

doi:10.11920/xnmdzk.2025.02.003

纳米技术在饲料黄曲霉毒素防控领域的应用研究进展

王茜¹, 李佳航¹, 苏东华¹, 江雨霏¹, 雍媛², 史海涛¹

(1. 西南民族大学畜牧兽医学院青藏高原动物遗传资源保护与利用教育部重点实验室, 四川成都610041;

2. 西南民族大学化学与环境保护工程学院, 四川成都610207)

摘要: 饲料中黄曲霉毒素(AFT)污染严重威胁动物健康和生产性能,其中黄曲霉毒素B₁(AFB₁)因污染广、毒性强而备受关注。传统的AFT防控方案存在较多的局限性,而纳米技术的兴起为AFT防控提供了新的解决方案。本文综述了纳米技术在饲料AFT防控领域的应用;在污染预防方面,纳米载体显著提升了抗真菌药物的靶向递送和缓释性能;在检测技术方面,纳米材料使检测灵敏度显著提升,并有助于实现现场快速检测;在污染后处理方面,纳米催化和吸附技术可有效降低AFT的生物利用度和毒性。未来研究可以重点关注纳米材料的生物安全性及稳定性,同时推进低成本制备工艺开发和标准化体系建设,以期在纳米技术在饲料AFT防控领域的科学应用提供坚实的理论与技术支持。

关键词: 黄曲霉毒素;农业生产;纳米技术;黄曲霉菌毒素检测;黄曲霉菌毒素防控;饲料

中图分类号:S816.17;TB383

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)02-0132-08

Research progress in the application of nanotechnology in the prevention and control of aflatoxins in feed

WANG Xi¹, LI Jiahang¹, SU Donghua¹, JIANG Yufei¹, YONG Yuan², SHI Haitao¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Animal Genetic Resource Reservation and Utilization,

Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2. School of Chemistry and Environmental Protection Engineering,

Southwest Minzu University, Chengdu 610207, China)

Abstract: The contamination of aflatoxins (AFT) in feed seriously threatens animal health and production performance. Among them, aflatoxin B₁ (AFB₁) has attracted much attention due to its wide-spread contamination and high toxicity. Traditional AFT prevention and control schemes have many limitations, while the rise of nanotechnology provides new solutions for AFT prevention and control. This paper reviewed the applications of nanotechnology in the field of AFT prevention and control in feed. In terms of pollution prevention, nanocarriers significantly improved the targeted delivery and sustained-release performance of anti-fungal drugs. Regarding detection technologies, nanomaterials significantly enhanced the detection sensitivity and contributed to the realization of on-site rapid detection. In the post-pollution treatment, nanocatalysis and adsorption technologies could effectively reduce the bioavailability and toxicity of AFT. Future research should be focused on the biosafety and stability of nanomaterials, and at the same time, should help promote the development of low-cost preparation processes and the construction of a standardized system, aiming to provide solid theoretical and technical support for the scientific application of nanotechnology in the field of AFT prevention and control in feed.

Keywords: aflatoxin; agricultural production; nanotechnology; detection of aflatoxin; prevention and control of aflatoxin; feed

收稿日期:2025-02-12

作者简介:王茜(1988-),女,讲师,博士,研究方向:动物营养与肠道微生物研究.E-mail:wangxi@swun.edu.cn.王茜与李佳航为共同一作

通信作者:史海涛(1988-),男,教授,博士,研究方向:反刍动物营养研究.E-mail:shihaitao010@163.com

基金项目:国家重点研发项目(2022YFD1601605);国家自然科学基金项目(31902187);国家现代农业产业技术体系四川肉羊创新团队建设专项经费(SCCXTD-2024-14)

黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)是由黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)及其他曲霉菌产生的次级代谢产物,这些真菌物种在全球热带和亚热带地区的粮食作物中普遍存在,特别是玉米、花生、油籽和坚果等作物^[1].目前已分离出来的AFT至少有14种,较为常见的主要有黄曲霉毒素B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)、黄曲霉毒素B₂(aflatoxin B₂, AFB₂)、黄曲霉毒素G₁(aflatoxin G₁, AFG₁)、黄曲霉毒素G₂(aflatoxin G₂, AFG₂),其中AFB₁毒性最强,是一种强致癌物、致畸剂、诱变剂、免疫毒物、肝毒物和生殖毒物.AFT可以广泛污染各类饲料原料,采食被AFT污染的饲料可以导致畜禽生产性能下降,损伤肝脏、肠道及生殖功能,引发免疫失调,其在畜产品中的残留也严重威胁人体健康^[2-4].霉菌毒素的化学结构稳定,不会被正常的工业加工工艺或烹饪所破坏,每年给畜禽养殖带来巨大的经济损失^[4-5].建立快速、准确、高效的AFT检测方法,创新AFT防控技术,是保障食品和饲料安全、降低AFT危害的重要途径.近年来,纳米技术在抑制霉菌生长和霉菌毒素检测、吸附等领域的应用越来越广泛.本文在检索国内外相关文献的基础上,综述了纳米技术在AFT防控领域研究的最新进展,以期在纳米技术在农业生产中的推广应用提供参考.

