

## 微生物在防治黄曲霉菌及毒素中的应用

宫安东<sup>1,2</sup>, 孔宪巍<sup>2</sup>, 方海宾<sup>1</sup>, 王天文<sup>1,2</sup>

(1. 信阳师范学院生命科学学院, 信阳 464000; 2. 信阳师范学院大别山农业生物资源保护与利用研究院, 信阳 464000)

**摘要:**黄曲霉菌及其黄曲霉毒素对人类的严重危害是世界性难题, 给粮食生产和人类健康带来了极大的损害。在对黄曲霉菌及毒素的防治研究中, 微生物资源已被证明具有高效的抑菌作用。近年来, 多种新颖的微生物资源被筛选和应用用于防治田间或储藏期作物黄曲霉病害, 取得了高效的应用价值。研究对近期报道的各类功能微生物在防治田间和储藏期黄曲霉菌及毒素的最新进展进行了综述, 微生物通过竞争抑制、拮抗作用、毒素的吸附和降解、储藏期呼吸抑制、以及新发现的微生物挥发气体抑菌等方式发挥拮抗作用, 为田间和储藏期作物的合理防控、食品安全和人类健康等提供重要的参考依据。

**关键词:**黄曲霉菌; 黄曲霉毒素; 生物防治; 田间防治; 储藏期防治

中图分类号: Q939.95

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0502-06

### Application of microbes in control of crop *Aspergillus flavus* and aflatoxins

GONG Andong<sup>1,2</sup>, KONG Xianwei<sup>2</sup>, FANG Haibin<sup>1</sup>, WANG Tianwen<sup>1,2</sup>

(1. College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000;

2. Institute for Conservation and Utilization of Agro-bioresources in Dabie Mountains, Xinyang Normal University, Xinyang 464000)

**Abstract:** Aflatoxins produced by *Aspergillus flavus* are hazardous to humans all over the world, causing great damage to crop production and human health. Among the methods used in control of *A. flavus* and aflatoxins, microbes have been proven validly and effectively in the field or post-harvest. In this study, we reviewed currently reported microbes which show great biocontrol activity against *A. flavus* and aflatoxins at pre- or post-harvest. The biocontrol strategies of these microbes include competitive effect, antagonistic effect, aflatoxins elimination effect, pathogen respiratory depression, and the newfound microbe antifungal volatiles. These methods will provide useful strategies for preventing field and harvested crops from pathogen damage and further keeping food safety and human health.

**Key words:** *Aspergillus flavus*; aflatoxin; biological control; field control; postharvest control

黄曲霉菌 (*Aspergillus flavus*) 是对人类危害严重的植物病原真菌, 能侵染花生、玉米、水稻、大豆和棉籽等多种重要的粮食和油料作物, 并产生高毒和强致癌性黄曲霉毒素 (Aflatoxins, AFT), 严重危害粮食生产和人类健康。20 世纪 60 年代, 美国报道的 10 万只火鸡中毒死亡事件, 让人们第一次认识到了 AFT 的严重危害。近年来, 随着全球性气候变化、物质交换及人类活动的趋于频繁, 黄曲霉菌及毒素导致的损失愈加严重。在美国佐治亚州每年因 AFT 污染导致的花生损失高达 2 500 万美元<sup>[1]</sup>。在

中国, 林强等人检测了不同花生榨油作坊的 59 份成品油样品, 所有样品中 AFB1 的检出率为 100%, 超标率达 66.1%<sup>[2]</sup>。近期媒体报道的蒙牛乳业黄曲霉毒素 M1 超标 140% 事件<sup>[3]</sup>、山东进口花生果 AFT 超标事件<sup>[4]</sup>及广东省检出食用油 AFT 超标事件等<sup>[5]</sup>, 给人们的生活和健康带来严重的安全隐患。

AFT 是目前已知的毒性最强的霉菌毒素, 误食后易引发高烧、呕吐、水肿和黄疸等多种不良反应, 严重时可能导致急性死亡<sup>[6]</sup>。到目前为止, 已发现 20 余种 AFT, 以黄曲霉毒素 B1 (AFB1) 毒性最高, 达

