

粮食中真菌毒素的脱毒降解技术及研究进展

梁雪雪¹ 张亚妮¹ 骆 珊² 李拥军² 孙建云²

(1. 甘肃中医药大学公共卫生学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省疾病预防控制中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:真菌毒素是真菌在生长过程中所产生的次级代谢产物,广泛分布于粮食和饲料中,对人类及动物健康构成严重威胁,同时造成巨大经济损失。文章系统综述了粮食中真菌素的物理脱毒法(热处理、辐射、吸附、低温等离子体、光催化)、化学脱毒法(氨处理、熏蒸、臭氧氧化)及生物降解法(微生物吸附、微生物降解、酶降解)等主流脱毒及降解技术的原理、应用效果与优缺点,重点介绍了低温等离子体、新型纳米吸附材料、耐高温脱毒酶等新技术的创新突破,并阐述了人工智能技术在真菌毒素脱毒领域的创新应用与现存挑战。未来研究应聚焦多技术融合与智能化升级,开发高效、安全、经济的综合脱毒降解方案,为保障粮食安全和食品安全提供科学支撑。

关键词:粮食作物;真菌毒素;脱毒方法;降解机理

Research progress on detoxification and degradation technologies for mycotoxins in grains

LIANG Xuexue¹ ZHANG Yani¹ LUO Shan² LI Yongjun² SUN Jianyun²

(1. School of Public Health, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Gansu Provincial Center for Disease Control and Prevention, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Mycotoxins are secondary metabolites produced by fungi during their growth. Widely observed in grains and feeds, these toxins pose a significant threat to both human and animal health, resulting in substantial economic losses. Therefore, this paper systematically reviews the principles, application effects, advantages, and disadvantages of mainstream detoxification and degradation technologies, including physical detoxification methods (heat treatment, radiation, adsorption, low-temperature plasma, and photocatalysis), chemical detoxification methods (ammonia treatment, fumigation, and ozonation), as well as biodegradation methods (microbial adsorption, microbial degradation, and enzymatic degradation). It specifically introduces the breakthroughs of new technologies such as low-temperature plasma, novel nano-adsorbent materials, and high-temperature resistant detoxifying enzymes. Additionally, it elaborates on the innovative applications and existing challenges of artificial intelligence technology in the field of mycotoxin detoxification. Future research should focus on multi-technology integration and intelligent upgrading, while developing efficient, safe, and economical comprehensive detoxification and degradation strategies to provide scientific support for grain and food safety.

Keywords: grain crop; mycotoxin; detoxification method; degradation mechanism

真菌毒素是由真菌在粮食生长、收获、贮藏等过程中产生的有毒次级代谢产物^[1],能够损害人体肝脏、肾脏和神经系统,部分具有致癌、致畸和致突变风险。这些毒素不仅危害人类健康,还会导致粮食产量和品质下降,造成

巨大的经济损失。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,全球约25%的粮食受到真菌毒素污染,每年导致10亿t农产品损失和数千亿美元的经济损失^[2-3]。目前,已确认的真菌毒素种类超过400种^[4],其中危害较大的包括黄曲霉

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(编号:23JRRA1265);甘肃省重点研发计划项目(编号:23YFNA0028);兰州市科技重点研发项目(编号:2022-2-65)

通信作者:孙建云(1976—),男,甘肃省疾病预防控制中心主任医师,硕士。E-mail:3280792349@qq.com

收稿日期:2025-03-01 **改回日期:**2025-11-09

引用格式:梁雪雪,张亚妮,骆珊,等. 粮食中真菌毒素的脱毒降解技术及研究进展[J]. 食品与机械,2026,42(3):197-204.

Citation:LIANG Xuexue, ZHANG Yani, LUO Shan, et al. Research progress on detoxification and degradation technologies for mycotoxins in grains[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 197-204.

毒素(aflatoxins,AFs)、赭曲霉毒素A(ochratoxins,OTA)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol,DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone,ZEN)和伏马菌素(fumonisin,FB)等40余种。在中国,由真菌毒素污染导致的粮食减产达3%~7%^[5],尤其在气候湿热的西南部地区,AFs对玉米和花生等作物的污染尤为严重^[6]。

为有效管理粮食中的真菌毒素,20世纪初的真菌毒素降解技术主要依赖物理筛选和简单处理,随着科技的进步,化学及生物降解技术逐渐成为主导。近年来,现代生物技术的快速发展使得基因编辑及纳米材料在该领域的应用越来越广泛。在早期控制阶段,可通过抑制真菌生长来减少真菌毒素的生成。例如,采用植物精油、生物防治剂、育种改良和田间管理等环保方法^[7],这些预防性措施着重于控制真菌的增殖,从而减少真菌毒素的生成。对于已经产生的真菌毒素,后期处理可以采用降解的方法,通过物理、化学和生物技术将其分解或转化为低毒或无毒物质。

然而,传统的脱毒及降解方法存在诸多不足,例如协

同作用研究较少,多种脱毒方法联合应用不足,产业化难度较大,且对环境影响的考虑不够充分。近年来,随着技术的不断进步,光催化脱毒法已得到了应用,多技术协同与智能化监测成为当前的发展趋势,且新型纳米吸附材料和耐高温脱毒酶等的发现也弥补了传统脱毒及降解技术的缺陷。此外,人工智能领域的兴起为食品安全领域带来了新的机遇,有望在真菌毒素污染控制中发挥至关重要的作用。

