

微生物法针对毒性位点降解黄曲霉毒素 B₁ 的研究进展

Research progress on degradation of aflatoxin B₁ by microbial method according to toxicity sites of aflatoxin B₁

连胜青^{1,2,3,4} 钱鑫^{1,2,3} 刘楚岑^{1,2,3,4}

LIAN Sheng-qing^{1,2,3,4} QIAN Xin^{1,2,3} LIU Chu-cen^{1,2,3,4}

李良怡^{1,2,3} 孙长坡⁴ 周文化^{1,2,3}

LI Liang-yi^{1,2,3} SUN Chang-po⁴ ZHOU Wen-hua^{1,2,3}

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 稻米及副产物深加工国家工程研究中心, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南省特医食品加工重点实验室, 湖南 长沙 410004; 4. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 102209)

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. National Engineering Research Center of Rice and Byproduct Deep Processing, Changsha, Hunan 410004, China; 3. Hunan Key Laboratory of Processed Food for Special Medical Purpose, Changsha, Hunan 410004, China; 4. Scientific Research Institute of State Grain and Material Reserve Bureau, Beijing 102209, China)

摘要:文章主要探究了黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 的毒性位点及毒性机理, 并对比了微生物法破坏 AFB₁ 毒性位点从而降解 AFB₁ 的优势。重点综述了微生物法中的脱毒酶法对 AFB₁ 的降解机制。同时, 对脱毒酶法联合其他方法的复合应用进行展望。

关键词:微生物法; 黄曲霉毒素 B₁; 毒性位点; 降解机制

Abstract: The toxicity sites and toxicity mechanism of aflatoxin B₁ (AFB₁) were explored in this study, and aiming at the toxicity sites of AFB₁, the advantages of microbial degradation of AFB₁ were compared. Then the degradation mechanism of AFB₁ by detoxifying enzyme method in microbial method was reviewed. Moreover, the composite application of detoxification enzyme method combined with other methods is prospected.

Keywords: microbiological method; aflatoxin B₁; toxic sites; degradation mechanism

基金项目:湖南省高技术产业科技创新引领计划(编号: 2021GK4022, 2021GK4024); 长沙市自然科学基金项目(编号: kq2014150)

作者简介:连胜青, 女, 中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者:周文化(1969—), 男, 中南林业科技大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: 1479674265@qq.com

收稿日期:2022-04-13 **改回日期:**2022-09-25

黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)作为真菌的一种代谢产物能够导致人类和其他动物的疾病甚至死亡, 是一种天然致癌物并且毒性极强^[1]。AFT 的衍生物有很多, 目前报道的有黄曲霉毒素 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)、黄曲霉毒素 M₂ (AFM₂)、黄曲霉毒素 P₁ (AFP₁)、黄曲霉毒素 Q₁ (AFQ₁)、毒醇等。其中以 AFB₁ 的毒性最大, 致癌性最强^[2]。AFB₁ 主要存在于坚果、花生、玉米、小麦及大豆等食物和饲料谷物中且污染于粮食等作物生长、收获、运输、贮藏等多个环节。AFB₁ 污染的食物或饲料谷物一旦被入畜误食后将在人畜体内发挥毒性^[3-5]。人畜因自身对 AFB₁ 毒性抗性的不同, 机体会产生不同的反应差异。慢性中毒时会出现食欲不振、体重下降、纤维组织增生等情况; 急性中毒时会出现肝脏肿大、肝细胞脂肪变性、胆管增生、运动失调等情况, 严重时甚至出现死亡现象。因此, 中国各地区都高度关注 AFB₁ 的污染问题, 并于 2017 年发布了《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》(GB 2761—2017), 其中对 AFB₁ 的限量标准如表 1 所示。鉴于此, 消减食物及饲料谷物中的 AFB₁ 具有重要意义。

研究主要探究 AFB₁ 毒性位点和毒性机理, 并对生物

理法(辐射法、高温法)、化学法(臭氧法、氨化法、碱化法)和微生物法(微生物降解法)针对毒性位点降解 AFB₁ 的优缺点。重点综述微生物降解 AFB₁ 的研究进展。其中微生物的降解作用主要通过微生物酶促反应进行,包括微生物(细菌、真菌)发酵粗提液以及经纯化获得的脱毒酶(氧化酶、过氧化物酶、内酯酶等)的作用,以期为微生物法高效降解 AFB₁ 提供依据。

1 黄曲霉毒素 B₁ 的毒性

目前 AFB₁ 主要有 3 个毒性位点^[7],如图 1 所示。毒性位点 1(8、9 号位点)、毒性位点 2(10、11、15 号位点)、毒性位点 3(1、2、3、14 号位点)^[8-9]。其中毒性位点 1(呋喃