1 纳米技术简介

纳米技术作为一门新兴交叉学科,其核心在于在三维空间的一个或多个维度上,以纳米尺度(1~100 nm)对原子或分子进行精确操控和组装^[5].这一技术突破了传统方法的局限,在光学和电子学等多个领域展现出显著的应用价值.近年来,其在农业科学领域的应用研究呈现快速增长态势,推动了食品加工和包装、食品安全和水净化、环境修复、作物改良和植物保护等领域的技术革新^[6].纳米技术的发展为现代农业科学提供了新的科学方法论,目前的主要研究方向包括农业投入品的传输、动植物遗传育种、农产品加工、农业环境改良和农业纳米检测技术^[7].

新型纳米复合材料的开发为真菌病害防控提供了创新解决方案,有助于抑制真菌生长,显著降低作物损失^[8].纳米材料可以通过多种机制发挥抗黄曲霉活性,主要包括(1)与真菌细胞壁组分发生特异性相

互作用;(2)抑制真菌生物膜的形成;(3)诱导活性氧等产生等^[9].纳米技术为AFB₁的检测提供了多种功能化纳米材料,包括金纳米粒子(AuNP)、碳基纳米材料(CBN)、磁性纳米粒子(MNP)、量子点(QD)和上转换纳米粒子(UCNP)等.通过将上述纳米材料与传统检测方法相结合,可开发出具有高灵敏度、高通量特性的快速检测新方法^[5].纳米技术与电子学、生物学等学科的交叉融合,促进了新型纳米传感器的研发.这类传感器在食品安全快速检测、植物病原体诊断、动物疫病监测、农药残留分析及水环境污染检测等领域展现出显著优势^[7].将纳米技术与传统物理、化学及生物脱毒方法相结合,有望克服传统方法存在的脱毒不彻底、化学残留及营养成分损失等技术瓶颈.目前,纳米材料的合成工艺正向微生物介导合成和绿色化学合成等方向转变,这些方法具有经济性、安全性和高效性等优势^[8].尽管纳米技术具有广阔的应用前景,但在实际应用前必须进行系统的生物安全性评估和环境影响评价.这包括纳米材料的迁移转化规律、生物累积效应及长期生态风险等,以最大限度地降低其对环境 and 人类健康的潜在风险.

2 基于纳米技术抑制饲料中真菌的生长和黄曲霉毒素产生

在传统农业生产体系中,作物收获前的真菌防控主要聚焦于抑制病原菌的生长.尽管真菌生长并不意味着一定有霉菌毒素产生,但两者存在着密切的联系.抑制真菌生长被认为是减少霉菌毒素产生的有效途径.目前田间防控主要依赖化学农药,尽管这些杀菌剂在真菌控制方面具有一定效果,但可能带来以下问题:(1)对作物产生药害;(2)破坏土壤微生物群落结构;(3)通过食物链生物放大效应威胁人类健康^[8].

2.1 纳米颗粒对真菌生长的抑制作用

纳米颗粒因其独特的物理化学特性(包括高比表面积、可调控的表面电位、精确的分子操纵性等)在抗菌领域展现出显著优势(表1).研究表明,纳米颗粒可通过穿透真菌细胞壁、导致菌丝形态畸变、破坏细胞膜完整性等机制抑制真菌生长^[10-11].Ingle等^[12]利用聚生茎点霉(*Phoma glomerata*, MTCC-2210)的水提取物合成了氧化铜纳米颗粒(CuONPs),其体外抗黄曲霉实验显示最小抑菌浓度(MIC)为220 μg/mL,

显著低于传统杀菌剂代森锰锌,展现出良好的应用前景。Ilkhechi 等^[13]系统研究了 ZnO、TiO₂及其复合纳米颗粒的抗黄曲霉性能,发现 ZnO-TiO₂纳米颗粒在 150 μg/mL 浓度下即表现出优异的抗真菌活性,这与其较强的促 ROS 生成能力和氧化应激诱导能力密切相关。值得注意的是,ZnO NPs 的形状和尺寸与其抗真菌性能存在密切联系^[14]。目前,纳米颗粒的制备工艺已逐步实现工业化,其中生物合成法和冷冻干燥法等绿色制备技术因具有成本低、产量高等优势,有望成为该领域的研究热点。

表 1 纳米颗粒对霉菌生长的抑制作用

Table 1 The inhibitory effect of nanoparticles on fungal growth

纳米颗粒 Nanoparticles	霉菌 Mould	MIC (μg/mL)	参考文献 Ref
Ag	黑曲霉、土曲霉、 黄曲霉、烟曲霉菌	15.62~125.00	[15]
Se		106.00	
ZnO	黄曲霉菌	156.00	[16]
CuO		25.00	
Cu	黄曲霉菌	150.00	[17]
ZnO-TiO ₂ /Au		0.63	
ZnO-TiO ₂	黄曲霉菌	78.00	[18]
Cu/Chitosan	黄曲霉、黑曲霉菌	180.00~220.00	[12]
Fe ₂ O ₃	黑曲霉菌	160.00	[19]

表 2 基于纳米封装植物精油减少 AFB₁ 的产生

Table 2 Reduction of AFB₁ production based on nano-encapsulated plant essential oils