收稿日期: 2016-10-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB127801), 河南省科技攻关计划项目 (172102110260) 和河南省教育厅科学技术研究重点项目 (16A180036) 共同资助。

作者简介: 宫安东, 博士, 副教授。E-mail: gad-123.123@126.com

氰化钾的 10 倍、砒霜的 68 倍<sup>[7]</sup>。AFB1 也是一种强致癌物, 易诱发肝癌、肾癌和直肠癌等严重人体病变, 是世界卫生组织 (WHO) 认定的最强致癌物。中国每年约有 37 万人死于肝癌, 占世界肝癌死亡人数的 50% 以上<sup>[8]</sup>, 发病的原因与 AFT 的污染具有直接相关性。2004 年, 肯尼亚东部发生严重的 AFT 中毒事件, 造成 317 人肝脏衰竭病变, 125 人死亡, 死亡原因与食用储藏期污染 AFT 的粮食作物直接相关。

长期以来, 对粮、油作物黄曲霉菌及 AFT 的防治主要依靠抗病育种, 化学药剂防治和生物防治等。生物防治作为一种环保、安全的防治手段, 在黄曲霉菌及毒素的防治工作中不断被人们认可。至今为止, 已报道了多种植物提取物可抑制黄曲霉菌及毒素的危害, 如丁香、柠檬草、牛至叶、薄荷、大豆和玉米等<sup>[9-11]</sup>。提取自迷迭香 (*Rosemarinus officianalis*), 鼠尾草 (*Salvia officianalis*) 和 柑橘 (*Citrus*) 中的植物精油已被加工成抑菌剂 DMC base Natura, 提取自肉桂 (*Cinnamomum zeylandicum*) 的植物精油加工成 Cinnamite™ 菌剂, *Rosemarinus officianalis* 提取物加工成 Sporan™ 菌剂, 以及自百里香 (*Thymus vulgaris*) 提取物制成的 Promax™ 菌剂等, 均为生防杀真菌剂, 具有显著的生防效果<sup>[12-13]</sup>。

植物源抑菌物质提取自植物, 具有很好的安全效应和生防前景。然而, 由于植物生长周期长, 需求面积大, 提取繁琐等, 在一定程度上制约了其应用和发展。与植物相比, 微生物个体微小、结构简单、繁殖速度快且代谢迅速, 可用于快速产生和富集功能代谢物质, 具有很好的应用前景和研究价值。到目前为止, 多种微生物已被成功应用于黄曲霉菌及毒素的防控工作中。作用方式包括竞争抑制、拮抗作用、呼吸抑制作用、吸附和脱毒酶降解以及微生物产气抑菌等, 为田间和储藏期黄曲霉病害及毒素的安全防控提供了新颖有效的生物资源。

## 1 微生物抑制黄曲霉菌及毒素的作用机制

### 1.1 竞争性抑制作用

利用不产毒黄曲霉菌防治作物黄曲霉病害是目前应用最广的生防手段, 非产毒黄曲霉菌株与产毒菌株的营养状况相同, 接种后依靠种群数量和竞争优势, 占据营养、空间和水分等生态龛位, 进而抑制了致病黄曲霉菌的发病和产毒, 减少了作物损失<sup>[14]</sup>。20 世纪 80 年代, 该方法首次在温室棉花上试用, 从 7 个非产毒菌株中筛选到抑菌效果最显著的生防菌株 AF36<sup>[15]</sup>。AF36 的生防效果在防治花生

