

食品与饲料中黄曲霉毒素脱除技术的研究进展

刘配莲¹, 张刚¹, 陈焱², 李世磊², 王翔宇², 王满意^{2,3},
王风艳², 黄昭先²

(1. 费县中粮油脂工业有限公司, 山东 临沂 273400; 2. 中粮营养健康研究院有限公司 营养健康与食品安全北京市重点实验室, 老年营养食品研究北京市工程实验室, 北京 102209; 3. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 南京 210023)

摘要:黄曲霉毒素污染严重威胁人类和动物健康, 造成巨大的经济损失。因此, 脱除食品与饲料中的黄曲霉毒素已经成为人们研究的热点。从物理法、化学法和生物法 3 个方面综述了黄曲霉毒素脱除技术的研究进展, 讨论了各种脱毒技术的效果和优缺点, 以为黄曲霉毒素脱除技术的研究提供参考, 促进食品与饲料中黄曲霉毒素的防治工作。

关键词:黄曲霉毒素; 物理法脱毒; 化学法脱毒; 生物法脱毒

中图分类号: TS205; TS201.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2021)10-0092-06

Progress on detoxification technology of aflatoxin in food and feed

LIU Peilian¹, ZHANG Gang¹, CHEN Yan², LI Shilei², WANG Xiangyu²,
WANG Manyi^{2,3}, WANG Fengyan², HUANG Zhaoxian²

(1. COFCO Oils & Grains Industries (Feixian) Co., Ltd., Linyi 273400, Shandong, China; 2. Beijing Engineering Laboratory of Geriatric Nutrition Food Research, Beijing Key Laboratory of Nutrition & Health and Food Safety, COFCO Nutrition & Health Research Institute, Beijing 102209, China; 3. Jiangsu Province Center of Cooperative Innovation for Modern Grain Circulation and Security, Nanjing 210023, China)

Abstract: Aflatoxin pollution seriously threatens human and animal health, causing huge economic losses. Therefore, reducing aflatoxin in food and feed has become a hot research topic. The research progress of aflatoxin detoxification technology from three aspects including physical, chemical and biological methods was summarized, and the effects, advantages and disadvantages of each detoxification technology were discussed, so as to provide reference for the research of aflatoxin detoxification technology and promote the prevention and treatment of aflatoxin in food and feed.

Key words: aflatoxin; physical detoxification; chemical detoxification; biological detoxification

霉菌毒素是由丝状真菌产生的次级代谢产物, 是粮食和饲料作物的重要污染物^[1], 对人类和动物构成了严重的健康风险, 并对全球经济产生负面影

响^[2]。全球每年损失粮食约 10 亿 t^[3], 根据联合国粮食及农业组织 (FAO) 预计, 全世界范围内约 25% 的农作物在收获前后可能遭遇霉菌毒素的污染^[4]。黄曲霉毒素 (aflatoxin, AF) 由黄曲霉等多种真菌产生, 是所有霉菌毒素里毒性最高的。黄曲霉毒素主要由双呋喃环香豆素构成, 主要包括 B 族黄曲霉毒素 (AFB₁、AFB₂)、G 族黄曲霉毒素 (AFG₁、AFG₂) 和 M 族黄曲霉毒素 (AFM₁、AFM₂), 有 18 种以上^[5]。AFB₁、AFG₁、AFG₂ 被认为是黄曲霉毒素中最具毒性的, 是国际癌症研究机构 (IARC) 认定的 1 类致癌物质^[6]。黄曲霉毒素不仅关系到人类健康, 也关系到

收稿日期: 2020-11-27; 修回日期: 2021-07-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目 (2016YFD0401405)

作者简介: 刘配莲 (1971), 女, 高级工程师, 主要从事油脂质量安全管理、检测和控制工作 (E-mail) lpl710918@126.com。

通信作者: 王风艳, 高级工程师, 博士 (E-mail) wangfengyan@cofco.com; 黄昭先, 高级工程师, 硕士 (E-mail) brooksh@163.com。

