衡^[10]。我国《饲料卫生标准(GB 13078—2017)》中规定,植物性饲料原料中 DON 含量不得超过 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,饲料产品中猪配合饲料中不得超过 $3.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。受气候影响,我国饲用玉米中 DON 污染呈现一定的地域性,北方饲用玉米中 DON 检出率和超标率高于南方,华东地区玉米中 DON 污染最为严重。2019—2021 年,全国饲用玉米中 DON 检出率分别为 98.35%、90.00%和 89.20%,超标率为 0%、8.64%和 1.80%;玉米副产品中检出率为 100.00%、100.00%和 99.20%,超标率为 4.63%、6.88%和 24.00%^[11-13]。玉米副产品中 DON 检出率与超标率高于玉米本身,这也说明玉米加工过程增加了 DON 富集和超标的风险。

ZEN 是一种类雌激素结构化合物,分子式 $\text{C}_{18}\text{H}_{22}\text{O}_5$,同 DON 一样具有耐高温,物理性质稳定,不易溶于水的特点。能够与雌激素受体结合,干扰雌激素合成,抑制哺乳动物卵泡的成熟,进而引起哺乳动物不孕和流产,有较强的生殖毒性,猪和反刍动物对 ZEN 尤为敏感^[14-15]。我国《饲料卫生标准(GB 13078—2017)》中规定,饲用原料玉米中 ZEN 含量不得超过 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,饲料产品青年母猪配合饲料中 ZEN 不得超过 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仔猪配合饲料中不得超过 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其他猪配合饲料中不得超过 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同于 DON,ZEN 在我国南、北方玉米中均有检出,不具地域性特点。2019—2021 年,全国饲用玉米中 ZEN 检出率分别为 90.08%、95.31%和 79.10%,超标率为 6.94%、7.90%和 3.30%;玉米副产品中检出率为 100.00%、100.00%和 98.90%,超标率为 17.36%、9.63%和 56.30%^[11-13]。虽然玉米中 ZEN 检出率低于 DON,但检出 ZEN 含量具有高超限的特点,而玉米副产品中 ZEN 检出率和超标率均高于 DON,可见,ZEN 对饲料原材料的污染较为严重。

FB 结构类似物分为 A、B、C 和 P,其中 B 型 FB 毒性最高,B 型 FB 又以 FB_1 毒性最强,污染最普遍, FB_1 占 FB 总量的 70%,是危害食品和饲料安全的主要毒素之一^[16],FB 具有与 DON 和 ZEN 相似的理化性质,能够引起动物肠道、肝肾、免疫系统等的损伤,还会抑制卵细胞成熟与神经管发育^[17-18]。FB 在玉米中检出普遍,多伴随 DON、ZEN 和 AFB 污染。我国《饲料卫生标准(GB 13078—2017)》中规定,饲料原料玉米中 FB_1 和 FB_2 含量之和不超过 $60.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,饲料产

品中最高不超过 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因其危害程度相对小于 DON 与 ZEN,故重视程度不如 DON 与 ZEN,但考虑到饲料中多种毒素共同污染会增加动物的中毒作用,FB 的污染不容小觑。

综上,镰孢菌毒素 DON、ZEN、FB 在饲用玉米中具有高检出率、高超限率,且难以去除的特点,对动物的肠道、免疫、肝肾、神经、生殖均有一定毒性以及致癌性。饲用玉米中 DON、ZEN、FB 污染控制对动物安全和食品安全至关重要。

2 饲用玉米镰孢菌毒素污染控制

饲用玉米中镰孢菌毒素累积是一个连续动态的过程,生产、流通与加工环节均存在风险,识别风险控制点,采取相应措施,对控制玉米中镰孢菌毒素的累积,减少饲料粮浪费,保障饲料安全有重要意义。

