生物技术进展 2023 年 第 13 卷 第 6 期 853~862
Current Biotechnology ISSN 2095-2341

进展评述
Reviews

黄曲霉毒素降解技术研究及应用进展

李雨薇， 吕家硕， 于一凡， 刘晓晖， 刘成珍*

青岛大学生命科学学院，山东 青岛 266071

摘 要： 黄曲霉毒素是由多种曲霉属真菌产生的强致癌物，在多种恶劣环境中有极高的稳定性，该毒素分布广泛，与人类和动物接触可能性较大，因此也被认为是人类和动物最重要的饮食风险因素之一。此外，在降解黄曲霉毒素的过程中仍有可能会产生其他有毒物质，加之某些降解技术可能会破坏营养物质的结构，从而降低产品质量。黄曲霉毒素污染问题给全球卫生体系和食品工业造成了巨大负担。尽管降解黄曲霉毒素的方法多种多样，但仍未能找出一种比较完美的方法解决黄曲霉毒素的污染问题，因此寻求一种高效安全的黄曲霉毒素降解技术成为当代科研工作者研究的热点。综述了黄曲霉毒素的致毒机理、常用的降解方法及其优缺点，系统总结了生物法和新型纳米材料在黄曲霉毒素降解中的研究进展。目前使用生物技术手段和新型纳米材料降解黄曲霉毒素有着较高的生物安全性和高效性，因而未来可将黄曲霉毒素新型降解方法的研究聚焦于此，期望为科研工作者进一步开发黄曲霉毒素的降解方法提供助力。

关键词： 黄曲霉毒素；致毒机理；降解方法；生物安全

DOI：10.19586/j.2095-2341.2023.0096

中图分类号： Q949.32, TS205 **文献标志码：** A

Research and Application Progress in Degradation of Aflatoxin

LI Yuwei, LYU Jiashuo, YU Yifan, LIU Xiaohui, LIU Chengzhen*

School of Life Sciences, Qingdao University, Shandong Qingdao 266071, *China*

Abstract: Aflatoxins (AFTs) are potent carcinogens produced by multiple strains of the *Aspergillus* genus, which show extremely high stability in different harsh environments, so it is also considered to be one of the most important dietary risk factor for humans and animals. Furthermore, other toxic materials may also be generated in the degradation process of AFTs, and the degradation methods might destroy the structure of nutrients, and then decrease the quality of products ultimately. The contamination of aflatoxins places a huge burden on global health systems and the food industry. Although there are many ways to degrade aflatoxins, there is still no way to solve the problem of aflatoxins pollution perfectly, so searching for a technology which can eradicate aflatoxins effectively and safely has become a research hotspot for contemporary researchers. In this article, we summarized the mechanism of aflatoxin toxicity and reviewed several methods of AFTs degradation. We also summarized the advantages and disadvantages of these techniques, in which the research progress of using biological methods and nanomaterials to remove AFTs was recaptitulated systematically. At present, the use of biotechnological means and nanomaterials to degrade aflatoxins has commendable biosafety and efficiency, so the generation of new degradation techniques in the future might revolve around this. Therefore, this paper attempted to support researchers to develop new degradation methods of AFTs.

Key words: aflatoxin; toxicity mechanism; degradation method; biosecurity

黄曲霉毒素（aflatoxins，AFTs，相对分子质量312~346 kD）是由黄曲霉、寄生曲霉、集蜂曲霉以及某些曲霉亚种等多种真菌所产生的一类无色无味的次生代谢产物，具有极强的毒性，可诱导发生致癌、致毒和致畸形作用[1]。此外，由于该毒素分布广泛，人类在与受污染农产品及使用受污染饲

收稿日期：2023-07-27；**接受日期：**2023-10-27
基金项目：山东省大学生创新创业训练计划项目（202211065054）。
联系方式：李雨薇 E-mail: 2684382240@qq.com；*通信作者 刘成珍 E-mail: liuchengzhen2014@163.com

料喂养所得的动物性产品的接触和摄入过程中难免会直接或间接地触及黄曲霉毒素，从而导致毒害发生[2]。1993年，黄曲霉毒素被世界卫生组织癌症研究所列为Ⅰ级强致癌物质[3-4]，目前已发现并确定结构的黄曲霉毒素有二十多种，其中黄曲霉毒素B1（aflatoxins B1，AFB1）致癌性最强[5]。研究发现，人类长期小剂量摄入AFB1会导致胚胎畸形、变异、诱发原发性癌症等，使生物体产生免疫抑制并诱导基因突变，而一次性大量摄入则会造成急性中毒甚至死亡，且AFB1亦可残留于动物产品中进一步危害人类健康，加之黄曲霉毒素在谷物、油脂、香料和水果中均有很高的检出率，因此黄曲霉毒素已对人们正常的社会生产生活造成严重负面影响[6]。

一般而言，控制黄曲霉及黄曲霉毒素污染的策略有灭活黄曲霉、干扰黄曲霉毒素的生物合成和降解黄曲霉毒素，如加热、超声等物理手段，以及氧化剂等化学药剂处理方法[7-9]。这些方法在工业生产上得到了广泛应用[10-11]，但也伴随着营养损失、耗时长、有毒物质引入和污染环境等缺点[6]。面对黄曲霉毒素对正常社会生活造成的严重负面影响，找到一种高效、生物安全、环境友好的黄曲霉毒素降解方法成为当今的研究热点。本文以物理、化学、生物、新型材料方法为主体，对黄曲霉毒素降解方法进行了综述，介绍了每种方法的降解效率及使用过程中的优缺点，着重总结了生物方法和新型材料在黄曲霉毒素降解方面的应用，以期为黄曲霉毒素降解研究提供新思路。

1 黄曲霉毒素B1的致毒机理

AFB1已经被证实对人类和多种动物具有毒害作用，且根据暴露在AFB1中的时间长短和环境中AFB1剂量不同，个体产生的反应也有所差异。AFB1毒性靶点是多种多样的，其毒性作用包括 肝毒性、致畸性、免疫毒性、血液疾病、诱发染色体畸变以及DNA不正常合成和DNA链断裂等[12-13]。