鉴于真菌毒素污染控制对于保障粮食安全的关键作用,文章对近年来在物理、化学和生物途径上的真菌毒素脱毒降解技术的研究进展进行综述,旨在为食品安全防控提供参考。

1 粮食中常见的真菌毒素

粮食作物中常见真菌毒素通常有AFs、OTA、DON、ZEN、T-2及FB等,其主要污染的粮食作物及其对人类或动物的危害见表1。为把风险降至最低,中国根据GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》来规范生产加工中的真菌毒素。

表1 粮食中常见的真菌毒素及其危害[†]

Table 1 Common mycotoxins in grains and their hazards

真菌毒素	主要受污染的粮食作物	危害	参考文献
AFs	玉米、水稻、花生	具有毒性、致癌性、诱变性和免疫抑制作用	[8—9]
OTA	谷物	肾毒性、肝毒性、免疫毒性、致畸性、神经毒性、胚胎毒性以及潜在致癌性	[10—11]
DON	小麦、玉米、大麦和土豆	具有神经毒性、生殖毒性、肠道毒性、免疫毒性等多种毒性	[12]
ZEN	玉米、小麦和大麦	通过雌激素效应、氧化损伤和细胞凋亡等途径引发肝脏、肾脏、子宫、睾丸等器官病变	[13]
T-2	玉米、小麦、大麦、燕麦和黑麦	可诱发细胞一遗传毒性和免疫毒性,并对人和动物的生殖发育、消化系统和肝脏、血液系统等产生毒性效应	[14]
FB	玉米、小麦和稻米	具有神经毒性、肺毒性、细胞毒性、生殖毒性、致癌性和免疫毒性	[15]

2 脱毒及降解方法

2.1 物理脱毒法

物理脱毒法是一种通过物理手段去除或减少食品和饲料中霉菌毒素的方法,涵盖了清洗、研磨、吸附、辐照、热处理、蒸汽爆破^[16]和光催化等多种技术。其核心优势在于操作流程相对简单,且通常为非破坏性处理方式,避免了化学试剂的使用,无化学残留风险。

然而,随着人们对食品口感和营养保留要求的不断提高,物理脱毒法在实际应用中可能会导致部分营养成分流失,这在一定程度上限制了其在某些特定场景下的应用效果。此外,尽管物理脱毒法通常设备要求简单、成本较低,但大量使用吸附剂或反复进行加热处理可能增加成本,同时仍难以完全避免毒素残留的风险。

2.1.1 热处理技术 热处理是食品加工中一种常见的处理真菌毒素的方式,主要通过高温、负压或高湿度等条件

来降解真菌毒素。该方法操作简单,能有效去除一些对热敏感的真菌毒素^[17],例如,Bretz等^[18]试验发现,在碱性条件下加热DON和3-乙酰脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-AcDON)可以降低其毒性。

在小麦加工过程中,热处理技术被广泛应用于降低真菌毒素含量。研究^[19]表明,通过烘焙、发酵等热处理步骤,可以显著降低小麦粉中的DON和ZEN。经过热处理后,DON的含量可降低至检测限以下。这种技术不仅提高了小麦制品的安全性,还保留了其营养成分^[20]。然而,对于热稳定性好的毒素如黄曲霉毒素B₁(AFB₁),热处理效果有限,需与其他方法结合使用。例如,先将AFB₁污染的花生样品在100℃下加热30 min,再进行5 kGy辐照处理,其降解效果优于单独热处理或辐照处理。

2.1.2 辐射技术 辐射技术^[21]是一种通过γ射线、电子束等电离辐射破坏真菌毒素结构的降解方法,具有高效、无

化学残留的特点。研究表明,辐射剂量与真菌毒素的降解率呈正相关。例如,0.1 mg/L 的 AFB₁ 溶液在 4 kGy 辐射剂量下,降解率超过 80%,而在 6 kGy 时可达 96%^[22]。此外, γ 射线辐照技术可用于处理受 AFB₁ 污染的粮食,如玉米、花生等。通过适当的辐照剂量,能够有效降低毒素含量,减少粮食在贮藏和加工过程中的霉变风险^[23]。 γ 射线(5 kGy)联合蒙脱石处理饲料时,ZEN 残留量降低至 10 μ g/kg 以下^[24]。然而,辐射技术也存在一定的局限性。

- ① 辐射本身具有一定的危险性,需要严格的安全防护措施。
- ② 辐射处理后可能产生废弃物,需要妥善处理。
- ③ 辐射技术需要特定设备,成本较高,大规模应用时需考虑经济性。虽然辐射技术在食品保鲜方面具有潜力,例如用于水果干和坚果等产品的保鲜,但由于设备要求和成本问题,其应用范围相对有限。相比之下,冷藏等传统保鲜方法在成本和可及性方面更具优势。

2.1.3 吸附技术 为了寻求一种更为环保高效的脱毒方法,邵建忠等^[25]利用活性炭、黏土、硅藻土吸附培养基中 85% 的伏马毒素 B₁(初始质量浓度为 200 μ g/mL),这种通过吸附剂与毒素结合形成稳定化合物的方法,有效弥补了传统物理脱毒法导致营养成分流失的不足。常用的吸附剂包括活性炭、膨润土、 β -环糊精—聚氨酯聚合物和壳聚糖等。其中改性蒙脱土吸附剂对 AFB₁ 吸附率可达 76.9% 和 55.2%^[26]。虽然天然吸附剂有一定效果,但性能和选择性不足。而新型纳米材料如石墨烯、金属有机框架和磁性纳米复合材料^[27]等,凭借其大表面积、良好分散性和丰富活性位点,展现出优异的生物相容性和吸附性能,如在粮食加工过程中,将磁性纳米吸附剂加入粮食中,通过搅拌等方式使吸附剂与粮食充分接触,随后利用外加磁场分离吸附剂^[28],该方法为真菌毒素物理吸附脱毒提供了良好前景。然而,新型吸附材料成本相对较高,违背了经济原则。