双键)是致毒和致癌的主要位点,其可以与蛋白质、DNA、RNA 形成加合物从而使机体紊乱;毒性位点 2(香豆素的内酯环结构)也与致癌相关;而毒性位点 3(环戊烯酮环)虽然也具有一定的毒性,但没有毒性位点 1、2 的高。由于 AFB₁ 含有呋喃双键以及香豆素内酯环结构,并且两个羰基氧化性高,容易产生氢键,所以 AFB₁ 是 AFT 衍生物中毒性最高的。

当人畜误食含有 AFB₁ 的食物或者饲料谷物后,在体内的致毒方式主要分为直接致毒和间接致毒两种^[8]。直接致毒主要体现在, AFB₁ 在体内会被十二指肠直接吸收,主要危害的器官是肝脏、肾脏、肠膜系统等,未被吸收的部分会随排泄系统排出体外;间接致毒主要体现在,被体内器官吸收的 AFB₁ 在经过体内细胞功能氧化酶的作用下被羟基化、去甲基化、还原为多种毒性低的同系物,如 AFM₁、AFQ₁、AFP₁、AFL 等。其中 AFB₁ 和 AFM₁ 能被体内 P450 氧化酶氧化成 AFB₁-8-9-环氧化物(AFBO)和 AFM₁-8-9-环氧化物。这些环氧化物一部分与蛋白质结合致使不同程度的中毒,或者与 DNA、RNA 结合致使肝细胞癌变。此过程是 AFB₁ 致使机体紊乱的主要原因;另一部分和其他同系物一样以尿液、粪便等方式排出体外。

但是,当 AFBO 被水解为毒性较低的 AFB₁-二氢二醇后排出体外可以实现脱毒;AFB₁ 氨化时被水解为毒性

表 1 AFB₁ 限量标准^[6]

Table 1 AFB₁ limit standard

食品种类	限量标准/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
玉米、玉米面(渣、片)、玉米油、玉米制品、豆类及其制品、花生油、花生及其制品	20
大米类(稻谷、糙米等)、植物油(除花生油和玉米油外的其他油脂)	10
大麦、小麦、其他谷物、小麦粉、麦片、其他去壳谷物、其他熟制坚果及籽类、酱油、醋、酿造酱(以粮食为主要原料)	5
婴幼儿食品	0.5