2.1 生产(种植)过程污染控制

镰孢菌对玉米籽粒的侵染在种植过程就已开始,花丝期和蜡熟期是两个关键的风险时期。在玉米花丝期,镰孢菌通过感染花丝进而感染玉米籽粒;蜡熟期,虫蛀、刮风等物理损伤增加了镰孢菌侵染的风险。因此,栽培抗虫抗病品种是解决镰孢菌侵染的根本途径。改变籽粒物理性状,提高物理抗性是提高抗病性的一种途径。如云南省选育的云优 19、云优 105 等硬质胚乳玉米遗传了热带亚热带种质优质蛋白高、抗病性强的特点,比普通玉米增效 17%以上。此外,利用生物技术挖掘抗性基因,转入抗性基因调控生化反应,可提高抗病性。如徐莉等^[19]挖掘到玉米 *GRMZM2G455909* 基因可调控水杨酸信号通路提高玉米抗性,转玉米 *GRMZM2G455909* 基因的模式植株具有很强的抗侵染能力;而葛立杰^[20]则发现 *ZmGLP1* 基因可调控茉莉酸信号通路表达提高抗病能力。

此外,良好的栽培方式也可防控镰孢菌侵染玉米籽粒。如:(1)选择宽阔、排水性较好的田块,采用宽行和窄行相互排列种植,可避免由于种植密度过小,温湿度过高,蜡熟期玉米籽粒侵染严重的情况^[21];(2)在拔节期和孕穗期追肥,合理的氮、磷、钾比例可强化玉米抗病能力^[22];(3)采用玉米-大豆-玉米轮作倒茬方式种植,改善土壤养分与微生物结构,减少病虫害发生^[23]。

2.2 流通(采收与运储)过程污染控制

玉米属于不耐储藏谷物,玉米储藏 420 d,ZEN 含量上升约 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,DON 含量上升约 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]。玉米籽粒水分含量、运储环境温度、湿度是镰孢菌毒素累积的关键因素。采收期

与采收天气会影响玉米籽粒含水量和毒素含量,适时采收的玉米籽粒中 DON 含量与水分含量正相关;采收期晚 7~14 d,籽粒中 FB 和 ZEN 含量升高,且与水分含量正相关。因此,选择晴天适时采收可降低籽粒自身毒素含量,科学晾晒或机械烘干将玉米籽粒的水分含量降至 12.5% 以下可延缓仓储玉米镰孢菌毒素的累积。

田间定殖在玉米表皮的镰孢菌在运储环境不当时可快速繁殖并产生毒素。运储环境温度应在 15~20 °C 之间,温度高于 20 °C 时,FB 累积风险增高,高于 25 °C 时,AFL 累积风险增高;环境湿度应低于 65.0%,对于水分含量高于 12.5% 的玉米在夏季高温危险期时,应采取隔热控温和机械通风延缓镰孢菌毒素的累积,机械通风进风湿度 40.0% 能有效降低粮堆温度^[25-26]。此外,采收、晾晒、运输与仓储过程应尽量避免玉米籽粒因碰撞造成的机械损伤,增加镰孢菌感染的风险。

2.3 加工过程污染控制

玉米副产品中镰孢菌毒素污染率高于玉米中,如 2021 年我国饲用玉米中 DON 和 ZEN 污染率为 89.20% 和 79.10%,玉米胚芽粕中 DON 和 ZEN 污染率为 99.20% 和 98.60%^[13],说明玉米加工过程增加了镰孢菌再次污染和毒素浓缩的风险。因此,加工过程应采用必要的方法降低污染,抑制毒素的浓缩。

2.3.1 传统物理与化学方法 物理方法是通过物理手段对污染玉米进行处理减毒。如:(1)剔除霉变粒是依据霉变粒比正常玉米籽粒比重小,将一部分明显霉变的籽粒剔除掉。(2)稀释法是将霉变玉米与正常玉米混合在一起,从而达到降低霉菌毒素浓度的方法。剔除霉变粒与稀释法从一定程度上降低了霉菌毒素,但不能从根本上解决霉菌毒素的存在。(3)辐射降解法是利用 γ 射线、微波、紫外线等手段杀死霉菌并降解毒素,如在玉米油中添加 3% 活性炭,微波功率 210 W,微波时间 2 min,可降解玉米油中 90.24% 的 ZEN^[27],这种方法虽然效果好,但需要专用的设备与防护措施,实施有一定的难度。

化学方法是利用化学物质氧化剂、还原剂和碱等对霉变玉米进行处理,使毒素化学结构发生变化,从而失去毒性的方法。氧化剂有臭氧、次氯酸钠和氯气等,还原剂有亚硫酸氢钠等,碱有氨气、铵盐和氢氧化钠等。化学方法在降解毒性的同时污染环境,破坏了营养物质的结构,降低了饲料的营养价值和食用安全性,因此无法在实际生产中使用。