2.1.4 低温等离子体脱毒法 低温等离子体一般在相对较低的温度下操作,通常接近室温,不仅适用于农产品和食品领域,还可用于一些温度敏感的材料处理,对于多种类型的真菌毒素都有降解作用,尤其对一些难降解的毒素表现出较好的降解潜力。等离子体是物质的第 4 种基本状态,由带电物质和电子组成。低温等离子体通过产生光电子、离子和自由基等活性物质,能破坏微生物细胞结构,杀灭微生物,降解化学农药。其在食品安全领域主要应用于 AFs、DON 和 ZEN 的降解,等离子体的产生如图 1 所示。

低温等离子体技术在食品安全领域的应用逐渐受到重视,特别是在降解真菌毒素方面。李善瑞等^[29]研究了低温等离子体对粮食中典型真菌毒素(如 AFB₁)的降解效果。结果表明,低温等离子体产生的活性氧自由基(如 $\cdot$ OH、O₃、 $\cdot$ O₂⁻)通过氧化、裂解等途径破坏毒素的关键基团(如香

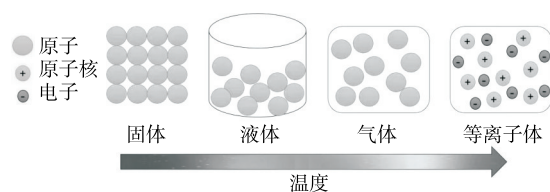


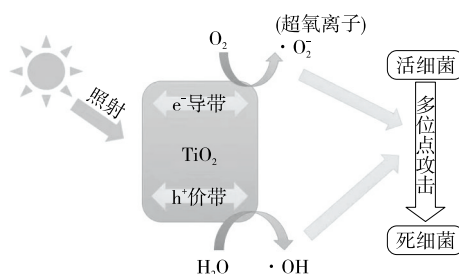
图 1 等离子体的产生示意图

Figure 1 Plasma generation process

豆素环、环氧基),显著降低其毒性。例如,在 160 kV 峰值电压、50 Hz 工作频率和 165 s 处理时间下,溶液中的 AFB₁ 降解率可达 99.62%;且在受 AFB₁ 污染的玉米中应用优化条件,180 s 处理时间下,降解率可达 39.29%,该方法在食品加工及贮藏过程中发挥了重要作用。

虽然该技术具有高效性、安全性等优点,但相关等离子体设备及配套装置造价高,且需要专业人员操作和维护设备。

2.1.5 光催化脱毒法 光催化脱毒技术因其良好的环保性及在利用太阳能等可再生资源方面具有独特的优势,能弥补低温等离子体在运行成本等方面的不足,因此在去除真菌毒素方面的应用日益受到关注。该技术通过光照激活光催化剂(如二氧化钛 TiO₂),生成强氧化活性自由基,如羟自由基($\cdot$ OH)和超氧化物阴离子($\cdot$ O₂⁻),从而降解污染物^[30]。光催化剂如 TiO₂ 和 ZnO 等,在光照下产生电子—空穴对,与氧气和水分子反应生成强氧化自由基^[31],使污染物矿化^[32]。如图 2 所示,光催化技术具有诸多优点:降解产物可完全矿化,无废物处理问题,反应条件温和,且成本较低。TiO₂ 因其稳定性、无毒和高催化活性,在处理水体和空气中的有毒有害物质方面显示出巨大潜力。此外,光催化技术还具有显著的抗菌效果^[33],因此在粮食、水果和蔬菜加工过程中,可用于去除加工原料或成品中污染的真菌毒素。

图 2 TiO₂光催化去除微生物机理Figure 2 Mechanism of microbial removal by TiO₂ photocatalysis

Tan 等^[34]成功合成了 CN-NaK-AP 纳米材料,结果显示,该材料在可见光下对粮食中常见的 AFB₁、ZEN 和 DON 具有良好的降解效果,降解率分别为 94.5% (45 min), 97.6% (15 min), 81.3% (60 min), 降解过程明确

了主要活性自由基和真菌活性位点,且降解产物毒素明显低于母体毒素,有效防止粮食在运输及加工过程中受到真菌污染。尽管光催化技术具备诸多显著优势,但仍面临一些亟待解决的挑战,如光催化剂的稳定程度、光源限制、材料回收以及成本较高等一系列问题,未来的研究仍需要提高光催化技术的安全性和经济性^[35]。

2.2 化学脱毒法

相比于物理脱毒法,化学脱毒法能够更深入地破坏毒素结构,降解效果更彻底,且适用范围更广,针对性更强。化学脱毒法主要通过化学试剂与真菌毒素发生化学反应来降解或破坏真菌毒素的分子结构,从而降低其毒性。涉及使用臭氧、电解氧化水、有机酸和天然植物提取物,还包括被许多国家广泛接受的食品添加剂。常见的化学脱毒方法包括氨处理法、氧化法、碱处理法和有机溶剂处理法等。

2.2.1 氨处理法 氨气或氨基化合物可以消除霉菌毒素的有害作用。氨基化合物通过多种化学反应机制(如亲核加成、开环反应、烷基化反应等)来影响真菌毒素的结构,从而达到降解的目的。氨气来源广泛且易于回收,降解 AFBs 的效率,因此具有极大的发展潜力。例如,利用氨气熏蒸法处理受到 AFB₁ 污染的花生,氨气体积分数 10%,熏蒸温度 40 ℃,熏蒸时间 96 h,最高降解率可达到 95.06%^[36],如图 3 所示。此外,氨处理能使真菌毒素的结构发生变化,更易于酶的作用,例如在处理 FB 污染玉米时,先进行氨处理,再加入相应的降解酶,可实现对 FB 的高效降解^[37]。