和玉米黄曲霉病害中得到了进一步验证<sup>[16]</sup>。在美国, 有 2 个非产毒黄曲霉菌剂已获批准环境保护组织 (environmental protection agency, EPA) 注册证明。AF36 作为其中之一, 从 1999 年开始, AF36 已在美国亚利桑那州和德克萨斯州的玉米种植田地中得到广泛应用, 现已推广到加利福尼亚州的开心果试验田中。该菌株不产毒的主要原因是基因组中缺少了毒素合成的关键基因聚酮合成酶 *pksA*, 阻碍了毒素的产生<sup>[17]</sup>。另一个商品化制剂为 Afla-Guard, 是由脱壳的大麦包被有不产毒的黄曲霉孢子 NRRL21882 组成。该菌株可抑制田间花生中 AFT 的污染, 处理种植 67 d 的花生后, 毒素污染明显降低。未处理的对照组中 AFT 含量为 516.8  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 处理后的毒素量为 54.1  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。经一段时间的储藏后再次检测, 对照组的毒素含量已高达 9 145.1  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 处理组的毒素含量为 374.2  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。表明该菌株在田间对 AFT 具有高效的抑制作用, 且抑制作用可进一步的延续到储藏期<sup>[18]</sup>。Afla-Guard 菌剂已注册可应用于花生和玉米, 为先正达公司 (Syngenta) 所持有<sup>[16]</sup>。

非产毒黄曲霉菌株生防作用的高效应用呈现了国际化发展趋势。在非洲, 报道的非产毒菌 BN30 可抑制玉米 AFT 的产生<sup>[19]</sup>; 澳大利亚报道的非产毒菌降低花生 AFT 量达到 95%<sup>[11]</sup>; 在中国, 生防菌株 AF051, 对种植花生的土壤中黄曲霉种群的抑制率达 99%<sup>[20]</sup>。国际化非产毒菌株的筛选和验证, 为黄曲霉菌及毒素的控制提供了很好的应用价值。

### 1.2 拮抗作用

对黄曲霉菌及毒素的防控中, 具有拮抗作用的菌株报道最多<sup>[27-28]</sup>, 如芽孢杆菌 (*Bacillus spp.*)、乳酸杆菌 (*Lactobacillus sp.*)、假单胞菌 (*Pseudomonas sp.*)、伯克霍尔德菌 (*Burkholderia sp.*)、李斯特菌 (*Listeria sp.*)、链霉菌 (*Streptomyces sp.*)、寡养单胞菌 (*Stenotrophomonas sp.*) 和罗尔斯通菌 (*Ralstonia sp.*) 等, 均通过产生拮抗代谢产物, 抑制黄曲霉菌的生长和毒素的积累<sup>[26]</sup>。

Yan 等<sup>[29]</sup>分析了伯克霍尔德菌与致病黄曲霉菌的关系, 发现细菌可产生米酵菌酸类代谢产物, 进而抑制黄曲霉菌的菌丝生长和孢子产生, 最终抑制了 AFT 的产生。研究同时表明, M3 能利用死亡的黄曲霉菌丝细胞为营养, 供给自身生长需要且不受毒素损伤, 具有很好开发和应用前景。Kumar 等<sup>[30]</sup>鉴定了蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 对黄曲霉菌的抑制作用, 在与黄曲霉菌进行共培养时, 该菌株可显著抑制黄曲霉菌在花生上的定值和侵染。分析

其代谢物质发现, 该菌株可产环缩二胺酸类物质, 抑制黄曲霉菌的发病和产毒。同时, 该类物质对另外 5 株黄曲霉菌具有广谱抑制作用, 其最低抑菌浓度低至  $2 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。且该物质对动物细胞危害弱,

浓度高于  $200 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  时仅呈现弱毒性, 低浓度下对细胞无毒害。该类物质的发现为黄曲霉菌及毒素的防控, 新型天然代谢产物的开发和应用提供了重要依据。

表 1 已报道的具有生防作用的非产毒黄曲霉菌株  
Table 1 The effective non-toxicogenic *A. flavus* strains used nowadays

