

食品中黄曲霉毒素的降解方法的研究进展

李智高¹, 毛永杨^{1*}, 狄朋敏², 苏 涛¹, 田金兰¹

(1. 大理州食品检验检测院, 大理 671000; 2. 弥渡县新街镇农业农村服务中心, 大理 675600)

摘 要: 黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)是一种致癌性较强的剧毒物质, 主要由曲霉属真菌产生, 广泛存在于食品及其动物饲料中, 严重危害着人体健康。黄曲霉毒素具有稳定的结构, 一般的处理很难将其去除。因此如何将黄曲霉毒素有效降解确保食品安全一直是研究的重点。本文主要介绍了近些年黄曲霉毒素的物理降解法、化学降解法和生物降解法的研究进展, 以期为食品中黄曲霉毒素的降解提供参考。

关键词: 黄曲霉毒素; 物理降解; 化学降解; 生物降解

Research progress on the degradation methods of aflatoxin in food

LI Zhi-Gao¹, MAO Yong-Yang^{1*}, DI Peng-Min², SU Tao¹, TIAN Jin-Lan¹

(1. Dali Institute for Food Control, Dali 671000, China;

2. Agricultural Rural Service Center of Xinjie Town Midu County, Dali 675600, China)

ABSTRACT: Aflatoxin (AFT) is a highly carcinogenic and highly toxic substance mainly produced by *Aspergillus fungi*, which is widely found in food and animal feeds, and seriously endangers human health. Aflatoxin has a stable structure and is difficult to remove by general treatment. Therefore, how to effectively degrade aflatoxin to ensure food safety has always been the focus of research. This paper mainly introduced the research progress of aflatoxin degradation by physical method, chemical method and biological method in recent years, so as to provide reference for the degradation of aflatoxin in food.

KEY WORDS: aflatoxin; physical detoxification; chemical detoxification; bio-degradation

1 引 言

黄曲霉毒素是一类化学结构类似的二氢呋喃香豆素衍生物, 主要由黄曲霉(*Aspergillus flavus*)和寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)产生^[1]。黄曲霉毒素常见于花生、玉米、大豆、小麦等粮食及其制品中, 是天然存在的剧毒物质, 具有致突变、致畸性、强致癌性, 1993 年被世界卫生组织的癌症研究机构列为 IA 类致癌物质^[2]。黄曲霉毒素是一类比较稳定的真菌毒素, 微溶于水, 不溶于非极性溶剂, 可溶于强极性的有机溶剂, 如氯仿和甲醇; 具有较强的热稳定性, 常规的加热处理无法破坏黄曲霉毒素的结构。

目前已知的黄曲霉毒素有 20 余种, 常见的有黄曲霉

毒素 B₁(AFB₁)、黄曲霉毒素 B₂(AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁(AFG₁)、黄曲霉毒素 G₂(AFG₂)、黄曲霉毒素 M₁(AFM₁) 和黄曲霉毒素 M₂(AFM₂)^[3]。其中黄曲霉毒素 B₁ 的毒性和致癌性最强, 可在粮食的生长、收获、储运、加工、流通等环节中发生污染, 对食品安全及人体健康构成巨大威胁。2012 年欧盟食品和饲料类快速预警系统通报中指出, 真菌毒素是食品和饲料主要的风险因子, 而黄曲霉毒素占有通报真菌毒素的 92%左右^[4]。如何有效降解食品中的黄曲霉毒素, 减少黄曲霉毒素带来的损失, 确保食品安全和人体健康已成了当今食品安全的一大课题。

目前, 黄曲霉毒素的降解方法主要有物理降解、化学降解和生物降解 3 种, 本文对目前 3 种降解方法中的主要方

*通讯作者: 毛永杨, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全与质量检测。E-mail: maoyongyang@163.com

*Corresponding author: MAO Yong-Yang, Engineer, Dali Institute for Food Control, East Longshan Road, Dali Economic Development Zone, Dali 671000, China. E-mail: maoyongyang@163.com

法进行概述, 以期为食品中黄曲霉毒素的降解提供参考。

2 黄曲霉毒素主要的物理降解方法

2.1 挤压蒸煮法

挤压蒸煮法广泛用于食品工业领域, 特别是即食谷物类食品、面食制品、挤压食品等。郑海燕^[5]将 20 mg/L 的黄曲霉毒素 B₁ 经 120 °C 处理后, 没有明显的降解效果, 黄曲霉毒素 B₁ 经 210 °C 处理后降解率达到 93.8%, 挤压蒸煮法就是利用高温、高压、高剪切力的作用对食品中的黄曲霉毒素进行迅速有效的降解。其基本程序是食品原料通过双螺杆挤出机(twin-screw extruder)切成块状或粉末与溶液混合, 然后通过保温(heat preservation)和水解来提取该液体, 最后利用柠檬酸或乳酸进行处理, 具体处理工艺参见图 1^[5]。