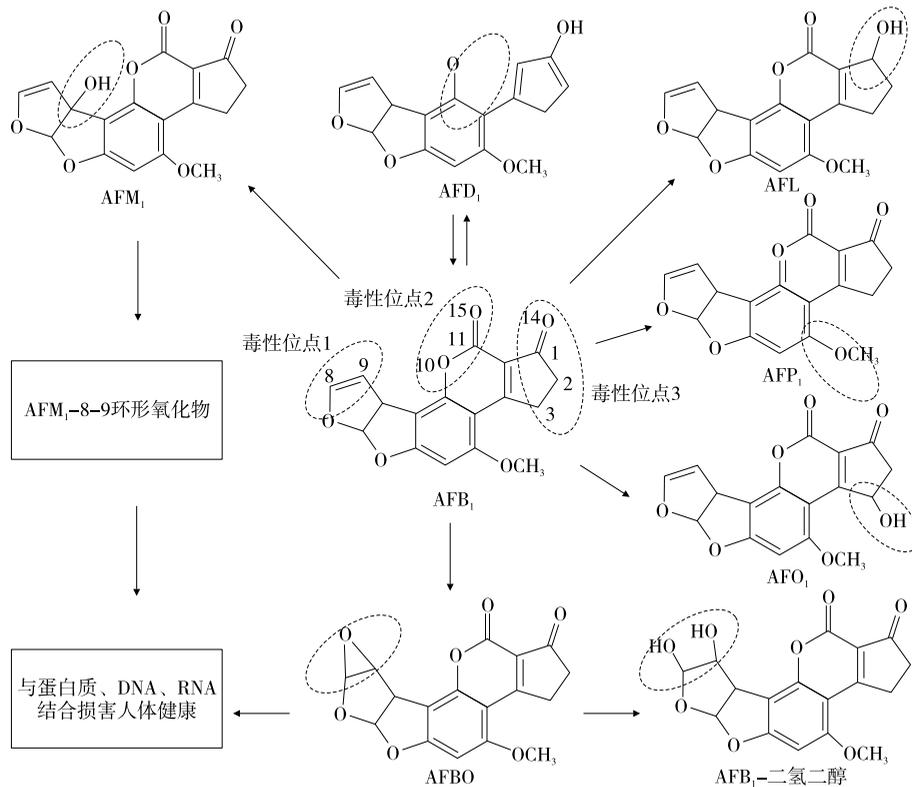


图 1 AFB₁ 主要毒性位点及毒性机理示意图

Figure 1 Schematic diagram of main toxicity sites and toxicity mechanism of AFB₁

较低的 AFD₁ 也可达到降低 AFB₁ 毒性的效果。由此可见理想的降低 AFB₁ 毒性的方法是破坏 AFB₁ 的呔喃双键或内酯环结构,使 AFB₁ 转化为无毒或毒性较低的物质,从而减小其对人畜机体的损害。具体 AFB₁ 在体内的毒性机理见图 1。

2 微生物法降解 AFB₁ 的优势

随着对 AFB₁ 毒性位点及毒性机理的认识,人们迫切希望能有效地消除其产生的不良影响。目前已经报道的有关降解 AFB₁ 的方法包括物理法^[10]、化学法^[11]和微生物法^[12]。其中针对破坏 AFB₁ 毒性结构进行脱毒的物理法有高温法、辐射法等;化学法有臭氧法、氨化法、碱化法等;微生物法有微生物降解法。

微生物法破坏 AFB₁ 毒性结构降解 AFB₁ 相比物理法、化学法的优势主要表现在:现有去除 AFB₁ 毒性的物理法虽然绿色安全、操作简单,但其固体穿透性差,不适用于粮食作物且耗能;化学法虽然成本低,可用于粮食作物,但高浓度的臭氧带有一定的毒性,对食物具有氧化性和腐蚀性,影响食品品质;而微生物法降解 AFB₁ 恰好规避了以上缺点。具体物理法、化学法、微生物法破坏 AFB₁ 毒性结构的原理及其优缺点见表 2。

微生物法包括微生物吸附和微生物降解。其中微生物吸附法是利用菌体内和膜上的吸附作用,与真菌产生的 AFB₁ 形成复合体排出体外,从而达到降低 AFB₁ 水平的效果。但是吸附和结合是可逆过程,在一定条件下可能会释放 AFB₁,从而造成脱毒效果不彻底且微生物吸附法并不一定能破坏 AFB₁ 的毒性结构。而微生物降解法可利用微生物自身或一些代谢产物去破坏 AFB₁ 的毒性

结构,条件温和,不会造成营养成分的大量损失,可以较好地维持食品的品质且不产生有害物质。因此相对于物理法和化学法,微生物降解法是一种更有前景的降低真菌毒素的方法^[26-29],所以研究微生物降解 AFB₁ 具有较高的价值。

3 微生物降解 AFB₁

微生物降解 AFB₁ 大多是破坏 AFB₁ 的毒性位点或者生物转化(微生物以 AFB₁ 作为辅助或主要碳源直接将其降解)来实现降解的目的^[7-8]。目前,关于微生物降解 AFB₁ 包括微生物发酵粗提取液降解和脱毒酶降解仍存在争议。一些学者认为微生物发酵粗提取液降解 AFB₁ 属于脱毒酶降解 AFB₁ 的一种,因为微生物发酵粗提取液降解 AFB₁ 也是其中的酶起主要作用,因此不应该被区分开来。但两者也存在不同,其不同在于微生物发酵粗提取液降解 AFB₁ 可能是真菌或细菌产生的一种酶或一组酶的降解效果,但具体是哪种酶的降解作用还需进一步探究。

3.1 微生物发酵粗提取液对 AFB₁ 的降解

微生物利用液体培养基中的营养成分,合成菌体及分泌产物,这种经微生物代谢后的液体叫发酵液。据报道^[30],许多真菌和细菌的发酵粗提取液能够降解 AFB₁。

真菌降解 AFB₁ 的作用主要来源于胞内提取物。如 Li 等^[31] 研究发现 CGMCC 3790 假丝酵母(真菌)活性细胞组分对 AFB₁ 的降解率为 69.40%、胞内组分对 AFB₁ 的降解率为 64.99%,均显著高于降解率为 29.61%的胞外组分。而且其作用 AFB₁ 的主要位点是毒性位点 2 和 3,打开内酯环形成化学式为 C₁₃ H₁₂ O₂ 的毒性低的物质,从

表 2 物理法、化学法、微生物法破坏 AFB₁ 毒性结构的原理及其优缺点

Table 2 Principles, advantages and disadvantages of physical, chemical and microbiological method to destroy the toxicity structure of AFB₁