植物精油 Essential oils	纳米材料 Nano material	效果 Effects	参考文献 Ref
多香果油	壳聚糖纳米凝胶	抗真菌性能显著提升,在低浓度下即可有效控制玉米储存过程中的黄曲霉污染,同时对玉米的主要营养成分无显著影响。	[20]
罗勒精油	壳聚糖纳米基质	在低浓度下即可实现黄曲霉生长和 AFB ₁ 生物合成的完全抑制,其缓释特性延长了精油发挥作用的时间,提高了小米的储藏期限。	[22]
芳樟油	壳聚糖复合材料	抗真菌活性显著提升,同时具有缓释、控释等特性,有效保护水稻在储存过程中免受 AFB ₁ 污染和脂质过氧化的影响。	[23]
柠檬草油	壳聚糖纳米基质	改善了精油的稳定性,有效地抑制了玉米储存期间的 AFB ₁ 的污染和脂质的过氧化。	[24]
牛至油	壳聚糖纳米乳	可有效抑制 AFB ₁ 合成,降低玉米脂质过氧化水平,延长玉米的保质期,生物安全性良好。	[25]
柠檬醛、香叶醇和松油醇	壳聚糖纳米基质	增强了抗真菌协同效应,AFB ₁ 抑制率升高,有效降低高粱种子的营养成分的损失,生物安全性良好。	[26]

Upadhy 等^[27]采用离子凝胶法制备了壳聚糖纳米乳负载的依兰精油,结果表明,该封装精油在 1 μL/mL 浓度下可完全抑制黄曲霉的生长,在 0.75 μL/mL 浓度下即可完全阻断 AFB₁ 的生物合成,且对花生种子的萌发率无显著影响,展现出良好的生物相容性。Das 等^[28]开发了一种基于壳聚糖纳米基质的莳萝精油封装体系,用于水稻储存期间的 AFT 防

2.2 基于纳米封装技术的植物精油在黄曲霉毒素防控中的应用

植物精油(Essential Oils,EOs)作为天然抗菌剂,在过去几十年中被广泛研究并应用于食品防腐领域,特别是在控制储存食品中霉菌毒素污染方面展现出显著效果。然而,EOs 的直接应用存在以下技术瓶颈:(1)疏水性强导致分散性差;(2)对温度、光照和氧气敏感,易发生降解;(3)水溶性低;(4)挥发性高影响食品营养价值^[20]。纳米封装技术为解决这些问题提供了创新方案,通过提高 EOs 的生物利用度、水溶性和稳定性,同时降低其对食品的潜在毒性,可有效增强其抗真菌和抑制 AFT 产生的效果^[21]。目前,多种功能化纳米材料已被开发作为 EOs 的载体,主要包括金属纳米颗粒(Metal NPs)、碳基纳米材料(如碳纳米管、碳量子点)、聚合物纳米颗粒等。其中,壳聚糖纳米颗粒因其具有生物相容性高、细胞毒性低和易于生物降解等优势备受关注^[20-21]。表 2 展示了近年来纳米封装植物精油在抑制 AFB₁ 产生方面的进展。

控。研究表明,与游离莳萝精油相比,纳米封装体系在 0.04 μL/mL 的极低浓度下即可完全抑制 AFB₁ 的分泌。这种增强效应可能源于:(1)纳米封装显著增大了精油的比表面积;(2)壳聚糖基质实现了精油的缓释;(3)纳米载体与真菌细胞壁的特异性相互作用。Roshan 等^[29]系统研究了壳聚糖基纳米封装的飞龙掌血精油(*Toddalia asiatica* essential oil)对储存玉米中黄

曲霉的抑制作用机制.该纳米体系通过下调 AFT 合成关键基因(*ver-1* 和 *omt-1*)的表达,有效阻断了 AFT 的生物合成途径.这一发现为 AFT 的分子水平防控提供了新的理论依据和技术路径.基于纳米封装植物精油在抗黄曲霉应用中展现出的多重优势(包括高效性、安全性和环境友好性),这类纳米体系有望发展成为新型绿色保鲜剂,在农业和食品工业中具有广阔的应用前景.

3 纳米技术在黄曲霉菌毒素检测领域的应用进展

目前,AFT 的检测主要依赖于色谱和光谱技术,包括薄层色谱法(TLC)、气相色谱法(GC)、质谱法(MS)、高效液相色谱法(HPLC)和酶联免疫吸附法(ELISA)等^[5].尽管这些方法已相对成熟,但仍存在操作流程复杂、检测周期较长、样本前处理繁琐、仪器设备昂贵且不便携等问题.纳米技术的引入为解决这些问题提供了新的思路,通过与传统检测方法相结合,可显著提高检测方法的特异性、操作便捷性和检测效率.纳米技术在 AFT 检测中的应用主要集中在体现在以下三个方面:(1)样品前处理;(2)基于免疫和色谱技术的检测;(3)纳米传感器开发.

3.1 基于纳米技术的样品前处理方法

样品前处理是复杂基质中 AFT 分析的关键步骤,直接影响检测结果的准确性和可靠性.传统的预处理方法包括固相萃取(SPE)、液-液萃取(LLE)、基质固相分散(MSPD)和 QuEChERS 法等^[5].纳米材料的引入有效解决了传统方法中吸附材料特异性不足、

循环使用率低、成本高和处理周期长等问题^[5,30].