牲畜的健康。在家禽中,饲用高水平的黄曲霉毒素 B_1 (AFB_1)会导致肝脏损害,最终导致死亡。此外,黄曲霉毒素会损害家禽产量和繁殖效率,导致产蛋量下降,蛋和肉的质量下降。黄曲霉毒素会造成猪的肝脏损害,牛的体重减轻、肝脏和肾脏损害以及产奶量减少^[7]。由于毒素可以以黄曲霉毒素 M_1 (AFM_1) (AFB_1 的羟基化代谢产物)的形式带入牛奶和其他乳制品中,所以牛奶中的黄曲霉毒素污染对人类健康构成了重大威胁^[8]。此外,在人乳中也检测出了 AFM_1 ^[9]。

为了保护消费者的健康,许多国家和地区设定了人类食品和动物饲料中黄曲霉毒素和其他霉菌毒素的允许限量。欧盟规定 AFB_1 的许可水平范围为 $0.10 \sim 12 \mu\text{g}/\text{kg}$,总黄曲霉毒素的许可水平范围为 $4 \sim 15 \mu\text{g}/\text{kg}$,特别是食品中 AFM_1 的允许水平范围为 $0.025 \sim 0.050 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。美国食品药品监督管理局将食品中 AFB_1 的最高含量限定为 $20 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[10]。目前,我国GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》对黄曲霉毒素有明确的规定,其中特殊膳食食品中的 AFB_1 和 AFM_1 最高含量限定为 $0.5 \mu\text{g}/\text{kg}$,不同谷物制品中的 AFB_1 最高含量限定为 $5 \sim 20 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

考虑到黄曲霉毒素污染对人类和动物健康以及对经济的巨大威胁,加之日趋严格的含量限定标准,人们积极探索更有效和健康环保的黄曲霉毒素脱除方法^[1, 10-12]。目前,黄曲霉毒素的脱除措施主要有物理法、化学法和生物法3种^[13]。本文对食品和饲料中黄曲霉毒素的脱除技术进行了综述,并讨论各种脱毒技术的脱除效果和优缺点,以期为黄曲霉毒素脱除技术的研究提供参考,促进食品与饲料中黄曲霉毒素的防治工作。

1 物理法脱毒

1.1 高温脱毒

黄曲霉毒素是一种高度稳定的化合物,不易被常规的热处理或蒸煮破坏,但是在高温条件下可以发生分解^[14]。通过高温处理,具有高度毒性的黄曲霉毒素上呋喃环的8,9碳-碳键氧化电位受到破坏,可能降解为毒性较小或无毒的衍生物,如 AFD_1 、 AFD_2 等^[15-16]。高温脱毒的操作简单便捷,是黄曲霉毒素脱除中最常用的一种方法。Hwang等^[17]将干小麦分别置于 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热,结果发现 AFB_1 含量分别下降了50%和90%。Yazdanpanah等^[18]研究表明,在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下处理受到黄曲霉毒素污染的开心果仁30 min,可显著降低样品中黄曲霉毒

素的污染水平。黄曲霉毒素的降解与时间、温度有关,在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤120 min可使开心果中的 AFB_1 降解95%以上。挤压蒸煮是目前食品与饲料工业生产中常用的一种黄曲霉毒素脱除方法,尤其是在谷物和谷物食品中,是在很短的时间内将受污染的物料暴露于高温和高压下的过程,在此过程中添加过氧化氢、石灰等碱性物质可以提高黄曲霉毒素脱除效率。Zheng等^[12]采用挤压蒸煮法处理花生粕,在机筒温度 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 、物料水分 $40 \text{ g}/100 \text{ g}$ 、进料速度 $17 \text{ g}/\text{min}$ 、螺杆速度 $152 \text{ r}/\text{min}$ 的条件下,高达77.6%的 AFB_1 被降解。Elias - Orozco等^[19]发现,在挤压蒸煮过程中加入0.3%的石灰和1.5%的过氧化氢,黄曲霉毒素的脱除效率相对较高, AFB_1 和 AFM_1 的降解率分别为46%和74%。Méndez - Albores等^[20]研究了乳酸和柠檬酸在挤压蒸煮过程中对高粱中B族黄曲霉毒素降解的影响,结果表明,与柠檬酸相比,乳酸处理的样品B族黄曲霉毒素降解率更高。挤压蒸煮工艺必须加入一些添加剂才能对黄曲霉毒素进行有效降解,尽管使用这些添加剂使挤压蒸煮的效果更好,但是不能忽视添加剂残留问题,这些添加剂对食品质量甚至对人类和动物健康都有负面影响。例如高含量的石灰和过氧化氢会影响玉米饼的味道和香气^[19]。因此,挤压蒸煮工艺的缺点是显而易见的。高温和高压需要消耗大量能量,并破坏其他营养物质的结构,例如水溶性维生素和蛋白质。后续对高温降解黄曲霉毒素的研究应更多地关注寻找有效、廉价、不影响食品质量且对人类及动物健康安全的多种添加剂。