AFB1主要通过在生物体中产生相关活性代谢产物而引发一系列致毒反应。生物体代谢过程中肝脏酶系会产生大量自由基，AFB1通过影响体内的抗氧化酶系统，引起机体氧化应激损伤，从而抑制机体对肝脏代谢所产生的氧自由基的清除，使自由基可直接攻击细胞中的蛋白质、DNA等生物大分子，进而损伤机体功能。当动物摄入AFB1后，在细胞色素P450微粒体氧化酶的作用下，AFB1经代谢变为AFB1-8，9-环氧化物。AFB1-8，9-环氧化物与赖氨酸的ε-氨基共价结合，生成AFB1-赖氨酸加合物，导致肝脏细胞死亡。此外，在细胞色素P450微粒体氧化酶参与的情况下，诱导AFB1-DNA加合物的形成，使AFB1代谢为AFB1-8，9-环氧化物，从而引起人体抑癌基因*P53*的热性突变。虽然部分AFB1-8，9-环氧化物会在谷氨酰胺转移酶作用下生成AFB1谷胱氨肽结合物或AFB1-二氢二醇，在醛还原酶作用下进一步生成AFB1-二羟醇，经肾脏排泄出机体，但仍有大部分剩余的AFB1会对机体造成损害。AFB1通过诱导形成DNA加合物引发癌症，并且会导致靶细胞遗传改变，诱发DNA链断裂并致使DNA碱基受损。此外，暴露在AFB1中致使DNA修复活性的改变也被认为是AFB1诱导肿瘤发生的主要决定因素[14]。AFTs的基本结构为双呋喃环和香豆素，内酯环存在于其一般结构式中，只有内酯环被打开时，毒性才会消除（图1）。

2 黄曲霉毒素物理降解方法

针对农林、畜牧、食品药品、医疗卫生等行业中经常出现黄曲霉毒素污染的问题，人们通常采用霉变部分高温高压法、吸附降解法、有机溶剂萃取法等物理方法降解黄曲霉毒素。然而，这些方法因过程繁杂、副产物利用率低且无法有效处理而难以在大规模批量生产中应用。现有研究通过辐照、超声及其他先进技术手段降解黄曲霉毒素，本节对几种物理方法的效果、作用机理等进行了简要总结与分析（表1）。

2.1 辐照处理

辐照处理是一种通过吸收高能或与高活性化学物质相互作用诱导霉菌毒素分子分解来降解黄曲霉毒素的方法，可以用于降解食品中的有毒物质。这种非热技术包括电离辐射（如伽马射线和电子束）以及非电离辐射（如紫外线、阳光和脉冲光）。这两种辐射形式都可以有效消除或大幅减少病原微生物的数量，从而阻止真菌毒素的产生，并有效降解食物中已经存在的真菌毒素[7]。Liu等[15]研究发现，电子束辐照可以显著降解作

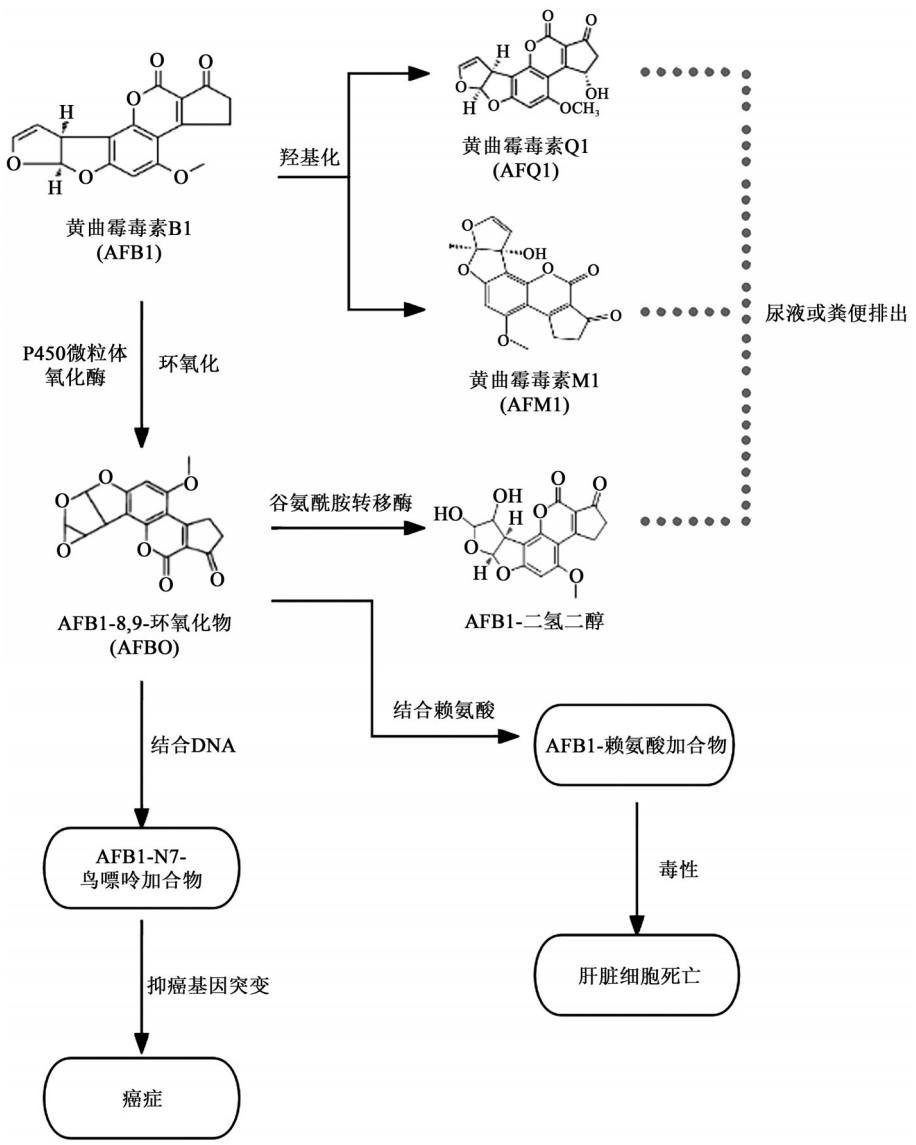

图1 AFB1致毒机理图

Fig. 1 Biotoxication mechanism of AFB1

物中的AFB1,AFB1的降解率随着作物中AFB1的初始浓度以及水分活度的降低而降低。Qi等[16]通过使用可以产生短而强烈的宽光谱白光的脉冲光加工技术,对果汁饮料中的黄曲霉毒素进行降解处理,并深入地研究了降解机制和此技术对于饮料品质的影响。经测定,经脉冲光照射40次后,果汁中AFB1、AFB2、AFG1和AFG2的降解率分别可达72.09%、73.65%、57.06%和69.69%。加之脉冲光处理对果汁品质影响不大,因此脉冲光是一种很有前途的黄曲霉毒素降解技术。Li等[17]发现最佳处理条件为臭氧浓度5 mg·L^{-1},紫外线和臭氧处理时间30 min。臭氧和紫外线联合使用对AFB1的解毒具有协同作用,并且比单独使用臭氧或紫外线更能有效地降解AFB1。此外,AFB1比AFB2、AFG1和AFG2对紫外线和臭氧处理更敏感,因此该技术针对AFB1处理具有良好的降解效果。[18]。