挤压蒸煮法对黄曲霉毒素的结构可以进行有效破坏, Cazzaniga 等^[6]通过实验来评估该方法对玉米粉中黄曲霉毒素的降解效率, 结果表明挤压蒸煮法可以有效地灭活黄曲霉毒素, 降解效率超过 95%。

挤压蒸煮法降解黄曲霉毒素的效率, 适用于谷物类、米面类、食用油料等食品加工厂和饲料厂, 但高温、高压、高剪切力的条件会影响食品的口感及营养品质, 同时在使用挤压蒸煮法时可能添加乳酸或柠檬酸等添加剂, 添加剂的使用不仅可能影响食品的风味, 还可能存在添加剂残留的问题, 故挤压蒸煮法不适用于精细食品中黄曲霉毒素的降解。此外, 挤压蒸煮法需要高温、高压的条件, 而产生高温、高压的条件需要消耗大量的能源和水资源, 不符合当前节能环保的生产理念。

2.2 物理吸附法

物理吸附法是利用多孔固体物质作为吸附剂, 将固体和气体或固体和液体组成的两相体系中的吸附物富集于固体吸附剂表面^[7]。目前, 常用的吸附剂有磁性碳和水合硅铝酸钙钠。

活性炭因其具有高表面积和廉价可用性, 通常被用于吸附有机和无机毒素^[8]。但因在食品生产过程中活性炭

能吸附食品中的水、食盐等成分, 致使食品的口感、品质等发生变化, 使其在食品工业中的应用受到限制。磁性碳不仅具有活性炭材料的优良吸附特性, 还具有磁性材料在外磁场作用下可控移动、易于分离的特性^[9], 有效弥补了活性炭存在的缺点。Khan 等^[10]评估了甘蔗渣中获得的磁性碳对家禽中黄曲霉毒素 B₁ 的吸附效率, 结果表明在饲料中添加 0.3 g/kg 的磁性碳是去除肉鸡黄曲霉毒素 B₁ 最有效和最安全的量, 该研究表明磁性碳对黄曲霉毒素降解具有很高的效率。

水合硅铝酸钙钠(hydrated sodium calcium aluminosilicates, HSCAS)通常作为抗结块剂添加到动物饲料中。水合硅铝酸钙钠具有多孔、表面积大、离子活跃等特性, 能高效的吸附黄曲霉毒素。Phillips 等^[11]研究表明在体外 HSCAS 以高亲和力吸附黄曲霉毒素 M₁, 降低了奶牛和山羊奶中黄曲霉毒素 M₁ 的含量。

物理吸附法主要依靠分子间的范德华力进行吸附, 具有较快的吸附和解吸速度, 吸附剂不会因为吸附作用而发生性质改变, 可以回收重复使用。但物理吸附法因其吸附选择性差, 吸附能力小, 稳定性差, 要广泛应用于食品加工生产中仍需进一步开发与研究。

2.3 辐照法

辐照法降解食品中黄曲霉毒素的原理是利用电离辐射产生的高能射线杀死产生黄曲霉毒素的菌株, 并改变黄曲霉毒素的分子结构。辐照法是一种有效提高食品安全和延长食品货架期的绿色食品加工方法^[12], 目前所采用的辐照法主要有紫外线辐照法; ⁶⁰Co、¹³⁷Cs 产生的 γ 射线法; 电子束法^[13]。王辰龙等^[14]研究不同辐照剂量下 ⁶⁰Co 辐照对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 降解率及对花生油品质的影响, 结果得出: 当黄曲霉毒素 B₁ 的初始含量小于等于 4 mg/kg 时, 10 kGy 的辐照剂量可以完全去除花生油中黄曲霉毒素 B₁, 在花生油的实际生产中黄曲霉毒素 B₁ 的含量小于 1 mg/kg, 故选择的辐照剂量小于 10 kGy, 该方法不仅能有效降解花生油中的黄曲霉毒素 B₁, 而且对花生油的品质没有明显影响。