1.2 吸附剂脱毒

目前用于吸附霉菌毒素的物质主要有活性炭、铝硅酸盐类(蒙脱石、沸石粉、膨润土等)和有机物类(酵母细胞壁多糖等),主要依靠电荷、氢键、离子键等进行吸附^[21]。活性炭由于其微孔结构而具有较高的比表面积,并且价格低廉,常被用于吸附各类无机或者有机毒素^[22]。然而,在活性炭吸附黄曲霉毒素的过程中,食物中所含的水分、盐分等物质也容易被吸附,影响最终产品的口感和质量,从而限制其广泛地应用于食品生产^[23]。磁性炭作为理想的吸附剂,不但拥有活性炭良好的吸附性能,还可以克服活性炭的不足。Khan等^[24]采用甘蔗渣制备的纳米磁性炭作为吸附剂,将雏鸡分为不同组,A组喂普通去污饲料,B组喂 AFB_1 污染($200 \mu\text{g}/\text{kg}$)的饲料,C、D、E、F组分别喂食混合了0.2%、0.3%、0.4%和0.5%吸附剂的 AFB_1 污染(AFB_1 含量 $200 \mu\text{g}/\text{kg}$)

的饲料,研究了雏鸡的临床体征和行为、丙氨酸转氨酶等血液指标、死亡情况、身体和器官的质量等,结果发现,添加 0.3% 吸附剂可能有效吸收和去除雏鸡胃肠道中的 AFB₁,且对雏鸡生长无不良影响,虽然这种新型吸附剂可以有效清除雏鸡体内的黄曲霉毒素,但对其他动物的吸附作用需要进一步确认。蒙脱石可以通过吸附作用降低黄曲霉毒素的生物利用度。Sadia 等^[25]合成了 AFB₁-Ca-蒙脱石的复合物,并将其和 AFB₁在铝杯中加热至 200℃,结果发现,经过高温处理,被吸附的 AFB₁能被有效地转化成其他毒性较小的物质。一种名为水合铝硅酸钙钠(HSCAS)的黄曲霉毒素选择性黏土,作为常见的抗结块添加剂被混合加入动物饲料里,可以有效地吸附黄曲霉毒素^[26]。HSCAS 可以作为肠吸收剂,选择性并且牢固地结合动物上消化道中的黄曲霉毒素,从而降低黄曲霉毒素的生物利用度及毒性^[27]。

1.3 辐照脱毒

辐照脱毒的基本原理是采用电离辐射对样品进行处理,样品中的毒素分子受到高能射线的作用后,结构产生突变,进而影响毒素的生物化学性能。辐照脱毒的过程中,毒素主要发生加成反应、消去反应等,自身的分子结构被破坏,然后转化为毒素较低的中间产物,从而实现毒素的脱除^[28-29]。辐照法既保证了食品的安全,又能够有效地延长食品的保质期,是目前食品行业较为提倡的一种绿色生产方式^[23]。目前用于黄曲霉毒素的辐照脱毒方法主要是电子束法,⁶⁰Co、¹³⁷Cs 产生的 γ 射线法,紫外线辐照法^[28]。Garg 等^[30]采用 15 W 的紫外线在 30 cm 处对花生进行 10 h 的照射,可以将 AFB₁含量从 350 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Mao 等^[31]通过超高效液相色谱-热四极杆主动聚焦质谱/质谱(UPLC-TQEF-MS/MS)对紫外线照射下花生油中 AFB₁的降解产物进行分析,高分辨率质谱反映出两个主要产物是在末端呋喃环中的双键修饰和内酯环断裂后形成的,而小分子尤其是含氮化合物可能参与了光化学反应。此外,人类胚胎肝细胞的活力测试结果表明,紫外线照射后降解产物的细胞毒性远低于 AFB₁。Zhang 等^[32]以 10 kGy 的 γ 射线对大豆进行辐照处理,发现可以完全消除真菌,并大大降低大豆中 B 族黄曲霉毒素的含量。当采用剂量小于 20 kGy 的 γ 射线辐照大豆 30 d 时,大豆油的品质、生育酚含量和氧化稳定性没有明显变化,说明 γ 射线辐照是消除饲料中真菌污染,提高大豆安全性和经济性的一种有效方法。Puligundla 等^[33]使用空气作为工作气体,