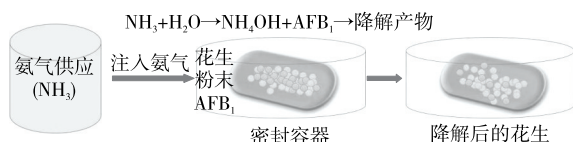


图 3 氨气处理受 AFB₁ 污染的花生示意图

Figure 3 Ammonia treatment for peanut contaminated with aflatoxin B₁ (AFB₁)

相比于其他碱性物质,氨气的碱性较弱且较少引起人体的不良反应。然而,该方法存在若干潜在风险,如营养成分损失以及试剂残留问题,同时需高温高压,可能生成毒性中间产物。因此,尽管氨气具备一定的降解真菌毒素的能力,但在实际应用中需要权衡其利弊。

2.2.2 熏蒸法 熏蒸法通过化学物质或改变环境条件,可破坏真菌毒素结构或抑制产毒真菌活性,从而降解或消除毒素,例如甲醛能使蛋白质变性。该方法适用于粮食、中药材、仓库等场所,通常不会对被处理对象的性质和结构产生明显影响,由于熏蒸剂以气体形式扩散,能均匀接触各个角落,通风后可较快挥发。例如,Yu 等^[38]研究表明,二氧化氯可有效降解 AFB₁,其降解产物无毒性,且

在玉米贮藏中对 AFB₁ 的去除率可达 70% 以上。但该方法可能存在熏蒸剂残留、生成有害副产品以及影响食品营养品质等问题。氧化剂(如臭氧)与熏蒸剂(如过氧化氢)协同作用可显著提高毒素去除率,减少单一处理方法的残留问题^[39]。因此,在实际应用中需权衡利弊,并严格遵循食品安全法规,确保食品的安全和质量。

2.2.3 臭氧脱毒法 臭氧脱毒技术凭借臭氧的强氧化性,能够降解粮食中的真菌毒素,通过破坏毒素的双键结构,产生多种中间产物,从而降低毒性^[40]。该技术被广泛用于降解花生中的 AFB₁ 和玉米中的 ZEN,影响其降解效果的因素包括样品与臭氧的接触面积、水分含量、温度、pH、臭氧处理浓度和处理时间等^[41]。例如,山长坡等^[42]研究表明,室温下,在臭氧质量浓度 89 mg/L,流量 1 L/min,搅拌速度 70 r/min,相对湿度 50%,处理时间 30 min 条件下,花生中 AFB₁、黄曲霉毒素 B₂(AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁(AFG₁)和黄曲霉毒素 G₂(AFG₂)的降解率分别达到了 82.6%,62.2%,71.1%,51.8%。同样,Santos 等^[43]研究表明,臭氧氧化过程中可以去除 ZEN 和 DON 的污染,且 ZEN 的降解速度比 DON 快。此外,美国小麦加工厂在清理分筛后增加臭氧喷淋,不仅可以有效减少小麦中的 DON^[44],同时还能杀灭昆虫和微生物,从而延长贮藏时间^[45]。这些研究及例子表明,臭氧脱毒技术在降低粮食中真菌毒素方面具有显著潜力和实际应用价值。然而,臭氧脱毒技术在食品领域的应用尚未广泛,存在一些限制因素,如低渗透性、半衰期短、残留气味及安全问题等。

2.3 生物降解法

生物降解法通过利用生物间的天然拮抗作用,抑制致毒真菌的代谢过程,从而减少真菌毒素的污染。该方法主要包括微生物吸附和微生物降解两种方式。前者是利用微生物细胞壁的吸附作用,将毒素固定在其表面,从而减少毒素在环境中的游离量。后者则是通过微生物分泌的酶促反应,将真菌毒素转化为低毒或无毒的产物。这种方法具有高效、安全、专一性强等优点,被认为是一种具有广泛应用前景的新技术。随着基因编辑技术的发展,“细胞工厂”在降解真菌毒素方面具有巨大潜力,为解决真菌毒素污染问题提供新的思路和方法。

2.3.1 微生物吸附法 某些微生物能够凭借其细胞壁的物理和化学特性吸附真菌毒素。这种吸附作用主要依赖于细胞壁中的多糖、蛋白质等成分与毒素之间的相互作用,如氢键、离子键和疏水作用力等。例如,乳酸菌的细胞壁成分能够与 FB 等真菌毒素结合,从而降低其毒性^[46-47]。小麦在生长和贮藏过程中容易受到 DON 的污染。而酵母菌因其细胞壁成分(如葡聚糖和甘露聚糖)能够有效吸附 DON^[48]。此外,磁性纳米材料与微生物吸附法联用,通过磁性纳米材料的高比表面积和吸附能力,进一步增强毒素的吸附效果^[49]。微生物吸附法操作简单,无复杂的设备和