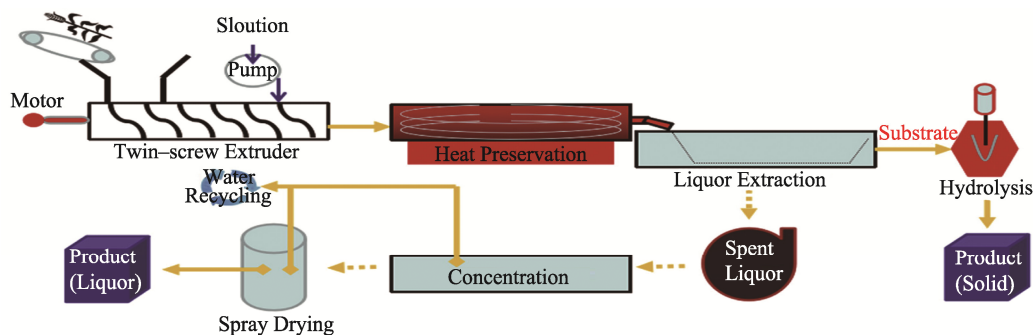


图 1 挤压机设置图

Fig.1 Diagram of the set up for extruder

王守经等^[15]利用不同剂量的高能电子束和 γ 射线对含有黄曲霉毒素 B₁ 的小麦粉进行辐照处理, 结果表明: 不同剂量的高能电子束与 γ 射线辐照处理对小麦粉中黄曲霉毒素 B₁ 均具有一定的降解作用, 在一定条件下降解率随辐照剂量升高而增大, 随黄曲霉毒素 B₁ 的浓度增大而降低; 在辐照剂量高于 6.0 kGy 的条件下, 对溶液状态下的黄曲霉毒素 B₁ 的降解率均超过 90%。

辐射法对食品的口感及品质影响极小, 能最大程度地减少食品中营养的损失, 不存在添加剂的影响, 可大规模的应用于食品生产过程中真菌毒素的降解。但辐射法存在对固态食品穿透性较弱, 辐射产物存在不确定性等缺点, 故要在食品安全生产过程中广泛使用辐射法还需要进一步深入研究。

3 黄曲霉毒素主要的化学降解法

3.1 碱处理法

碱炼法是碱处理法中的一种, 其原理是利用碱性溶液打开黄曲霉毒素的内酯环并形成钠盐, 黄曲霉毒素的结构发生改变使其毒性降低或者消失, 所形成的盐可在后续工艺中去除。张春华等^[16]采用 pH 8~9 的碱液对含黄曲霉毒素 B₁ 的花生油进行处理, 黄曲霉毒素 B₁ 的降解率超过 50%; 刘玉兰等^[17]通过碱炼法脱除玉米油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究, 结果表明在碱液质量分数 6.85%、超量碱 0.4%、碱炼温度 55 °C 的条件下, 经过 20 min 碱炼后, 玉米毛油中的黄曲霉毒素 B₁ 含量由 73.35 $\mu\text{g/kg}$ 降至 0.62 $\mu\text{g/kg}$, 其降解率高达 99.15%。碱炼法是油脂工业中用于黄曲霉毒素降解、除杂等重要的工序, 但碱性溶液可以和食品中的某些营养成分发生反应, 从而影响食品的口感及其品质, 所以碱炼法主要用于油脂生产中, 不适用于高端食品或精细食品的生产中。

氨处理法是碱处理法中最常用的一种, 其原理是氢氧化铵和黄曲霉毒素发生脱羟基反应, 使黄曲霉毒素的内酯环受到破坏, 从而使黄曲霉毒素失去毒性或降解。氨处理法中最主要的应用是氨气熏蒸法, 赵国斌^[18]利用氨气熏蒸法对污染黄曲霉毒素 B₁ 的花生进行处理, 在氨气浓度 10%、熏蒸温度 40 °C、花生含水量 30% 的条件下, 经过 96 h 的熏蒸, 黄曲霉毒素 B₁ 达到 95.06% 的降解率。氨气制作成本较低, 易于回收, 氨气熏蒸操作简单, 对黄曲霉毒素的降解效率高。但氨气不仅对人体健康及环境有一定的影响, 而且还影响食品的品质。目前氨气熏蒸法广泛用于筒仓粮食储存过程中, 筒仓的特殊结构有利于氨气熏蒸及回收, 且能在食品生产原料上消除黄曲霉毒素的危害。