作物 Crop	非产毒黄曲霉 Non-toxicogenic strain	毒素抑制率/% Reduction rate	参考文献 Reference
玉米 Maize	K49	83~98	[21-22]
	Afla-guard	9~75	[22-23]
	GZ-15	17~50	[24]
	WF-5	52~76	[24]
	WF-20	31~75	[24]
	JZ-2	13~34	[24]
	YC-8	37~53	[24]
花生 Peanut	AFCHG2	75	[25]
	AR27, AR100G	78~89	[26]
	GZ-15	55~75	[24]
	WF-5	11~50	[24]
	WF-20	15~83	[24]
	JZ-2	11~38	[24]
	YC-8	14~53	[24]
	NRRL 21882/ NRRL 21369	93~97	[18]
棉花 Cotton	AF36	20~88	[22]

为研究微生物抑制 AF 产生的作用机制, Verheecke 等<sup>[31]</sup>分析了链霉菌与黄曲霉菌的互做关系, 表明链霉菌抑制曲霉菌产毒的主要原因是因为其干扰了曲霉菌细胞多个关键产毒基因的表达 (*aflD*, *aflM*, *aflP*, *aflR*, *aflS*), 其中以基因 *aflS*, *aflR* 和 *aflM* 的表达受抑制最为明显, 研究结构同时显示, *aflM* 基因的表达水平与 AFB1 的产量呈正相关, 可作为监测 AFB1 污染程度的潜在标记。Kong 等<sup>[32]</sup>筛选到对黄曲霉菌具有生防活性的海洋巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*), 该菌株同样可抑制黄曲霉菌产毒基因 *aflS* 和 *aflR* 的表达, 降低了储藏期 AFT 的危害。Cho 等<sup>[33]</sup>分离得到一株细菌 *Bacillus pumilus* HY1, 可抑制黄曲霉菌的生长和产毒。经检测发现, 该菌株可产生具有广谱抑菌效果的依枯草菌素, 该物质为脂肽类物质, 具有环状多肽和长链脂肪酸结构, 通过与真菌细胞膜中的甾醇类物质发生相互作用, 导致真菌细胞膜破裂和内容物流失, 致使真菌细胞裂解和死亡, 从而抑制了黄曲霉菌的生长和产毒, 因而具有很好的生防活性和应用前景。

### 1.3 挥发性气体抑菌

微生物产生的挥发性气体抑菌机制新颖, 可用

于储藏期植物病害的防治。迄今为止, 多种微生物源挥发性气体被证明可抑制储藏期病害<sup>[29,34]</sup>。针对储藏期黄曲霉菌及毒素的防治中, 产气菌株的开发和应用研究仍然较少, 到目前为止, 仅有 1 株细菌被证明可产挥发性气体物质, 防治储藏期黄曲霉菌及毒素。

Gong 等<sup>[28]</sup>以海洋微生物为筛选材料, 筛选到一株产气海藻希瓦氏菌 YM8。该菌株可产生挥发性抑菌物质, 抑制黄曲霉菌的菌丝生长和孢子萌发, 抑菌效果显著。在花生和玉米的储藏试验中 (3 种水活度), YM8 菌株产生的挥发性物质, 可抑制黄曲霉菌的发病和毒素的产生, 抑菌率均达到 100%。经透射电镜试验表明, 该菌株可作用于黄曲霉孢子的细胞壁, 导致细胞皱缩, 丧失侵染和产毒能力。进一步的验证表明, YM8 菌株产生的挥发性气体具有广谱抑菌效果, 可抑制 9 种不同的病原真菌生长。采用 SPME-GC-MS 鉴定产生的挥发性物质, 确定 YM8 菌株可产生多种物质, 以二甲基三硫的丰度最高。经验证表明, 二甲基三硫抑菌效果显著,  $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (物质重量/储藏空间) 浓度下, 可完全抑制黄曲霉菌侵染花生, 对产毒的抑制率达到 100%。YM8 菌株及产生的二甲基三硫均体现出显