2.2 冷大气压等离子体

冷大气压等离子体是人们熟知的一种材料,已在医疗保健、环境修复和污染控制、材料加工、电化学、纳米技术等领域得到广泛应用,近年来已成为一个热门的研究领域[19]。作为一种能够降解持久性化学污染的高效降解技术,冷大气压等离子体在环境空气中产生时会伴生大量带电或中性物质,包括电子、离子、紫外线光子、活性氮和活性氧等物质。活性氮和活性氧与其他物

理化学现象同时产生，赋予了空气等离子体的氧化还原性质，使之能够降解复杂的化学分子。Hojnik等[20]发现AFB1末端呋喃环上8和9位碳原子之间的乙烯基键的快速断裂对于抑制毒性潜能至关重要，并通过冷大气压等离子体可在60 s内几乎完全降解AFB1，120 s内实现AFB1零残留。该法与紫外线照射相比，在时间上具有呈数量级式减少的效率优越性，然而完全降解AFB1需要其在基质上暴露更长的时间，因此该方法仍需进一步研究。

2.3 超声波处理

超声波作为一种新兴的去污技术，能在保证新鲜农产品品质的前提下实现高效去污，在全球食品加工业中具有潜在的应用前景[21]。研究发现，超声波处理通过破坏AFB1呋喃环中的C_8=C_9双键并修饰内酯环和甲氧基，显著降低了AFB1的生物活性和毒性，经测定，超声波处理80 min后，AFB1降解率为85.1%，降解效果显著[22]。未来超声波处理可以扩大研究范围，拓展其在小麦等食物基质中的潜在应用。

表1 不同物理方法比较

Table 1 Comparison of different physical methods

处理方法	优点	缺点	适用范围
脉冲光辐照[16]	营养物质损失较少，环境影响小	降解毒素机制和降解产物毒性强弱不明	果汁、啤酒等饮品
电子束辐照[15]	加工时间短、效率高、热量低	辐照产物和降解产物毒性不明确	花生、玉米等固态食品
臭氧和紫外线照射联用[17]	原料中营养物质损失较少	降解产物毒性不明确	花生、玉米等固态食品
超声波处理[22]	对环境影响小	降解产物毒性尚不明确	花生、玉米等固态食品

3 黄曲霉毒素化学降解方法

化学处理方法主要是通过氧化、水解或加成反应活化AFB1分子并使其降解。目前，人们已经发现多种能够降低黄曲霉毒素含量或降解黄曲霉毒素的化学物质，主要包括过氧化氢、各类氧化剂等(表2)。

3.1 紫外线和过氧化氢联用技术

紫外线和过氧化氢联用技术是一种比较好的降解黄曲霉毒素的方法[23]。其中，过氧化氢可以解离出能够降解黄曲霉毒素的自由基。紫外线照射过氧化氢会产生比单独使用过氧化氢多得多的自由基，提高降解速率，以便在更短的时间内对黄曲霉毒素污染的食物进行解毒。然而，由于自由基可与食物中大多数有机化合物发生反应，因此需对处理后食品的残留毒性进行深层研究。

3.2 臭氧处理

臭氧是一种强氧化剂，通过对黄曲霉毒素呋喃环的C_8=C_9双键亲电攻击，使黄曲霉毒素转为初级臭氧化物，然后重排为醛、酮和有机酸等一氮化物衍生物，从而实现黄曲霉毒素的降解。作为一种强大的抗菌物质，臭氧多年来一直被用作各种水的消毒，包括饮用水、游泳池、水疗中心、海洋水族馆，以及市政用水和污水处理，还可防止冷却塔结垢。此外，臭氧还可用于肉类、蔬菜、水果、鱼类以及草药、香料和饮料行业[24-26]。臭氧的浓度、处理时间、温度、水分活度等因素都会影响黄曲霉毒素的降解效果[9]。Agriopoulou等[27]在使用经臭氧处理过的三蒸水体系降解黄曲霉毒素时发现，气态臭氧降解黄曲霉毒素的效果非常好，可以实现反应体系中AFB1和黄曲霉毒素G1的完全降解。然而，臭氧降解黄曲霉毒素在食品中的应用是有限的，臭氧代谢产物可能会影响食品的营养价值，不符合食品安全原则，并且由于认知问题通常会引起消费者对这种方法的质疑[28]。同时，综合考虑臭氧各项应用条件，臭氧的使用不符合发展中国家对产品制造技术的成本要求，适用性低[29]。

3.3 电解氧化水

电解氧化水是通过电解除氯化钠以外无任何其他化学物质的纯水，在这个过程中会产生两种类型的水：中性氧化电解水和酸性氧化电解水，已有报道证明电解氧化水具有非常有效的抗菌活性[30]。Zhang等[31]发现酸性氧化电解水的pH<3.0，且有效氯浓度高，主要以氯气和次氯酸的形式存在。在一定条件下，酸性氧化电解水通过高水平的有效氯浓度可以净化处理被真菌污染的花生中含有的AFB1，经处理后的样品大约有85%的

AFB1被净化。此外,经酸性氧化电解水处理后的花生中的营养成分及外观颜色均未发生显著变化,且环境温度和浸泡时间均对AFB1在污染花生中的降解率有显著影响。当环境温度为25 ℃或45 ℃时,AFB1的降解效果最好,受污染的花生在酸性电解氧化水中浸泡15 min,可有效降解AFB1。

表2 不同化学方法比较

Table 2 Comparison of different chemicial methods

处理方法	优点	缺点	适用范围
紫外线和过氧化氢联用技术[23]	降解速率快	食物的口感风味和营养价值会受到影响	固体食物
臭氧处理[27]	降解效率高	时间长、有毒性和爆炸性	新鲜农产品
电解氧化水[31]	有害化学物质残留少	安全性尚不明确	体积较小,比表面积足够大的物质

4 黄曲霉毒素生物学降解方法

近年来,生物学降解黄曲霉毒素方法因其天然、生物安全、操作简单、毒副作用较小等特征而备受人们关注,也成为热门的研究方向。本节主要分析微生物和生物细胞提取物及生物基材料用于降解黄曲霉毒素的研究进展,以系统性介绍生物学方法降解黄曲霉毒素的机理及效能。