3.2 臭氧处理法

臭氧具有很强的氧化性, 可以有效破坏黄曲霉毒素中呋喃环的双键^[19], 黄曲霉毒素结构的改变使毒性降低或消

失。陈冉等^[20]利用臭氧脱毒专用装置, 在臭氧浓度 6.0 mg/L 的条件下, 对水分含量为 5% 的花生处理 30 min, 花生中黄曲霉毒素总量和黄曲霉毒素 B₁ 脱毒率分别达到 65.88% 和 65.9%, 具有明显的脱毒效果。罗小虎等^[21]利用质量浓度为 90 mg/L 的臭氧对水分含量 20.37%、黄曲霉毒素 B₁ 含量 77.6 $\mu\text{g/kg}$ 的玉米进行处理 40 min, 黄曲霉毒素 B₁ 的含量降至 21.42 $\mu\text{g/kg}$, 其降解率达 72.4%。很多研究都证明了臭氧可以快速有效的降解食品中的黄曲霉毒素, 而且在一定条件下, 黄曲霉毒素的降解率随着臭氧质量浓度的增加和处理时间的延长而升高。

臭氧的制备工艺简单, 在食品生产中使用方便, 极易分解成为氧气, 无毒害物质产生。臭氧是一种强氧化剂, 具有较强的氧化性能和良好的渗透性。臭氧除可以有效消减黄曲霉毒素外, 还具有去除原料中的残留农药, 杀灭各种微生物和昆虫, 延长食品的保质期等优点^[22]。由于臭氧优异的性能, 目前已经广泛用于食品生产中的保鲜灭菌等工艺中, 广泛用于粮食储存加工过程中真菌毒素的降解。

但在臭氧使用过程中具有一定的危害性, 首先高浓度的臭氧具有一定的毒性, 当质量浓度为 0.1 mg/L 时, 对五官有刺激性, 质量浓度为 1~10 mg/L 时, 出现头痛及呼吸器官局部麻痹, 质量浓度为 5~20 mg/L 时, 可能导致死亡^[23]; 其次较强的氧化能力对设备及金属物质等具有一定的腐蚀作用, 同时还能破坏食品中的营养成分从而影响食品的品质。所以使用臭氧对食品中的黄曲霉毒素进行降解具有一定的局限性, 要将臭氧处理更广泛的应用到食品的生产、加工、储存等过程中还需要进一步深入研究。

4 黄曲霉毒素主要的生物降解法

在食品生产、加工、储存等过程中, 对食品中真菌毒素的降解应具备: 有效降解真菌毒素; 不产生有毒有害物质, 不改变食品中固有的风味, 不影响食品的品质; 节能环保低成本, 不对人员健康带来伤害。而生物降解法具备了上述应具备的条件, 目前主要的生物降解法有: 微生物吸附法、微生物降解法、生物提取物降解法。

4.1 微生物吸附法

自然界中许多微生物的细胞壁存在着能够吸附黄曲霉毒素的成分, 微生物的细胞壁吸附毒素后, 形成菌体—毒素的复合体, 达到稳定状态, 降低毒素的生物利用度, 使其难以被机体吸收, 进而排出体外^[24]。利用益生菌对黄曲霉毒素吸附, 研究较多的是酵母菌和乳酸菌的吸附作用^[25]。

酵母菌的细胞壁中含有特殊的成分, 如甘露聚糖、葡聚糖和几丁质等, 这些特殊的成分让酵母菌具有了较好的吸附黄曲霉毒素的能力。刘畅等^[26]首次筛选出了吸附效果最佳的酿酒酵母 Y₁, 它对黄曲霉毒素 B₁ 的吸附率达到了 81.16%, 通过离心和过滤的方法可以去除酿酒酵母 Y₁ 与黄曲霉毒素 B₁ 的结合产物, 从而确保了酵母菌吸附作

用后的食品安全。Shetty 等^[27]从加纳食品和高粱啤酒中分离出 18 株酵母菌,研究了这 18 株酵母菌对黄曲霉毒素的吸附作用,结果表明这些菌株对黄曲霉毒素的够吸附率超过 60%,而且大部分菌株对黄曲霉毒素 B₁ 的吸附率超过 15%。

乳酸菌的脱毒机制主要是细胞壁中 N-乙酰胞壁酸及 N-乙酰葡萄糖胺为主要成分的肽聚糖对黄曲霉毒素 B₁ 进行物理吸附^[28]。Fazeli 等^[29]从伊朗传统面包和乳制品中分离出干酪乳杆菌、植物乳杆菌和发酵乳杆菌,发现 3 种乳酸菌能够与黄曲霉毒素 B₁ 结合,使黄曲霉毒素 B₁ 丧失毒性,其中干酪乳杆菌与黄曲霉毒素 B₁ 的结合能力最强。Hernandez-Mendoza 等分离出对黄曲霉毒素 B₁ 吸附率达 49.2% 的干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei* L30),所形成的毒素-菌体复合物稳定性良好,反复水洗其毒素-菌体复合物只有极少的毒素解吸附,证明了其吸附过程是一个有限的可逆过程^[30]。