著的生防效果, 不仅对于储藏期植物病害, 而且对于田间土传病害, 均具有很好的应用前景。

#### 1.4 毒素吸附和降解

田间和储藏期作物污染的 AFT 危害人类健康且难于清楚, 毒素的减持始终是生防领域研究的热点。通过微生物脱毒作用, 可降低毒素污染、保障粮食品质、减少经济损失, 到目前为止多种脱毒微生物已被筛选应用, 如假蜜环菌 (*Armillariella tabescens*)<sup>[35]</sup>, 酿酒酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*)<sup>[36]</sup>, 芽孢杆菌 (*Bacillus* spp)<sup>[37]</sup>和干酪乳杆菌 (*Lactobacillus casei*)<sup>[38]</sup>等, 为 AFT 的减持提供重要资源。

酵母菌作为高效的生防菌株, 在 AFT 的减持研究中作用显著。刘畅等<sup>[39]</sup>研究发现, 酿酒酵母菌 Y1 可通过物理结合的方式吸附 AFB1, 进而减少食品中 AFB1 含量, 菌株 Y1 对 AFB1 的吸附率可达 81.16%, 且该结合反应是可逆性, 脱附后可重复应用, 提升了菌株 Y1 的应用性。除简单的吸附作用外, Biernasiak 等<sup>[40]</sup>证明, 酿酒酵母具有降解 AFB 的能力, 在大麦、小麦和玉米粉的混合发酵试验中, 酿酒酵母菌能有效地降低 AFB1、B2、G1 和 G2 的含量, 降解率达到 30% 以上, 减少粮食和饲料中毒素残留。

乳酸杆菌为人体肠道中常见的有益微生物, 可调节人体微环境, 促进人体代谢平衡, 对人类健康具有重要意义。Hamidi 等<sup>[41]</sup>分别从人体粪便和鲜奶中分离得到乳酸菌 *Lactobacillus pentosus* 和 *Lactobacillus beveris*, 与 AFB1 共培养后, 使用 ELISA 法检测溶液中毒素残留量, *Lactobacillus pentosus* 和 *Lactobacillus beveris* 对 PBS 溶液 (AFB1 初始质量浓度为 2 mg·L<sup>-1</sup>) 中的 AFB1 结合率分别为 17.4% 和 34.7%, 证实这 2 株乳酸菌均具有一定的毒素结合能力。此外, AFB1-乳酸菌可形成复合物, 降低了 AFB1 对人体的危害, 且复合物比 AFB1 更容易排出体外, 减少 AFB1 在人体内的累积量<sup>[42]</sup>。Roger 等<sup>[43]</sup>筛选功能乳酸杆菌并分析其在发酵玉米面团上对黄曲霉菌及 AFB1 的抑制效果。证明有 3 株乳酸杆菌可抑制面团上黄曲霉菌的生长, 抑制率达到 100%, 且该 3 株菌株兼具备降解 AFB1 作用, 降解效率可高达 64.2%, 具有很好的应用前景。

刘大岭教授课题组从假蜜环菌 (*Armillariella* sp.) 获取了 AFT 脱毒酶 (Aflatoxin-detoxifying enzyme, ADTZ), 将样品中的 AFB1 含量降低 80%<sup>[35]</sup>。目前课题组已克隆该酶的编码基因, 并转化毕赤酵母工

程菌, 提高了该酶的表达效率和毒素降解能力。为进一步增强酶活力, 研究人员运用易错 PCR 技术, 构建 ADTZ 突变体, 检测突变体解毒酶活性及其对高温和低 pH 值的耐受性。经过多轮筛选, 获得了可耐 70℃ 高温的突变酶 A1773, 在酸性 (pH 4.0) 条件下活力稳定的突变酶 A1476, 提高了 ADTZ 酶的耐受性和稳定性。分析表明, 突变子的酶活力与野生菌相比, 分别提高了 6.5 倍和 21 倍, 脱毒活性明显提高<sup>[44]</sup>。