Zhu 等^[31]开发了一种基于氧化锌纳米花的前处理方法,用于小麦和花生样品中 AFT 的检测.该方法在实验室条件下表现出优异的性能,四种主要 AFT (AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂) 的检出限(LOD)为 0.024 ~ 0.067 μg/kg,回收率达到 93.8% ~ 105.1%.Yu 等^[32]制备了氧化石墨烯包裹二氧化硅的纳米复合材料作为固相萃取吸附剂,用于 AFT 的高效液相色谱分析.该方法优化了吸附剂用量、提取时间和解吸条件等关键参数,在玉米和大米样品中的 LOD 为 0.1 ~ 0.3 μg/kg,远低于欧盟规定的最大残留限量.Liu 等^[33]研制了一种可重复使用的纳米吸附柱,结合 HPLC 测定花生样本中的 AFB₂,LOD 达到 25 pg/mL,平均回收率为 80.9%.该吸附柱可重复使用五次而不影响其吸附性能,显著降低了检测成本.

综上所述,纳米技术的应用有效克服了复杂基质的干扰,提高了样品前处理的萃取效率、特异性和分析通量,为大批量农产品的快速分析提供了可靠的技术支持.

3.2 基于纳米技术的免疫和色谱检测方法

在 AFT 检测中,纳米颗粒主要发挥以下功能:(1)生物分子固定化;(2)信号发生;(3)信号放大;(4)荧光猝灭.将功能化纳米材料与 ELISA、FIA、CLIA 和 ICA 等传统方法相结合,可开发出灵敏度更高、检测时间更短的新型检测方法^[10].当前检测技术的发展趋势是开发可实现样品分离、提取、富集和检测一体化的现场快速分析技术.表 3 总结了纳米技术在 AFB₁ 检测领域的最新应用进展.

表 3 纳米技术在 AFB₁ 检测样品前处理领域的应用

Table 3 Application of nanotechnology in the pretreatment of samples for AFB₁ detection

纳米材料 Nano materials	前处理方式 Preparation	分析方法 Analysis methods	样本 Samples	检出限 LOD(μg/kg)	定量限 LOQ(μg/kg)	回收率 Recovery(%)	参考文献 Ref
GO/silica	SPE	HPLC-FLD	玉米	0.20	0.50	76.80~104.70	[32]
PU/GO	SPE-DLLME	HPLC-FD	大豆	0.11	0.37	76.00~101.00	[33]
MIPs@SBA-15-MPS	SPE	HPLC-FLD	水稻	0.05	0.20	98.90~119.70	[34]
UiO-66-NH ₂ @MIP	DLLME	HPLC-UV	谷物	0.09	0.30	85.60-97.10	[35]
Fe ₃ O ₄ -MWCNTs-NH ₂	MSPE	HPLC-DAD	小麦粉	0.15	0.52	88.80-96.00	[11]

Xiong 等^[36]利用金纳米棒作为 ELISA 测定的信号输出端,实现了玉米样品中 AFB₁ 的定性和定量检测.该方法通过颜色变化(蓝绿色到红色)进行可视化

检测,LOD 达到 4.0 pg/mL,加标样品的平均回收率为 82%~115%.Ouyang 等^[37]基于量子点纳米球开发了一种快速检测方法,可在 10 分钟内完成 AFT 的现

场检测,在大米和花生中的 LOD 分别为 1.4 pg/mL 和 2.9 pg/mL.Huang 等^[38]设计了一种基于纳米氮掺杂无定形碳的双模(比色/光热)免疫测定方法,其线性范围为 1~10 ng/mL,比色法和光热法的 LOD 分别为 0.22 pg/mL 和 0.76 pg/mL.该方法无需复杂仪器,可通过移动设备直接读取结果,为 AFT 检测提供了便捷的新工具.

尽管纳米技术显著提升了 AFT 检测的灵敏度和精确度,但仍面临材料制备复杂、成本较高等挑战.未

来研究应着重于简化制备工艺、优化操作流程和开发低成本材料.

3.3 基于纳米传感器的黄曲霉毒素检测技术

纳米材料因其高灵敏度、高选择性、小型化和低成本等优势,在食品安全检测领域展现出巨大潜力(表 4).作为生物传感器的核心部件,纳米生物识别元件(包括纳米适体、抗体、分子印迹聚合物和酶等)的开发已成为研究重点^[5-7].

表 4 纳米技术在 AFB₁ 检测传感器上的应用

Table 4 Application of nanotechnology in the detection sensor of AFB₁

传感器类型 Type of sensors		电极材料 Electrode modification	样本 Samples	检出限 LOD(ng/mL)	线性范围 Linear ranges(ng/mL)	参考文献 Ref
电 化 学 传 感 器	适体传感器	DNA-AuNPs-HRP	玉米和花生	3.30×10^{-4}	$1.00 \times 10^{-3} \sim 200.00$	[39]
	适体传感器	Nanocomposite-QOD-gold nanorods	玉米、花生和小麦	3.75×10^{-3}	0.01~100.00	[40]
	免疫传感器	Graphene oxide/aptamer	花生、水稻和植物油	1.00×10^{-3}	$5.00 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^3$	[41]
光 学 传 感 器	适体-比色传感器	AgNPs	花生、玉米和鸡饲料	0.09	0.20~6.00	[42]
	适体-比色传感器	Aptamer/AuNPs	花生和水稻	0.18	1.00~6.00	[43]
	荧光传感器	Metal-organic framework/aptamer	玉米、水稻和牛奶	0.35	0~180.00	[44]
	荧光传感器	QDs/gold nanoparticles	花生	20.00	$50.00 \sim 1.00 \times 10^5$	[45]