在大气压条件下,以 1.50 A 的电流产生等离子体放电,对加标食品处理,能在 30 min 内将载玻片上的 AFB₁浓度降低 95% 以上。

2 化学法脱毒

2.1 氨化脱毒与碱液脱毒

氨化脱毒主要是采用氨水反应或者氨气熏蒸等手段对受污染的食品进行处理,使黄曲霉毒素在碱性氨的作用下分子结构发生转变,毒性降低^[5]。在氨化过程中,会产生大量氨黄曲霉毒素产物。氨化被认为是对食品中黄曲霉毒素进行降解的最先进、最经济可行的技术,许多国家批准了该工艺应用于被黄曲霉毒素污染的农作物。氨化脱毒也是实际工业生产中应用的脱毒技术。在饲料(如玉米)中加入 21.3% 的氢氧化铵溶液,添加量为饲料质量的 1.5%,再加水至饲料质量的 12.0%~17.5%,充分搅拌均匀,装入完好的塑料袋或严密的容器中,密闭后在 25℃ 左右下过夜,然后将饲料倒出摊晾,再晾晒 15 d,除去氨味,即可作为饲料使用^[34]。氨气熏蒸法被广泛应用于玉米、花生饼、花生仁等加工过程。在常温常压下,用聚氯乙烯薄膜密封粮堆,通入 0.5%~1.0% 的氨气,熏蒸 3 d,经处理后花生仁 B 族黄曲霉毒素总含量可由 11 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 降至 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[34]。陈志娟等^[35]用氨气熏蒸法降解玉米中 AFB₁,发现在 37℃ 下用体积分数 7.05% 的氨气熏蒸玉米 96 h 可降解 92% 的 AFB₁。赵国斌^[36]采用氨气熏蒸法处理受污染的花生,在 40℃ 下用体积分数为 10% 的氨气连续熏蒸 96 h,可以脱除 95.06% 的 AFB₁。

碱液脱毒为采用碱液对受污染的原料进行处理,使黄曲霉毒素在碱液的作用下分子结构发生转变,毒性降低。张春华等^[37]研究认为,黄曲霉毒素在花生中的分布可能在表面,也可能在内部,利用氢氧化钠溶液处理花生原料对花生油中黄曲霉毒素有明显的脱除效果。杨威等^[38]研究发现,碱液处理花生对脱除花生油中 AFB₁具有良好的效果,劣质花生经压榨后,花生油中的 AFB₁含量为 21.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$,经氢氧化钠溶液处理花生 30 min 后,压榨得到的花生油中 AFB₁含量降到 2.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$,脱除率为 90.7%。

2.2 臭氧脱毒

臭氧有很强的氧化能力,已被证明可以氧化破坏 AFB₁分子结构中的呋喃环双键,从而达到脱毒的目的^[39]。林叶等^[39]以 100 mg/L 的臭氧处理花生粕粉 10 min,可以将花生粕中的 AFB₁含量从 138

$\mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 $30 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。Luo 等^[40]用 $90 \text{ mg}/\text{L}$ 的臭氧处理玉米 40 min, 可以将玉米中的 AFB_1 从 $83 \mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 $10 \mu\text{g}/\text{kg}$, 降解率达到 88%。陈冉等^[41]制造了一种专门用于花生中黄曲霉毒素脱除的臭氧脱毒装置, 经过臭氧处理, 花生中的黄曲霉毒素总量和 AFB_1 脱除率分别为 65.88% 和 65.90%, 脱毒效果显著。Mohammadi 等^[42]首次使用臭氧降解牛奶中的 AFM_1 , 结果发现, 经过 5 min 臭氧处理, 牛奶中的 AFM_1 含量降低了 50%。