分类	方法	原理	优点	缺点	参考文献
物理法	辐射法	电离辐射,使 AFB ₁ 结构(呔喃双键和内酯环)产生突变	绿色安全,对食品品质影响小	固体穿透性差,不适用于粮食作物	[13-14]
	高温法	高温破坏 AFB ₁ 呔喃双键	操作简单,降解效率高,可用于谷物	影响食品品质,耗能,高温使蛋白质变性	[15-17]
化学法	氨化法	氨水反应或者氨气熏蒸破坏 AFB ₁ 内酯环	先进,经济,可用于粮食作物	影响食品品质和人体健康	[18-19]
	碱液法	碱液处理,破坏 AFB ₁ 内酯环	可用于粮油	破坏食品营养结构,影响口感	[20]
	臭氧法	氧化 AFB ₁ 从而破坏 AFB ₁ 呔喃双键	简单易行	不好控制浓度,浓度过高会存在一定的危害性	[21]
微生物法	微生物降解法	利用酶促反应破坏 AFB ₁ 呔喃双键或内酯环	安全环保,高效,未造成营养成分大量损失,可用于粮食作物	酶活性低,含量少	[22-25]

而达到脱毒的目的。而细菌降解 AFB₁ 的作用主要来源于胞外产物^[32]。如 Shu 等^[33]从培养基中分离纯化得到的一株较强降解活性的 AFB₁ 降解菌(细菌),降解率可达 91.5%,经鉴定为芽孢杆菌,其解毒作用主要来自于胞外组分。Watanakij 等^[34]研究发现从非洲刺槐豆中分离的 BCC 42005 枯草芽孢杆菌(细菌)的胞外组分也具有降解 AFB₁ 的能力。因此利用微生物发酵粗提取液来降解 AFB₁,其实是利用发酵粗提取液中的酶促反应机制来脱除 AFB₁ 的毒性^[35-36]。其降解作用可能来源于其中的一种酶亦或是一组酶,但是具体是哪一种酶还需进一步探究。

3.2 脱毒酶对 AFB₁ 的降解

脱毒酶是指从微生物发酵粗提取液中经过进一步的提纯精制得到的酶,同微生物发酵粗提取液降解 AFB₁ 相比,脱毒酶降解 AFB₁ 具有更加专一且更加明确的降解效果。目前已从各种微生物中提取和纯化出许多 AFB₁ 脱毒酶,如氧化酶^[37]、过氧化物酶^[38]、内酯酶^[39],还有一些被分离纯化出但未知特性的酶,这些都是降解 AFB₁ 的主要酶类^[40]。氧化酶是研究最多的 AFB₁ 脱毒酶之一,其能催化多种多环芳烃、酚类化合物和芳香胺并将其氧化为无毒的化合物。漆酶作为氧化酶的一种可有效降解 AFB₁。但是漆酶的氧化还原电位较低(≤ 0.8 V),需要在漆酶中额外添加氧化还原介体形成漆酶-介体系统,才能增强漆酶对 AFB₁ 的降解效果^[41]。如 Wang 等^[42]使用植物提取物肉豆蔻酸甲酯作为介体,研究枯草芽孢杆菌 CotA 漆酶降解 AFB₁ 能力,结果显示肉豆蔻酸甲酯可以

有效帮助枯草芽孢杆菌 CotA 漆酶降解 AFB₁,且降解率达到 98.0%。

过氧化物酶具有较高的氧化还原电位(≥ 1.0 V)^[38],不需要添加额外的氧化还原介体,可直接降解 AFB₁。如 Wang 等^[43]研究发现 *Phanerochaete sordida* YK-624 白腐真菌中的纯化锰过氧化物酶(MnP)可将 AFB₁ 氧化为 AFBO 后再将其水解为 AFB₁-8-9-二氢二醇,从而达到一定的降解效果,且降解率达到 86%;Loi 等^[44]研究重组 B 型染料脱色过氧化物酶(Rh_DypB)对 AFB₁ 的体外酶促降解作用,结果表明, Rh_DypB 可有效转化 AFB₁,在 25 °C 下反应 4 d 后转化率达到最大值 96%。