根据识别元件的不同,用于 AFB₁ 检测电化学传感器可分为适配体传感器、免疫传感器和分子印迹传感器等类型^[39-41].Singh 等^[46]开发的基于氧化锰纳米颗粒的电化学免疫传感器,在玉米样品中的 LOD 为 0.58 pg/mL,线性范围为 1~10 μ g/mL,回收率达 98.6%,并表现出优异的抗干扰能力.Ahmad 等^[47]将金-银核壳纳米颗粒集成到表面增强拉曼光谱(SERS)生物传感器中,用于小麦中 AFB₁ 的检测,LOD 达到 0.03 ng/mL.Sergeyeva 等^[48]开发的 MIP 光学传感器在玉米粉样品中的 LOD 为 20 ng/mL,识别元件在 22 $^{\circ}$ C 下可稳定保存 1 年,检测结果可通过智能手机快速读取.

尽管纳米生物传感器在 AFT 检测领域展现出显著优势,但其实际应用仍面临多重挑战,比如纳米材料与复杂基质间的非特异性相互作用可能导致假阳性结果、环境因素(如温度、湿度、pH 值等)对检测结

果存在潜在的干扰等.随着纳米材料工程、微流控技术和人工智能的融合,新一代智能传感器有望向高灵敏度、高特异性、实时在线监测和多功能集成方向发展,推动其在饲料安全领域的实际应用.

4 纳米技术在黄曲霉毒素脱毒领域的应用研究进展

传统 AFT 脱毒方法主要包括物理、化学和生物策略,用于降低受污染食品和饲料中的 AFT 含量并减少经济损失^[49].物理和化学方法虽能有效降解 AFT,但可能影响产品的营养价值、感官特性和适口性.生物降解方法因环境友好而备受关注,但微生物及其代谢产物可能改变饲料的营养成分,且酶催化副产物可能影响饲料品质.近年来,纳米材料在 AFT 脱毒中的应用研究取得显著进展,表 5 总结了相关应用实例.

表 5 纳米技术在 AFT 脱毒领域的应用

Table 5 Application of nanotechnology in AFT detoxification

纳米材料 Nano materials	黄曲霉毒素 Aflatoxin	样本 Sample	脱毒效率 Detoxification efficiency(%)	参考文献 Ref
MgO-SiO ₂	AFB ₁ 、AFB ₂ 、AFG ₁ 、AFG ₂	小麦	80.0~100.0	[50]
MOF	AFB ₁	玉米	61.8~76.3	[51]
α-Fe ₂ O ₃	AFB ₁	玉米	85.0	[52]
rGO-AuNP	AFB ₁ 、AFB ₂ 、AFG ₁ 、AFG ₂ 、AFM ₁ 、AFM ₂	小麦、玉米和水稻	48.5~100	[53]
MGO/TiO ₂	AFB ₁	玉米	96.0	[54]
g-C ₃ N ₄ /NiFe ₂ O ₄	AFB ₁	花生	90.0	[55]

4.1 基于纳米催化技术的黄曲霉毒素降解

自 2007 年发现 Fe₃O₄ 纳米粒子的过氧化物酶样活性以来,纳米酶研究取得重大突破.与天然酶相比,纳米酶具有更好的特异性、稳定性和耐用性,可在生理条件下遵循相似的酶促反应动力学^[52,56].Ren 等^[52]利用类过氧化物酶纳米材料降解 AFB₁,在含 50 μg/mL AFB₁的玉米样本中降解率达 85%以上,且复杂基质不影响降解效率.Sun^[55]等开发了基于纳米 NiFe₂O₄的光催化降解体系,可见光照射 90 分钟后黄曲霉清除率超过 90%,在污染花生样本中可将 AFB₁浓度从 315.21 μg/kg 降至 18.50 μg/kg.该方法具有环境友好、成本低、操作简便等优势.然而,纳米酶设计技术仍需优化,其降解机制、对饲料营养成分的影响及降解产物特性等仍需深入研究,特别是需要通过体内实验系统评估其生物安全性.

4.2 基于纳米吸附技术的黄曲霉毒素去除

吸附法因其经济高效而广泛应用于粮食和饲料中 AFT 的去除.传统吸附剂(如蒙脱石、膨润土和沸石)虽能降低 AFT 的生物利用度,但可能干扰动物胃肠道代谢,甚至引发炎症反应^[57-58].新型纳米多孔材料(如碳纳米材料、壳聚糖聚合物和纳米 Fe₃O₄等)为解决这些问题提供了新思路.Zhang 等^[57]开发的纳米改性蒙脱土在奶牛瘤胃液中的 AFB₁吸附效率较普通蒙脱土提高 1.36 倍.Zahoor 等^[58]利用甘蔗渣制备的磁性碳纳米复合材料在家禽饲养实验中展现出良好的 AFB₁去除效果,可作为活性炭的替代品.尽管纳米吸附剂研究仍处于起步阶段,但其优异性能为 AFT 控制提供了新的研究方向.未来研究应重点评估纳米吸附剂的生物安全性和吸附稳定性,并优化制备工艺,探索其规模化应用可行性.