苛刻的条件,但吸附性能受外界环境如温度、pH等影响较大,通常用于延长农产品的保存期限及品质。

2.3.2 微生物降解法 微生物降解真菌毒素是利用微生物或其分泌的酶将有毒真菌毒素转化为低毒或无毒代谢产物,该方法因其高效性、特异性、不可逆性以及降解产物毒性低等特点,成为当前研究的热点之一。例如,Yang等^[50]研究发现,*Burkholderia* spp.具有分解AFs的能力,AFB₁和AFB₂在60 h内降解率超过了85%。除此之外,大肠杆菌、酿酒酵母和毕赤酵母组成的细菌菌株是通过与毒素的相互作用来去除ZEN^[51]。原国家粮食局科学研究院开发的生物降解技术体系在小麦加工中应用,通过微生物降解和吸附技术,显著降低了小麦中DON含量。此外,该研究院还开发了以生物降解技术为主的真菌毒素降解技术体系,针对燃料乙醇生产副产物含可溶物的干酒糟(distillers dried grains with solubles, DDGS)中的ZEN、DON和AFB₁进行降解,在安徽中粮生化股份有限公司,利用该技术对500 t高毒素含量玉米产生的废醪进行脱毒处理,得到的DDGS中ZEN、DON和AFB₁的含量显著降低,符合国家相关卫生标准^[52]。以上例子表明利用微生物自身代谢来降解,相对化学方法更绿色环保,不会产生有害化学残留,且通常成本较低,适合大规模使用,尤其适用于蔬菜、水果等加工原料。

2.3.3 酶降解法 酶促反应依赖于特定的酶,这些酶能够催化真菌毒素分子中的化学键,从而改变其结构,降低或消除其毒性。例如,漆酶和过氧化物酶等能够降解某些真菌毒素^[53-54]。尽管酶促反应在理论上具有降解真菌毒素的潜力,但在实际应用中仍面临挑战,如酶的稳定性、成本效益、规模化生产和环境条件的适应性。例如,将DON污染的小麦粉(5 mg/kg)与环氧水解酶(50 U/g)在37℃反应12 h,DON降解率>80%,且处理后小麦粉加工不受影响^[55]。此外,安徽农业大学开发了一种OTA水解酶及其编码基因,该酶在温和条件下处理粮食和农副产品中OTA 12 h,OTA的降解率达到60%^[56]。

中国农业科学院农产品加工研究所的粮油减损与真菌毒素防控创新团队取得了两项重要研究成果,为真菌毒素的生物脱毒提供了新的理论基础和技术支撑。该团队发现了一株能够同时高效降解AFB₁和ZEN的不动杆菌。该菌具有较好的耐高温性,且温度越高,AFB₁和ZEN的降解率越高。此外,该菌株还表现出广泛的pH适应性,在pH为5~10时,AFB₁和ZEN的降解率可达到90%以上;且Na⁺、Cu²⁺和K⁺可显著提高该菌的降解能力^[57]。这一发现为开发同时降解多种真菌毒素的脱毒酶制剂提供了理论基础和技术支撑。该团队还发现了一种新型真菌毒素降解酶Amh1,其对OTA的降解效率极高,具备工业化应用潜力,并进一步探究了Amh1对OTA的降解机制。结果显示,在3 min内对OTA降解率达到100%,且具有极

强的热稳定性(30~70℃)和酸稳定性(pH 4~7)。在反应体系中添加Zn²⁺、Mn²⁺和Ca²⁺和Li⁺可显著提高Amh1活性^[58]。该研究为农产品毒素降解提供了重要资源,也为脱毒酶挖掘提供了新视角。

2.4 AI技术在食品安全领域的应用进展与挑战

近期,随着人工智能领域的快速发展,AI智能辅助食品安全已成为一个备受瞩目的热点话题。在食品安全领域,AI在风险识别和智能监测方面的应用已有诸多研究和综述^[59]。例如,AI驱动的创新降解技术不断涌现,涵盖纳米材料协同降解(AI设计功能化纳米颗粒)、等离子体技术(机器学习优化等离子体处理时间)以及生物—物理联用技术(AI筛选高效降解菌株)等。其中,AI在辅助降解酶的筛选、性能改造以及作用机制研究方面取得了显著进展。例如,陈坤^[60]通过理性蛋白改造和计算设计,成功提升了PET水解酶的热稳定性和催化效率。又如中国农业大学与河南亿万中元生物技术有限公司合作,以关键基因挖掘与功能鉴别为核心,建立真菌毒素降解酶/菌检索大语言模型,引入人工智能辅助设计,大幅缩短真菌毒素降解酶/菌筛选周期^[61]。且国家粮食和物资储备局科学研究院粮食储运研究所研发的离子透镜粮食霉菌消杀技术及装备,突破了传统化学熏蒸的局限,采用物理能场高效灭活粮食中的微生物、虫卵,并降解AFB₁、DON等真菌毒素。粮食以10~15 t/h的流量连续加入设备中进行处理,90 s即可完成。试验检测结果显示,经过处理后,各种微生物和虫卵灭活率>99.99%,对AFB₁、DON、ZEN等真菌毒素降解率可达75%~98%^[62],为粮食贮藏及加工提供了安全保障。而且通过精细化环境管理和多种先进技术集成(如智能传感监测、空气净化、纳米涂层、动态气调控、区块链溯源、超声波降湿、负离子调节、智能分区管理等),构建精准控制贮藏条件的防护体系,实现对霉菌毒素污染风险的全面防控,同时结合高灵敏度的在线检测筛查技术(如光谱分析、表面增强拉曼光谱、生物传感芯片、微流控芯片、石墨烯场效应晶体管等),实现了对食品表面霉菌毒素的快速识别与精准控制,为食品安全提供全方位保障^[63]。

然而,AI在食品安全领域的应用仍面临诸多挑战。

- ① 数据共享较为困难,导致数据孤岛现象普遍存在。
- ② 许多AI模型被视作“黑箱”,其决策过程难以理解,这在一定程度上限制了其在食品安全领域的广泛应用。
- ③ 数据的隐私与合规性、数据质量与完整性等问题也亟待解决。未来,随着技术的不断完善和数据共享机制的改进,AI有望在保障全球食品安全、应对复杂多变的食品安全问题上发挥更为重要的作用。