内酯酶可以通过打开内酯环结构来降解 AFB₁。如 Mlgpa 等^[39]研究发现, RC₁B 枯草芽孢杆菌和 RC₁C 蜡状芽孢杆菌具有 *aii* 基因,该基因可编码负责降解 AFB₁ 的内酯酶,该酶通过靶向其酯键来切割内酯环从而脱除 AFB₁ 的毒性。除此之外,还有一些未知特性的酶也能降解 AFB₁。如 Zhao 等^[45]制备、纯化和鉴定出一种胞外酶,其来源于 SM068 黄色黏球菌,该酶不仅对 AFB₁ 具有很强的降解能力,同时还可降解 AFM₁ 和 AFG₁,其降解率分别可达 80%和 96%;Liang 等^[46]从沙克尔顿芽孢杆菌中纯化出一种热稳定的 AFB₁ 降解酶,其不仅可以降解 AFB₁ 也可以降解 AFB₂ 和 AFM₁,可将 AFB₁、AFB₂ 和 AFM₁ 水平分别降低 92.1%、84.1%、90.4%。表 3 总结了近年对 AFB₁ 有降解功能的脱毒酶,包括氧化酶、过氧化物酶、内酯酶等。

表 3 脱毒酶对 AFB₁ 的降解情况[†]

Table 3 Degradation of AFB₁ by detoxification enzymes

酶类	微生物来源	名称	胞内/胞外	作用位点	降解机制	参考文献
氧化酶	亮菌菌丝球	亮菌多酶	胞外	1	破坏咪唑双键	[47]
	酿酒酵母菌	杏鲍菇漆酶	胞外	2	打开内酯环	[42]
	凤尾菇	肺形侧耳 Lac2 纯酶	胞外	—	生物转化	[47]
	BCC42005 枯草芽孢杆菌	—	胞外	2	打开内酯环	[7]
过氧化物酶	<i>Phanerochaete sordida</i>	锰过氧化物酶 (MnP)	胞外	1	破坏咪唑双键	[43]
	YK-624 白腐真菌	—	—	—	—	—
	大肠杆菌	过氧化物酶 (Rh_DypB)	胞外	—	生物转化	[44]
内酯酶	大蒜	—	胞外	1,2	破坏咪唑双键和打开内酯环	[48]
	恶臭假单胞菌	—	胞外	2	生物转化和打开内酯环	[49]
	黑曲霉菌	—	胞外	1	打开内酯环	[40]
其他酶	黑曲霉菌	还原酶	胞内	2	破坏咪唑双键	[40]
	CGMCC3792 细耐盐四联球菌	—	—	1,2	破坏咪唑双键和打开内酯环	[50]
	FS10 黑曲霉菌	—	—	1,2	破坏咪唑双键和打开内酯环	[40]
	CGMCC3790 假丝酵母菌	—	胞内	2	打开内酯环	[33]

† “—”表示参考文献中未提及。

4 总结及展望

研究探究了黄曲霉毒素 B₁ 毒性位点及毒性机理。黄曲霉毒素 B₁ 主要的致毒位点是毒性位点 1 和毒性位点 2, 破坏黄曲霉毒素 B₁ 的毒性位点可有效脱除黄曲霉毒素 B₁ 的毒性, 从而降低其对人畜机体致毒和致癌的风险。相比较于物理法和化学法降解黄曲霉毒素 B₁, 微生物法降解黄曲霉毒素 B₁ 具有更加温和、不造成食品中营养成分大量损失且绿色环保等优点, 可以较好地维持食品的品质。通过对比微生物法中的微生物发酵粗提取液法和脱毒酶法对黄曲霉毒素 B₁ 的降解效果得知, 相对于微生物发酵粗提取液降解黄曲霉毒素 B₁, 脱毒酶降解黄曲霉毒素 B₁ 具有更加专一且明确的降解效果。

虽然脱毒酶降解黄曲霉毒素 B₁ 具有很多优点。但脱毒酶纯化成本高、分离纯化过程复杂、含量少且酶活不稳定, 因此限制了该方法的实际应用。为了减小这些问题带来的负面影响, 可从脱毒酶法联合其他方法的复合应用入手, 从而更有效地降解黄曲霉毒素 B₁。

(1) 脱毒酶法联合基因工程。如基因工程可以克隆高活性的脱毒酶基因, 实现脱毒酶基因的高效表达并生产出新型且安全的黄曲霉毒素 B₁ 脱毒酶, 达到一个更高的降解效果。

(2) 脱毒酶法联合介体物质。如一些脱毒酶(漆酶)氧化还原电位低, 不能氧化具有高氧化还原电位的物质。因此可向其中添加氧化还原介体(金属离子、植物提取物等), 使其与介体反应并形成自由基, 增大其氧化还原电位, 进一步与底物反应, 从而增强其对黄曲霉毒素 B₁ 的降解效果。

参考文献

[1] 陈露, 尹礼国, 张超, 等. 干制辣椒中黄曲霉毒素 B₁ 污染及暴露风险研究进展[J]. 云南化工, 2022, 49(1): 6-9.
CHEN L, YIN L G, ZHANG C, et al. Research progress of aflatoxin B₁ pollution and exposure risk in dried chili[J]. Yunnan Chemical Industry, 2022, 49(1): 6-9.

