

# 黄曲霉毒素脱毒研究进展

宋承钢<sup>1,2</sup>, 王彦多<sup>1</sup>, 杨健<sup>3</sup>, 郭兰萍<sup>3</sup>, 丁刚<sup>1\*</sup>, 秦建春<sup>2\*</sup>

(1. 中国医学科学院/北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100193; 2. 吉林大学 植物科学学院, 长春 130062; 3. 中国中医科学院 中药资源中心, 北京 100193)

**摘要:** 黄曲霉毒素是危害食品安全和人体健康最主要的真菌毒素之一, 全世界每年因黄曲霉毒素造成的粮食及其他农产品损失严重。此外, 在我国, 黄曲霉毒素还是影响储藏中药材安全标准的重要污染物。由于黄曲霉毒素的危害性极高, 关于黄曲霉毒素的污染防治是保证食品药品安全的研究重点之一。本研究综述了近年来关于食品中黄曲霉毒素脱毒与降解研究的最新进展以及各种方法涉及可能的降解产物和降解机制, 涵盖了以物理, 化学和生物 3 大类脱毒技术的分析和总结, 除传统技术手段之外, 还对于采用天然产物防治黄曲霉毒素、不同脱毒手段协同作用的相关研究进行了展望, 以期为黄曲霉毒素防治和脱毒相关研究工作提供借鉴, 促进后续研究的开展。

**关键词:** 黄曲霉毒素; 食品安全; 脱毒方法; 降解机制

## Research progress of aflatoxin detoxification

SONG Cheng-Gang<sup>1,2</sup>, WANG Yan-Duo<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>3</sup>, GUO Lan-Ping<sup>3</sup>, DING Gang<sup>1\*</sup>, QIN Jian-Chun<sup>2\*</sup>

(1. Chinese Academy of Medical Sciences, Institute of Medicinal Plants, Peking Union Medical College, Beijing 100193, China; 2. College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China; 3. National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China)

**ABSTRACT:** Aflatoxin (AFs) is one of the major types of mycotoxins that endangers food safety and human health, and contributes to the immeasurable loss of food and agricultural production in the world annually. In addition, aflatoxin contamination seriously affects the safety of stored Chinese medicinal materials in our country. This paper reviewed the detoxification and degradation of aflatoxin, including analysis and summary of the major technologies in physics, chemistry and biology in recent years. In addition to traditional technical means, this article also presented utility of natural products to control aflatoxin and synergy of different detoxification strategies in order to provide reference for aflatoxin control and detoxification, and promote the development of follow-up research.

**KEY WORDS:** aflatoxin; food safety; detoxification methods; degradation mechanism

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201402)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFD0201402)

\*通讯作者: 丁刚, 博士, 研究员, 主要研究方向为真菌次生代谢产物结构与功能。E-mail: gding@implad.ac.cn

秦建春, 博士, 教授, 主要研究方向为植物及微生物天然次级代谢产物研究。E-mail: qinjc@jlu.edu.cn

\*Corresponding author: DING Gang, Ph.D, Professor, The Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China. E-mail: gding@implad.ac.cn

QIN Jian-Chun, Ph.D, Professor, College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China. E-mail:

qinjc@jlu.edu.cn

## 1 引言

真菌毒素是由真菌产生的一类次级代谢产物,是世界范围内影响农业健康发展的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。其中,黄曲霉毒素是造成粮食谷物及其相关制品(奶制品、豆制品和饲料等),花生等坚果类食品以及贮存中药材污染主要的一种真菌毒素,对食品和药品安全造成严重威胁<sup>[3-6]</sup>。黄曲霉毒素(aflatoxin, AF)是多种真菌毒素中毒性最高和危害最大的一类,主要由黄曲霉菌等多种真菌产生,基本结构为双呋喃环香豆素,主要包括B族(AFB<sub>1</sub>、AFB<sub>2</sub>)、G族(AFG<sub>1</sub>、AFG<sub>2</sub>)和M族(AFM<sub>1</sub>、AFM<sub>2</sub>)(图1),这3类毒素主要的结构差别在于B族黄曲霉毒素的香豆素部分末端为环戊烯酮结构,G族黄曲霉毒素则为环己烯酮结构,而M族则是B族黄曲霉毒素的羟基化衍生物。黄曲霉毒素B<sub>1</sub>对人类哺乳动物具很强的急性毒性,致癌,致畸和致突变特性,被世界卫生组织列为一级致癌物<sup>[7]</sup>。根据近些年的相关研究,Carvaja<sup>[8]</sup>揭示了通过食物摄入人体内的黄曲霉毒素通过肝脏转化为羟基酯化物(AFP<sub>1</sub>等),与人体内肿瘤和恶性组织的病变联系密切;Koshiol等<sup>[9]</sup>通过对上海地区胆囊癌病例统计,以患者体内 AFB<sub>1</sub> 赖氨酸含量为指标,根据建立模型比较,发现胆囊癌的发病率升高与接触黄曲霉毒素相关;Gökhan等<sup>[10]</sup>利用大鼠为实验对象进行黄曲霉毒素的饲喂实验,通过监测分析各种生理指标,发现黄曲霉毒素可以引起大鼠体内严重的脂质过氧化,这也是黄曲霉毒素造成对人和动物急性毒性的重要原因之一。

为保障食品安全和人体健康的需要,世界范围内均对食品中黄曲霉毒素的含量制定了严格的标准<sup>[11]</sup>,其中,根据我国 GB 2761-2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》<sup>[12]</sup>要求,黄曲霉毒素B<sub>1</sub>在不同谷物制品最高限

量标准为5~20 μg/kg,黄曲霉毒素B<sub>1</sub>和M<sub>1</sub>在特殊膳食食品中最高含量则不超过0.5 μg/kg,在婴儿膳食中则不得检出。除食品安全要求之外,我国对药材中的黄曲霉毒素污染也采取了相对严格的检测标准和质量控制<sup>[13-15]</sup>。中国药典(2015)版第一部<sup>[16]</sup>对地龙等14味中药材及饮片添加了黄曲霉毒素含量限定标准,规定黄曲霉毒素B<sub>1</sub>含量不超过5 μg/kg,同时规定黄曲霉毒素B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>总量不超过10 μg/kg。

由于黄曲霉毒素在食品药品行业的巨大危害以及日趋严格的含量检测标准,相关食品、药材中黄曲霉毒素的降解方法受到广泛关注,国内外针对安全有效、广泛实用的降解黄曲霉毒素的手段开展了大量研究测试<sup>[17,18]</sup>。目前对黄曲霉毒素的降解研究主要集中于物理、化学和生物降解3类。此外,在传统方法外,近年来天然产物降解和不同性质方法协同作用的研究也愈发深入。本文从降解效果,优缺点分析和应用前景等不同角度对近年来黄曲霉毒素降解的最新研究进展进行总结归纳,以为黄曲霉毒素防治和脱毒相关研究工作提供借鉴,促进后续研究的开展。

## 2 黄曲霉毒素的物理降解

### 2.1 高温降解

在各种降解方法中,高温脱毒是最早使用的手段之一,诸如蒸煮、烘烤等手段。由于操作相对简便,无论食品工业生产还是日常烹制都可以便捷使用。

Zheng等<sup>[19]</sup>探究了挤压蒸煮法对花生粕中黄曲霉毒素B<sub>1</sub>含量的影响,发现料筒温度对降解率具有显著影响,在料筒温度为150℃时,黄曲霉毒素B<sub>1</sub>降解率最高可达到76.6%±2.2%;Kaur等<sup>[20]</sup>利用蒸煮法处理被黄曲霉毒素污染的小麦,使样品中黄曲霉毒素含量降低约38%,进一步通

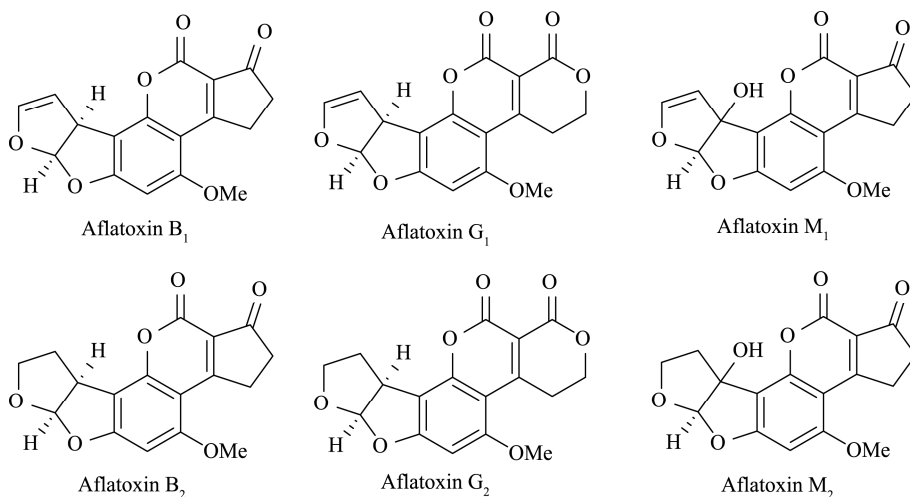


图1 黄曲霉毒素B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>、M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>化学结构

Fig.1 Chemical structure of aflatoxins B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>