4.1 微生物

4.1.1 *益生菌* 益生菌可以用作食品、药品、补充剂中的重要成分。目前研究和使用最广泛的益生菌有乳酸杆菌、双歧杆菌、大肠杆菌、酵母、肠球菌等。益生菌可以为人体提供一些帮助,例如缓解乳糖不耐受的症状、维持肠道稳态环境以及调节免疫反应和减轻炎症等。益生菌可通过其细胞壁上的肽聚糖、多糖与黄曲霉毒素之间形成的范德华力、氢键、静电引力等非共价键来吸附黄曲霉毒素,以降低其生物利用度[2]。已有研究发现,乳酸杆菌对AFB1的生物吸附率为49%~84%,例如干酪乳杆菌和鼠李糖乳杆菌。益生菌的类型、浓度、培养时间、温度、黄曲霉毒素浓度等因素都会影响与黄曲霉的结合能力,从而对黄曲霉毒素的降解率产生影响[32]。已有研究表明,螺旋乳杆菌发酵的麦麸提取物具有良好的AFB1降解能力,降解率可达90%[33]。但是利用益生菌针对黄曲霉毒素的降解机制和降解最佳条件仍需进一步研究,未来也有可能出现与益生菌相结合的新兴技术。

4.1.2 *木霉真菌* 木霉真菌可以抑制植物叶面和土壤中的病原微生物,增强植物对疾病和非生物胁迫的抵抗力,促进植物对于矿物质等营养物质的吸收,从而促进植物生长和提高作物的生产力。它们主要通过干扰竞争合成次生代谢产物来减少植物病原体[34]。木霉真菌可以合成多种酶,如过氧化物酶、几丁质酶、β-1,3-葡聚糖酶和苯丙氨酸解氨酶。其中过氧化物酶可以将黄曲霉毒素氧化成极性和低毒分子,从而对毒素进行降解处理[35]。在体外实验中过氧化物酶显示出较高的降解水平,针对低浓度AFB1的降解率高达100%,对受污染的玉米粉中的AFB1降解率为30%。实验发现,里氏木霉CGMCC3.5218可在3 d内100%降解液体培养基中初始浓度为50 μg·kg^{-1}的AFB1,5 d内对初始浓度为10 μg·kg^{-1}的AFB1降解率为87.6%。此外,CGMCC3.5218在人工和自然污染的花生、玉米和饲料中针对初始浓度在108.2~23 233.5 ng·kg^{-1}范围内的黄曲霉毒素B1、B2、G1和G2的降解率均在85.0%以上[36]。真菌菌株、培养基的条件、黄曲霉毒素的浓度均会影响过氧化酶的产生,从而影响黄曲霉毒素的降解率。此外,被真菌毒素污染后的农产品对于动物和人体的健康都有一定的风险,而使用有益微生物及酶处理农产品可以降低真菌中毒的危险性。但木霉过氧化物酶对于食物的影响,以及降解产物的毒性仍需进一步研究。

4.1.3 *耐盐白色芽孢杆菌* Kumar等[37]从韩国发酵豆酱中分离出白色芽孢杆菌YUN5,并检测了该菌株针对AFB1和AFG1的降解能力。研究发现,该菌株的无细胞上清液对不同黄曲霉毒素的降解率分别可达76.28±0.15%(AFB1)和98.98±0.00%(AFG1),且添加YUN5及其无细胞上清液的豆酱中AFB1和AFG1的含量均低于未添加体系。实验分析发现AFB1的二呋喃环或内酯环和AFG1的内酯环是耐盐白色芽孢杆菌YUN5的主要作用位点,且该菌在一年的发酵过程中保证了豆酱不被黄曲霉毒素污染,这表明该菌株在实际

食品生产中的适用性较强[37]。

4.1.4 *嗜热四联球菌* 嗜热四联球菌的生长具有一定的稳定性，其对AFB1的降解主要依赖细胞外酶发挥作用。研究表明，AFB1可被黄曲霉毒素-氧化酶、锰过氧化物酶、漆酶等降解，故推测嗜热四联球菌对AFB1的降解主要是通过产生氧化酶实现的。通过控制各项实验条件，嗜热四联球菌在MRS液体培养中对AFB1的降解率最高可达75.90%±4.92%，且Zn^{2+}可促进该酶降解AFB1的活性，而Al^{3+}、Ba^{2+}、Ca^{2+}和Mn^{2+}可抑制该酶降解AFB1的活性。其中Ca^{2+}的抑制作用最强，抑制率高达48.54%。嗜热四联球菌降解AFB1的产物分别为327.08 $m\cdot z^{-1}$（$C_{17}H_{10}O_7$）和285.08 $m\cdot z^{-1}$（$C_{16}H_{12}O_5$），这两种产物的毒性均低于AFB1，因此嗜热四联球菌具有产生胞外酶降解黄曲霉毒素的潜力[38]。

4.2 生物细胞提取物及生物基材料

4.2.1 *枯草芽孢杆菌和花斑芽孢杆菌无细胞提取物* 芽孢杆菌属的许多细菌种类都能产生抗菌剂，且大多数菌种在低成本的培养基中即可培养，加之孢子形成特性有助于其在不利条件下生存，并可在具有挑战性的环境中保持较高的种群密度，因此，芽孢杆菌已成为病原真菌生物防治和预防霉菌毒素产生的研究热点[39]。已有研究表明[40]，枯草芽孢杆菌和花斑芽孢杆菌的无细胞提取物对AFB1的降解率分别可达60%和34%。枯草芽孢杆菌中的氧化还原酶可以使AFB1羟基化、脱氢、氢化等进行化学修饰，这使得AFB1结构中具有毒性位点的内酯环被修饰或完全裂解，从而减小AFB1的毒性。对比AFB1降解产物的质荷比发现，枯草芽孢杆菌对AFB1的降解效率更高。因此，将这两种微生物的无细胞提取物用于降解黄曲霉毒素是一种经济节约、环境友好的降解方法，未来可以开发为一种饲料添加剂来降低家畜健康风险。

4.2.2 *漆酶* 漆酶是一种含铜氧化酶，能催化酚类、非酚类、芳香胺、多环芳烃等多种底物的氧化反应，从而生成毒性较小或无毒性的产物[41]。现有研究通过基因工程技术，生产大肠杆菌胞外重组漆酶用于降解黄曲霉毒素B1，在pH 7.0、温度为37 ℃条件下，重组漆酶针对黄曲霉毒素的降解效率超过60%。该项研究为开发漆酶的大规模生产及其降解黄曲霉毒素的应用提供了新的思路[42]。此外，已有研究使用两亲性漆酶-无机杂交纳米粉降解花生油中的AFB1，由于两亲性漆酶-无机杂交纳米粉使漆酶反应微环境改善并且酶结构的稳定性增强，故该物质用于降解AFB1的效率得到了极大提升。将其应用于降解花生油中的AFB1时，其降解效果显著——黄曲霉毒素初始浓度为50~150 $\mu g\cdot kg^{-1}$时，加入该物质反应3 h后，花生油中AFB1浓度能够控制在0.96 $\mu g\cdot kg^{-1}$以下[43]。