[2] MISHRA H N, DAS C. A review on biological control and metabolism of aflatoxin[J]. Critical Reviews in Food Technology, 2003, 43(3): 245-264.

[3] 石格鑫. 高效液相色谱法测定小麦中黄曲霉毒素 B₁ 含量[J]. 现代食品, 2020, 5(10): 204-206.
SHI G X. Determination of aflatoxin B₁ in wheat by high performance liquid chromatography[J]. Modern Food, 2020, 5(10): 204-206.

[4] 邢福国, 李旭, 张晨曦. 黄曲霉毒素的产生机制及污染防控策略[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 13-26.
XING F G, LI X, ZHANG C X. Biosynthesis mechanisms and control strategies of aflatoxin[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 13-26.

[5] 许艳丽, 吴振兴, 刘恩德, 等. 低温等环境条件对黄曲霉菌产毒的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2 718-2 722.
XU Y L, WU Z X, LIU E D, et al. Effects of environmental conditions such as low temperature on aflatoxins production[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017, 8(7): 2 718-2 722.

[6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量: GB 2761—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-2.
State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard limit of mycotoxins in food: GB 2761—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017: 1-2.

[7] 肖伟. 云芝黄曲霉毒素降解酶基因的异源表达及降解 AFB₁ 机制的初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 1.
XIAO W. Heterologous expression of *Trametes versicolor* aflatoxin B₁ degrading gene and preliminary study on the mechanism of AFB₁ degradation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 1.

[8] 宋川, 王利娟, 汪玲玲. 微生物代谢黄曲霉毒素 B₁ 的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 362-369.
SONG C, WANG L J, WANG L L. Research progress on the microbial metabolism of aflatoxin B₁[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(10): 362-369.

[9] 赵萌, 高婧, 褚华硕, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 的分子致毒机理及其微生物脱毒研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 235-245.
ZHAO M, GAO J, CHU H S, et al. Recent progress in research on toxicity mechanism and microbial detoxification of aflatoxin B₁[J]. Food Science, 2019, 40(11): 235-245.

[10] PUKKASORN P, RATPHITAGSANTI W, HARUTHAITANASAN V. Effect of ultra-superheated steam on aflatoxin reduction and roasted peanut properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(8): 2 935-2 941.

[11] 张禹, 王海荣. 饲料中黄曲霉毒素的危害及脱毒方法进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(8): 157-160.
ZHANG Y, WANG H R. The harm of aflatoxin in feed and the progress of detoxification methods[J]. Feed Research, 2021, 44(8): 157-160.

[12] SHETTY P H, HALD B, JESPERSEN L. Surface binding of aflatoxin B₁ by *Saccharomyces cerevisiae* strains with potential decontaminating abilities in indigenous fermented foods [J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 113(1): 41-46.

[13] RUSTOM I Y S. Aflatoxin in food and feed: Occurrence, legislation and inactivation by physical methods [J]. Food Chemistry, 1997, 59(1): 57-67.

[14] 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.
MO Z M, YUAN G W, CHEN N Z, et al. The research progress of aflatoxins degradation and product analysis[J]. Food Research and Development, 2019, 40(2): 188-193.