过挤压蒸煮处理, 在 170 °C 条件下, 发现黄曲霉毒素下降 74.55%; Méndez 等<sup>[21]</sup>以被 B 族黄曲霉毒素污染的高粱粉为实验材料, 利用乳酸和柠檬酸水溶液对样品进行挤压蒸煮处理, 黄曲霉毒素含量分别降低 67% 和 93%; Martins 等<sup>[22]</sup>调查了烘烤法去除花生中黄曲霉毒素的效果, 当样品中黄曲霉毒素含量为 85 μg/kg 时, 在 160、180 和 200 °C 下各自烘烤 5~20 min 后, 样品中黄曲霉毒素分别减少了 61.6%、83.6% 和 89.7%; Farahmandfar 等<sup>[23]</sup>发现初始黄曲霉毒素浓度为 10 ng/g 的污染花生样品在 150 °C 下加热 40 min 时, 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub> 和 G<sub>2</sub> 的最大还原率分别为 37.9%、39.8%、37.4% 和 40.4%, 而初始阶段花生样品中 α- 和 γ- 生育酚的含量增加, 当焙烧时间增加到 40 min 时, 生育酚的含量略只是有所下降, 证明该处理条件可作为花生烘烤脱毒的可行方案; Hakan 等<sup>[24]</sup>发现被黄曲霉毒素污染的干无花果提取物在 pH 为 10 条件下, 经 1~2 h 加热处理, 样品中 AFB<sub>1</sub>(98 °C) 和 AFB<sub>2</sub>(50 °C) 降解率分别达到 97% 和 87%; Yazdanpanah 等<sup>[25]</sup>以自然条件下被污染的快乐果为样品, 对其进行不同处理的烘烤脱毒后, 发现在 150 °C 下处理自然污染的整个快乐果仁 30 min 后, 样品中的 AFs 污染水平显著降低, 且对食品品质影响较小; 康传志等<sup>[26]</sup>利用煎煮法配合硫熏蒸对霉变天麻进行处理后, 样品中未检测出黄曲霉毒素。以上研究均说明高温降解对于黄曲霉毒素的脱毒效果很好。

## 2.2 辐照降解

利用紫外线, 射线脉冲光等不同种类辐照进行食品中真菌毒素的去除一向被认为是相对安全有效的手段, 基于辐照降解的操作便捷, 快速有效, 在大规模工业生产中的应用潜力巨大。

Liu 等<sup>[27]</sup>评价了电子束辐照(electron beam irradiation,

EBI)对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的降解效果, 结果显示在 AFB<sub>1</sub> 初始浓度为 5 mg/L, 含水量为 21.47% 时降解速率最高, 经 Ames 和细胞毒性测试表明样品中的降解产物几乎无毒(图 2); Mao 等<sup>[28]</sup>分析了紫外线降解花生油中 AFB<sub>1</sub> 的降解产物, 推测了可能的降解产物结构和降解途径, 并结合人胚肝细胞活力测定实验, 表明降解产物毒性远低于 AFB<sub>1</sub>(图 3); Puligundla 等<sup>[29]</sup>使用电流强度 1.5 A 的电晕放电等离子射流, 距离样品 15 mm 进行处理, 30 min 内使 AFB<sub>1</sub> 最高降解率达到 95%, 在食品样品中, 该处理对商业食品(大米和小麦)中的 AFB<sub>1</sub> 降解水平则在 45%~56%; Wang 等<sup>[30]</sup>根据海虾致死实验和菌株波动测试, 验证了脉冲光降解糙米中 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 效果显著, 且毒性和致突变能力大大降低; 此外, Wang 等<sup>[31]</sup>根据统计学数据, 发现在脉冲光辐照下, AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 的降解遵循二级反应动力学模型( $r^2 > 0.97$ ), 且降解速率与辐射强度和黄曲霉毒素的初始浓度成正比。

## 2.3 吸附法

吸附法依靠具有良好吸附能力的吸附剂(活性炭、蒙脱石、纳米制品或者其他生物材料)将被污染食品表面的黄曲霉毒素进行吸附, 完毕后将食品与吸附剂分离即可达到脱毒效果。

Saowalak 等以酸处理榴莲皮作为真菌吸附剂, 经分析表明, 榴莲皮对 AFB<sub>1</sub> 吸附率为 98.4%, 同时降低了真菌毒素在胃肠道消化后的生物可利用性, 且吸附能力受 pH 影响较小<sup>[32]</sup>。Ji 等<sup>[33]</sup>采用 Hummer 法和共沉淀法制成的具有纳米结构的磁性氧化石墨烯和磁性石墨烯吸附剂, 对于油中 AFB<sub>1</sub> 去除效率高, 并具备磁选简单的特点, 在去除污染油脂中的 AFB<sub>1</sub> 方面具有广阔的应用前景。Pirouz 等<sup>[34]</sup>在 pH 值为 4、处理时间 8 h、处理温度为 35 °C 时, 发现以壳聚糖作为吸附剂对棕榈仁蛋糕中 AFB<sub>1</sub>、AFB<sub>2</sub>、

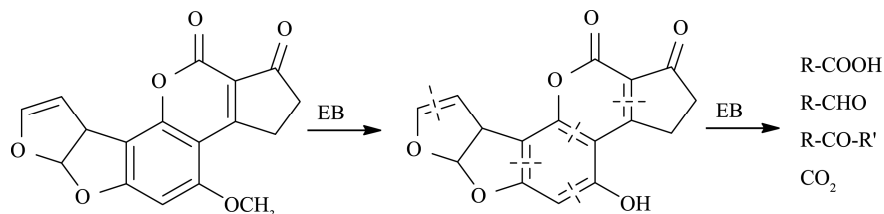


图 2 电子束辐照降解花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的降解机制推导

Fig.2 Derivation of degradation mechanism of AFB<sub>1</sub> in peanut meal by electron beam irradiation

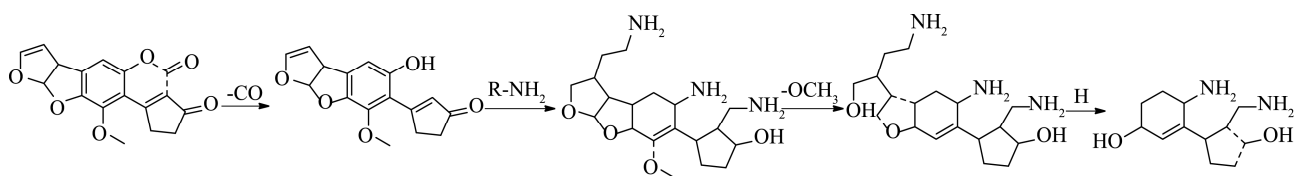


图 3 紫外线降解花生油中 AFB<sub>1</sub> 的降解产物和可能机制

Fig.3 Degradation products and possible mechanism of AFB<sub>1</sub> in peanut oil by ultraviolet

AFG<sub>1</sub>、AFG<sub>2</sub> 的最大去除率分别为 94.35%、45.90%、82.11%、84.29%，吸附效果好；Sadia 等<sup>[35]</sup>发现常用吸附剂蒙脱石可以在升高的温度下可以有效地将黄曲霉毒素转化为其他毒性较小的形式，铜或锰过渡金属阳离子与蒙脱石离子交换和热处理可以使吸附的 AFB<sub>1</sub> 分子更有效地转化为其他化合物；Scaglioni 等<sup>[36]</sup>采用中心复合旋转设计，开发出一种稻壳吸附剂，使用 0.5 g 的稻壳(42 目)对 10 mL 被 AFM<sub>1</sub> 和 AFB<sub>1</sub> 污染的牛奶进行吸附，该条件对 2 种霉菌毒素均实现了约 100% 的回收率，平均吸附的霉菌毒素量等同于 0.0150 μg/g 的 AFB<sub>1</sub> 和 0.0174 μg/g 的 AFM<sub>1</sub>；Sun 等<sup>[37]</sup>通过羟基化反应制备的能化纳米花状羟基硅酸镁，对 AFB<sub>1</sub> 的吸附量为 28.61 mg/g，该吸附过程既有物理吸附，也有化学吸附；Zahran 等<sup>[38]</sup>用表面修饰的斜发沸石吸附器对罗非鱼饲料进行处理后进行饲喂实验，可将罗非鱼肝脏和肌肉中 AFs 残留量分别降低至 0.9 和 0.022 μg/kg。

## 2.5 超声降解

超声脱毒也是一种安全绿色的技术，但是一般作为辅助手段与其他方法协同使用，单一利用超声脱毒的研究相对较少<sup>[39]</sup>。

Liu 等<sup>[40]</sup>发现利用大功率超声可以破坏 AFB<sub>1</sub> 中呋喃环末端双键并修饰内酯环和甲氧基，80 min 后使水溶液中 AFB<sub>1</sub> 含量降低了 85.1%(图 4)；Liu 等<sup>[41]</sup>发现超声强度(2.2~11 W/cm<sup>3</sup>)和超声时间(10~50 min)对包括 AFB<sub>1</sub> 在内数种真菌毒素的降解有显著影响，在此条件下的实验结果表明，AFB<sub>1</sub> 在 25% 的占空比条件下降解率为 96.5%；

Hernández 等<sup>[42]</sup>研究发现，使用 20 kHz, 95% 振幅的热超声处理 10~15 min，可以替代牛奶巴氏消毒，从而保持牛奶的理化和微生物质量，同时 AFM<sub>1</sub> 水平也有所降低。

## 3 黄曲霉毒素的化学降解

### 3.1 有机酸降解

Tránsito 等<sup>[43]</sup>在被黄曲霉毒素(39 ng/g)污染的饲料中加入不同浓度柠檬酸，对肉鸡进行 28 d 饲喂实验，结果表明饲料中黄曲霉毒素在酸化过程中降解率高达 92%，且肉鸡体内除血清中的天冬氨酸转氨酶活性值增高外，对其他生理指标不存在影响；Rushing 等<sup>[44]</sup>发现在室温下，1 mol/L 柠檬酸处理 96 h 可将大于 97% 的 AFB<sub>1</sub> 转化为毒性较低的 AFB<sub>2a</sub>(图 5)，在柠檬酸存在的条件下，将 AFB<sub>1</sub> 煮沸 20 min 可达到 98% 的转化率，通过将 AFB<sub>1</sub> 加入到含有柠檬酸的模拟胃液中，71% 以上的 AFB<sub>1</sub> 被水合成 AFB<sub>2a</sub>；Aiko 等<sup>[45]</sup>研究了 3 种有机酸对 AFB<sub>1</sub> 的降解作用，发现在加热条件下，乳酸对 AFB<sub>1</sub> 降解率达 85%，通过四甲基偶氮唑盐(methyl thiazolil tetracolum, MTT)法检测到降解物细胞毒性明显降低；Lee 等<sup>[46]</sup>将被黄曲霉毒素污染的大豆浸泡在有机酸溶液中，检测发现 AFB<sub>1</sub> 在 1.0 mol/L 柠檬酸、乳酸、琥珀酸和酒石酸中还原 18 h 的降解速率分别为 94.1%、92.7%、62.0% 和 95.1%；Singh 等<sup>[47]</sup>研究表明，添加 0.25% 丙酸、0.30% 苯甲酸、0.40% 酒石酸可完全抑制 13% 水分条件下家禽饲料中黄曲霉毒素的产生，此外，丙酸比苯甲酸或酒石酸更有效地抑制黄曲霉毒素的合成。