3 结论

真菌毒素作为天然污染物难以避免,其广泛分布使防控备受关注。物理脱毒快速简便但操作复杂、成本高;

化学脱毒安全高效但有化学残留与污染;生物降解绿色高效而部分机理不明。降解时,可依据原材料特性与加工要求选择合适方法,也可将物理、化学、生物 3 种方法结合提升效果。与传统脱毒方法相比,人工智能辅助的脱毒技术具有显著优势。它能够实现快速检测、精准识别和高效处理,大幅提升脱毒效率。因此,人工智能辅助脱毒技术有望成为未来脱毒及降解领域的重要发展方向。

参考文献

- [1] WANG L, HUA X, SHI J, et al. Ochratoxin a: occurrence and recent advances in detoxification[J]. *Toxicon*, 2022, 210: 11-18.
- [2] 李文廷, 叶沛, 刘玲, 等. 粮食作物中真菌毒素脱毒技术及其防控措施研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(9): 1-7.
LI W T, YE P, LIU L, et al. Research progress on detoxification technology of mycotoxins in grain crops and its prevention and control measures[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(9): 1-7.
- [3] 纪剑, 于坚, 王良哲, 等. 真菌毒素的降解技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(5): 1-10.
JI J, YU J, WANG L Z, et al. Research progress in mycotoxin degradation technology[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(5): 1-10.
- [4] 马帅, 李安, 潘立刚. 真菌毒素脱毒技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 377-383.
MA S, LI A, PAN L G. Research progress in the detoxification technology of mycotoxins[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 377-383.
- [5] 闫兆凤, 黄常刚, 杨欣. 中国主粮中真菌毒素污染现状[J]. *卫生研究*, 2022, 51(4): 685-691.
YAN Z F, HUANG C G, YANG X. Current status of mycotoxin contamination in China's staple grains[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2022, 51(4): 685-691.
- [6] KUMAR P, GUPTA A, MAHATO D K, et al. Aflatoxins in cereals and cereal-based products: occurrence, toxicity, impact on human health, and their detoxification and management strategies[J]. *Toxins (Basel)*, 2022, 14(10): 687.
- [7] 曹慧英, 伍松陵, 沈晗, 等. 粮食中真菌毒素的控制策略[J]. *粮油食品科技*, 2012, 20(6): 45-48.
CAO H Y, WU S L, SHEN H, et al. Control strategy against mycotoxins in grain [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2012, 20(6): 45-48.
- [8] 胡海生, 高洁, 杨厚兵, 等. 粮食中真菌毒素及其代谢物的产生和影响[J]. *食品安全导刊*, 2024(8): 167-169.
HU H S, GAO J, YANG H B, et al. Production and influence of mycotoxins and their metabolites in grain[J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(8): 167-169.
- [9] GUO Y P, ZHAO L H, MA Q G, et al. Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: a review[J]. *Food Research International*, 2021, 140: 109878.
- [10] 邢福国, 刘一冰, 王刚. 食品中赭曲霉毒素 A 的产生机制及污染防控策略[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(4): 26-37.
- XING F G, LIU Y B, WANG G. Production mechanisms and control strategies of ochratoxin A in food[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(4): 26-37.
- [11] ZOU D, JI J, YE Y L, et al. Degradation of ochratoxin a by a uv-mutated *Aspergillus niger* strain[J]. *Toxins (Basel)*, 2022, 14(5): 343.
- [12] 李杰峰. 缺氧微环境下 DON 诱发 RAW264.7 细胞衰老的分子机制[D]. 荆州: 长江大学, 2023: 1-9.
LI J F. Molecular mechanism of don-induced raw264.7 cell senescence under hypoxic microenvironment[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023: 1-9.
- [13] 邓子锋, 王利娟, 吴希强, 等. 玉米赤霉烯酮在动物体内的代谢与分子毒性研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(12): 5 194-5 203.
DENG Z F, WANG L J, WU X Q, et al. Research progress on metabolism and toxicity of zearalenone in animals[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(12): 5 194-5 203.
- [14] 杨建英, 李元晓. T-2 毒素对机体的毒性作用研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(10): 957-959.
YANG J Y, LI Y X. Toxic effects of T-2 toxin on organism: a review of recent studies[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(10): 957-959.
- [15] 高玲玲. 伏马菌素的毒性及去除方法分析[J]. *化工管理*, 2019(29): 175-176.
GAO L L. Analysis of the toxicity and removal methods of fumonisins[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019(29): 175-176.
- [16] 汤小朋, 陈磊. 棉籽粕脱毒技术及其在家禽生产中的应用研究进展[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2020, 35(1): 180-186.
TANG X P, CHEN L. Advance in detoxication technology of cottonseed meal and its application in poultry production[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35(1): 180-186.
- [17] 金瑞, 李萌萌, 万小乐, 等. 谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇物理降解研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(13): 331-339.
JIN R, LI M M, WAN X L, et al. Advances in physical degradation of deoxynivalenol in cereals[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(13): 331-339.
- [18] BRETZ M, BEYER M, CRAMER B, et al. Thermal degradation of the *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(17): 6 445-6 451.
- [19] ALVITO P, BARCELO J, MEESTER J D, 等. 消减食品加工过程中的真菌毒素: 来自欧洲和东南亚的经验分享[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(6): 46-58, 23-24.
ALVITO P, BARCELO J, MEESTER J D, et al. Mitigation of mMycotoxins during food processing: sharing experience among europe and south east asia [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(6): 46-58, 23-24.
- [20] LIU Y X, LI M M, BIAN K, et al. Reduction of