5 结论和展望

本研究系统梳理了纳米技术在饲料黄曲霉毒素防控中的应用研究进展,重点探讨了其在饲料生产、储存和使用过程中 AFT 污染防控的关键技术突破.纳米技术在饲料 AFT 防控领域展现出独特优势:在饲料原料生产环节,纳米载体可显著提升抗真菌药物的靶向递送和缓释性能,有效抑制田间 AFT 污染;在饲料储存环节,基于纳米材料的快速检测技术大幅提升了 AFT 的检测灵敏度和准确性;在饲料加工和饲喂环节,纳米催化和吸附技术可显著降低 AFT 的生物利用度和毒性,保障动物饲料安全.然而,当前研究仍面临诸多挑战,包括技术转化率低、制备成本高、规模化生产工艺不成熟以及生物安全性评估不足等问题.未来研究应着重关注纳米材料在动物体内的代谢机制、长期使用安全性评估以及环境归趋等关键科学问题.同时,开发低成本、绿色制备工艺,推进技术产业化应用,建立完善的饲料安全标准体系和监管框架,对于推动纳米技术在饲料 AFT 防控领域的可持续发展具有重要意义.这些努力将为保障饲料安全、促进畜牧业健康发展提供创新解决方案.

参考文献

- [1] KHLANGWISET P, SHEPHARD G S, WU F. Aflatoxins and growth impairment: A review [J]. Critical Reviews in Toxicology, 2011, 41 (9): 740-755.
- [2] 周煜, 向思亭, 赵元元. 动物饲料及饲料原料中霉菌毒素残留现状研究进展 [J]. 畜禽业, 2025, 36 (1): 10-13.
- [3] 刘秋瑾, 尹琚伊, 张军, 等. 饲料中常见霉菌毒素污染情况及其对畜禽毒性作用的研究进展 [J]. 畜牧与饲料科学, 2023, 44 (04): 47-54.
- [4] 史海涛, 曹志军, 李键, 等. 中国饲料霉菌毒素污染现状及研究进展 [J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45 (4): 354-366.
- [5] XUE Z H, ZHANG Y X, YU W C, et al. Recent advances in aflatoxin B₁ detection based on nanotechnology and nanomaterials-a review [J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1069: 1-27.
- [6] PRAMANIK P, KRISHNAN P, MAITY A, MRIDHA N, et al. Applica-