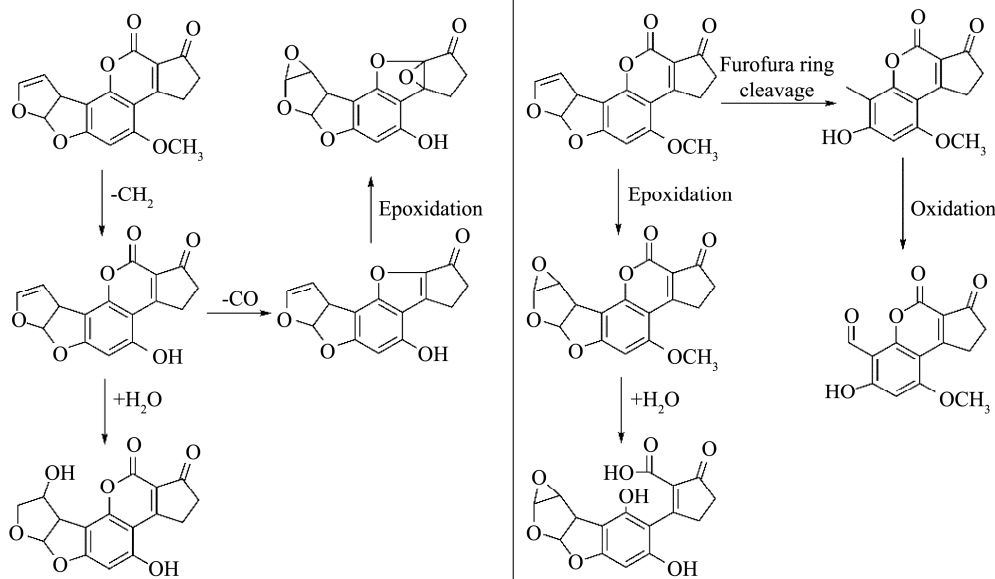


图 4 大功率超声破坏水溶液中 AFB<sub>1</sub> 的降解产物及可能机制

Fig.4 Degradation products and possible mechanism of AFB<sub>1</sub> in aqueous solution destroyed by ultrasound

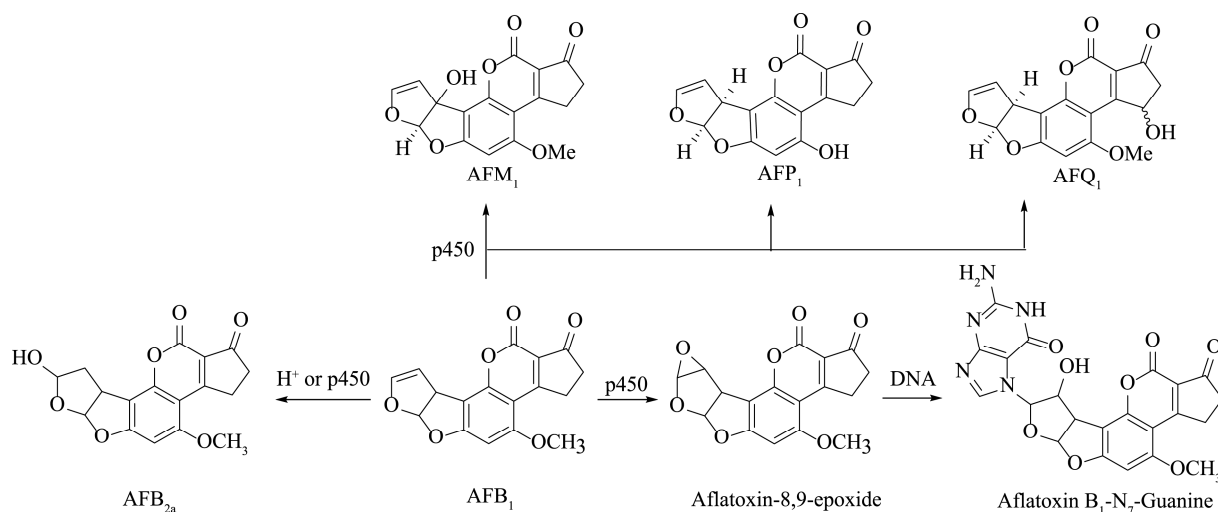


图 5 柠檬酸将 AFB<sub>1</sub> 转化为 AFB<sub>2a</sub> 的转化机制推测  
Fig.5 Transformation mechanism of AFB<sub>1</sub> to AFB<sub>2a</sub> by citric acid

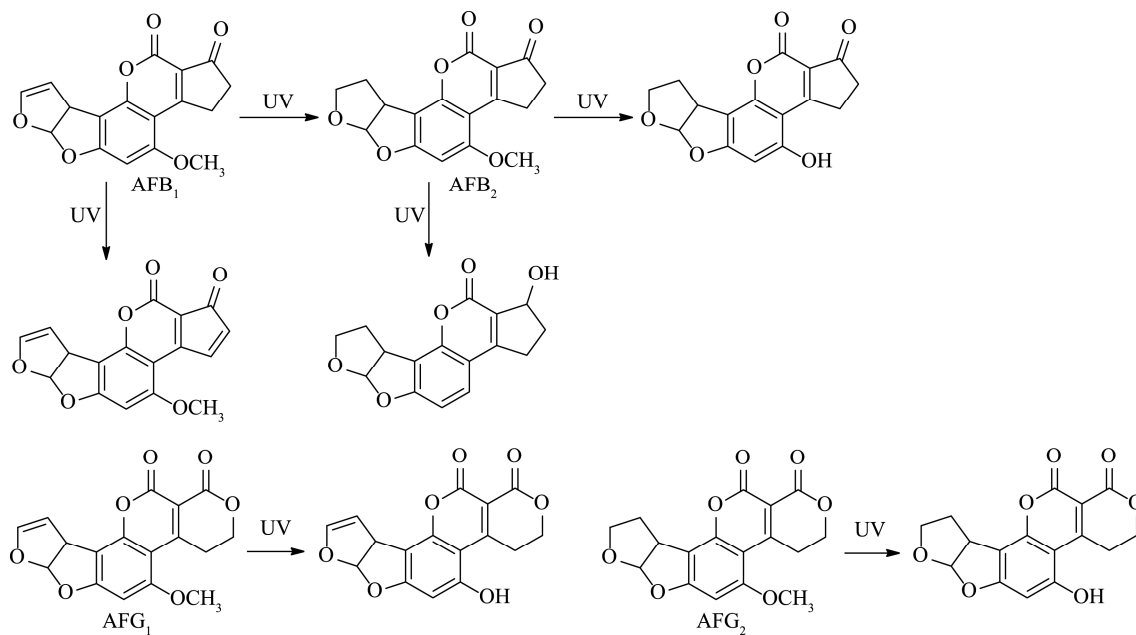


图 6 紫外线和臭氧联合降解花生中各类黄曲霉毒素的降解产物及可能机制  
Fig.6 Degradation products and possible mechanism of aflatoxins in peanut by ultraviolet and ozone

### 3.2 臭氧降解

电离氧气产生臭氧用于杀菌消毒的技术已经非常成熟。Gui 等<sup>[48]</sup>利用臭氧和紫外照射结合的方法对花生样品中的黄曲霉毒素进行降解, 结果显示, 臭氧浓度为 7 mg/L 照射 30 min 后, AFB<sub>1</sub> 降解率为 79.01%, AFs(AFB<sub>1</sub>+AFB<sub>2</sub>+AFG<sub>1</sub>+AFG<sub>2</sub>)降解率为 67.24%, 同时该处理对花生样品本身成分和理化性质无显著影响(图 6); 罗小虎等<sup>[49]</sup>通过小鼠饲喂实验证明, 被 AFB<sub>1</sub> 污染的玉米经臭氧处理后, 相比于未处理样品, 对小鼠毒性显著降低, 多项生理、生化指标得到显著改善; Hesam 等<sup>[50]</sup>首次利用臭氧处理牛奶中

的 AFB<sub>1</sub> 污染, 结果表明, 臭氧处理 5 min 后, 乳汁的 AFB<sub>1</sub> 降低了 50%, 乳汁的 pH 值和氧化值没有明显变化, 且随着暴露时间的延长, 牛奶中 β-胡萝卜素含量显著降低, 微生物总数减少。

### 3.3 氨化脱毒

氨化脱毒是利用氨气熏蒸或者氨水处理等方式, 使造成食品污染的黄曲霉毒素发生氨化, 结构改变, 从而降低毒性危害<sup>[51,52]</sup>。在高温下, NH<sub>4</sub>OH 水溶液或 NH<sub>3</sub> 气体可以有效地降低玉米中的 AFB<sub>1</sub>。玉米本身的含水量和保温温度是影响氨化黄曲霉毒素净化效果的关键因素<sup>[53]</sup>。

Allameh 等<sup>[54]</sup>采用 1%氨水处理被黄曲霉毒素污染的玉米种子作为对照,进行肉鸡饲喂实验后,发现饲喂氨处理黄曲霉毒素污染玉米的鸡,其日粮摄入量、增重和饲料转化率均无显著变化,而饲喂含黄曲霉毒素饲料的鸡,这些参数均受到抑制; Bagley<sup>[55]</sup>以多种家禽家畜为实验对象,通过饲喂实验证明在常压下用气态氨处理含黄曲霉毒素的玉米,可以有效地去除玉米中的黄曲霉毒素; Brekke 等<sup>[56]</sup>研究表明,氨化使黄曲霉毒素失活,使被污染玉米对虹鳟的致癌性降低到与基础日粮无显著差异的水平; Jensen 等<sup>[57]</sup>以猪为实验对象,进行了重复氨化玉米验收利用试验,结果显示氨化可以有效地将黄曲霉毒素浓度降低到化学分析测定的不可检测水平。

### 3.4 天然产物降解

天然产物是由植物,动物以及微生物本身产生的次级代谢产物,由于来源广泛,结构多样,活性出色被广泛研究,在医药,农业和食品等等行业广泛获得应用。近年来将天然产物作为黄曲霉毒素等真菌毒素的脱毒剂,越发受到研究人员的关注。