4.2.3 *叶绿素铜钠* 叶绿素铜钠是从叶绿素中提取的水溶性铜钠盐的半合成混合物，广泛用作食品染料，且叶绿素铜钠具有抗诱变和抗癌特性，可在体外与AFB1等致癌物紧密结合形成强复合物从而降低生物利用度[44]。已有研究探讨了叶绿素铜钠在不同波长光源（白色、红色、蓝色和紫外光）下针对AFB1的降解效果，结果表明在含0.01%（质量体积分数）叶绿素的水溶液中，pH 7时，黄曲霉毒素的降解率最高，达92.67%。此外，研究通过细胞毒性试验对黄曲霉毒素B1及其光降解产物的毒性进行测定，结果表明黄曲霉毒素B1在水介质中的降解产物无毒性作用。在无醇啤酒中应用叶绿素铜钠，经检测，红光照射下AFB1降解率高达84.63%，但对啤酒整体口感风味没有显著影响[45]。因此，应用叶绿素铜钠降解受污染液体食品中的黄曲霉毒素不失为一种高效、安全的解毒方法。

4.2.4 *迷迭香* 迷迭香是一种常绿芳香草本植物，常用于增加食物的风味，并提高食物稳定性和抗氧化活性[46]。迷迭香具有较高的氧化还原电位，可以更有效地降解AFB1，因此食用迷迭香生物基材料在食品、饲料等领域具有广阔的应用前景[47]。研究表明，生物基材料迷迭香能有效降解山羊肉中的AFB1。在最佳降解条件下，食用迷迭香对山羊肉中AFB1的降解率为90.20%。经蛋白质组学方法鉴定，生物基材料迷迭香的内源性保护酶，发现生物基物质-迷迭香介导的代谢与AFB1的生物降解和生物转化有关。迷迭香通过激活AhR核易位，上调谷胱甘肽S-转移酶含量，导致细胞色素P450 1A2水平下调。此外，代谢组学研究表明，迷迭香不仅可以有效地降解AFB1，还可以通过提高山羊肉中的谷胱甘肽、组氨酸、丝氨酸、络氨酸等氨基酸含量来增加羊肉的生物摄入成分，是一种绿色健康的黄曲霉毒素降解物质[48]。

4.2.5 生姜 姜自古以来被用作食物和药物,是天然抗氧化化合物的宝库,具有多种生物活性,如免疫调节、抗炎和抗菌等[49],且安全评估报告表明,即使是高剂量的生姜也没有任何毒性作用[50]。通过液相色谱-质谱分析黄曲霉毒素降解产物发现黄曲霉毒素的呋喃环和内酯环对生姜成分极为敏感,易被破坏从而失去毒性。实验表明,生姜对黄曲霉毒素B1、G1、B2和G2具有还原作用,姜汁针对黄曲霉毒素B1、G1、B2和G2的降解率可分别达到70.2±0.01%、99.76±0.0%、56.8±0.5%和98.6±0.0%,且经条件优化后,在45 ℃和55 ℃环境下黄曲霉毒素降解率几乎达到100%。然而,姜汁经透析(12 000~14 000 Da分子截止量)和加热后,姜汁对黄曲霉毒素的降解效率显著降低。研究分析表明,生姜成分通过阻断DNA片段化、细胞凋亡和活性氧的生成来保护细胞免受AFB1毒害。此外,生姜还能激发细胞抗氧化物质如过氧化氢酶、谷胱甘肽还原酶、超氧化物歧化酶1和超氧化物歧化酶2,从而平衡细胞内氧化还原状态,使细胞免受AFB1诱导产生的毒害作用。生姜因其针对AFB1优越的降解效率和健康安全无毒副作用等特点而成为黄曲霉毒素降解的良方[50]。

5 黄曲霉毒素新型纳米材料降解

近年来,新型纳米材料用于黄曲霉毒素降解相关技术的研究逐渐走进人们视野,多种物质经加工处理后可具备黄曲霉毒素降解作用,其所用原料多数无毒害或毒性偏低且易获得,因此新型纳米材料是可应用于高效降解黄曲霉毒素的技术。

5.1 花状氧化锌

近年来,以天然无毒害物质为原料人工合成的纳米酶与黄曲霉毒素相互作用实现脱毒也受到了人们的广泛关注。研究表明,花状氧化锌处理后真菌菌丝数量减少。经浓度为1.25、2.50和5.00 mmol·L^{-1}氧化锌处理过后,黄曲霉的菌丝体产量显著下降,降幅最高可达对照组水平的78%。当氧化锌浓度为0.625 mmol·L^{-1}时,菌丝生长减少量最低(51%)[51]。此外,花状氧化锌处理后,真菌形态也发生了多种退行性改变,如管状丝损伤、菌丝形状丧失和菌丝破裂,这表明花形氧化锌纳米结构具有较强的抗真菌活性[51]。David等[51]还发现不同浓度的花状氧化锌纳米结构对黄曲霉分离物均有不同程度的抑制作用,用最低浓度的花状氧化锌材料处理玉米籽粒,黄曲霉毒素含量可降低69%,在液体介质中表现出最强的抑制活性,而在花状氧化锌浓度为1.25、2.50和5.00 mmol·L^{-1}的培养基中抑制效果最好,在这3个花状氧化锌浓度下,该纳米结构对黄曲霉毒素生物合成的抑制率均可达99.7%。该结果表明,花状氧化锌纳米结构具有很强的抗黄曲霉毒素生成活性。

5.2 硒纳米颗粒

硒纳米颗粒是晶粒大小为50~60 nm的球形粒状物质。基于硒纳米颗粒的催化活性、生物化学和代谢作用、自由基清除作用、抗肿瘤活性和抗菌作用等特性,近年来许多研究发现了硒纳米颗粒在营养和饮食学、药学、诊断和治疗、农业或环境研究中的作用[52-54]。Hassan等[55]研究表明,硒纳米颗粒可有效缓解黄曲霉毒素的中毒症状,AFB1引起的炎症导致肝素水平的升高和促红细胞生成素激素浓度降低情况在实验大鼠体内得到改善;高剂量(0.5 mg·kg^{-1})硒纳米颗粒与低剂量(0.3 mg·kg^{-1})硒纳米颗粒相比,高剂量硒纳米颗粒成功使大鼠肝组织中AFB1降解率达到近60%。由此可知,硒纳米颗粒可协助动物改善黄曲霉毒素对身体产生的不良影响。