2.3 有机酸脱毒

柠檬酸和乳酸可以有效降解黄曲霉毒素。研究表明柠檬酸可使玉米中的黄曲霉毒素降解率达到 96.7%^[43]。李建辉等^[44]研究了柠檬酸溶液质量浓度和反应时间对花生中 B 族黄曲霉毒素的影响, 结果发现, 随着柠檬酸溶液质量浓度的增加和反应时间的延长, 花生中的 B 族黄曲霉毒素含量降低, 经 $80 \text{ g}/\text{L}$ 柠檬酸溶液处理 30 min 后, B 族黄曲霉毒素含量可以由 $98.60 \mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 $20 \mu\text{g}/\text{kg}$ 以下。金华丽等^[45]研究了柠檬酸不同处理条件对花生粕中 AFB_1 脱除效果的影响, 结果表明, 在料液比 5:1、柠檬酸溶液质量浓度 $80 \text{ g}/\text{L}$ 、处理时间 30 min 条件下, 花生粕中 AFB_1 含量由 $25.75 \mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 $5.0 \mu\text{g}/\text{kg}$ 以下。Aiko 等^[46]比较了 3 种有机酸对 AFB_1 的脱除效果, 发现在加热条件下乳酸的效果最佳, 对 AFB_1 脱除率为 85%。

3 生物法脱毒

3.1 微生物降解法

微生物法降解 AFB_1 已经逐渐成熟, 多种微生物对 AFB_1 具有显著的降解作用^[47]。Wang 等^[48]观察到地衣芽孢杆菌 BL010 具有较高的 AFB_1 降解活性, 是一种高效的 AFB_1 降解菌株。Karunaratne 等^[49]研究了 3 种乳酸杆菌对黄曲霉菌生长和黄曲霉毒素产生的影响, 发现 3 种乳酸杆菌能有效地抑制黄曲霉菌的生长, 并减少黄曲霉毒素的产生。Wang 等^[50]从鸡盲肠中分离并鉴定了 AFB_1 降解细菌 CG1061, 通过 HPLC 测定发现该菌表现出 93.7% 的 AFB_1 降解率。Ghanbari 等^[51]研究了乳酸克鲁维酵母对黄曲霉菌生长的影响, 发现在 30°C 下孵育 7 d, 酵母最低群体浓度为 $1.5 \times 10^5 \text{ CFU}/\text{mL}$ 时, 乳酸克鲁维酵母抑制了黄曲霉菌的生长, 并使黄曲霉毒素的总产量降低了 97.9%, 其中 AFB_1 、 AFB_2 、 AFG_1 、 AFG_2 分别降解了 97.8%、98.6%、98.0% 和 94.0%。Wang 等^[52]对白腐菌进行研究发现, 该菌可去除 86.0% 的 AFB_1 。

3.2 微生物吸附法

许多天然存在的微生物, 如酵母菌和乳酸菌的细胞壁具有可以吸附黄曲霉毒素的物质。毒素被微生物的细胞壁吸附, 两者形成毒素和菌体的复合体, 达到稳定状态, 毒素的生物利用度降低, 难以被机体吸收, 从而被排出体外^[23]。刘畅等^[53]首次筛选出吸附作用最好的酿酒酵母 Y1, 其对 AFB_1 的吸附率可达 81.16%, 然后通过离心和过滤的方式可以去除 AFB_1 与酿酒酵母 Y1 的复合体, 从而确保了吸附作用后酵母菌的食品安全。Hernandez - Mendoza 等^[54]分离出对 AFB_1 吸附率达 49.2% 的干酪乳杆菌 L30, 所形成的毒素 - 菌体复合体稳定性强, 即使经过反复水洗也只有极少的毒素发生解吸附, 说明其吸附过程是一个有限的可逆过程。