2.3.2 新兴脱霉剂的使用 脱霉剂是饲料加工

过程中添加的控制玉米中霉菌生长和产毒的饲料添加剂。脱霉剂的使用弥补了物理和化学方法的局限性,是目前饲料厂广泛使用的方法,根据脱毒原理分为吸附型脱霉剂和降解型脱霉剂。

(1)吸附型脱霉剂。其脱毒原理是在饲料中添加能够吸附霉菌毒素的吸附剂,使毒素经过动物肠道时不被吸收,随吸附剂排出动物体外。常见的吸附剂有改性蒙脱石(硅铝酸盐)、活性炭、酵母细胞壁、甘露寡糖等。蒙脱石能有效降低牛奶中 AFB₁ 含量,并降低动物尿液中 AFB₁ 和 FB₁ 含量,其对 AFB₁ 效果较好,但对 FB₁ 效果稍差^[28-29]。活性炭吸附毒素的同时也吸附了营养,对毒素的选择性较差,且吸附力具有饱和性。酵母细胞壁中的 β -葡聚糖与甘露糖两种多糖分子能够吸附毒素,其吸附力是活性炭的 37.0%,但其能够降解猪日粮 27.4% 的 ZEN,降解效果优于降解菌和降解酶,同时是一种很好的降解剂^[30]。为增强吸附效果,一种脱霉剂产品也包含两种或以上吸附成分。如甘露寡糖是一种益生元,同时也是很好的吸附剂,对 DON 的吸附能力达 41.81%,其与蒙脱石复合使用可减轻 AFB₁ 和 DON 联合诱导的小鼠血清、肝脏和脾脏毒性^[31]。吸附型脱霉剂是目前研究比较成熟的脱霉剂类型,进口脱霉剂中吸附型脱霉剂居多。

(2)降解型脱霉剂。它是利用微生物和酶的作用对镰孢菌毒素降解为毒素较低的产物的方法。如 Ji 等^[32] 分离得到的黑曲霉(*Aspergillus niger*) FS₁₀ 可将 ZEA 降解为低毒的 4-S-ZEA 和 (E)-ZEA。德沃斯氏菌(*Devosia* sp.) DDB001 能够将 DON 转化为低毒的 3-keto-DON^[33]。目前报道的分离得到的能够降解 DON 和 ZEN 的菌种很多^[34],如革兰氏阳性细菌(Gram-positive bacteria)有红球菌(*Rhodococcus* sp.)^[35]、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)^[36-37]、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)^[38]、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)^[39]、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)^[40] 等。如谭剑等^[41] 分离得到一株枯草芽孢杆菌能够对玉米浆中的呕吐毒素降解率达 80%;革兰氏阴性细菌有假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)^[42]、不动杆菌(*Acinetobacter* sp.)^[43] 等,如邓桃等^[44] 分离得到的醋酸不动杆菌(*A. calcoaceticus*)对 ZEN 降解率达 54.80%;真菌有曲霉菌(*Aspergillus* sp.)^[45]、酵母菌(*Saccharomyces* sp.)^[46] 等,几乎所有的啤酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)对 ZEN 均有降解能力。两种或以上菌株协同作用也可增强降解效

果,如枯草芽孢杆菌与植物乳杆菌共同发酵可降解麸皮中 71% 的 DON^[47]。我国市售脱毒剂中常见的降解菌有地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌和酿酒酵母。

微生物脱毒的本质是微生物代谢产生了具有降解毒素作用的酶,目前已证实具有降解作用的酶有水解酶(hydrolase)、转移酶(transferase)、氧化酶(oxidase)和融合酶(recombinant enzyme)。如 ZEN 水解酶 ZHD101 可破坏内脂键降解 ZEN 毒性,经突变改造后 ZEN 降解率提高了 5.79%,酶活提高了 1.10 倍^[48]。

转移酶有氧甲基转移酶(α -methyltransferase)^[49]、葡萄糖基转移酶(glucanotransferase)^[50]等。如可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia theobromae* NBRC 31059)和丝层菌寄生(*Hypomyces subiculosus* ATCC 76476)代谢产生的氧甲基转移酶 Lt-OMT 和 Hs-OMT 可将 ZEN 的 3-OH 和 5-OH 转化为 3-OCH₃ 和 5-OCH₃,从而降低 ZEN 毒性^[49]。