5.3 氧化石墨烯/$Cu_3(BTC)_2$/Fe_3O_4杂化纳米复合材料

氧化石墨烯/$Cu_3(BTC)_2$/Fe_3O_4杂化纳米复合材料是利用水热合成法制备的纳米复合材料。该材料在紫外光照射下可产生电子,电子与氢氧根离子可反应生成超氧化物和羟基自由基,进而氧化AFB1并使其吸附在催化剂表面,在最佳反应条件下AFB1的降解率可达99%[56]。这为纳米酶降解黄曲霉毒素提供了数据支撑,展现了该方向良好的发展前景。

5.4 磁性氧化石墨烯/二氧化钛纳米复合材料

不同类型的金属或非金属材料可与二氧化钛相结合,以增强其可见光和催化响应。虽然活性炭的掺杂提高了二氧化钛对AFB1降解的光催化性能,但其吸附能力和选择性能仍会受到限制。研究表明,氧化石墨烯有着高比表面积、高吸附容量和热导率以及优异的载流子迁移率,且对芳香族化合物有良好的选择吸附性。因此,磁性材料、氧化石墨烯和二氧化钛的协同作用可以有效提高

二氧化钛材料对AFB1的降解效果和纳米材料的回收率[57]。磁性氧化石墨烯/二氧化钛法降解AFB1的光催化机制基于包括空穴和羟基自由基在内的主要活性自由基，它们可以攻击AFB1分子末端呋喃环上的双键，形成3种不同的毒性较小的转化产物。结果表明，通过磁性氧化石墨烯/二氧化钛纳米复合材料光催化处理AFB1对样品的储藏质量没有显著影响。与化学方法相比，使用制备的纳米复合材料光降解可以提高AFB1的降解效率，并且可以在AFB1的内酯环上诱导更显著的消除反应[58]。但是此方法会产生其他有较小毒性的副产物，未来需要进一步改进方法，以消除副产物的影响。

5.5 铁氮共掺多孔炭材料

铁氮共掺多孔炭材料是引入额外的具有高催化过氧单硫酸盐活性Fe-N位点的一种新型材料。材料表面涂有硅涂层，可有效防止催化剂在反应过程中颗粒的聚集，并在材料中引入了分层多孔结构，显著提高了反应物在材料上的传质性能。经测定，铁氮共掺多孔炭材料对AFB1的吸附能力为202.8 $mg\cdot g^{-1}$，其在30 min内对AFB1的降解速度快，且降解效率高达99.88%。此外，经鉴定4种降解产物发现AFB1末端呋喃环或甲氧基的双键被破坏，使AFB1的毒性显著降低。以上结果表明，铁氮共掺多孔炭材料是降解AFB1的有效物质[59]。

5.6 MOF衍生La-$ZnFe_2O_4$@Fe_3O_4@碳磁性杂化复合材料

现有研究以MOF(Zn, Fe)为基本框架，通过简单的吸收-热解法成功制备了La-$ZnFe_2O_4$@Fe_3O_4@碳磁性杂化复合材料。该材料具有较高的比表面积和非凡的光催化性能，在紫外光照射下对AFB1、黄青霉素和玉米片烯酮的降解率分别可达98.37%、97.35%和98.52%。此外，材料中结合有$ZnFe_2O_4$且La镶嵌在Fe_3O_4@碳上，因此具有良好的稳定性，这提示该材料展现出了作为光催化剂降解病原微生物产生霉菌毒素的潜力[60]。

6 展望

本文对现有用于黄曲霉毒素降解的技术进行了综述，并着重强调了生物学方法和新型纳米材料在黄曲霉毒素降解方面的应用。虽然这些方法都不完美，但是在过往生产生活中在一定程度上保护了我们免受黄曲霉毒素的侵害。黄曲霉毒素在全球范围内的影响巨大，其生化毒性和致癌作用在农业、食品、医药等领域的危害十分严重，很大程度上威胁和困扰了人们的生活。这使得快速、高效且安全地降解黄曲霉毒素成为相关行业乃至整个社会迫切需要解决的问题，并对新技术的快速研发提出了更高的要求。随着对黄曲霉毒素认识的不断加深，研究学者们不断地提出了新的降解方法，涵盖了物理、化学、生物学等多个学科领域。随着新材料、新技术的不断研究和开发，利用生物方法新型纳米材料降解黄曲霉毒素逐渐成为了国内外研究的热点，其节约、高效以及高生物安全性等特点也逐渐受到了更多人的青睐。随着科技与社会的不断进步，各种新兴的黄曲霉素降解技术在食品加工、农产品储藏等方面展现了应用潜能。今后，我们仍需进行大量体内和体外试验，寻找更多类似的可降解黄曲霉毒素的活性材料，并研究如何将新型纳米材料投入实际应用。

参 考 文 献

[1] 徐静静, 闫培生, 王凯, 等. 一株抑制黄曲霉毒素的深海微杆菌的分离与鉴定[J]. 生物技术进展, 2015(3): 235-239.

[2] AFSHAR P, SHOKRZADEH M, RAEISI S N, *et al*.. Aflatoxins biodetoxification strategies based on probiotic bacteria[J]. Toxicon, 2020, 178: 50-58.

[3] GAO J, ZHAO L, LI J, *et al*.. Aflatoxin rapid detection based on hyperspectral with 1D-convolution neural network in the pixel level[J/OL]. Food Chem., 2021, 360: 129968[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129968.

[4] 肖伟, 闫培生. 海带渣微生物药肥对土壤中产毒真菌寄生曲霉的抑制作用研究[J]. 生物技术进展, 2015(3): 213-217.

[5] MARCHESE S, POLO A, ARIANO A, *et al*.. Aflatoxin B1 and M1: biological properties and their involvement in cancer development[J/OL]. Toxins, 2018, 10(6): 214[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/toxins10060214.

[6] WU Y, CHENG J H, SUN D W. Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: applications and mechanisms[J]. Trends Food Sci. Technol., 2021, 109: 647-661.

[7] WANG Y, SHANG J, CAI M, *et al*.. Detoxification of mycotoxins in agricultural products by non-thermal physical technologies: a review of the past five years[J/OL]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2022: 2095554[2023-10-26]. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2095554.

[8] KHALIL O A A, HAMMAD A A, SEBAEI A S. *Aspergillus flavus* and *Aspergillus ochraceus* inhibition and reduction of aflatoxins and ochratoxin A in maize by irradiation[J]. Toxicon, 2021, 198: 111-120.