4 结束语

黄曲霉毒素严重威胁动物和人类的健康, 给农业发展带来诸多问题。目前, 物理法、化学法和生物法 3 种常用的黄曲霉毒素脱除方法已在食品与饲料行业中广泛应用。但是, 每种方法都有优点和缺点。物理法降解黄曲霉毒素的过程中, 高温和高压虽然破坏了黄曲霉毒素, 但同时也破坏了某些营养成分。化学法对黄曲霉毒素有强大的降解能力, 但反应效率低, 化学试剂残留可能直接损害动物和人类健康。与物理法和化学法相比, 生物法降解作用温和, 对食品品质影响较小, 环保安全, 但是可能存在菌株抗性低, 菌种的分离、纯化、培养等难度大, 菌株的解毒酶产量低、活性不稳定, 释放不受欢迎的代谢产物等问题。如果能将以上方法结合起来使用, 做到取长补短, 相信可以有效地保护人类免受黄曲霉毒素的侵害, 减少经济损失。

参考文献:

- [1] RUSHING B R, SELIM M I. Aflatoxin B₁: a review on metabolism, toxicity, occurrence in food, occupational exposure, and detoxification methods [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 124:81 - 100.
- [2] WILLIAMS J H, PHILLIPS T D, JOLLY P E, et al. Human aflatoxicosis in developing countries: a review of toxicology, exposure, potential health consequences, and interventions[J]. Am J Clin Nutr, 2004, 80(5): 1106 - 1122.
- [3] CRAVENS R L, GOSS G R, CHI F, et al. The effects of necrotic enteritis, aflatoxin B₁, and virginiamycin on growth performance, necrotic enteritis lesion scores, and mortality in young broilers[J]. Poult Sci, 2013, 92(8): 1997 - 2004.
- [4] ESKOLA M, KOS G, ELLIOTT C T, et al. Worldwide