## 2 讨论

生物资源的开发和利用, 极大地丰富了黄曲霉病害控制的可用资源, 为 AFT 的减持提供了有利的保障。部分生防菌株已经成功的运用到田间作物黄曲霉及毒素的防控研究, 成果显著。如非产毒黄曲霉菌株, 目前已加工成商品化制剂, 在全球范围内使用。但微生物制剂的生防研究尚处于起步阶段, 尚有部分暂时无法解决的应用和研究难题, 需要不断的尝试创新, 如非产毒黄曲霉菌的对生物多样性的影响, 对作物品质的潜在作用等。另外, 微生物的生防效果受环境因素影响严重, 多数菌剂仅在温和或可控环境条件下对黄曲霉菌或毒素具有显著效果, 当田间环境变化较大时 (多雨、干旱), 生防效果愈加难以保证。随着生物技术的不断发展, 尤其是新一代高通量测序技术的推广普及, 基因组学、转录组学、蛋白组学和代谢组学以及多组学关联分析等为研究微生物抑菌作用以及彼此之间的互作关系提供了重要途径, 确定了生防菌的抑菌和应用机理, 为优势生防资源的开发和利用提供了重要手段, 极大的促进了生物防治技术的研究和推广。

从粮食长期储藏而言, 储藏期黄曲霉菌及毒素的危害被人类所忽视, 造成了严重的粮食污染和健康损伤。近年来, 随人类对健康重视程度的不断增强, 以及储藏期 AFT 的危害逐渐加大, 储藏期作物黄曲霉菌及 AFT 的防控开始被人们所重视<sup>[45]</sup>。黄曲霉菌孢子小、易传播, AFT 危害严重, 在今后很长的一段时间内, 储藏期粮油黄曲霉菌及毒素的安全防控将是生防领域研究的重点。多种新技术的研究和推广, 促进了病害的安全防控和本领域的快速发展。生物药剂的研发满足了绿色环保的生物需求, 为生物资源的发展提供了有利的保障。

## 参考文献:

- [1] AMAIKE S, KELLER N P. *Aspergillus flavus* [J]. *Annu Rev Phytopathol*, 2011, 49: 107-133.
- [2] 林强, 方黎剑, 陈伟, 等. 个体榨油作坊花生油产品黄