- deoxynivalenol in wheat with superheated steam and its effects on wheat quality[J]. *Toxins*, 2019, 11(7): 414.
- [21] 李颖, 张锐利. 真菌毒素物理降解的研究进展[J]. *现代食品*, 2022, 28(17): 27-31.
- LI Y, ZHANG R L. Research progress in physical degradation of mycotoxins[J]. *Modern Food*, 2022, 28(17): 27-31.
- [22] 杨静. 农产品中真菌毒素污染辐射降解效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009: 19-20.
- YANG J. Research on irradiation-induced degradation of mycotoxins in agricultural products[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 19-20.
- [23] BOZIDAR U, SLAVICA S, NIKOLA T, et al. Evaluation of ultraviolet irradiation effects on *Aspergillus flavus* and aflatoxin B₁ in maize and peanut using innovative vibrating decontamination equipment[J]. *Food Control*, 2022, 134: 108691.
- [24] 王守经, 柳尧波, 胡鹏, 等. 辐照处理对黄曲霉毒素B₁的降解效果研究[J]. *山东农业科学*, 2015, 47(11): 116-119.
- WANG S J, LIU Y B, HU P, et al. Study on degradation effect of irradiation on aflatoxin B₁[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(11): 116-119.
- [25] 邵建忠, 潘雪男, DEVREESE M, 等. 活性炭在吸附猪体内呕吐毒素(DON)上的功效[J]. *国外畜牧学(猪与禽)*, 2015, 35(5): 97-99.
- SHAO J Z, PAN X N, DEVREESE M, et al. Efficacy of active carbon towards the absorption of deoxynivalenol in pigs[J]. *Animal Science Abroad: Pigs and Poultry*, 2015, 35(5): 97-99.
- [26] NONES J, NONES J, POLI A, et al. Organophilic treatments of bentonite increase the adsorption of aflatoxin B₁ and protect stem cells against cellular damage[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2016, 145: 555-561.
- [27] JI J M, XIE W L. Detoxification of aflatoxin B(1) by magnetic graphene composite adsorbents from contaminated oils[J]. *J Hazard Mater*, 2020, 381: 120915.
- [28] SHEN Z T, KUANG Y X, ZHOU S X, et al. Preparation of magnetic adsorbent and its adsorption removal of pollutants: an overview[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 167: 117241.
- [29] 李善瑞, 赵璐玲, 严文静, 等. 低温等离子体对黄曲霉毒素B₁的降解效能[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(4): 271-277.
- LI S R, ZHAO L L, YAN W J, et al. Degradation efficiency of aflatoxin B₁ by cold plasma[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 271-277.
- [30] NARAGINTI S, SATHISHKUMAR K, LAVANYA K, et al. Sunlight-driven intimately coupled photocatalysis and biodegradation (SDICPB): a sustainable approach for enhanced detoxification of triclosan[J]. *Chemosphere*, 2023, 336: 139210.
- [31] WU S J, WANG F, LI Q, et al. Detoxification of DON by photocatalytic degradation and quality evaluation of wheat[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(59): 34 351-34 358.
- [32] 程荣, 邓子祺, 夏锦程, 等. 光催化系统灭活微生物气溶胶的研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(2): 957-968.
- CHENG R, DENG Z Q, XIA J C, et al. Research progress on photocatalysis systems for inactivation of microbial aerosol[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(2): 957-968.
- [33] THABET S, SIMONET F, LEMAIRE M, et al. Impact of photocatalysis on fungal cells: depiction of cellular and molecular effects on *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2014, 80(24): 7 527-7 535.
- [34] TAN H X, CHEN J M, WANG P, et al. Design of carbon nitride photo-catalysts based on defect engineering and metal doping for enhanced visible-light-driven activity of mycotoxins degradation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 508: 160893.
- [35] 施晶晶, 刘宽博, 王永伟, 等. 光催化技术降解粮油中真菌毒素的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(2): 66-70.
- SHI J J, LIU K B, WANG Y W, et al. Recent advances in mycotoxin degradation by photocatalytic technology in grain and oil[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(2): 66-70.
- [36] 赵国斌. 氨气熏蒸法降解花生中的黄曲霉毒素B₁[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(3): 111-113.
- ZHAO G B. Degradation of aflatoxins B₁ which in peanut by ammonia gas method[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(3): 111-113.
- [37] 徐瑾, 伍松陵, 常晓娇, 等. 伏马毒素生物合成和降解的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(7): 119-123, 128.
- XU J, WU S L, CHANG X J, et al. The development of research on fumonisins' biosynthesis and degradation[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2013, 28(7): 119-123, 128.
- [38] YU Y, SHI J Y, XIE B Y, et al. Detoxification of aflatoxin B(1) in corn by chlorine dioxide gas[J]. *Food Chem*, 2020, 328: 127121.
- [39] SHI Y W, XING Y M, MA C, et al. Degradation of aqueous organic pollutants by dual oxidant advanced oxidation processes: a comprehensive review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114174.
- [40] AFSAH-HEJRI L, HAJEB P, EHSANI R J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1 777-1 808.
- [41] 刘芳, 李萌萌, 卞科. 臭氧对食品中真菌毒素的降解效果及影响因素研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 282-286, 293.
- LIU F, LI M M, BIAN K. Recent progress in the degradation effects of mycotoxins in food with ozone and the related influencing factors[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(18): 282-286, 293.
- [42] 山长坡, 刁恩杰, 王宇晓, 等. 臭氧降解花生中黄曲霉毒素的