[9] ATAKAN O, CANER C. Evaluation of different ozonation on aflatoxin degradation and physicochemical characteristics of hazelnuts[J/OL]. J. Food Proc. Preserv., 2021, 45(26): e15276 [2023-10-26]. https://doi.org/10.1111/jfpp.15276.

[10] ISMAIL A, GONÇALVES B L, DE NEEFF D V, *et al*.. Aflatoxin in foodstuffs: occurrence and recent advances in decontamination[J]. Food Res. Int., 2018, 113: 74-85.

[11] KARLOVSKY P, SUMAN M, BERTHILLER F, *et al*.. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination[J]. Mycotoxin Res., 2016, 32(4): 179-205.

[12] BEDARD L L, MASSEY T E. Aflatoxin B1-induced DNA damage and its repair[J]. Cancer Lett., 2006, 241(2): 174-183.

[13] CORCUERA L A, VETTORAZZI A, ARBILLAGA L, *et al*.. Genotoxicity of aflatoxin B1 and ochratoxin A after simultaneous application of the *in vivo* micronucleus and comet assay[J]. Food Chem. Toxicol., 2015, 76: 116-124.

[14] BAKHEET S A, ALHURAISHI A M, AL-HARBI N O, *et al*.. Alleviation of aflatoxin B1-induced genomic damage by proanthocyanidins via modulation of DNA repair[J]. J. Biochem. Mol. Toxicol., 2016, 30(11): 559-566.

[15] LIU R, LU M, WANG R, *et al*.. Degradation of aflatoxin B1 in peanut meal by electron beam irradiation[J]. Int. J. Food Prop., 2018, 21(1): 891-900.

[16] QI L, MA Y, CAI R, *et al*.. Degradation of aflatoxins in apple juice by pulsed light and the analysis of their degradation products[J/OL]. Food Contr., 2023, 148(12): 109648[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109648.

[17] LI H, XIONG Z, GUI D, *et al*.. Effect of ozonation and UV irradiation on aflatoxin degradation of peanuts[J/OL]. J. Food Proc. Preserv., 2019, 43(11): e13914[2023-10-26]. https://doi.org/10.1111/jfpp.13914.

[18] ALBERT J, MUÑOZ K. Kinetics of microbial and photochemical degradation of aflatoxin B1 in a sandy loam and clay soil[J/OL]. Sci. Rep., 2022, 12(1): 16849[2023-10-26]. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20727-1.

[19] LU X, NAIDIS G, LAROUSSI M, *et al*.. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: generation, transport, and biological effects[J/OL]. Phys. Rep., 2016, 630: 003 [2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.003.

[20] HOJNIK N, MODIC M, WALSH J L, *et al*.. Unravelling the pathways of air plasma induced aflatoxin B(1) degradation and detoxification[J/OL]. J. Hazard. Mater., 2021, 403: 123593 [2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123593.

[21] NETO L, MILLAN D, PBRINCAT J, *et al*.. Impact of ultrasound decontamination on the microbial and sensory quality of fresh produce[J]. Food Contr., 2019, 104: 262-268.

[22] LIU Y, LI M, LIU Y, *et al*.. Structures of reaction products and degradation pathways of aflatoxin B(1) by ultrasound treatment[J/OL]. Toxins, 2019, 11(9): 526[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/toxins11090526.

[23] SHEN M, SINGH R. Detoxification of aflatoxins in foods by ultraviolet irradiation, hydrogen peroxide, and their combination-a review[J/OL]. LWT, 2021, 142(8): 110986[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110986.

[24] STRITTMATTER R J, YANG B, JOHNSON D A. A comprehensive investigation on the application of ozone in cooling water systems-correlation of bench-top, pilot scale and field application data[J]. Ozone Sci. Engin., 1993, 15: 47-80.

[25] GUZEL-SEYDIM Z B, GREENE A K, SEYDIM A C. Use of ozone in the food industry[J]. LWT-Food Sci. Technol., 2004, 37: 453-460.

[26] GONÇALVES A A. Ozone as a safe and environmentally friendly tool for the seafood industry[J]. J. Aquat. Food Prod. Technol., 2014, 25: 210-229.

[27] AGRIOPOULOU S, KOLIADIMA A, KARAISKAKIS G, *et al*.. Kinetic study of aflatoxins′ degradation in the presence of ozone[J]. Food Contr., 2016, 61: 221-226.

[28] JACKOWSKA I, BOJANOWSKA M, STASZOWSKA K M, *et al*.. Low concentration short time ozonation of rapeseed seeds reduces the stability of the oil and content of some antioxidant components[J/OL]. Int. J. Food Sci. Technol., 2019, 54(12): 3175-3184.

[29] WOMACK E D, BROWN A E, SPARKS D L. A recent review of non-biological remediation of aflatoxin-contaminated crops[J]. J. Sci. Food Agric., 2014, 94(9): 1706-1714.

[30] VILLARREAL-BARAJAS T, VÁZQUEZ-DURÁN A, MÉNDEZ-ALBORES A. Effectiveness of electrolyzed oxidizing water on fungi and mycotoxins in food[J/OL]. Food Control, 2022, 131: 108454 [2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108454.

[31] ZHANG Q, XIONG K, TATSUMI E, *et al*.. Elimination of aflatoxin B1 in peanuts by acidic electrolyzed oxidizing water[J/OL]. Food Contr., 2012, 27(1): 16 [2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.029.

[32] ABDOLMALEKI K, JAVANMARDI F, GAVAHIAN M, *et al*.. Emerging technologies in combination with probiotics for aflatoxins removal: an updated review[J/OL]. Int. J. Food Sci. Technol., 2022, 57: 5712-5721.

[33] ZHANG Y, WANG P, KONG Q, *et al*.. Biotransformation of aflatoxin B(1) by *Lactobacillus helviticus* FAM22155 in wheat bran by solid-state fermentation[J/OL]. Food Chem., 2021, 341(Pt 1): 128180[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128180.

[34] REN X, BRANÀ M T, HAIDUKOWSKI M, *et al*.. Potential of *Trichoderma* spp. for biocontrol of aflatoxin-producing *Aspergillus flavus*[J/OL]. Toxins, 2022, 14(2): 86[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/toxins14020086.

[35] DINI I, ALBORINO V, LANZUISE S, *et al*.. *Trichoderma* enzymes for degradation of aflatoxin B1 and ochratoxin A[J/OL]. Molecules, 2022, 27(12): 3959[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/molecules27123959.

[36] YUE X, REN X, FU J, *et al*.. Characterization and mechanism of aflatoxin degradation by a novel strain of *Trichoderma reesei* CGMCC3.5218[J/OL]. Front. Microbiol., 2022, 13: 1003039 [2023-10-26]. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1003039.