中药阿育魏的种子提取物可以破坏黄曲霉毒素呋喃环末端双键和内酯环,对 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 的降解率分别达到了 92.8%和 91.9%<sup>[58]</sup>(图 7)。Wajiha 等<sup>[59]</sup>研究发现决明子叶片水提取物对 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 具有显著降解作用,降解率分别为 90.4%和 88.6%,在优化条件下(pH8.0, 30 °C, 72 h),罗勒叶片提取物对产毒菌株生长抑制率为 82%~87%,并通过除去末端呋喃环中的双键和修饰内酯基将 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 降解为低毒性化合物(图 8)。

Abdel-Fattah 等<sup>[60]</sup>研究发现野生甜叶菊的乙醇-水(1:1, V/V)提取物,在抑制真菌生长以及黄曲霉毒素降解方面均有较好效果。Hadi 等<sup>[61]</sup>研究发现,在 250 μg/mL 浓度条件下,百里香己烷提取物对 AFB<sub>1</sub> 的降解率为 98.7%, 1000 mg/mL 的百里香碱提取物,毒素降解率为 93.7%, 850 μg/mL 的百里香冷水提取物,毒素降解率为 84.3%, 500 μg/mL 的蛇床子碱提取物对 AFB<sub>1</sub> 降解率为 97.5%, 1200 μg/mL 浓度的肉桂冷水提取物降解率为 96.9%; Iram 等<sup>[62]</sup>发现,在优化条件下,柠檬桉叶提取物对 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub>(AFB<sub>1</sub> 100 μg/L, AFB<sub>2</sub> 50 μg/L)的降解率分别为 95.21%和 92.95%,根据

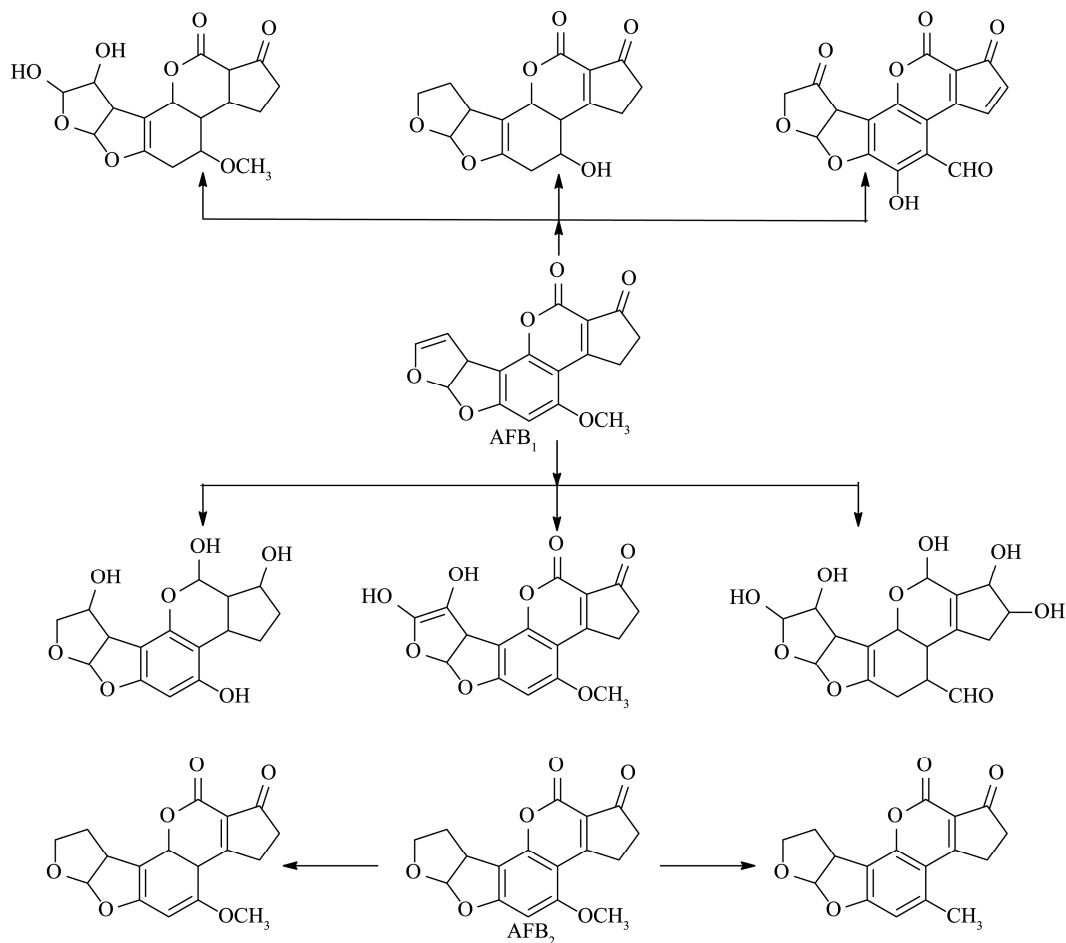
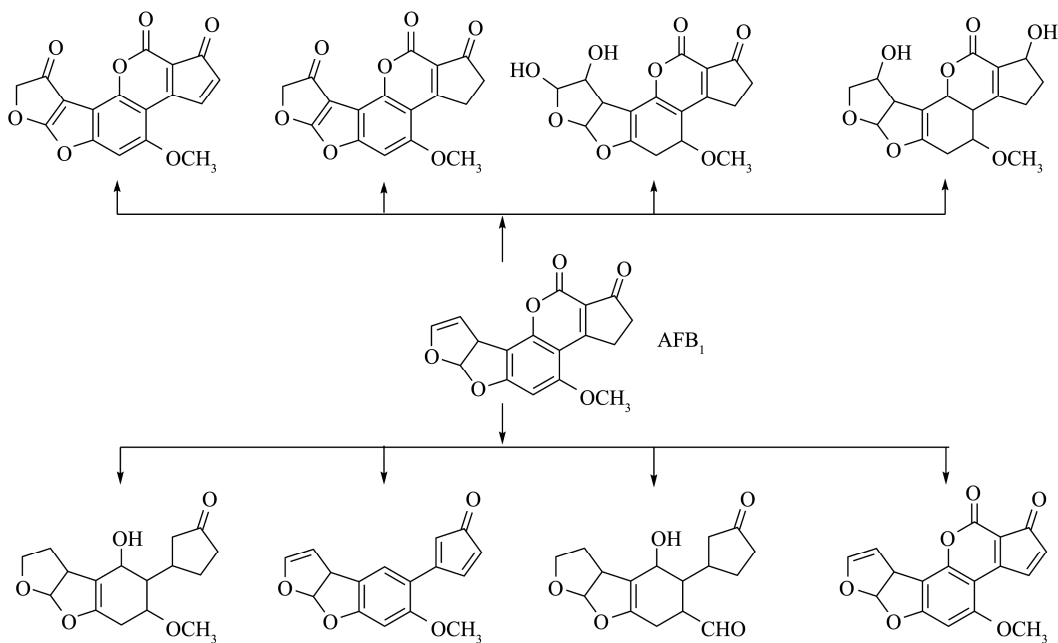
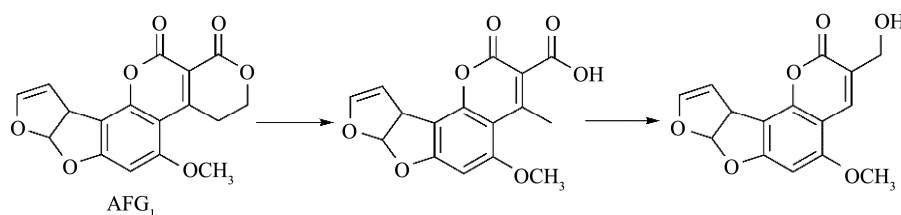


图 7 阿育魏种子水提取物降解 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 后的降解产物结构

Fig.7 Structure of degradation products of AFB<sub>1</sub> and AFB<sub>2</sub> by water extract of *Trachyspermum ammi* seeds

图 8 罗勒叶片提取物降解 AFB<sub>1</sub> 后的降解产物结构Fig.8 Structure of degradation products of extract from *Ocimum basilicum* leaves on AFB<sub>1</sub>图 9 沙棘种子提取物降解玉米中 AFG<sub>1</sub> 后的降解产物和机制推测Fig.9 Degradation products and mechanism of *Hippophae rhamnoides* seed extract on AFG<sub>1</sub> in maize

海虾活性测试证明降解产物毒性显著降低; Velazhahan 等<sup>[63]</sup>基于薄层层析法和酶联免疫吸附试验, 对不同药用植物叶片/种子的水提取物进行了 AFG<sub>1</sub> 的脱毒实验中, 沙棘种子提取物对 AFG<sub>1</sub> 的降解率最高可达 65%。经透析后的提取物比粗提物更有效, 能降解 90% 以上的毒素, 且降解后的 AFG<sub>1</sub> 未能诱导玉米染色体畸变; Vijayanandraj 等<sup>[64]</sup>发现, 样品经鸭嘴花叶片提取物在 37 °C 处理 24 h 后, AFB<sub>1</sub> 的降解率在 98% 以上(图 9)。

## 4 黄曲霉毒素的生物降解

### 4.1 微生物转化

微生物转化旨在利用不同微生物自身的代谢途径和酶体系将毒素等目标化合物的结构进行改造, 转化为其他衍生物, 进而使其原有活性发生改变, 是一种绿色高效的生物技术。微生物转化技术脱毒的关键是筛选出具有特异性的菌株, 保证黄曲霉毒素降解效果的同时, 不产生其他有害成分, 且菌株本身易于去除或本身对人体无害。