虽然在食品工业中微生物吸附真菌毒素通常使用的是益生菌,使用益生菌还可以改良食品的风味和品质,在使用过程中节约资源不会影响环境和损害人体健康,但是微生物对黄曲霉毒素的吸附作用是无特异性的物理吸附,不是以共价键的形式结合,吸附力较弱,而且吸附过程存在着可逆性。所以在食品工业中,利用微生物吸附黄曲霉毒素的应用还存在一定的局限性,有待进一步开发和完善。

4.2 微生物降解法

微生物对黄曲霉毒素的降解最主要是利用微生物可以产生各种酶,通过酶促反应破坏黄曲霉毒素的毒性结构,将黄曲霉毒素降解成为无毒产物。生物酶解法主要分为真菌降解和细菌降解 2 大类。其中真菌的解毒作用主要源于细胞内提取物,而细菌的解毒作用多源于胞外代谢产物^[29,31]。

降解黄曲霉毒素的真菌,包括寄生曲霉菌(*Aspergillus parasiticus*)、根霉菌(*Rhizopus*)、白腐真菌(*Trametes versicolor*)、假密环菌(*Armillariellatabescens*)和黑曲霉(*Aspergillus niger*)等^[32]。李冰^[1]从 300 株细菌、真菌和放线菌中分离出具有降解黄曲霉毒素 B₁ 能力的 1 株乳酸菌、1 株米曲霉和 1 株黑曲霉,其中黑曲霉降解能力最佳,对黄曲霉毒素 B₁ 降解率可达 93.28%,并对黑曲霉胞外粗提液、胞内提取物降解黄曲霉毒素进行分析,发现黑曲霉的胞外粗提液对黄曲霉毒素 B₁ 的降解率最高;Adebo 等^[33]分离出的梭状芽孢杆菌对黄曲霉毒素 B₁ 进行 48 h 降解,降解率达 61.3%,降解时间 60 h 后黄曲霉毒素 B₁ 全部降解。Liu 等^[34]发现食用型真菌假密环菌中提取的胞内粗酶液能够高效降解黄曲霉毒素 B₁,降解效率达到 80%。Wang 等^[35]对白腐菌进行研究,发现该菌分泌一种能够有效降解黄曲霉毒素 B₁ 的锰过氧化物酶,降解率高达 86.0%。

诸多研究表明很多细菌具有降解黄曲霉毒素的能力,Adebo 等^[36]提取假单胞菌 VGF₁、荧光假单胞菌和葡萄球菌 VDF₂ 的胞内液,其提取液加入蛋白酶抑制剂后进行黄曲霉毒素 B₁ 的降解,6 h 后黄曲霉毒素 B₁ 的降解率分别达到 66.5%、63%和 100%;Xia 等^[37]从土壤中分离出能降解黄曲霉毒素 B₁ 的枯草芽孢杆菌 JSW-1,30 °C 的条件下经过 72 h,黄曲霉毒素 B₁ 的降解率达 67.2%;Raksha 等^[38]分离出地衣芽孢杆菌 CFR1,其胞外提取物降解黄曲霉毒素 B₁ 72 h 后,黄曲霉毒素 B₁ 降解率达 93.57%。

利用微生物降解食品中的黄曲霉毒素,具有安全、环保、高效、改良食品品质等优点,符合当今食品工业的发展理念。但实际生产中还存在降解菌株的抗性低,菌种分离、纯化、培养困难,菌株的解毒酶产量低、活性不稳定等问题。要让微生物降解法更广泛的用于食品工业中还需要进一步研究优化和完善。

4.3 生物提取物降解法

许多研究表明从生物中提取的某些活性成分对黄曲霉的生长具有抑制作用,对黄曲霉毒素具有降解的效果。吴清华^[39]在研究茶叶中抑制黄曲霉毒素产生的组分中发现没食子酸、表儿茶素、表没食子儿茶素、香豆素对黄曲霉产毒具有较强的抑制作用;柠檬酸是用于食品中黄曲霉毒素降解最有代表性的生物提取物之一,Rushing 等^[40]认为柠檬酸将黄曲霉毒素 B₁ 转化为黄曲霉毒素 B_{2a} 的能力较强,黄曲霉毒素 B₁ 在柠檬酸 96 h 的作用下转化率超过 97%,当黄曲霉毒素 B₁ 在柠檬酸溶液中煮沸 20 min 时,转化率甚至达到 98%。