氧化酶有葡萄糖氧化酶(glucose oxidase)^[51-52]、细胞色素 P450(cytochrome P450)^[53]、锰过氧化物酶(manganese peroxidase)^[54]、Oxa 氧化酶(Oxa oxidase)^[55]、漆酶(laccase)^[54,56]等,如链霉菌(*Streptomyces thermocarboxydus*)在锰过氧化物酶和漆酶联合催化作用下能有效降解 ZEN^[54]。

融合酶是通过基因工程、蛋白质工程等将两个不同的霉菌毒素降解酶基因组合在一起,使表达的酶产物能够同时降解两种霉菌毒素^[57]。如吴梓凤^[58]将 ZEN 水解酶 ZHD101.1 基因与锰过氧化物酶 *Phc Mnp* 基因重组表达,构建了融合酶 ZPF₁,优化后,ZPF₁ 能够同时降解约 64% 的 AFB₁ 和 46% 的 ZEN。又如 Azam 等^[59]将 ZEN 水解酶 ZHD101 和解淀粉芽孢杆菌 ASAG 降解赭曲霉毒素 A(OTA)的羧基肽酶(carboxypeptidase)构建重组后可同时降解 ZEN 和 OTA。融合酶具有多功能性,是未来研究的一个方向。

(3)营养复合型脱毒剂。多种营养成分被证实能够缓解 DON 和 ZEN 诱导的毒性反应。如槲皮素可以通过调控氧化还原反应与 Nrf2 信号通路缓解 ZEN 引起的牛乳腺上皮 MAC-T 和猪肠道上皮细胞 IPEC-J2 炎症反应^[60]。解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) FZB₄₂ 产生的芬芥素能够抑制禾谷镰孢菌生长和镰孢菌毒素的合成^[39]。营养复合型脱毒剂是在吸附剂与降解剂的基础上,添加益生元、维生素、微量元素、氨基酸、植物提取物等免疫调节剂,通过营养物质的调控作用提高动物免疫力,排出和降解毒素的同

时,增强动物解毒能力,减轻毒副作用,是近年新兴的抗毒理念。目前,国产市售脱毒剂多为营养复合型脱毒剂,在吸附剂与降解剂的基础上,添加益生元有甘露聚糖和酵母细胞壁多糖;维生素有 A、C、E;微量元素有酵母硒、亚硒酸钠和硫酸锌;氨基酸有苏氨酸、蛋氨酸等;中药有黄芪、五味子、党参、决明子、茯苓、白术、蒲公英等。

当前市售脱毒剂多种多样,但脱毒效果缺乏科学统一的评价标准,如不同吸附型脱毒剂吸附效果评价方法不统一;降解型脱毒剂虽可降解毒素,但各种酶或菌类活性有效成分存储及确立稳定性的问题;同时部分营养调控脱毒剂缺少体内实验证实营养调控作用等问题。因此,建立统一的脱毒剂评价标准,对推进脱毒剂产业良性发展至关重要。

3 小结

饲用玉米从种植到收获流通,以及加工消费全链条中受环境、气候、操作的影响均有被霉菌感染的风险,只有把控全产业链条中风险控制点,方能保障饲料质量安全。饲用玉米全产业链链孢菌毒素的污染控制应以田间为源头,从产地环境到品种选择、从栽培技术到田间管理,建立标准化操作规程,收获、干燥、运输、贮藏中间环节明确条件与要求,降低加工过程毒素浓缩风险,加快建立饲料脱毒剂标准评价体系,推动脱毒剂市场良性发展,以此保障饲用玉米品质。

参考文献:

- [1] 齐驰名. 2021/22 年度下半阶段国内玉米市场供求和价格形势[J]. 黑龙江粮食, 2022(5): 15, 11.
- [2] 顾剑, 林国发. 国际粮食危机下国内玉米饲用需求分析及展望[J]. 广东饲料, 2022, 31(6): 22-25.
- [3] 李润妍, 潘琳, 柳家鹏, 等. 2010—2019 年欧盟食品和饲料快速预警系统对华通报食品真菌毒素污染分析及应对策略[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1883-1892.
- [4] MEDINA Á, RODRÍGUEZ A, MAGAN N. Climate change and mycotoxigenic fungi: impacts on mycotoxin production[J]. Current Opinion in Food Science, 2015, 5: 99-104.
- [5] REMBOLD F, MERONI M, URBANO F, et al. ASAP: a new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis[J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 247-257.
- [6] 李新锋, 郭净邑, 赵盼盼, 等. 某奶牛场饲用玉米霉菌毒素的检测及霉菌的分离鉴定[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(18): 105-110, 144.
- [7] 王子微, 高亚男, 王加启, 等. 牛奶中霉菌毒素共污染及联合毒理效应[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1): 107-117.
- [8] 杜新宇, 符欣灵, 唐贺尧, 等. 大庆地区生牛乳中霉菌毒素含量调查[J]. 吉林畜牧兽医, 2022, 43(3): 1-2.