Adebo 等<sup>[65]</sup>利用 1 株 *Pontibacter* 种的液体培养基对 AFB<sub>1</sub> 进行生物转化 48 h 后, 使 AFB<sub>1</sub> 的降解率达到了 50%; González 等<sup>[66]</sup>对 11 株芽孢杆菌进行了鉴定, 其中第 8 和 10 号菌株对 AFB<sub>1</sub> 降解率达 27.78%~79.78% ( $P < 0.05$ ), 并推测黄曲霉毒素的内酯环为芽孢杆菌胞外酶和胞内酶的靶点; Gu 等<sup>[67]</sup>从非洲象粪便中分离并鉴定了一株短小芽孢杆菌 E-1-1-1, 12 h 内可使 AFG<sub>1</sub> 降解率达 89.55%, 通过后续理化分析证明对培养基氮源和碳源控制对该菌株降解能力影响显著; Sangi 等<sup>[68]</sup>发现一株从伊朗东南部境内土壤中分离到的短小芽孢杆菌对 AFB<sub>1</sub> 降解活性为 88%。研究显示, 9 种食用杏鲍菇在含有 AFB<sub>1</sub> (500 ng/mL) 麦芽浸提液中生长 30 d 后, 对 AFB<sub>1</sub> 降解率均达到 100%; Jackson 等<sup>[69]</sup>在实验室培养条件下, 食用杏鲍菇在含有 25% (w/w) 被 AFB<sub>1</sub> 污染的玉米培养基中生长, 由假单胞杆菌 ITEM 13681 导致的 AFB<sub>1</sub> 降解率为 86%, 且检测显示真菌底物中毒素含量在检测限以下; Wang 等<sup>[70]</sup>从鸡盲肠中分离的一株非致病性大肠杆菌 CG1061, 其培养基的上清液对 AFB<sub>1</sub>

降解率为 61.8%，根据体外细胞活性测试显示降解后的成分细胞毒性显著下降；Li 等<sup>[71,72]</sup>发现 2 株嗜盐念珠菌 CGMCC 3792 和 CGMCC 3790 可将 AFB<sub>1</sub> 转化为多种无毒降解产物，并使调味品中 AFB<sub>1</sub> 降解率均达到 90% 以上，显示了在调味品加工中的应用潜力(图 10)；Martínez 等<sup>[73]</sup>首次报道了无害益生菌戊糖戊球菌和马克斯克鲁维酵母具有吸附和降解 AFM<sub>1</sub> 的能力，并使牛奶中 AFM<sub>1</sub> 的含量减少 19%~60%，可防范黄曲霉毒素污染对儿童健康造成的风险；Mwakinyali 等<sup>[74]</sup>研究发现细菌菌株 3J2MO 在 37 °C 条件下，培养 48 h 后降解了约 93.82% 的 AFB<sub>1</sub>，使其浓度降低至 100 μg/L，若选用合适的碳源和氮源，还可使降解速率增加；Shu 等<sup>[75]</sup>利用香豆素为唯一碳源培养基筛选出的一株耐热菌 *Bacillus velezensis* DY3108，在 80 °C，pH4.0~11.0 条件下对 AFB<sub>1</sub> 最高降解率达 91.5%，降解产物毒性显著降低；Wang 等<sup>[76]</sup>研究发现嗜热菌群 TADC7 在最适温度 55~60 °C 条件下，在 72 h 内将培养基中 AFB<sub>1</sub> 降解 95% 以上，经 16S rRNA 测序，表明菌群中发挥主要降解作用的为地衣芽孢杆菌。

#### 4.2 生物酶降解

生物酶降解解毒本质是生物转化技术的延伸，通过

分离出特异性的生物酶，直接作用于真菌毒素的降解，但是由于酶本身的特殊理化性质，需要对使用条件进行测试优化。

Afsharmanesh 等<sup>[77]</sup>研究证明，枯草芽孢杆菌 UTB1 对黄曲霉毒素的降解是由一种参与细菌素生物合成的氧化还原酶造成的(图 11)；Dellafiora 等<sup>[78]</sup>则利用三维模拟分子技术，研究了云芝漆酶对 AFB<sub>1</sub> 和 AFM<sub>1</sub> 不同的酶-底物相互作用；基于体外活性测试，研究人员从米曲霉中分离的真菌毒素降解酶和益生菌复合物有效抑制了 AFB<sub>1</sub> 和 ZEA 对猪空肠上皮细胞的毒性，为真菌毒素带来的动物健康问题提供了可能的策略<sup>[79]</sup>；Li 等<sup>[80]</sup>从耻垢分枝杆菌中分离的一种 F<sub>420</sub>H<sub>2</sub> 依赖性还原酶 MSMEG\_5998，在 22 °C 条件下，4 h 后可降解 31% 的 AFB<sub>1</sub>，而在硫氧还蛋白的增强作用下，降解率提高到 68%；Singh 等<sup>[81]</sup>探究 1 株假单胞杆菌降解 AFB<sub>1</sub> 机制时发现，对细胞内含物热灭活后，其对 AFB<sub>1</sub> 的降解率由 80% 降低至不足 20%，从而推测降解过程的酶促反应特性；Song 等<sup>[82]</sup>使用三步法从铜绿假单胞杆菌 M19 中分离纯化出一种胞外酶，在 65 °C 和 pH6.0 时，PADE 对 AFB<sub>1</sub> 表现出最高的降解活性，而且发现 Cu<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 的加入可使其降解活性增强；Xie 等<sup>[83]</sup>发现黄曲霉毒素脱毒菌株 *Pantoea* sp. T6 离心后的上清液对 AFB<sub>1</sub> 降解率达 68.3%，

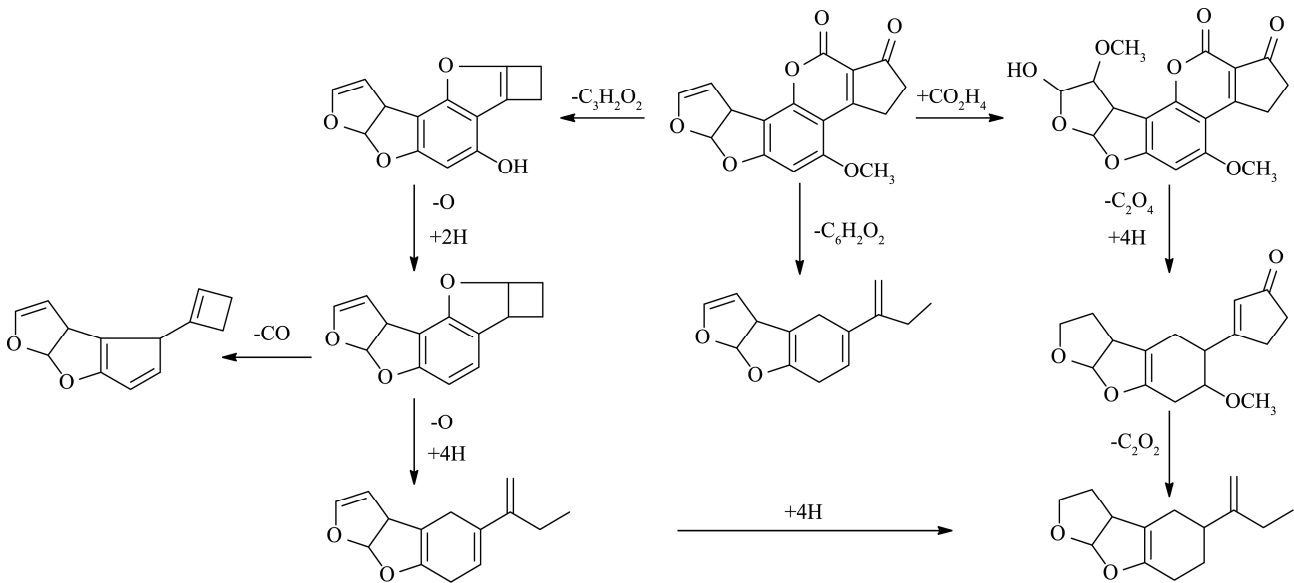


图 10 嗜盐念珠菌对调味品中 AFB<sub>1</sub> 的转化产物和转化途径推测

Fig.10 Transformation products and transformation pathway of AFB<sub>1</sub> in condiment by salt tolerant *Tetragenococcus halophilus*

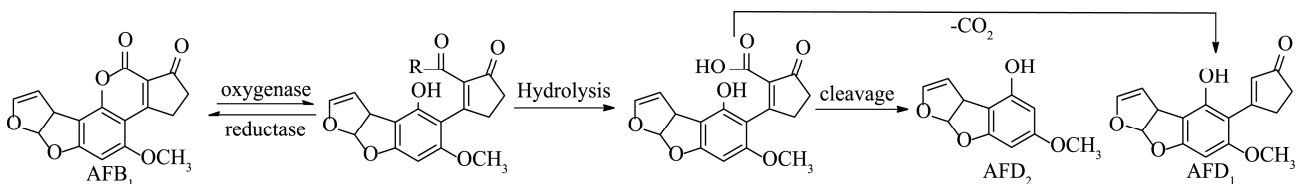


图 11 枯草芽孢杆菌 UBT1 中氧化还原酶降解 AFB<sub>1</sub> 的机制推测

Fig.11 Mechanism of AFB<sub>1</sub> degradation by oxidoreductase in *Bacillus subtilis* UBT1



并进一步从中分离鉴定出了具有高降解活性的膜外酶; Xu 等<sup>[84]</sup>通过大规模菌株筛选和活性测试, 首次从沙门氏杆菌中分离到一种耐热黄曲霉毒素降解酶 BADE, 在 70 °C 和 pH8.0 时表现出最高的活性。

## 5 协同作用

上述的各种物理、化学和生物脱毒方法在单独使用的情况下均有利弊。为了进一步提高黄曲霉毒素降解效果, 同时尽可能降低负面影响, 突破单一方法使用的限制, 不同脱毒手段协同使用的研究也得到相应开展。

Abuagela 等<sup>[85]</sup>发现, 在柠檬酸(citric acid, CA)和脉冲光(pulse light, PL)的协同作用下, 被处理的花生样品中 AFB<sub>1</sub> 和 AFB<sub>2</sub> 的降解率分别达到了 98.9%(±0.8%) 和 98.1%(±1.1%); Sun 等<sup>[86]</sup>以水热法合成活性炭负载 TiO<sub>2</sub> 催化剂复合体, 在 AFB<sub>1</sub> 降解中具有吸附和光解协同效应, 与单独 TiO<sub>2</sub> 催化剂相比, 对 AFB<sub>1</sub> 降解活性由 76% 提高至 98%, 是一种绿色有效的降解手段; Mao 等<sup>[87]</sup>设计并合成了复合光催化体系 WO<sub>3</sub>/RGO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合材料, 以 O<sup>2-</sup>、H<sup>+</sup> 和 OH 为主要的活性自由基, 对 AFB<sub>1</sub> 具有高光解活性(图 12); Wang 等<sup>[88]</sup>将丁香酸甲酯作为介质, 枯草芽孢杆菌漆酶对 AFB<sub>1</sub> 降解活性达到 98%, 利用来自淫羊藿、薰衣草等植物的天然衍生物作为介质, 同样可以提高漆酶的降解活性, 使其可以用于食品和饲料的脱毒; Yousif 等<sup>[89]</sup>以纳米氧化锌颗粒-ZnO(NP)负载蜂蜜组成复合体, 使海玉米种