- tion of nanotechnology in agriculture [J]. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, 2021, 11(10): 141-149.
- [7] 孙长娇, 崔海信, 王琰等. 纳米材料与技术 在农业上的应用研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(01): 18-25.
- [8] ALGHUTHAYMI M A, RAJKUBERAN C, RAJIV P, et al. Nanohybrid antifungals for control of plant diseases: Current status and future perspectives [J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(1): 48.
- [9] ALMATAR M, MAKKY E A, VAR I, et al. The role of nanoparticles in the inhibition of multidrug-resistant bacteria and biofilms [J]. *Current Drug Delivery*, 2018, 15(4): 470-484.
- [10] KHAN I, SAEED K, KHAN I. Nanoparticles: properties, applications and toxicities [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(7): 908-931.
- [11] LI W K, ZHANG H X, SHI Y P. Simultaneous determination of aflatoxin B₁ and Zearalenone by magnetic nanoparticle filled amino-modified multi-walled carbon nanotubes [J]. *Analytical Methods*, 2018, 10(27): 3353-3363.
- [12] INGLE P U, SHENDE S S, HANDE D, et al. Mycogenic copper oxide nanoparticles for fungal infection management in agricultural crop plants [J]. *BioNanoScience*, 2024, 14(1): 359-367.
- [13] NAJIBI ILKHECHI N, MOZAMMEL M, YARI KHOROUSHAHI A. Antifungal effects of ZnO, TiO₂ and ZnO-TiO₂ nanostructures on *Aspergillus flavus* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2021, 176: 104869.
- [14] MAHAMUNI-BADIGER P, GHARE V, NIKAM C, et al. The fungal infections and their inhibition by Zinc oxide nanoparticles: an alternative approach to encounter drug resistance [J]. *The Nucleus*, 2024, 67(2): 291-309.
- [15] HASHEM A H, SAIED E, AMIN B H, et al. Antifungal activity of biosynthesized silver nanoparticles (AgNPs) against *Aspergilli* causing *Aspergillosis*: ultrastructure study [J]. *Journal of Functional Biomaterials*, 2022, 13(4): 242.
- [16] NASSAR A A, ATTA H M, ALI ABDEL-RAHMAN M, et al. Mycosynthesized copper oxide nanoparticles using harnessing metabolites of endophytic fungal strain *Aspergillus terreus*: An insight into antibacterial, anti-Candida, biocompatibility, anticancer, and antioxidant activities [J]. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 2023, 23(1): 261.
- [17] HASSAN A, ORABY N H, EL-MESALAMY M, et al. Effect of hybrid nanomaterial of copper-chitosan against aflatoxigenic fungi in poultry feed [J]. *Journal of World's Poultry Research*, 2022, 12(3): 157-164.
- [18] NAJIBI ILKHECHI N, MOZAMMEL M, KHOROUSHAHI A Y. Antifungal effects of ZnO-TiO₂/Au nanostructures on *Aspergillus flavus* [J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2021, 57(3): 793-802.
- [19] PARVEEN S, WANI A H, SHAH M A, et al. Preparation, characterization and antifungal activity of iron oxide nanoparticles [J]. *Microbial Pathogenesis*, 2018, 115: 287-292.
- [20] KUMAR CHAUDHARI A, KUMAR SINGH V, DAS S, et al. Fabrication, characterization, and bioactivity assessment of chitosan nanoemulsion containing allspice essential oil to mitigate *Aspergillus flavus* contamination and aflatoxin B₁ production in maize [J]. *Food chemistry*, 2022, 372: 131221.
- [21] KARIMIRAD R, BEHNAMIAN M, DEZHSETAN S. Bitter orange oil incorporated into chitosan nanoparticles: Preparation, characterization and their potential application on antioxidant and antimicrobial characteristics of white button mushroom [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105387.
- [22] SINGH B K, TIWARI S, MAURYA A, et al. Chitosan-based nanoencapsulation of *Ocimum americanum* essential oil as safe green preservative against fungi infesting stored millets, aflatoxin B₁ contamination, and lipid peroxidation [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(8): 1851-1872.
- [23] DAS S, SINGH V K, CHAUDHARI A K, et al. Fabrication, physicochemical characterization, and bioactivity evaluation of chitosan-linalool composite nano-matrix as innovative controlled release delivery system for food preservation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 188: 751-763.
- [24] KUMAR A, SINGH P P, PRAKASH B. Assessing the efficacy of chitosan nanomatrix incorporated with *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf essential oil against the food-borne molds and aflatoxin B₁ production in food system [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2022, 180: 105001.
- [25] CHAUDHARI A K, SINGH V K, DAS S, et al. Improvement of *in vitro* and *in situ* antifungal, AFB₁ inhibitory and antioxidant activity of *Origanum majorana* L. essential oil through nanoemulsion and recommending as novel food preservative [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 143: 111536.
- [26] KUMAR A, SINGH P P, KUMAR M, et al. Nanoencapsulated plant-based antifungal formulation against the *Aspergillus flavus* and aflatoxin B₁ contamination: unraveling the biochemical and molecular mechanism of action [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, 372: 109681.
- [27] UPADHYAY N, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. Assessment of nanoencapsulated *Cananga odorata* essential oil in chitosan nanopolymer as a green approach to boost the antifungal, antioxidant and *in situ* efficacy [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 171: 480-490.
- [28] DAS S, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. *Anethum graveolens* essential oil encapsulation in chitosan nanomatrix: investigations on *in vitro* release behavior, organoleptic attributes, and efficacy as potential delivery vehicles against biodeterioration of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(5): 831-853.
- [29] ROSHAN A B, VENKATESH H N, DUBEY N K, et al. Chitosan-based nanoencapsulation of *Toddalia asiatica* (L.) Lam. essential oil to enhance antifungal and aflatoxin B₁ inhibitory activities for safe storage of maize [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 204: 476-484.
- [30] BIAN Y, ZHANG Y, ZHOU Y, et al. Recent insights into sample pretreatment methods for mycotoxins in different food matrices: A critical review on novel materials [J]. *Toxins*, 2023, 15(3): 215.
- [31] ZHU A, JIAO T, ALI S, et al. Dispersive micro solid phase extraction based ionic liquid functionalized ZnO nanoflowers couple with chromatographic methods for rapid determination of aflatoxins in wheat and