- [9] 翟晓汀. 粮食安全核心在饲料粮安全访中国农业科学院饲料研究所研究员李习龙[J]. 经济, 2023(3): 47-49.
- [10] LIAO P, LI Y H, LI M J, et al. Baicalin alleviates deoxynivalenol-induced intestinal inflammation and oxidative stress damage by inhibiting NF- κ B and increasing mTOR signaling pathways in piglets[J]. Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2020, 140: 111326.
- [11] 雷元培, 周建川, 郑文革, 等. 2019—2020 年中国饲料原料和饲料中霉菌毒素污染调查报告[J]. 饲料工业, 2022, 43(20): 59-64.
- [12] 周健庭, 郑和. 2021 年饲料霉菌毒素污染情况调查报告[J]. 养猪, 2022(3): 12-16.
- [13] 刘建高, 厉学武, 彭哲, 等. 2021 年我国饲料原料中常见霉菌毒素污染情况调查[J]. 中国家禽, 2023, 45(10): 70-75.
- [14] 朱根生, 夏苏干, 余进进, 等. 白藜芦醇对玉米赤霉烯酮致小鼠肝脏氧化损伤及炎症的保护作用[J]. 中国畜牧兽医, 2021, 48(11): 4254-4261.
- [15] RAI A, DAS M, TRIPATHI A. Occurrence and toxicity of a fusarium mycotoxin, Zearalenone[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(16): 2710-2729.
- [16] 刘晓莉, 李金泽, 朱勇文, 等. 伏马毒素的毒性作用及研究进展[J]. 中国饲料, 2022(23): 101-108.
- [17] 郭志青, 张霞, 刁立功, 等. 镰刀菌及其伏马毒素的危害和防控[J]. 山东农业科学, 2022, 54(1): 157-164.
- [18] 曹伟. 伏马毒素 B₁ 在猪卵母细胞成熟过程中的毒性作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [19] 徐莉, 王其, 丁婷, 等. 玉米 GRMZM2G455909 基因的克隆及其抗病功能初步分析[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(9): 1976-1984.
- [20] 葛立杰. 玉米 ZmGLP1 基因的抗病功能研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- [21] 齐爱英. 玉米种植新技术及病虫害防治方法[J]. 种子科技, 2023, 41(5): 67-69.
- [22] 陶艳, 张效花. 玉米病虫害发生原因及防治新技术[J]. 世界热带农业信息, 2022(10): 42-43.
- [23] 王英, 杨森, 乔金友, 等. 玉豆轮作下黑土区轮耕模式对土壤坚实度及玉米产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(6): 10-19.
- [24] 陶泽. 不同仓储条件对玉米品质变化的影响及品质评价预测数学模型的建立[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [25] 姜玉山, 闫恩峰, 李莉. 偏高水分玉米高大平房仓储安全度夏试验[J]. 粮食科技与经济, 2022, 47(2): 62-65.
- [26] 王艺, 戚禹康, 孔令今. 通风过程中进风相对湿度对仓储粮堆温度和水分的的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 125-129.
- [27] 赵冉, 孙淑敏, 谢岩黎. 微波诱导活性炭脱除玉米油中玉米赤霉烯酮研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 34-40.
- [28] MAKI C R, MONTEIRO A P A, ELMORE S E, et al. Calcium montmorillonite clay in dairy feed reduces aflatoxin concentrations in milk without interfering with milk quality, composition or yield[J]. Animal Feed Science and Technology, 2016, 214: 130-135.
- [29] MITCHELL N J, XUE K S, LIN S H, et al. Calcium montmorillonite clay reduces AFB₁ and FB₁ biomarkers in rats exposed to single and co-exposures of aflatoxin and fumonisin[J]. Journal of Applied Toxicology: JAT, 2014, 34(7): 795-804.
- [30] 邓增炜. 三种 ZEN 降解剂对 ZEN 暴露仔猪的保护效果评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- [31] 胡文娟. 复合吸附剂对黄曲霉毒素 B₁ 和脱氧雪腐镰刀菌烯醇联合毒性的脱毒效果研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [32] JI J, YU J, YANG Y, et al. Exploration on the enhancement of detoxification ability of Zearalenone and its degradation products of *Aspergillus niger* FS₁₀ under directional stress of Zearalenone[J]. Toxins, 2021, 13(10): 720.
- [33] WANG Y, ZHANG H H, ZHAO C, et al. Isolation and characterization of a novel deoxynivalenol-transforming strain *Paradevossia shaoguanensis* DDB001 from wheat field soil[J]. Letters in Applied Microbiology, 2017, 65(5): 414-422.
- [34] 赵天祥, 余祖华, 丁轲, 等. 微生物降解玉米赤霉烯酮的研究进展[J]. 微生物学报, 2023, 63(10): 3711-3726.
- [35] 邱孜博, 汪荣, 张杨, 等. 红球菌及其生物降解作用研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(7): 254-258.
- [36] GUO Y P, HUO X T, ZHAO L H, et al. Protective effects of *Bacillus subtilis* ANSB060, *Bacillus subtilis* ANSB01G, and *Devosia* sp. ANSB714-Based mycotoxin biodegradation agent on mice fed with naturally moldy diets[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2020, 12(3): 994-1001.
- [37] YANG S B, ZHENG H C, XU J Y, et al. New biotransformation mode of Zearalenone identified in *Bacillus subtilis* Y816 revealing a novel ZEN conjugate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(26): 7409-7419.
- [38] WANG S W, HOU Q Q, GUO Q Q, et al. Isolation and characterization of a deoxynivalenol-degrading bacterium *Bacillus licheniformis* YB9 with the capability of modulating intestinal microbial flora of mice[J]. Toxins, 2020, 12(3): 184.
- [39] HANIF A, ZHANG F, LI P P, et al. Fengycin produced by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB₄₂ inhibits *Fusarium graminearum* growth and mycotoxins biosynthesis[J]. Toxins, 2019, 11(5): 295.
- [40] MAIDANA L, de SOUZA M, BRACARENSE A P F R L. *Lactobacillus plantarum* and deoxynivalenol detoxification: a concise review[J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(12): 1815-1823.
- [41] 谭剑, 杨硕, 苏会波, 等. 一株降解呕吐毒素枯草芽孢杆菌的鉴定与降解效果研究[J]. 当代化工, 2018, 47(3): 548-551.
- [42] HOUSHAYMI B, AWADA R, KEDEES M, et al. Pyocyanin, a metabolite of *Pseudomonas aeruginosa*, exhibits antifungal drug activity through inhibition of a pleiotropic drug resistance subfamily FgABC3[J]. Drug Research, 2019, 69(12): 658-664.
- [43] ZHOU Y Q, WANG A, YU Q Z, et al. Induced expression of the *Acinetobacter* sp. oxa gene in *Lactobacillus acidophilus*