子中 AFB<sub>1</sub> 降解率达 96.42%; Alcantar-Barrios 等<sup>[90]</sup>用酒石酸对被 AFB<sub>1</sub>(140 ng/g)污染的玉米粉(粒径小于 420 μm)样品进行化学处理, 然后在红外微波耦合系统中进行非电离辐射, 使样品中 AFB<sub>1</sub> 含量最高降低 87%; Lin 等<sup>[91]</sup>探究了微波联合酶解对米糠中 AFB<sub>1</sub> 含量的影响, 通过响应面分析确定了最佳工艺条件: 微波功率 750 W, 微波时间 9.56 min; 碱性蛋白酶水解温度 50 °C, 酶解 pH10.74, 酶解时间 1.57 h, 酶用量 0.4%; 料液比 1:9.96(m/V), 在此条件下, AFB<sub>1</sub> 在米糠中的降解率为 98.68%, 米糠多肽残留浓度为 1.85 μg/kg, 符合国家标准(<10 μg/kg); Sun 等<sup>[92]</sup>利用聚氧乙烯醚(OP-10)和月桂酰胺丙基甜菜碱(LAB-35)二元表面活性剂混合物对有机蒙脱石进行改造后, 所得吸附剂(NZMTs)对 AFB<sub>1</sub> 的脱毒效率显著提高, 与单一表面活性剂改性的对照样品相比, pH 值对 NZMTs 的吸附影响较小, 说明 NZMTs 在不同 pH 环境下更稳定; Zhang 等<sup>[93]</sup>利用另一种利用阳离子表面活性剂改造的纳米蒙脱石(NMST-STAB), 对黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 达到 9.23 mg/g, 吸附量比未改造蒙脱石提高了 1.36 倍; 靳志强等<sup>[94]</sup>发现紫外线辐射和臭氧熏蒸串并联组合处理对染毒玉米中 AFB<sub>1</sub> 的降解效果优于单一处理, 且紫外(UV)/O<sub>3</sub> 组合 AFB<sub>1</sub> 含量较低, 与未进行任何处理的染毒玉米相比降低了 63.6%, 微波(microwave, MW)-UV/O<sub>3</sub> 组合处理能发挥协同作用, 有效降低霉变玉米的霉菌孢子数量和 AFB<sub>1</sub> 含量, 且不会引起玉米品质的显著改变。

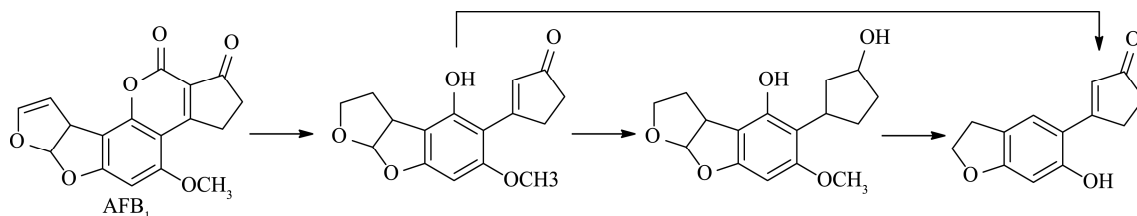


图 12 复合光催化体系 WO<sub>3</sub>/RGO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对 AFB<sub>1</sub> 的光解产物和机制推测

Fig.12 Photolysis products and mechanism of AFB<sub>1</sub> by composite photocatalytic system WO<sub>3</sub>/RGO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

## 6 总结与展望

本研究对黄曲霉毒素 3 大类脱毒方法进行了综述。在各种脱毒方法中, 物理脱毒方法相对最为快速简单, 但是高温处理对食品本身的理化性质和营养成分影响较大, 应用范围狭小; 辐照脱毒是目前最具应用潜力的脱毒手段之一, 但是在大规模工业生产的条件下需要考虑相应的设备成本问题, 此外, 不同类型辐照由于其作用原理, 对于被处理食品材料本身成分的影响同样需要进一步评价; 吸附法作为安全绿色的手段之一, 使用所受限制较小, 对食品品质几乎不产生影响, 不过依赖于材料化学和生物材料研发的进步, 以获得低成本吸附效果更强的吸附剂。

化学脱毒法中, 臭氧脱毒法在前期技术设备发展的基础上, 具备一定的前景, 不过由于臭氧依靠相应装置电离产生, 制备成本较高, 加之臭氧本身的微毒性, 对大规模应用产生限制; 氨化脱毒效果较好, 却对环境存在一定影响, 且氨残留造成的二次污染会影响动物对饲料的取食<sup>[95]</sup>; 天然产物具有来源广泛, 结构多样, 种类丰富等优点, 通过质谱、高效液相与生物测试技术结合筛选出活性出色的化合物并应用于农业应用方面的研究发展迅速, 而且用于真菌毒素脱毒对食品本身的成分和性质没有直接影响, 未来将天然产物用于真菌毒素的处理将成为新的研究趋势, 但是由于天然产物制剂开发利用周期较长, 短时间内难以获得广泛应用。

微生物转化技术依靠微生物的酶催化体系和次生代谢途径,可以对结构复杂的化合物进行结构改造,同时不易对环境造成污染,是一种绿色有效的降解手段,随着生物技术的进步,可以预见会在真菌以及真菌毒素污染的防治中发挥巨大作用。但微生物转化技术面临着发酵带来的时间效率和培养条件问题,同时要防止生防菌株自身发酵对食品所含营养成分和性质产生其他影响,应用于食品中真菌毒素降解时要结合安全评价筛选出满足条件的菌种;生物酶降解是生物转化的延伸,直接利用了酶的高效性,比微生物转化技术更为便捷,而且避免了由于生防菌株自身代谢对食品品质产生影响的问题。但是基于生物酶系统的降解手段,由于酶自身特性,对于使用条件的要求限制较多,生防制剂的开发目前也缺乏明确的制造和施用标准,距离推广应用还有一段距离。

多元协同技术为真菌毒素的处理提供了新的研究思路和方向,现有的相关研究也显示出了出色的应用效果。不过由于不同方法的各自局限性,协同技术的选择和搭配也面临更为复杂因素的考验,需要相当时间的探索和试验。相信随着上述理化生方法的突破和进步,不同技术综合利用的策略也会成为未来的主流。

目前黄曲霉毒素降解已经取得了大量研究进展,但是降解产物的分析、结构鉴定、降解机制与毒性研究等方面的研究比较薄弱。因此,本研究认为,关于黄曲霉毒素的脱毒降解研究今后应关注以下几个方面。(1)黄曲霉毒素降解产物的分析与结构鉴定:受到降解产物获得量的影响,目前关于黄曲霉毒素降解产物的研究主要以质谱数据为基础,依靠高效液相色谱-串联质谱、超高压液相色谱飞行时间质谱仪等技术,对降解产物的结构进行推测,缺乏利用核磁共振等化合物鉴定的主流技术对降解产物进行系统的结构鉴定,以及在此基础上开展的降解机制研究和确定化合物的毒理活性测试,类似研究应该更加深入的开展;(2)黄曲霉毒素的提前预防与防治:除食品行业外,关于中药材中黄曲霉毒素污染的处理措施多集中于前期种植、贮藏条件改善等阶段,对有效且可靠的降解手段研究较少,相关科研工作应该在未来受到更多关注;(3)脱毒手段应与实际应用紧密结合:现有的脱毒手段应与实际应用紧密结合,将现实生产中的各种因素综合考虑对具体方法进行评价,以开发出真正适用于工业化发展的安全可靠的技术。