虽然很多生物提取物中的某些活性对黄曲霉的生长具有抑制作用,对黄曲霉毒素具有降解的效果,但是这些活性物质在提取的过程中工艺复杂,成本较高,提取过程中存在着对环境的影响,所以目前该方法只适用于精细食品、高端食品的加工过程中,不适合用于大规模生产^[41-43]。

综上所述,每种方法都有各自的优点和局限性。在食品安全生产过程中,应根据所生产食品的特性,选择合适的方法对黄曲霉毒素进行有效降解,各方法的优缺点详见表 1。

5 结 论

随着对食品中黄曲霉毒素的物理、化学和生物降解技术研究的逐步深入,在黄曲霉毒素的降解效率等方面取得了实质性的成果,但各种降解方法对食品品质产生的影响仍存在诸多的不确定性。生物降解法相对于物理、化学方法,安全、特异性强、节能环保、对食品品质和风味影响较小,符合当前食品工业的发展理念,具有较广阔的发展前景,但要使生物法降解食品中黄曲霉毒素实现规模化应用,仍需进一步深入研究。

表 1 黄曲霉毒素的不同降解方法的优点和缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of different degradation methods of aflatoxin

名称	方法	优点	缺点
物理方法	挤压蒸煮法	降解效率高, 有效破坏毒素结构	影响食品品质, 高能耗, 存在添加剂残留的风险
	物理吸附法	成本低, 吸附剂可重复使用	吸附力弱, 选择性差, 稳定性差
	辐射法	降解效率高, 适用于大规模食品生产中, 对食品品质影响小	对固体食品穿透性弱, 辐射产物存在不确定性, 成本较高
化学方法	碱炼法	成本低, 易回收, 降解效率高, 适用于大规模食品生产中	存在对人体及设备造成危害的风险, 对食品的品质、风味有影响, 存在化学残留物等可能, 污染大
	臭氧处理法	使用方便, 氧化性、渗透性强, 降解效率高, 无毒害物产生	存在对人体及设备造成危害的风险, 对食品的品质存在影响, 成本高
	微生物吸附法	对食品风味影响小, 作用温和, 安全、环保	吸附力弱, 吸附过程存在可逆性
生物法	微生物降解法	安全、环保、高效, 对食品品质影响较小	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
	生物提取物法	降解作用温和, 对食品品质影响较小, 安全	工艺复杂, 成分复杂, 成本高, 影响环境

参考文献

[1] 李冰. 黑曲霉对黄曲霉毒素 B₁ 的降解及应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
Li B. Degradation and application of aflatoxin B₁ by aspergillus niger [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.

[2] Habibipour R, Tamandegani PR, Farmany A. Monitoring of aflatoxin G₁, B₁, G₂, and B₂ occurrence in some samples of walnut [J]. Environ Monitor Assess, 2016, 188(12): 669–675.

[3] Gross-Steinmeyer K, Eaton DL. Dietary modulation of the biotransformation and genotoxicity of aflatoxin B₁ [J]. Toxicology, 2012, 299(2/3): 69–79.

[4] Marin S, Ramos AJ, Cano-Sancho G, et al. Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment [J]. Food Chem Toxicol, 2013, 60: 218–237.

[5] 郑海燕. 挤压降解黄曲霉毒素 B₁ 及作用机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Zhen HY. Study on degradation of aflatoxin B₁ by extrusion and its mechanism [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.

[6] Cazzaniga D, Basilico JC, Gonzalez RJ, et al. Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour [J]. Lett Appl Microbiol, 2001, 33: 144–147.

[7] 曹铭, 樊明涛. 黄曲霉毒素脱除技术研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 260–264.
Cao M, Fan MT. Progress on aflatoxin removing technique [J]. Food Mach, 2015, 31(1): 260–264.

[8] Kahani SA, Hamadian M, Vandadi O. Deposition of magnetite nanoparticles in activated carbons and preparation of magnetic activated carbons [J]. AIP Confer Proceed, 2007, 3: 183–188.

[9] Zhou WQ, Liu MM, Cai C, et al. Highly regenerable carbon-Fe₃O₄ core-satellite nanospheres as oxygen reduction electrocatalyst and magnetic adsorbent [J]. J Solid State Chem, 2017, 246: 357–362.