- and its increased ZEN degradation stability by immobilization [J]. *Toxins*, 2023, 15(6): 387.
- [44] 邓桃,袁青松,周涛,等.一株玉米赤霉烯酮高效降解细菌的筛选与降解条件研究[J]. *中国中药杂志*, 2021, 7(20): 5240-5246.
- [45] JARD G, LIBOZ T, MATHIEU F, et al. Transformation of zearalenone to zearalenone-sulfate by *Aspergillus* spp. [J]. *World Mycotoxin Journal*, 2015, 3(2):183-191.
- [46] TAYEBE A, MOHSEN D, MANOOCHHEHR A, et al. Effect of *Lactobacillus* sp. and yeast supplementation on performance and some blood attributes in deoxynivalenol-challenged broiler chickens [J]. *Research in Veterinary Science*, 2023, 159: 35-43.
- [47] 梁含,马召稳,于思颖,等.呕吐毒素降解菌的筛选、鉴定及应用[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(12):115-119.
- [48] 徐荣荣.玉米赤霉烯酮降解酶 Zhd101 的突变改造、分泌表达及应用研究[D]. 无锡:江南大学, 2019.
- [49] 时从来.氧甲基转移酶转化玉米赤霉烯酮脱毒效果的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2019.
- [50] VIDAL A, CLAEYS L, MENGELERS M, et al. Humans significantly metabolize and excrete the mycotoxin deoxynivalenol and its modified form deoxynivalenol-3-glucoside within 24 hours[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5255.
- [51] 李国宝.新型饲料添加剂葡萄糖氧化酶开发与应用研究. 山东省,山东信得科技股份有限公司, 2009-11-16.
- [52] 刘公言,闫先峰,吴志强,等.丁酸梭菌、葡萄糖氧化酶和迷迭香提取物组方对肉兔生长性能、屠宰性能、免疫功能和盲肠微生物区系的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(9): 5942-5953.
- [53] REINEN J, KALMA L L, BEGHEIJN S, et al. Application of cytochrome P450 BM3 mutants as biocatalysts for the profiling of estrogen receptor binding metabolites of the mycotoxin Zearalenone[J]. *Xenobiotica: the Fate of Foreign Compounds in Biological Systems*, 2011, 41(1): 59-70.
- [54] QIN X, XIN Y Z, SU X Y, et al. Efficient degradation of Zearalenone by dye-decolorizing peroxidase from *Streptomyces thermocarboxydus* combining catalytic properties of manganese peroxidase and laccase[J]. *Toxins*, 2021, 13(9): 602.
- [55] 王谥.重组嗜酸乳杆菌表达 Oxa 氧化酶及其特性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [56] ZHANG Y R, REN J, WANG Q, et al. Oxidation characteristics and degradation potential of a dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens* for crystal violet dye[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 168: 107930.
- [57] 何欣,张海文.饲料中霉菌毒素脱毒技术的研究现状[J]. *现代畜牧兽医*, 2022(10): 77-82.
- [58] 吴梓凤.同时降解黄曲霉毒素 B₁ 和玉米赤霉烯酮的重组酵母菌构建及其应用研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [59] AZAM M S, YU D Z, LIU N, et al. Degrading ochratoxin A and Zearalenone mycotoxins using a multifunctional recombinant enzyme[J]. *Toxins*, 2019, 11(5): 301.
- [60] 付玉蓉.槲皮素缓解玉米赤霉烯酮与脂多糖联合作用对 MAC-T 和 IPEC-J2 细胞损伤的研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.

Control Measures of *Fusarium* Toxins in Forage Maize

HUANG Cui¹, LAN Jing¹, ZHAO Lin¹, LI Wan¹, NI Bei¹, ZHAO Honghua¹, CHAI Menglong²

(1. Institute of Quality and Safety of Agricultural Products, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Agricultural Products Quality and Safety Risk Assessment Laboratory, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Harbin), Harbin 150086, China; 2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Maize is one of the world's main food crops, China is the world's second largest producer of maize, is also a maize importer, in the total output of maize, feed maize accounted for 63%. *Fusarium* toxin affects the quality and safety of forage maize and leads to waste. Controlling *Fusarium* toxins pollution in forage maize is of great significance to reduce the feed cost, ensure the food safety and enhance the competitiveness of maize in the world. In this paper, the critical control points of *Fusarium* toxins contamination during the planting, harvesting, transportation, storage and process of the forage maize were analyzed to provide suggestions for controlling *Fusarium* toxin pollution. The control of *Fusarium* toxin pollution in the whole forage maize industry chain should trace to the field. Standardized operating procedures should be established from the origin environment to variety selection and from cultivation technology to field management. Conditions and requirements should be clearly defined in the middle links of harvesting, drying, transportation and storage, so as to reduce the risk of toxin concentration during processing and accelerate the establishment of a standard evaluation system for feed demildew agents. Thus promoting the benign development of mildew removal agent market, in order to ensure the quality of forage maize.

Keywords: forage maize; *Fusarium* toxins; control measures