## 参考文献

- [1] Kvaternik M, Todorović M, Nikolić M, *et al.* Aflatoxins as food contaminants [J]. *Qual Life Multi Discip J Food Sci*, 2019, 10(1-2): 33-40.
- [2] Mousavi KA, Ismail EŞ, Raecis S, *et al.* Aflatoxins in cereals: State of the art [J]. *J Food Saf*, 2018, 38(6): e12532.
- [3] Ismail A, Riaz M, Gong YY, *et al.* Aflatoxins in plant-based foods [J]. *Plant Human Health*, 2019, (2): 313-325.
- [4] Ginting E, Rahmianna AA, Yusnawan E. Aflatoxin and nutrient contents of peanut collected from local market and their processed foods [J]. *Earth Environ Sci*, 2018, 102(1): 12-31.
- [5] Lee D, Lyu J, Lee K. Analysis of aflatoxins in herbal medicine and health functional foods [J]. *Food Control*, 2015, (48): 33-36.
- [6] Spanjer MC. Occurrence & risk of aflatoxins in food and feed [M]. *Encyclopedia Food Chemistry*, 2019.
- [7] Kademi HI, Baba IA, Saad FT. Modelling the dynamics of toxicity associated with aflatoxins in foods and feeds [J]. *Toxicol Rep*, 2017, (4): 358-363.
- [8] Carvajal-Moreno M. Aflatoxins, frequent mutagen and carcinogen of human and animal foods [J]. *Toxicol Lett*, 2016, (259): 139.
- [9] Koshiol J, Gao YT, Dean M, *et al.* Association of aflatoxin and gallbladder cancer [J]. *Gastroenterology*, 2017, 153(2): 488.
- [10] Gökhan E, Zeynep SS, Latife ÇB, *et al.* The effects of diosmin on aflatoxin-induced liver and kidney damage [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24(36): 27931-27941.
- [11] 范蓓, 李庆鹏, 哈益明. 关注黄曲霉毒素国内外限量标准,完善食品安全保障措施[J]. *食品工业科技*, 2010, (12): 26-27.  
Fan B, Li QP, Ha YM. Pay attention to the domestic and international limit standards of aflatoxin and improve food safety measures [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2010, (12): 26-27.
- [12] GB 2761-2017 食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量[S].  
GB 2761-2017 Food safety national standard-Limit of mycotoxins in food [S].
- [13] 金红宇, 王莹, 孙磊, 等. 中药中外源性有害残留物监控的现状与建议[J]. *中国药事*, 2009, (7): 639-642.  
Jin HY, Wang Y, Sun L, *et al.* Current situation and suggestions on control of extrinsic harmful residues in Chinese medicinal materials [J]. *Chin Pharm Affair*, 2009, (7): 639-642.
- [14] 年宇娇. 中药材中真菌毒素的检测和转移及其对质量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.  
Nian YJ. Detection and transfer of mycotoxin in traditional Chinese medicines and its effect on quality [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.
- [15] 刘蕊, 赵新悦, 毛雯雯, 等. 中药材中黄曲霉毒素及赭曲霉毒素A污染的研究进展[J]. *中国药物警戒*, 2020, (2): 117-120.  
Liu R, Zhao XY, Mao WW, *et al.* Aflatoxin and ochratoxin A contamination in Chinese herbal medicines [J]. *Chin J Pharmacov*, 2020, (2): 117-120.
- [16] 张新军, 林志军, 金晓丽, 等. 2015年版《中国药典》一部收载中药材及饮片测定信息的分析[J]. *中成药*, 2020, 42(1): 175-179.  
Zhang XJ, Lin ZJ, Jin XL, *et al.* Analysis of the determination information of Chinese herbal medicines and pieces of decoction collected in the first part of *Chinese Pharmacopoeia* (2015 Edition) [J]. *Chin Tradit Patent Med*, 2020, 42(1): 175-179.
- [17] Peng Z, Chen L, Zhu Y, *et al.* Current major degradation methods for aflatoxins: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, (80): 155-166.
- [18] Kumar P, Mahato DK, Kamle M, *et al.* Aflatoxins: A global concern for food safety, human health and their management [J]. *Front Microbiol*, 2016, (7): 2170.
- [19] Zheng H, Wei S, Xu Y, *et al.* Reduction of aflatoxin B<sub>1</sub> in peanut meal by extrusion cooking [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2015, 64(2): 515-519.

- [20] Kaur B, Sharma NS, Sharma S, *et al.* Effect of processing on reduction of aflatoxins in contaminated wheat [J]. *Agric Res J*, 2014, 51(2): 163–167.
- [21] Méndez AA, Martínez BF, Gaytán MM, *et al.* Effect of lactic and citric acid on the stability of B-aflatoxins in extrusion-cooked sorghum [J]. *Lett Appl Microbiol*, 2008, (47): 1–7.
- [22] Taniwaki MH, Iamanaka BT, Martins LM, *et al.* Kinetics of aflatoxin degradation during peanut roasting [J]. *Food Res Int*, 2017, (97): 178–183.
- [23] Farahmandfar R, Tirgarian B. Conference announcements [J]. *Steel Res Int*, 1995, 66(3): 109.
- [24] Karaca H, Nas S. Combined effect of pH and heat treatment on degradation of aflatoxins in dried figs [J]. *J Food Process Preserv*, 2009, 33(1): 329–339.
- [25] 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.
- [26] 康传志, 吕朝耕, 蒋靖怡, 等. 霉变与煎煮对硫熏天麻质量及二氧化硫残留量的影响[J]. *中华中医药杂志*, 2018, 33(5): 2047–2050.
- Kang CZ, Lv ZG, Jiang JY, *et al.* Effects of mouldy and decoction on the quality and sulfur dioxide of sulfur-fumigated *Gastrodia rhizoma* [J]. *China J Tradit Chin Med Pharm*, 2018, 33(5): 2047–2050.
- [27] Liu R, Lu M, Wang R, *et al.* Degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> in peanut meal by electron beam irradiation [J]. *Int J Food Prop*, 2018, 21(1): 892–901.
- [28] Mao J, He B, Zhang L, *et al.* A structure identification and toxicity assessment of the degradation products of aflatoxin B<sub>1</sub> in peanut oil under UV irradiation [J]. *Toxins*, 2016, 8(11): 332.
- [29] Puligundla P, Lee T, Mok C. Effect of corona discharge plasma jet treatment on the degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> on glass slides and in spiked food commodities [J]. *LWT*, 2019, (7): 108333.
- [30] Wang B, Mahoney N, Pan ZL, *et al.* Effectiveness of pulsed light treatment for degradation and detoxification of aflatoxin B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> in rough rice and rice bran [J]. *Food Control*, 2016, (59): 461–467.
- [31] Wang B, Mahoney NE, Khir R, *et al.* Degradation kinetics of aflatoxin B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> in solid medium by using pulsed light irradiation [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(14): 5220–5224.
- [32] Adunphatcharaphon S, Petchkongkaew A, Greco D, *et al.* The effectiveness of durian peel as a multi-mycotoxin adsorbent [J]. *Toxins*, 2020, 12(2): 108.
- [33] Ji J, Xie W. Detoxification of aflatoxin B<sub>1</sub> by magnetic graphene composite adsorbents from contaminated oils [J]. *J Hazard Mater*, 2020, (381):120915.
- [34] Pirouz AA, Selamat J, Iqbal SZ, *et al.* Efficient and simultaneous chitosan-mediated removal of 11 mycotoxins from palm kernel cake [J]. *Toxins*, 2020, 12 (2): 115.
- [35] Sadia A, Dykes L, Deng Y. transformation of adsorbed aflatoxin B<sub>1</sub> on smectite at elevated temperatures [J]. *Clay Miner*, 2016, 64 (3): 220–229.
- [36] Scaglioni PT, Badiale-Furlong E. Rice husk as an adsorbent: A new analytical approach to determine aflatoxins in milk [J]. *Talanta*, 2016, (152): 423–431.
- [37] Sun Z, Huang D, Duan X, *et al.* Functionalized nanoflower-like hydroxyl magnesium silicate for effective adsorption of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. *J Hazard Mater*, 2020, (387): 121792.
- [38] Zahran E, Risha E, Hamed M, *et al.* Dietary mycotoxicosis prevention with modified zeolite (clinoptilolite) feed additive in *Nile tilapia* (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture*, 2020, (515): 734562.
- [39] Manoochehri M, Asgharinezhad AA, Safaei M. Determination of aflatoxins in rice samples by ultrasound-assisted matrix solid-phase dispersion [J]. *J Chromatogr Sci*, 2015, 53(1): 189–195.
- [40] Liu Y, Li M, Liu Y, *et al.* Structures of reaction products and degradation pathways of aflatoxin B<sub>1</sub> by ultrasound treatment [J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(9): 526.
- [41] Liu Y, Li M, Liu Y, *et al.* Effects of pulsed ultrasound at 20 kHz on the sonochemical degradation of mycotoxins [J]. *World Mycotoxin J*, 2019, 12(4): 357–366.
- [42] Hernández-Falcón TA, Monter-Arciniega A, Cruz-Cansino NDS, *et al.* Effect of thermoultrasound on aflatoxin M<sub>1</sub> levels, physicochemical and microbiological properties of milk during storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2018, (48): 396–403.
- [43] Salgado-Tránsito L, Río-García JD, Arjona-Román J, *et al.* Effect of citric acid supplemented diets on aflatoxin degradation, growth performance and serum parameters in broiler chickens [J]. *Arch Med Veter*, 2019, 43(3): 215–222.
- [44] Rushing BR, Selim MI. Effect of dietary acids on the formation of aflatoxin B<sub>2a</sub> as a means to detoxify aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. *Food Addit Contam A*, 2016, 33(9): 1456–1467.
- [45] Aiko V, Edamana P, Mehta A. Decomposition and detoxification of aflatoxin B<sub>1</sub> by lactic acid [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(6): 1959–1966.
- [46] Lee J, Her JY, Lee KG. Reduction of aflatoxins (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub> and G<sub>2</sub>) in soybean-based model systems [J]. *Food Chem*, 2015, (189): 45–51.
- [47] Singh R, Mandal A, Biswas A. Efficacy of propionic, benzoic and tartaric acids in preventing biosynthesis of aflatoxins in poultry feed [J]. *Anim Nutr Feed Technol*, 2017, 17(1): 157–164.
- [48] Gui D, Guo Y, Pan Y, *et al.* Effect of ozonation and UV irradiation on aflatoxin degradation of peanuts [J]. *J Food Process Preserv*, 2019, 43(11): e13914
- [49] Luo X, Li K, Xing J, *et al.* *In vivo* toxicity assessment of aflatoxin B<sub>1</sub>-contaminated corn after ozone degradation [J]. *Food Addit Contam A*, 2018, 35(2): 341–350.
- [50] Mohammadi H, Mazloomi SM, Eskandari MH, *et al.* The effect of ozone on aflatoxin M<sub>1</sub>, oxidative stability, carotenoid content and the microbial count of milk [J]. *Ozone Sci Eng*, 2017, 39(6): 447–453.
- [51] Bergot BJ, Stanley WL, Masri MS. Reaction of coumarin with aqua ammonia: Implications in detoxification of aflatoxin [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 25(4): 965–966.
- [52] Brekke OL, Stringfellow AC, Peplinski AJ. Aflatoxin inactivation in corn by ammonia gas: laboratory trials [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 26(6): 1383–1389.
- [53] Weng CY, Martinez AJ, Park DL. Efficacy and permanency of ammonia treatment in reducing aflatoxin levels in corn [J]. *Food Addit Contam A*, 1994, 11(6): 649–658.
- [54] Allameh A, Safamehr A, Mirhadi SA, *et al.* Evaluation of biochemical and production parameters of broiler chicks fed ammonia treated aflatoxin contaminated maize grains [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2005, 122(3–4): 289–301.
- [55] Bagley EB. Decontamination of corn containing aflatoxin by treatment with ammonia [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1979, 56(9): 808–811.
- [56] Brekke OL, Sinnhuber RO, Peplinski AJ, *et al.* Aflatoxin in corn:

- ammonia inactivation and bioassay with rainbow trout [J]. Appl Environ Microbiol, 1977, 34(1): 34–37.
- [57] Jensen AH, Brekke OL, Frank GR, *et al.* Acceptance and utilization by swine of aflatoxin-contaminated corn treated with aqueous or gaseous ammonia [J]. J Anim Sci, 1977, 45(1): 8–12.
- [58] Iram W, Anjum T, Iqbal M, *et al.* Structural elucidation and toxicity assessment of degraded products of aflatoxin B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> by aqueous extracts of *Trachyspermum ammi* [J]. Front Microbiol, 2016, (7): 346.
- [59] Wajiha I, Tehmina A, Mazhar I, *et al.* Structural analysis and biological toxicity of aflatoxins B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> degradation products following detoxification by ocimum basilicum and cassia fistula aqueous extracts [J]. Front Microbiol, 2016, (7): 1105.
- [60] Abdel-Fattah SM, Badr AN, Seif Fa-HA, *et al.* Antifungal and anti-mycotoxigenic impact of eco-friendly extracts of wild stevia [J]. J Biol Sci, 2018, 18 (8): 488–499.
- [61] Hadi A, Yasser M, Najm A. Using of plant extracts for cinnamon, syzygium and thyme to degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. J Nat Sci Res, 2014, 4 (17): 1–7.
- [62] Iram W, Anjum T, Iqbal M, *et al.* Mass spectrometric identification and toxicity assessment of degraded products of aflatoxin B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> by *Corymbia citriodora* Aqueous extracts [J]. Sci Rep, 2015, (5): 14672.
- [63] Velazhahan R, Vijayanandraj S, Vijayasamundeeswari A, *et al.* Detoxification of aflatoxins by seed extracts of the medicinal plant, *Trachyspermum ammi* (L.) Sprague ex Turill-Structural analysis and biological toxicity of degradation product of aflatoxin G<sub>1</sub> [J]. Food Control, 2010, 21(5): 719–725.
- [64] Vijayanandraj S, Brinda R, Kannan K, *et al.* Detoxification of aflatoxin B<sub>1</sub> by an aqueous extract from leaves of *Adhatoda vasica* Nees [J]. Microbiol Res, 2014, 169(4): 294–300.
- [65] Adebo OA, Njobeh PB, Sidu S, *et al.* Aflatoxin B<sub>1</sub> degradation by culture and lysate of a *Pontibacter specie* [J]. Food Control, 2017, 80(1): 99–103.
- [66] González PML, Martínez MP, Cavaglieri LR. Presence of aiiA homologue genes encoding for N-acyl homoserine lactone-degrading enzyme in aflatoxin B<sub>1</sub>-decontaminating *Bacillus* strains with potential use as feed additives [J]. Food Chem Toxicol, 2019, (124): 316–323.
- [67] Gu X, Sun J, Cui Y, *et al.* Biological degradation of aflatoxin M<sub>1</sub> by *Bacillus pumilus* E-1-1-1 [J]. Microbiol Open, 2018, 8(3): e00663.
- [68] Sangi F, Mohammadi A, Afzali N, *et al.* Identification of new aflatoxin B<sub>1</sub>-Degrading bacteria from Iran [J]. Iran J Toxicol, 2018, 12(3): 39–44.
- [69] Jackson LW, Pryor BM. Degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> from naturally contaminated maize using the edible fungus *Pleurotus ostreatus* [J]. AMB Express, 2017, 7(1): 110.
- [70] Wang L, Wu J, Liu Z, *et al.* Aflatoxin B<sub>1</sub> degradation and detoxification by *Escherichia coli* CG1061 isolated from chicken cecum [J]. Front Pharmacol, 2019, (9): 1548.
- [71] Li J, Huang J, Jin Y, *et al.* Aflatoxin B<sub>1</sub> degradation by salt tolerant *Tetragenococcus halophilus* CGMCC 3792 [J]. Food Chem Toxicol, 2018, 121(1): 430–436.
- [72] Li J, Huang J, Jin Y, *et al.* Mechanism and kinetics of degrading aflatoxin B<sub>1</sub> by salt tolerant *Candida versatilis* CGMCC 3790 [J]. J Hazard Mater, 2018, (359): 382–387.
- [73] Martínez MP, Magnoli MP, González PML, *et al.* Probiotic bacteria and yeasts adsorb aflatoxin M<sub>1</sub> in milk and degrade it to less toxic AFM<sub>1</sub>-metabolites [J]. Toxicol, 2019, (172): 1–7.
- [74] Mwakinyali SE, Ming Z, Xie H, *et al.* Investigation and characterization of myroides odoratimimus strain 3J2MO aflatoxin B<sub>1</sub> degradation [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(16): 4595–4602.
- [75] Shu X, Wang Y, Zhou Q, *et al.* Biological degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> by cell-free extracts of *Bacillus velezensis* DY3108 with broad pH stability and excellent thermostability [J]. Toxins, 2018, 10(8): 330.
- [76] Wang Y, Zhao C, Zhang D, *et al.* Effective degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> using a novel thermophilic microbial consortium TADC7 [J]. Bioresour Technol, 2017, (224): 166–173.
- [77] Afsharmanesh H, Perez-Garcia A, Zerriouh H, *et al.* Aflatoxin degradation by *Bacillus subtilis* UTB1 is based on production of an oxidoreductase involved in bacilysin biosynthesis [J]. Food Control, 2018, 94(1): 48–55.
- [78] Dellafiora L, Galaverna G, Reverberi M, *et al.* Degradation of aflatoxins by means of laccases from trametes versicolor: An in silico insight [J]. Toxins, 2017, 9(1): 17.
- [79] Huang W, Chang J, Wang P, *et al.* Effect of compound probiotics and mycotoxin degradation enzymes on alleviating cytotoxicity of swine jejunal epithelial cells induced by aflatoxin B<sub>1</sub> and zearalenone [J]. Toxins, 2019, 11(1): 12.
- [80] Li CH, Li WY, Hsu IN, *et al.* Recombinant aflatoxin-degrading F420H2-Dependent reductase from mycobacterium smegmatis protects mammalian cells from aflatoxin toxicity [J]. Toxins, 2019, 11(5): 259.
- [81] Singh J, Mehta A. Protein-mediated degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> by *Pseudomonas putida* [J]. Brazil J Microbio, 2019, 50(4): s42770.
- [82] Song J, Zhang S, Xie Y, *et al.* Purification and characteristics of an aflatoxin B<sub>1</sub> degradation enzyme isolated from *Pseudomonas aeruginosa* [J]. FEMS Microbiol Lett, 2019, 366(5): 34.
- [83] Xie Y, Wang W, Zhang S. Purification and identification of an aflatoxin B<sub>1</sub> degradation enzyme from *Pantoea* sp. T6 [J]. Toxicol, 2019, (157): 35–42.
- [84] Xu L, Ahmed MFE, Sangare L, *et al.* Novel aflatoxin-degrading enzyme from *Bacillus shackletonii* L7 [J]. Toxins, 2017, 9 (1): 36.
- [85] Abuagela MO, Iqdiam BM, Mostafa H, *et al.* Combined effects of citric acid and pulsed light treatments to degrade B-aflatoxins in peanut [J]. Food Bioprod Process, 2019, (117): 396–403.
- [86] Sun S, Zhao R, Xie Y, *et al.* Photocatalytic degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> by activated carbon supported TiO<sub>2</sub> catalyst [J]. Food Control, 2019, (100): 183–188.
- [87] Mao J, Zhang Q, Li P, *et al.* Geometric architecture design of ternary composites based on dispersive WO<sub>3</sub> nanowires for enhanced visible-light-driven activity of refractory pollutant degradation [J]. Chem Eng J, 2018, (334): 2568–2578.
- [88] Wang X, Bai Y, Huang H, *et al.* Degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> and zearalenone by bacterial and fungal laccases in presence of structurally defined chemicals and complex natural mediators [J]. Toxins, 2019, 11(10): 609.
- [89] Yousif DA, Hussein HZ, Ali AM. Testing the efficiency of zinc oxide nanoparticles, honey, honey supported by zinc oxide nanoparticles and phylex in degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> in stored sea maize seeds [J]. J Glob Pharm Technol, 2019, 11(2): 225–235.
- [90] Alcantar-Barrios CA, Mendez-Albores A. Potential of tartaric acid in combination with infrared-microwave heating as a method for aflatoxin

- reduction in maize [J]. *Anim Nutr Feed Technol*, 2017, 17(3): 469–478.
- [91] Lin YS, Lin YY, Zhang HN, *et al.* Study on degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> during the preparation of rice bran polypeptide by response surface methodology microwave-assisted enzyme treatment [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35 (7): 173–181.
- [92] Sun Z, Lian C, Li C, *et al.* Investigations on organo-montmorillonites modified by binary nonionic/zwitterionic surfactant mixtures for simultaneous adsorption of aflatoxin B<sub>1</sub> and zearalenone [J]. *J Coll Interface Sci*, 2020, (565): 11–22.
- [93] Zhang W, Zhang L, Jiang X, *et al.* Enhanced adsorption removal of aflatoxin B<sub>1</sub>, zearalenone and deoxynivalenol from dairy cow rumen fluid by modified nano-montmorillonite and evaluation of its mechanism [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2020, (259): 114366.
- [94] 靳志强, 王顺喜. 微波、紫外线与臭氧组合技术对霉菌及其毒素的协同影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 147–154.  
Jin ZQ, Wang SX. Synergistic effects of microwave, ultraviolet and ozone combination on mold spores and aflatoxin [J]. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 46(4): 147–154.
- [95] Brekke O, Peplinski A, Lancaster E. Aflatoxin inactivation in corn by aqua ammonia [J]. *Trans ASAE*, 1977, 20(6): 1160–1168.

(责任编辑: 李磅礴)

## 作者简介



宋承钢, 博士研究生, 主要研究方向  
真菌次级代谢产物、真菌毒素降解。  
E-mail: songcg18@mails.jlu.edu.cn



丁 刚, 博士, 研究员, 主要研究方向  
为真菌次级代谢产物结构与功能。  
E-mail: gding@implad.ac.cn



秦建春, 博士, 教授, 主要研究方向为  
植物及微生物天然次级代谢产物研究。  
E-mail: qinjc@jlu.edu.cn