[15] 刘配莲, 张刚, 陈焱, 等. 食品与饲料中黄曲霉毒素脱除技术

- 的研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 92-97.
- LIU P L, ZHANG G, CHEN Y, et al. Progress on detoxification technology of aflatoxin in food and feed[J]. China Grease, 2021, 46(10): 92-97.
- [16] ZHENG H, WEI S, XU Y, et al. Reduction of aflatoxin B₁ in peanut meal by extrusion cooking [J]. LWT-Food Science & Technology, 2015, 64(2): 515-519.
- [17] YAZDANPANAH H, MOHAMMADI T, ABOUHASSAIN G, et al. Effect of roasting on degradation of aflatoxins in contaminated pistachio nuts[J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, 43(7): 1135-1139.
- [18] 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.
- SONG C G, WANG Y D, YANG J, et al. Research progress of aflatoxin detoxification [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(12): 3945-3957.
- [19] 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 G B. Degradation of aflatoxins B₁ which in peanut by ammonia gas method[J]. Food Research and Development, 2014, 35(3): 111-113.
- [20] 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.
- YANG W, DONG Z W, LEI F F, et al. Removal of aflatoxin B₁ from peanut oil by alkaline treatment solution treatment of peanut [J]. China Grease, 2019, 44(3): 90-93.
- [21] 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: Science & Engineering, 2017, 39(6): 447-453.
- [22] FARZANEH M, SHI Z Q, GHASSEMPOUR A, et al. Aflatoxin B₁ degradation by *Bacillus subtilis* UTBSP1 isolated from pistachio nuts of Iran[J]. Food Control, 2012, 23(1): 100-106.
- [23] 计成, 贾如, 赵丽红. 基因工程技术在黄曲霉毒素生物降解中的应用[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3422-3428.
- JI C, JIA R, ZHAO L H. Application of gene engineering technology in aflatoxin biodegradation [J]. China Agricultural Science, 2017, 50(17): 3422-3428.
- [24] 胡常英, 胡科峰, 秦慧娟, 等. 复合酶制剂降解黄曲霉毒素 B₁ 对蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[J]. 生物学杂志, 2015, 32(2): 24-27.
- HU C Y, HU K F, QIN H J, et al. The effects of complex enzymes for detoxicated aflatoxin B₁ on production performance and egg quality of laying hens[J]. Journal of Biology, 2015, 32(2): 24-27.
- [25] 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, 46(24): 249-256.
- XIE H, GAO L, ZHAO D D, et al. Research progress in biodegradation of aflatoxin B₁ [J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(24): 249-256.
- [26] ALI S, HASSAN M, ESSAM T, et al. Biodegradation of aflatoxin by bacterial species isolated from poultry farms[J]. Toxicon, 2021, 195(1): 7-16.
- [27] HATHOUT A S, MOHAMED S R, EL-NEKEETY A A, et al. Ability of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus reuteri* to protect against oxidative stress in rats fed aflatoxins-contaminated diet[J]. Toxicon, 2011, 58(2): 179-186.
- [28] CHANG J, WANG T, WANG P, et al. Compound probiotics alleviating aflatoxin B₁ and zearalenone toxic effects on broiler production performance and gut microbiota[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 194(5): 110420.
- [29] HUANG W, CHANG J, WANG P, et al. Effect of the combined compound probiotics with mycotoxin-degradation enzyme on detoxifying aflatoxin B₁ and zearalenone [J]. The Journal of Toxicological Sciences, 2018, 43(6): 377-385.
- [30] 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 X H, WANG R, WANG L, et al. The Progress of detoxification methods of aflatoxin in grains[J]. Grain Processing, 2015, 40(6): 42-46.
- [31] LI J, HUANG J, JIN Y, et al. Mechanism and kinetics of degrading aflatoxin B₁ by salt tolerant *Candida versatilis* CGMCC 3790[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 359(10): 382-387.
- [32] 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, 29(24): 57-59.
- GUAN S, HU X X, MA Q G, et al. Aflatoxin detoxification by traditional methods and biological technology [J]. Feed Industry, 2008, 29(24): 57-59.
- [33] SHU X, WANG Y, ZHOU Q, et al. Biological degradation of aflatoxin B₁ by cell-free extracts of *Bacillus velezensis* DY3108 with broad pH stability and excellent thermostability [J]. Toxins, 2018, 10(8): 330.
- [34] WATANAKIJ N, VISESSANGUAN W, PETCHKONGKAEW A. Aflatoxin B₁-degrading activity from *Bacillus subtilis* BCC 42005 isolated from fermented cereal products [J]. Food Additives & Contaminants, 2020, 12(8): 1-11.
- [35] 张美美, 蒋梦宇, 孙悠然, 等. 不同氨化处理黄曲霉毒素 B₁ 脱毒效果及其对奶牛瘤胃体外发酵的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(1): 130-139.
- ZHANG M M, JIANG M Y, SUN Y R, et al. Effects of different ammonia treatments on aflatoxin B₁ detoxification and rumen fermentation in dairy cows [J]. China Animal Husbandry and Veterinary, 2019, 46(1): 130-139.
- [36] 李彦伸, 卢国柱, 曲劲尧, 等. 霉菌毒素检测与脱毒技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3919-3929.
- LI Y S, LU G Z, QU J Y, et al. Research progress of mycotoxin detection and detoxification techniques [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(12): 3919-3929.
- [37] ALBERTS J F, GELDERBLOM W, BOTHA A, et al. Degradation of aflatoxin B₁ by fungal laccase enzymes [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 135(1): 47-52.