[10] Khan FA, Zahoor M. In vivo detoxification of aflatoxin B₁ by magnetic carbon nanostructures prepared from bagasse [J]. BMC Veter Res, 2014, 10: 255.

[11] Phillips TD, Clement BA, Kubena LF, et al. Detection and detoxification of aflatoxins: Prevention of aflatoxicosis and aflatoxin residues with hydrated sodium calcium aluminosilicate [J]. Veter Human Toxicol, 1990, 32: 15–19.

[12] 哈益明. 辐照技术在保障食品安全中的作用和应用领域[C]//中国核科学技术进展报告—中国核学会2009年学术年会论文集(第一卷·第8册). 北京: 原子能出版社, 2010.
Ha YM. The role and application of irradiation technology in ensuring food safety [C]//Chinese nuclear science and technology progress report - proceedings of the 2009 annual conference of the Chinese nuclear society (volume 1, volume 8). Beijing: Atomic Energy Press, 2010.

[13] 李萌萌, 关二旗, 卞科, 等. 真菌毒素的辐照降解及产物解析研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2013, (1): 14–18.
Li MM, Guan EQ, Bian K, et al. Research progress on degradation and product analysis of fungal toxins by irradiation [J]. Food Feed Ind, 2013, (1): 14–18.

[14] 王辰龙, 陈蕾, 闫晓明. ⁶⁰Co 辐照降解花生油中黄曲霉毒素 B₁ 及对花生油品质的影响[J]. 中国油脂, 2014, 39(2): 53–56.
Wang CL, Chen L, Yan XM. Effect of aflatoxin B₁ degradation by ⁶⁰Co irradiation on peanut oil quality [J]. China Oils Fats, 2014, 39(2): 53–56.

[15] 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 SJ, Liu YB, Hu P, et al. Study on degradation effect of irradiation on aflatoxin B₁ [J]. Shandong Agric Sci, 2015, 47(11): 116–119.

[16] 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.
Zhang CH, Zhang S, Huang WX. Study on removal of aflatoxin from peanut oil [J]. China Oils Fats, 2014, 39(7): 62–64.