- contamination of food – crops with mycotoxins: validity of the widely cited ‘FAO estimate’ of 25% [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(16): 2773 – 2789.
- [5] 宋承钢, 王彦多, 杨健, 等. 黄曲霉毒素脱毒研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(12): 3945 – 3957.
- [6] IARC. Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene [J]. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 2002, 82:1 – 556.
- [7] MONSON M S, COULOMBE R A, REED K M. Aflatoxicosis: lessons from toxicity and responses to aflatoxin B₁ in poultry [J]. *Agriculture*, 2015, 5(3): 742 – 777.
- [8] CREPPY E E. Update of survey, regulation and toxic effects of mycotoxins in Europe [J]. *Toxicol Lett*, 2002, 127(1): 19 – 28.
- [9] FAKHRI Y, RAHMANI J, OLIVEIRA C A F, et al. Aflatoxin M₁ in human breast milk: a global systematic review, meta – analysis, and risk assessment study (Monte Carlo simulation) [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 88: 333 – 342.
- [10] MARSHALL H, MENEELY J P, QUINN B, et al. Novel decontamination approaches and their potential application for post – harvest aflatoxin control [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 106:489 – 496.
- [11] KUMAR P, MAHATO D K, KAMLE M, et al. Aflatoxins: a global concern for food safety, human health and their management [J]. *Front Microbiol*, 2016, 7: 1 – 10.
- [12] ZHENG H Y, WEI S, XU Y, et al. Reduction of aflatoxin B₁ in peanut meal by extrusion cooking [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2015, 64(2): 515 – 519.
- [13] 王婧莹, 王琢, 闫培生. 黄曲霉毒素的脱毒研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(4): 42 – 51.
- [14] RUSTOM I Y S. Aflatoxin in food and feed: occurrence, legislation and inactivation by physical methods [J]. *Food Chem*, 1997, 59(1): 57 – 67.
- [15] SMITH J W, GROOPMAN J D. Aflatoxins [M]// *Encyclopedia of cancer*. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2019: 30 – 43.
- [16] ZAVALA – FRANCO A, ARÁMBULA – VILLA G, RAMÍREZ – NOGUERA P, et al. Aflatoxin detoxification in tortillas using an infrared radiation thermo – alkaline process: cytotoxic and genotoxic evaluation [J/OL]. *Food Control*, 2020, 112: 107084 [2020 – 11 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107084>.
- [17] HWANG J H, LEE K G. Reduction of aflatoxin B₁ contamination in wheat by various cooking treatments [J]. *Food Chem*, 2006, 98(1): 71 – 75.
- [18] YAZDANPANAH H, MOHAMMADI T, ABOUHOSSAIN G, et al. Effect of roasting on degradation of aflatoxins in contaminated pistachio nuts [J]. *Food Chem Toxicol*, 2005, 43(7): 1135 – 1139.
- [19] ELIAS – OROZCO R, CASTELLANOS – NAVA A, GAYTÁN – MARTÍNEZ M, et al. Comparison of nixtamalization and extrusion processes for a reduction in aflatoxin content [J]. *Food Addit Contam*, 2002, 19(9): 878 – 885.
- [20] MÉNDEZ – ALBORES A, MARTÍNEZ – BUSTOS F, GAYTÁN – MARTÍNEZ M, et al. Effect of lactic and citric acid on the stability of B – aflatoxins in extrusion – cooked sorghum [J]. *Lett Appl Microbiol*, 2008, 47(1): 1 – 7.
- [21] 夏超笃, 艾琴, 湛穗璋, 等. 霉菌毒素吸附剂在动物饲料中应用的研究进展 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2017, 38(4): 27 – 31.
- [22] KAHANI S A, HAMADANIAN M, VANDADI O. Deposition of magnetite nanoparticles in activated carbons and preparation of magnetic activated carbons [J]. *AIP Conf Proc*, 2007, 929(1): 183 – 188.
- [23] 李智高, 毛永杨, 狄朋敏, 等. 食品中黄曲霉毒素的降解方法的研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(14): 4597 – 4602.
- [24] KHAN F A, ZAHOOR M. In vivo detoxification of aflatoxin B₁ by magnetic carbon nanostructures prepared from bagasse [J/OL]. *BMC Vet Res*, 2014, 10(1): 255 [2020 – 11 – 27]. <https://doi.org/10.1186/s12917-04-0255y>.
- [25] SADIA A, DYKES L, DENG Y. Transformation of adsorbed aflatoxin B₁ on smectite at elevated temperatures [J]. *Clays Clay Miner*, 2016, 64: 220 – 229.
- [26] BINGHAM A K, HUEBNER H J, PHILLIPS T D, et al. Identification and reduction of urinary aflatoxin metabolites in dogs [J]. *Food Chem Toxicol*, 2004, 42(11): 1851 – 1858.
- [27] PHILLIPS T D, AFRIYIE – GYAWU E, WILLIAMS J, et al. Reducing human exposure to aflatoxin through the use of clay: a review [J]. *Food Addit Contam A*, 2008, 25(2): 134 – 145.
- [28] 余婷婷. 黄曲霉毒素脱毒方法研究进展 [J]. *广东第二师范学院学报*, 2013, 33(5): 63 – 69.
- [29] 莫紫梅, 袁光蔚, 陈宁周, 等. 黄曲霉毒素降解技术及其降解产物研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(2): 188 – 193.
- [30] GARG N, AGGARWAL M, JAVED S, et al. Studies for optimization of conditions for reducing aflatoxin contamination in peanuts using ultraviolet radiations [J]. *Int J Drug Dev Res*, 2013, 5: 408 – 424.