- 曲霉毒素 B1 污染情况分析[J]. 华南预防医学, 2004, 30(5): 38-38.
- [3] 李静, 廖爱玲. 蒙牛纯牛奶被检出强致癌物黄曲霉毒素 [N/OL]. 新京报, 2011-12-26. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2011/12/257542.shtm>.
- [4] 蓝宇. 中粮进口花生仁黄曲霉毒素超标已作退货处理 [EB/OL]. 2012-02-10. <http://money.163.com/12/0210/10/7PT5CSKO00253B0H.html#from=keyscan>.
- [5] 施诗, 李能忠. 广东三食用油厂因黄曲霉毒素超标停产 [N/OL]. 金融时报, 2011-12-29. <http://money.163.com/11/1229/07/7ME3VOAE002526O3.html#from=keyscan>.
- [6] KLICH M A. *Aspergillus flavus*: the major producer of aflatoxin [J]. Mol Plant Pathol, 2007, 8(6): 713-722.
- [7] ASTERS M C, WILLIAMS, W P, PERKINS A D, et al. Relating significance and relations of differentially expressed genes in response to *Aspergillus flavus* infection in maize [J]. Sci Rep-UK, 2014, 4:4815.
- [8] CHEN J G, EGNER P A, NG D, et al. Reduced aflatoxin exposure presages decline in liver cancer mortality in an endemic region of China [J]. Cancer Prev Res, 2013, 6(10): 1038-1045.
- [9] KEDIA A, PRAKASH B, MISHRA P K, et al. Antifungal and antiaflatoxic properties of *Cuminum cyminum* (L.) seed essential oil and its efficacy as a preservative in stored commodities [J]. Int J Food Microbiol, 2014, (168/169): 1-7.
- [10] CAMILETTI B X, ASENSIO C M, PECCI M L, et al. Natural control of corn postharvest fungi *Aspergillus flavus* and *Penicillium* sp. using essential oils from plants grown in Argentina [J]. J Food Sci, 2014, 79(12): 2499-2506.
- [11] CLEVELAND T E, CARTER-WIENTJES C H, DE LUCCA A J, et al. Effect of soybean volatile compounds on *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production [J]. J Food Sci, 2009, 74(2), 83-87.
- [12] BURT S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods-a review[J]. Int J Food Microbiol, 2004, 94(3): 223-253.
- [13] PRAKASH B, KEDIA A, MISHRA P K, et al. Plant essential oils as food preservatives to control moulds, mycotoxin contamination and oxidative deterioration of agri-food commodities-Potentials and challenges [J]. Food Control, 2015, 47: 381-391.
- [14] PITT J I, HOCKING A D. Mycotoxins in Australia: biocontrol of aflatoxin in peanuts [J]. Mycopathologia, 2006, 162(3): 233-243.
- [15] AMPT E A, BUSH D S, SIEGEL J P, et al. Larval preference and performance of *Amyelois transitella* (navel orangeworm, Lepidoptera: Pyralidae) in relation to the fungus *Aspergillus flavus* [J]. Environ Entomol, 2016, 45(1): 155-162.
- [16] DORNER J W. Efficacy of a biopesticide for control of aflatoxins in corn [J]. J Food Prot, 2010, 73: 495-499.
- [17] ACCINELLI C, ABBAS H K, VICARI A, et al. Leaf application of a sprayable bioplastic - based formulation of biocontrol *Aspergillus flavus* strains for reduction of aflatoxins in corn [J]. Pest Manag Sci, 2015, 72: 8.
- [18] DORNER J W, COLE R J. Effect of application of non-toxicogenic strains of *Aspergillus flavus* and *A. parasiticus* on subsequent aflatoxin contamination of peanuts in storage [J]. J Stored Prod Res, 2002, 38: 329-339.
- [19] CARDWELL K F, HENRY S H. Risk of exposure to and mitigation of effect of aflatoxin on human health: A West African example [J]. J Toxicol Toxin Rev, 2004, 23(2/3): 217-247.
- [20] DONNER M, ATEHNKENG J, SIKORA R A, et al. Molecular characterization of atoxigenic strains for biological control of aflatoxins in Nigeria [J]. Food Addit Contam, 2010, 27(5): 576-590.
- [21] ABBAS H K, ZABLOTOWICZ R M, HORN B W, et al. Comparison of major biocontrol strains of non-aflatoxicogenic *Aspergillus flavus* for the reduction of aflatoxins and cyclopiazonic acid in maize [J]. Food Addit Contam A, 2012, 28(2): 198-208.
- [22] EHRLICH K C. Non-aflatoxicogenic *Aspergillus flavus* to prevent aflatoxin contamination in crops: advantages and limitations [J]. Front Microbiol, 2014, 5: 50.
- [23] DORNER J W. Biological control of aflatoxin contamination in corn using a nontoxicogenic strain of *Aspergillus flavus* [J]. J Food Prot, 2009, 72(4): 801-804.
- [24] 魏丹丹, 周露, 张初署, 等. 不产毒黄曲霉菌对产毒黄曲霉菌产毒抑制效果分析[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 92-97.
- [25] ZANON A, CHIOTTA M, GIAJ-MERLER G, et al. Evaluation of potential biocontrol agent for aflatoxin in Argentinean peanuts [J]. Int J Food Microbiol, 2013, 162: 220-225.
- [26] ZANON M S A, BARROS G G, CHULZE S N. Non-aflatoxicogenic *Aspergillus flavus* as potential biocontrol agents to reduce aflatoxin contamination in peanuts harvested in Northern Argentina [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 231: 63-68.
- [27] KONG Q, CHI C, YU J, et al. The inhibitory effect of *Bacillus megaterium* on aflatoxin and cyclopiazonic acid biosynthetic pathway gene expression in *Aspergillus flavus* [J]. Appl Microbiol Biot, 2014, 98(11): 5161-5172.
- [28] GONG A D, LI H P, SHEN L, et al. The *Shewanella algae* strain YM8 produces volatiles with strong inhibition activity against *Aspergillus* pathogens and aflatoxins[J]. Front Microbiol, 2015, 6: 1091.
- [29] YAN Q H, ZHOU J X, LI H Z, et al. Coexistence of and interaction relationships between an aflatoxin-producing fungus and a bacterium [J]. Fungal Biol-UK, 2015, 119(7): 605-614.
- [30] KUMAR P S, DURAI PANDIYAN V, IGNACIMUTHU S. Isolation, screening and partial purification of antimicrobial antibiotics from soil *Streptomyces* sp. SCA 7 [J]. Kaohsiung J Med Sci, 2014, 30(9): 435-446.
- [31] VERHEECKE C, LIBOZ T, ANSON P, et al. Reduction of aflatoxin production by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* in interaction with *Streptomyces* [J]. Microbiology, 2015, 161(5): 967-972.
- [32] KONG Q, SHAN S H, LIU Q Z, et al. Biocontrol of *Aspergillus flavus* on peanut kernels by use of a strain of marine *Bacillus megaterium* [J]. Int J Food Microbiol, 2010, 139(1): 31-35.
- [33] CHO K M, MATH R K, HONG S Y, et al. Iturin produced