- 设备及应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 243-247.
- SHAN C P, DIAO E J, WANG Y X, et al. Equipment and application for ozone degradation of aflatoxins in contaminated peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 243-247.
- [43] SANTOS ALEXANDRE A P, VELA-PAREDES R S, SANTOS A S, et al. Ozone treatment to reduce deoxynivalenol (DON) and zearalenone (ZEN) contamination in wheat bran and its impact on nutritional quality[J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2018, 35(6): 1 189-1 199.
- [44] ZHU F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 358-366.
- [45] SIVARANJANI S, PRASATH V A, PANDISELVAM R, et al. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111412.
- [46] NIDERKORN V, MORGAVI D P, ABOAB B, et al. Cell wall component and mycotoxin moieties involved in the binding of fumonisin B₁ and B₂ by lactic acid bacteria[J]. J Appl Microbiol, 2009, 106(3): 977-985.
- [47] TORRIJOS R, DE MELO NAZARETH T, VILA-DONAT P, et al. Use of mustard extracts fermented by lactic acid bacteria to mitigate the production of fumonisin B₁ and B₂ by *Fusarium verticillioides* in corn ears[J]. Toxins (Basel), 2022, 14(2): 80.
- [48] CHATTARAJ S, MITRA D GANGULY A, et al. A critical review on the biotechnological potential of brewers' waste: challenges and future alternatives[J]. Current Research in Microbial Sciences, 2024, 6: 100228.
- [49] 徐晓艳, 王宇, 王梦瑶, 等. 中药材中真菌毒素的检测与脱毒研究进展[J]. 中草药, 2024, 55(2): 657-669.
- XU X Y, WANG Y, WANG M Y, et al. Research progress on detection and detoxification of mycotoxins in Chinese medicinal materials[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(2): 657-669.
- [50] YANG X A, CHEN X J, SONG Z Q, et al. Antifungal, plant growth-promoting, and mycotoxin detoxification activities of *Burkholderia* sp. strain XHY-12[J]. 3 Biotech, 2020, 10 (4): 158.
- [51] GARI J, ABDELLA R. Degradation of zearalenone by microorganisms and enzymes[J]. PeerJ, 2023, 11: e15808.
- [52] 孙长坡. 国家粮科院酒糟蛋白(DDGS)中真菌毒素“三合一”规模化消减技术[EB/OL]. (2018-05-21) [2025-06-15]. https://gdgrain.gd.gov.cn/lshwzcbkj/gfxxfb/kjcg/lyjg/content/post_2471465.html.
- SUN C P. "Three-in-one" Large-scale detoxification technology for mycotoxins in ddgs by the national grain science institute[EB/OL]. (2018-05-21) [2025-06-15]. https://gdgrain.gd.gov.cn/lshwzcbkj/gfxxfb/kjcg/lyjg/content/post_2471465.html.
- [53] AZA P, CAMARERO S. Fungal laccases: fundamentals, engineering and classification update[J]. Biomolecules, 2023, 13(12): 1 716.
- [54] LINDE D, AYUSO-FERNÁNDEZ I, LALOUX M, et al. Comparing ligninolytic capabilities of bacterial and fungal dye-decolorizing peroxidases and class-ii peroxidase-catalases[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(5): 2 629.
- [55] 武爱波, 郭立佳, 杨文杰, 等. 呕吐毒素对动物危害的研究进展及解决策略分析[J]. 饲料工业, 2025, 46(7): 1-8.
- WU A B, GUO L J, YANG W J, et al. Research advances for hazardous of deoxynivalenol to animals and related control strategies[J]. Feed Industry, 2025, 46(7): 1-8.
- [56] 荆丹丹, 赵丽娟, 徐静. 粮食与饲料脱霉专利技术研究动向与政策支撑[J]. 饲料工业, 2023, 44(14): 104-112.
- JING D D, ZHAO L J, XU J. Research trend and policy support of patent technology on mycotoxin removal in grain and feed[J]. Feed Industry, 2023, 44(14): 104-112.
- [57] ADEGOKE T V, YANG B L, TIAN X Y, et al. Simultaneous degradation of aflatoxin B and zearalenone by Porin and Peroxiredoxin enzymes cloned from *Acinetobacter nosocomialis* Y1[J]. J Hazard Mater, 2023, 459: 132105.
- [58] WANG G, WU W Q, KELLER N P, et al. *Metarhizium* spp. encode an ochratoxin cluster and a high efficiency ochratoxin-degrading amidohydrolase revealed by genomic analysis[J]. Journal of Advanced Research, 2025, 72: 85-95.
- [59] 盛利娜, 纪剑, 宋晓宁, 等. 人工智能辅助食品安全主动防控研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 14-27.
- SHENG L N, JI J, SONG X N, et al. Advances in artificial intelligence-assisted proactive prevention and control of food safety[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 14-27.
- [60] 陈坤. 改造和固定化 PET 水解酶提高 PET 的生物催化降解性能[D]. 天津: 天津大学, 2022: 119-121.
- CHEN K. Engineering and immobilizing PET hydrolytic enzymes for improving biocatalytic PET degradation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022: 119-121.
- [61] PAN J F, DENG F, LIU Z, et al. Toehold-mediated cascade catalytic assembly for mycotoxin detection and its logic applications[J]. Analytical Chemistry, 2022, 94(8): 3 693-3 700.
- [62] 中国发展改革报社. 节粮减损“黑科技”让粮食全产业链更上层楼 [EB/OL]. (2025-06-10) [2025-06-16]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_30960371.
- China Development Reform Press. "Black technology" For grain loss reduction and efficiency improvement in the entire grain industry chain[EB/OL]. (2025-06-10) [2025-06-16]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_30960371.
- [63] 宋洪春. 食品贮藏过程中的真菌毒素控制与防护技术探析[J]. 食品安全导刊, 2025(10): 109-111.
- SONG H C. Analysis of fungal toxin control and protection techniques during food storage[J]. China Food Safety Magazine, 2025(10): 109-111.