[37] KUMAR V, BAHUGUNA A, LEE J S, *et al*.. Degradation mechanism of aflatoxin B1 and aflatoxin G1 by salt tolerant *Bacillus albus* YUN_5 isolated from ′doenjang′, a traditional Korean food[J/OL]. Food Res. Int., 2023, 165: 112479[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112479.

[38] LI W, LI W, ZHANG C, *et al*.. Study on the mechanism of afla-

toxin B1 degradation by *Tetragenococcus halophilus*[J/OL]. LWT, 2023, 180: 114662[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114662.

[39] XUE G, QU Y, WU D, *et al*.. Biodegradation of aflatoxin B(1) in the Baijiu brewing process by *Bacillus cereus*[J/OL]. Toxins, 2023, 15(1): 65[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/toxins15010065.

[40] SURESH G, CABEZUDO I, PULICHARLA R, *et al*.. Biodegradation of aflatoxin B(1) with cell-free extracts of *Trametes versicolor* and *Bacillus subtilis*[J]. Res. Vet. Sci., 2020, 133: 85-91.

[41] LOI M, FANELLI F, ZUCCA P, *et al*.. Aflatoxin B1 and M1 degradation by Lac2 from *Pleurotus pulmonarius* and redox mediators[J/OL]. Toxins, 2016, 8(9): 245[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/toxins8090245.

[42] BIAN L, ZHENG M, CHANG T, *et al*.. Degradation of aflatoxin B1 by recombinant laccase extracellular produced from *Escherichia coli*[J/OL]. Ecotoxicol. Environ. Saf., 2022, 244: 114062[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114062.

[43] LU T, FU C, XIONG Y, *et al*.. Biodegradation of aflatoxin B(1) in peanut oil by an amphipathic laccase-inorganic hybrid nanoflower[J]. J. Agric. Food Chem., 2023, 71(8): 3876-3884.

[44] MDOMIJAN A, GAJSKI G, NOVAK JOVANOVIĆ I, *et al*.. *In vitro* genotoxicity of mycotoxins ochratoxin A and fumonisin B (1) could be prevented by sodium copper chlorophyllin: implication to their genotoxic mechanism[J]. Food Chem., 2015, 170: 455-462.

[45] DOUSTI S, SADEGHI E, ROUHI M, *et al*.. Photocatalytic degradation of aflatoxin B1 in aqueous medium and non-alcoholic beer using chlorophyllin[J/OL]. Food Contr., 2023, 150(11): 109757[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109757.

[46] ALIREZALU K, PATEIRO M, YAGHOUBI M, *et al*.. Phytochemical constituents, advanced extraction technologies and techno-functional properties of selected mediterranean plants for use in meat products: a comprehensive review[J/OL]. Trends Food Sci. Technol., 2020, 100: 292-306.

[47] CHEN X, JIA W, ZHU L, *et al*.. Recent advances in heterocyclic aromatic amines: an update on food safety and hazardous control from food processing to dietary intake[J]. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., 2020, 19(1): 124-148.

[48] WANG X, JIA W. Bio-based material-edible rosemary induced biodegradation of aflatoxin B1 via altering endogenous protective enzymes signatures in animal-derived foods[J/OL]. J. Hazard. Mater., 2023, 458: 132021[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132021.

[49] BERISTAIN S, HERNANDEZ CARRANZA P, CID-PÉREZ T S, *et al*.. Antimicrobial activity of ginger (*Zingiber officinale*) and its application in food products[J]. Food Rev. Int., 2019, 35(41): 1-20.

[50] BAHUGUNA A, KUMAR V, RAMALINGAM S, *et al*.. *Zingiber officinale* mediated aflatoxins cleanup in aqueous medium: kinetics, toxicity and cytoprotective effect[J/OL]. J. Clean. Prod., 2022, 381(7): 135155[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135155.

[51] HERNÁNDEZ-MELÉNDEZ D, SALAS-TÉLLEZ E, ZAVALA-FRANCO A, *et al*.. Inhibitory effect of flower-shaped zinc oxide nanostructures on the growth and aflatoxin production of a highly toxigenic strain of *Aspergillus flavus* link[J/OL]. Materials, 2018, 11(8): 1265[2023-10-26]. https://doi.org/10.3390/ma11081265.

[52] BODNAR M, KONIECZKA P, NAMIESNIK J. The properties, functions, and use of selenium compounds in living organisms[J]. J. Environ. Sci. Health C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev., 2012, 30(3): 225-252.

[53] CHAUDHARY S, UMAR A, MEHTA S. Selenium nanomaterials: an overview of recent developments in synthesis, properties and potential applications[J/OL]. Prog. Mater. Sci., 2016, 83: 270-329.

[54] KHURANA A, TEKULA S, SAIFI M A, *et al*.. Therapeutic applications of selenium nanoparticles[J]. Biomed. Pharmacother., 2019, 111: 802-812.

[55] HASSAN A, MANSOUR M, SAYED-ELAHL R, *et al*.. Influence of selenium nanoparticles on the effects of poisoning with aflatoxins[J/OL]. Adv. Anim. Vet. Sci., 2020, 8(S2): 64-73.

[56] SAMUEL M S, MOHANRAJ K, CHANDRASEKAR N, *et al*.. Synthesis of recyclable GO/Cu(3)(BTC)(2)/Fe(3)O(4) hybrid nanocomposites with enhanced photocatalytic degradation of aflatoxin B1[J/OL]. Chemosphere, 2022, 291(Pt 2): 132684[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132684.

[57] SUN S, ZHAO R, XIE Y, *et al*.. Reduction of aflatoxin B(1) by magnetic graphene oxide/TiO_2 nanocomposite and its effect on quality of corn oil[J/OL]. Food Chem., 2021, 343: 128521[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128521.

[58] SONG C, YANG J, WANG Y, *et al*.. Mechanisms and transformed products of aflatoxin B1 degradation under multiple treatments: a review[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2022: 2121910[2023-10-26]. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2121910.

[59] ZHANG Y, SUN Y, MAN Y, *et al*.. Highly efficient adsorption and catalytic degradation of aflatoxin B1 by a novel porous carbon material derived from Fe-doped ZIF-8[J/OL]. Chem. Eng. J., 2022, 440(8): 135723[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135723.

[60] YANG X, PAN J, HU J, *et al*.. MOF-derived La-Zn-Fe_2O_4@Fe_3O_4@carbon magnetic hybrid composite as a highly efficient and recyclable photocatalyst for mycotoxins degradation[J/OL]. Chem. Engin. J., 2023, 467: 143381[2023-10-26]. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143381.