- by *Bacillus pumilus* HY1 from Korean soybean sauce (*kanjang*) inhibits growth of aflatoxin producing fungi[J]. Food Control, 2009, 20(4): 402-406.
- [34] KAI M, HAUSTEIN M, MOLINA F, et al. Bacterial volatiles and their action potential [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2009, 81(6): 1001-1012.
- [35] LIU D L, MA L, GU L Q, et al. Armillariella tabescens enzymatic detoxification of aflatoxin B1. Part III. Immobilized enzymatic detoxification [J]. Ann NY Acad Sci, 1998, 864(1): 592-599.
- [36] VERHEECKE C, LIBOZ T, MATHIEU F. Microbial degradation of aflatoxin B1: Current status and future advances [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 237: 1-9.
- [37] PETCHKONGKAEW A, TAILLANDIER P, GASALU-CK P, et al. Isolation of *Bacillus* spp. from Thai fermented soybean (Thua-nao): screening for aflatoxin B1 and ochratoxin A detoxification [J]. J Appl Microbiol, 2008, 104: 1495-1502.
- [38] ZUO R Y, CHANG J, YIN Q Q, et al. Effect of the combined probiotics with aflatoxin B(1)-degrading enzyme on aflatoxin detoxification, broiler production performance and hepatic enzyme gene expression [J]. Food Chem Toxicol, 2013, 59:470-475.
- [39] 刘畅, 王涛, 石翠芳. 耐高温酵母菌的筛选及特性研究[J]. 酿酒, 2007, 34(2): 52-54.
- [40] BIERNASIAK J, PIOTROWSKA M, LIBUDZISZ Z. Detoxification of mycotoxins by probiotic preparation for broiler chickens [J]. Mycotoxin Res, 2006, 22(4): 230-235.
- [41] HAMIDI A, MINNEJAD R, YAHAGHI E. The aflatoxin B1 isolating potential of two lactic acid bacteria [J]. Asian Pac J Trop Med, 2013, 3(9): 732-736.
- [42] 王晓伟, 高鹏飞, 姚国强, 等. 乳酸菌对乳制品中黄曲霉毒素的生物防治作用[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(3): 42-49.
- [43] ROGER T, LÉOPOLD T N, CARL M M F. Effect of selected lactic acid bacteria on growth of *Aspergillus flavus* and aflatoxin B1 production in *Kutukutu* [J]. J Microbiol Res, 2015, 5(3): 84-94.
- [44] 张赛, 邢克克, 胡亚冬, 等. 基于易错 PCR 的黄曲霉毒素解毒酶体外分子定向进化[J]. 生物工程学报, 2011, 27(7): 1100-1108.
- [45] VILLERS P. Aflatoxins and safe storage [J]. Front Microbiol, 2014, 5: 158.