- [31] MAO J, HE B, ZHANG L X, et al. A structure identification and toxicity assessment of the degradation products of aflatoxin B₁ in peanut oil under UV irradiation [J/OL]. *Toxins (Basel)*, 2016, 8(11): 332 [2020 - 11 - 27]. <https://doi.org/10.3390/toxins8110332>.
- [32] ZHANG Z S, XIE Q F, CHE L M. Effects of gamma irradiation on aflatoxin B₁ levels in soybean and on the properties of soybean and soybean oil [J]. *Appl Radiat Isot*, 2018, 139: 224 - 230.
- [33] PULIGUNDLA P, LEE T, MOK C. Effect of corona discharge plasma jet treatment on the degradation of aflatoxin B₁ on glass slides and in spiked food commodities [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 124: 108333 [2020 - 11 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108333>.
- [34] 江潇潇, 许秀琴, 朱勇, 等. 饲料中霉菌毒素的危害及其控制技术研究进展 [J]. *宁波农业科技*, 2013(2): 15 - 18.
- [35] 陈志娟, 刘阳, 邢福国, 等. 氨气熏蒸降解玉米中黄曲霉毒素 B₁ 的条件优化 [J]. *食品科学*, 2010, 31(8): 33 - 37.
- [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.
- [37] 张春华, 张森, 黄蔚霞. 花生油中黄曲霉毒素脱除技术研究 [J]. *中国油脂*, 2014, 39(7): 62 - 64.
- [38] 杨威, 董志文, 雷芬芬, 等. 碱液处理花生脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(3): 90 - 93.
- [39] 林叶, 李进伟, 蒋将, 等. 臭氧去除黄曲霉毒素 B₁ 工艺优化及其对花生粕营养品质的影响 [J]. *中国油脂*, 2015, 40(11): 28 - 32.
- [40] LUO X H, WANG R, WANG L, et al. Effect of ozone treatment on aflatoxin B₁ and safety evaluation of ozonized corn [J]. *Food Control*, 2014, 37: 171 - 176.
- [41] 陈冉, 李培武, 马飞, 等. 花生黄曲霉毒素污染臭氧脱毒技术研究 [J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35(1): 92 - 96.
- [42] MOHAMMADI H, MAZLOOMI S M, ESKANDARI M H, et al. The effect of ozone on aflatoxin M₁, oxidative stability, carotenoid content and the microbial count of milk [J]. *Ozone - Sci Eng*, 2017, 39(6): 447 - 453.
- [43] MÉNDEZ - ALBORES A, ARÁMBULA - VILLA G, LOARCA - PIÑA M G F, et al. Safety and efficacy evaluation of aqueous citric acid to degrade B - aflatoxins in maize [J]. *Food Chem Toxicol*, 2005, 43(2): 233 - 238.
- [44] 李建辉, 魏益民, 郭波莉, 等. 柠檬酸对花生 B 族黄曲霉毒素脱毒效果的研究 [J]. *食品科学*, 2009, 30(13): 37 - 40.
- [45] 金华丽, 史秋映. 柠檬酸处理对花生粕中黄曲霉毒素 B₁ 脱毒效果的研究 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3): 39 - 42.
- [46] AIKO V, EDAMANA P, MEHTA A. Decomposition and detoxification of aflatoxin B₁ by lactic acid [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(6): 1959 - 1966.
- [47] 谢慧, 高蕾, 赵丹丹, 等. 生物法降解黄曲霉毒素 B₁ 的研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2020(8): 1 - 8.
- [48] WANG Y, ZHANG H Y, YAN H, et al. Effective biodegradation of aflatoxin B₁ using the *Bacillus licheniformis* (BL010) strain [J/OL]. *Toxins (Basel)*, 2018, 10: 497 [2020 - 11 - 27]. <https://doi.org/10.3390/toxins10120497>.
- [49] KARUNARATNE A, WEZENBERG E, BULLERMAN L. Inhibition of mold growth and aflatoxin production by *Lactobacillus* spp. [J]. *J Food Prot*, 1990, 53: 230 - 236.
- [50] WANG L W, WU J, LIU Z W, et al. Aflatoxin B₁ degradation and detoxification by *Escherichia coli* CG1061 isolated from chicken cecum [J/OL]. *Front Pharmacol*, 2019, 9: 1548 [2020 - 11 - 27]. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01548>.
- [51] GHANBARI R, REZAIE S, NOORBAKHS F, et al. Biocontrol effect of *Kluyveromyces lactis* on aflatoxin expression and production in *Aspergillus parasiticus* [J/OL]. *FEMS Microbiol Lett*, 2019, 366(10): 114 [2020 - 11 - 27]. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnz114>.
- [52] WANG J, OGATA M, HIRAI H, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ by manganese peroxidase from the white - rot fungus *Phanerochaete sordida* YK - 624 [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2011, 314(2): 164 - 169.
- [53] 刘畅, 刘阳, 邢福国, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 吸附菌株的筛选及吸附机理研究 [J]. *核农学报*, 2010, 24(4): 766 - 771.
- [54] HERNANDEZ - MENDOZA A, GUZMÁN - DE - PEÑA D, GARCIA H. Key role of teichoic acids on aflatoxin B₁ binding by probiotic bacteria [J]. *J Appl Microbiol*, 2009, 107: 395 - 403.