- peanut samples[J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133277.
- [32] YU L, MA F, DING X X, et al. Silica/graphene oxide nanocomposites: Potential adsorbents for solid phase extraction of trace aflatoxins in cereal crops coupled with high performance liquid chromatography[J]. Food Chemistry, 2017, 245: 1018-1024.
- [33] LIU H, LUAN Y, LU A, et al. An oligosorbent-based aptamer affinity column for selective extraction of aflatoxin B₂ prior to HPLC with fluorometric detection[J]. Microchimica Acta, 2018, 185(1): 71.
- [34] SONG L X, WANG H G, RUI C F, et al. Preparation and properties of aflatoxins imprinted polymer grafted onto the surface of mesoporous silica SBA-15 functionalized with double bonds[J]. Journal of Separation Science, 2021, 44(22): 4181-4189.
- [35] LIANG Y I, HE J, HUANG Z P, et al. An amino-functionalized zirconium-based metal-organic framework of type UiO-66-NH₂ covered with a molecularly imprinted polymer as a sorbent for the extraction of aflatoxins AFB₁, AFB₂, AFG₁ and AFG₂ from grain[J]. Microchimica Acta, 2019, 187(1): 32.
- [36] XIONG Y, PEI K, WUYQ, et al. Plasmonic ELISA based on enzyme-assisted etching of Au nanorods for the highly sensitive detection of aflatoxin B₁ in corn samples[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2018, 267: 320-327.
- [37] OUYANG S Y, ZHANG Z W, HE T, et al. An on-site, ultra-sensitive, quantitative sensing method for the determination of total aflatoxin in peanut and rice based on quantum dot nanobeads strip[J]. Toxins, 2017, 9(4): 137.
- [38] HUANG S Y, LAI W Q, LIU B Q, et al. Colorimetric and photothermal dual-mode immunoassay of aflatoxin B₁ based on peroxidase-like activity of Pt supported on nitrogen-doped carbon[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 284: 121782.
- [39] HUI Y Y, WANG B N, REN R, et al. An electrochemical aptasensor based on DNA-AuNPs-HRP nanoprobe and exonuclease-assisted signal amplification for detection of aflatoxin B₁[J]. Food Control, 2022, 109: 106902.
- [40] LU Y, ZHAO X Q, TIAN Y, et al. An electrochemiluminescence aptasensor for the ultrasensitive detection of aflatoxin B₁ based on gold nanorods/graphene quantum dots-modified poly(indole-6-carboxylic acid)/flower-gold nanocomposite[J]. Microchemical Journal, 2020, 157: 104959.
- [41] WU L, ZHOU M, WANG Y S, et al. Nanozyme and aptamer based immunosorbent assay for aflatoxin B₁[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 123154.
- [42] LERDSRI J, CHANANCHANA W, UPAN J, et al. Label-free colorimetric aptasensor for rapid detection of aflatoxin B₁ by utilizing cationic perylene probe and localized surface plasmon resonance of gold nanoparticles[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 320: 128356.
- [43] LERDSRI J, THUNKHAMRAK C, JAKMUNEE J. Development of a colorimetric aptasensor for aflatoxin B₁ detection based on silver nanoparticle aggregation induced by positively charged perylene diimide[J]. Food Control, 2021, 130: 108323.
- [44] JIA Y M, ZHOU G H, WANG X D, et al. A Metal-organic framework/ aptamer System as a fluorescent biosensor for Determination of aflatoxin B₁ in food samples[J]. Talanta, 2020, 219: 121342.
- [45] LU X T, WANG C Q, QIAN J, et al. Target-driven switch-on fluorescence aptasensor for trace aflatoxin B₁ determination based on highly fluorescent ternary CdZnTe quantum dots[J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1047: 163-171.
- [46] SINGH A K, DHIMAN T K, LAKSHMI G B V S, et al. Dimanganese trioxide(Mn₂O₃) based label-free electrochemical biosensor for detection of Aflatoxin B₁[J]. Bioelectrochemistry, 2021, 137: 107684.
- [47] JIAO T H, AHMAD W, ZHU J J, et al. Aggregation triggered aflatoxin B₁ determination in foodstuff employing 5-aminotetramethylrhodamine decorated gold-silver core-shell nanoparticles in surface enhanced Raman scattering[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 331: 129424.
- [48] SERGEYEVA T, YARYNKA D, PILETSKA E, et al. Development of a smartphone-based biomimetic sensor for aflatoxin B₁ detection using molecularly imprinted polymer membranes[J]. Talanta, 2019, 201: 204-210.
- [49] YING Z W, ZHANG T Y, LI H, et al. Adsorptive removal of aflatoxin B₁ from contaminated peanut oil via magnetic porous biochar from soybean dreg[J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135321.
- [50] MOGHADDAM S H H, JEBALI A, DALIRI K. The use of MgO-SiO₂ nano-composite for adsorption of aflatoxin in wheat flour samples[J]. Proceedings of the NanoCon, 2010: 10-15.
- [51] WU Q, FAN J, CHEN X R, et al. Sandwich structured membrane adsorber with metal organic frameworks for aflatoxin B₁ removal[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 246: 116907.
- [52] REN Z Y, LUO J Q, WAN Y H. Enzyme-like metal-organic frameworks in polymeric membranes for efficient removal of aflatoxin B₁[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(34): 30542-30550.
- [53] GUO W B, WU L D, FAN K, et al. Reduced graphene oxide-Gold nanoparticle nanoframework as a highly selective separation material for aflatoxins[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14484.
- [54] ABDELNABY A, ABDELALEEM N, ELSHEWY E, et al. The efficacy of clay bentonite, date pit, and chitosan nanoparticles in the detoxification of aflatoxin M₁ and ochratoxin A from milk[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(14): 20305-20317.
- [55] SUN D, MAO J, CHENG L, et al. Magnetic g-C₃N₄/NiFe₂O₄ composite with enhanced activity on photocatalytic disinfection of *Aspergillus flavus*[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418(7060): 129417.
- [56] GAO L Z, ZHUANG J, NIE L, et al. Intrinsic peroxidase-like activity of ferromagnetic nanoparticles[J]. Nature Nanotechnology, 2007, 2(9): 577-583.
- [57] ZHANG W, ZHANG L Y, JIANG X, et al. Enhanced adsorption removal of aflatoxin B₁, zearalenone and deoxynivalenol from dairy cow rumen fluid by modified nano-montmorillonite and evaluation of its mechanism[J]. Animal Feed Science and Technology, 2020, 259: 114366.
- [58] ZAHOOR M, KHAN F A. Adsorption of aflatoxin B₁ on magnetic carbon nanocomposites prepared from bagasse[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2018, 11(5): 729-738.