- [17] 刘玉兰, 陈金定, 裴娅晓, 等. 碱炼法脱除玉米油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(6): 48–51.
Liu YL, Chen JD, Pei YX, et al. Removal of AFB₁ from maize oil by alkali refining [J]. China Oils Fats, 2016, 41(6): 48–51.
- [18] 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 GB. Degradation of aflatoxins B₁ which in peanut by ammonia gas method [J]. Food Res Dev, 2014, 35(3): 111–113.
- [19] Karaca H, Velioglu YS, Nas S. Mycotoxins: contamination of dried fruits and degradation by ozone [J]. Toxin Rev, 2010, 29(2): 51–59.
- [20] 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.
Chen R, Li PW, Ma F, et al. Aflatoxins detoxification in peanuts by ozonation [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2013, 35(1): 92–96.
- [21] 罗小虎, 王韧, 王莉, 等. 臭氧降解玉米中黄曲霉毒素 B₁ 效果及降解动力学研究[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 45–49.
Luo XH, Wang R, Wang L, et al. Efficiency and kinetics of ozone degradation of aflatoxin B₁ in corn [J]. Food Sci, 2015, 36(15): 45–49.
- [22] 罗小虎, 王韧, 王莉, 等. 粮食中黄曲霉毒素消减方法研究进展[J]. 粮食加工, 2015, 40(6): 42–46.
Luo XH, Wang R, Wang L, et al. Progress in research on methods for reducing aflatoxin in grains [J]. Grain Process, 2015, 40(6): 42–46.
- [23] 李萌萌, 关二旗, 卞科. 真菌毒素的臭氧降解研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 100–105.
Li MM, Guan EQ, Bian K. Progress in ozone degradation of fungal toxins [J]. J Henan Univ Technol(Nat Sci Ed), 2015, 36(1): 100–105.
- [24] 刘英丽, 毛慧佳, 刘慧琳, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 生物法脱毒机制及产物毒性评价[J]. 食品工业科技, 2018, 3(62): 324–329.
Liu YL, Mao HJ, Liu HL, et al. Progress in biological detoxification of aflatoxin B₁ and its degradation metabolites toxicity evaluation [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 3(62): 324–329.
- [25] 史敦胜, 李旺, 聂利波, 等. 生物方法降解黄曲霉毒素的研究[J]. 食品与饲料工业, 2017, 2(11): 49–52.
Shi DS, Li W, Nie LB, et al. Research progress of the degradation of aflatoxin by biological methods [J]. Cere Feed Ind, 2017, 2(11): 49–52.
- [26] 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.
Liu C, Liu Y, Xing FG, et al. Screening and adsorption mechanism of aflatoxin B₁ [J]. J Nucl Agric Sci, 2010, 24(4): 766–771.
- [27] Shetty PH, Hald B, Jespersen L. Surface binding of aflatoxin B₁ by *Saccharomyces cerevisiae* strains with potential decontaminating abilities in indigenous fermented foods [J]. Int J Food Microbiol, 2007, 113(1): 41–46.
- [28] 蔡俊, 田尔诺, 邵帅, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 生物脱毒的研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(3): 726–731.
Cai J, Tian EN, Shao S, et al. Progress in biological detoxification of aflatoxin B₁ [J]. Microbiol China, 2017, 44(3): 726–731.
- [29] Fazeli MR, Hajimohammadali M, Moshkani A, et al. Aflatoxin B₁ binding capacity of autochthonous strains of lactic acid bacteria [J]. J Food Protect, 2009, 72(1): 189–192.
- [30] Hernandez-Mendoza A, Guzman-de-Peña D, Garcia HS. Key role of teichoic acids on aflatoxin B₁ binding by probiotic bacteria [J]. J Appl Microbiol, 2009, 107(2): 395–403.
- [31] 关舒, 胡新旭, 马秋刚, 等. 黄曲霉毒素的传统去毒方法和生物降解研究进展[J]. 饲料工业, 2008, (24): 57–59.
Guan S, Hu XX, Ma QG, et al. Aflatoxin detoxification by traditional methods and biological technology [J]. Feed Ind, 2008, (24): 57–59.
- [32] Mann R, Rehm HJ. Degradation products from aflatoxin B₁ by *Corynebacterium rubrum*, *Trichoderma viride* and *Mucor ambiguous* [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1976, 2(4): 297–306.
- [33] Adebo OA, Njobeh PB, Mavumengwana V. Degradation and detoxification of AFB₁ by *Staphylococcus warneri*, *Sporosarcina* sp. and *Lysinibacillus fusiformis* [J]. Food Control, 2016, 68: 92–96.
- [34] Liu DL, Yao DS, Liang YQ, et al. Production purification and characterization of an intracellular aflatoxin-detoxifying enzyme from *Armillariella tabescens* (E-20) [J]. Food Chem Toxicol, 2001, 39(5): 461–466.
- [35] Wang JQ, 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.
- [36] Adebo OA, Njobeh PB, Sibusiso S, et al. Aflatoxin B₁ degradation by liquid cultures and lysates of three bacterial strains [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 233: 11–19.
- [37] Xia X, Zhang Y, Li M, et al. Isolation and characterization of a *Bacillus subtilis* strain with aflatoxin B₁ biodegradation capability [J]. Food Control, 2017, 75: 92–98.
- [38] Raksha RK, Vipin AV, Hariprasad P, et al. Biological detoxification of aflatoxin B₁ by *Bacillus licheniformis* CFR1 [J]. Food Control, 2017, 71: 234–241.
- [39] 吴清华. 茶叶中抑制黄曲霉毒素产生的组分及相关特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Wu QH. Study on the components and properties of aflatoxin inhibition in tea [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013.
- [40] Rushing BR, Selim MI. Effect of dietary acids on the formation of aflatoxin B_{2a} as a means to detoxify aflatoxin B₁ [M]. Food Addit Contam Part A, 2016, 9: 1456–1467.
- [41] Raney KD, Meyer DJ, Ketterer B, et al. Glutathione conjugation of aflatoxin B₁ exo- and endo-epoxides by rat and human glutathione S-transferases [J]. Chem Res Toxicol, 1992, 5: 470–478.
- [42] Jalili M, Jinap S, Son R. The effect of chemical treatment on reduction of aflatoxins and ochratoxin A in black and white pepper during washing [J]. Food Addit Contam Part A, 2011, 28: 485–493.
- [43] Lee J, Her JY, Lee KG. Reduction of aflatoxins [B(1), B(2), G(1), and G(2)] in soybean-based model systems [J]. Food Chem, 2015, 189: 45–51.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



李智高, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全与质量检测。
E-mail: hellolizhigao@163.com



毛永杨, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全与质量检测。
E-mail: maoyongyang@163.com