- [38] SÁEZ-JIMÉNEZ V, SANDRA A, VICTOR G, et al. Improving the oxidative stability of a high redox potential fungal peroxidase by rational design[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0124750.
- [39] MLGPA B, MPMA C, LRCA B. Presence of *aiiA* homologue genes encoding for N-Acyl homoserine lactone-degrading enzyme in aflatoxin B₁ decontaminating *Bacillus* strains with potential use as feed additives[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2019, 124: 316-323.
- [40] KUMAR V, BAHUGUNA A, RAMALINGAM S, et al. Recent technological advances in mechanism, toxicity, and food perspectives of enzyme-mediated aflatoxin degradation[J]. *Food Science and Nutrition*, 2021, 62(20): 5 395-5 412.
- [41] GUAN Z B, QUAN L, WANG H R, et al. Bacterial laccases: Promising biological green tools for industrial applications [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2018, 75(19): 3 569-3 592.
- [42] WANG X, BAI Y, HUANG H, et al. Degradation of aflatoxin B₁ and zearalenone by bacterial and fungal laccases in presence of structurally defined chemicals and complex natural mediators[J]. *Toxins*, 2019, 11(10): 609.
- [43] 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 Microbiology Letters*, 2011, 314(2): 164-169.
- [44] LOI M, RENAUD J B, ROSINI E, et al. Enzymatic transformation of aflatoxin B₁ by Rh_DypB peroxidase and characterization of the reaction products[J]. *Chemosphere*, 2020, 250(7): 126296.
- [45] ZHAO L H, GUAN S, GAO X, et al. Preparation, purification and characteristics of an aflatoxin degradation enzyme from *Myxococcus fulvus* ANSM068 [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 110(1): 147-155.
- [46] LIANG X, MOHAMED E A, LANCINE S, et al. Novel aflatoxin-degrading enzyme from *Bacillus shackletonii* L7[J]. *Toxins*, 2017, 9(1): 36.
- [47] LIU D L, YAO D S, LIANG R, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ by enzymes isolated from *armillariella tabescens* [J]. *Food & Chemical Toxicology an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 1998, 36(7): 563-574.
- [48] TRIPATHI S, MISHRA H N. Modeling and optimization of enzymatic degradation of aflatoxin B₁ (AFB₁) in red chili powder using response surface methodology [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2011, 4(5): 770-780.
- [49] SAMUEL M S, SIVARAMAKRISHNA A, MEHTA A. Degradation and detoxification of aflatoxin B₁ by *pseudomonas putida*[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 86: 202-209.
- [50] CUI R Y, ZHENG J, WU C D, et al. Effect of different halophilic microbial fermentation patterns on the volatile compound profiles and sensory properties of soy sauce moromi [J]. *European Food Research & Technology*, 2015, 240(2): 669-670.

(上接第 60 页)

- [14] 刘霄希. 基于柔性材料和 SERS 技术的番茄表面农药残留快速检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 50-51.
LIU X X. Rapid detection of pesticide residues on tomato surface based on flexible materials and SERS technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 50-51.
- [15] 占绣萍, 刘彬, 黄兰淇, 等. 应用胶体金法检测叶类蔬菜中吡虫啉、多菌灵、啶虫脒、噻虫嗪的残留量分析[J]. *农药科学与管理*, 2021, 42(10): 24-31.
ZHAN X P, LIU B, HUANG L Q, et al. Determination of imidacloprid, carbendazim, acetamiprid and thiamethoxam residues in leafy vegetables by colloidal gold immunochromatography[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2021, 42(10): 24-31.
- [16] WANG M S, ZHU W B, ZHAO L Y, et al. Simultaneous detection of thiabendazole and carbendazim in foods based on two-color up conversion and magnetic separation nanoparticles fluorescence immunoassay[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 248(1): 85-94.
- [17] LI J, MA X G, ZHANG M Y, et al. Preparation of molecularly imprinted polymer sensor on electrochemically reduced graphene oxide modified electrode for selective probing of thiabendazole[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2019, 166(2): 84-91.
- [18] 唐录华, 秦思楠, 高林, 等. 基于对巯基苯胺膜的高灵敏己烯雌酚印迹传感器的制备及应用[J]. *化工进展*, 2019, 38(11): 5 074-5 083.
TANG L H, QIN S N, GAO L, et al. Preparation and application of sensitive diethylstilbestrol imprinting sensor based on p-aminothiophenol film [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(11): 5 074-5 083.

(上接第 187 页)

- [18] 徐勇, 孙培龙, 张安强. 姬松茸多糖提取、生物活性及产品开发生研究进展[J]. *食药菌*, 2017, 25(5): 308-312.
XU Y, SUN P L, ZHANG A Q. Research progress on preparation analysis, biological activities and product development of polysaccharides from *Agaricus Blazei* Murill [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2017, 25(5): 308-312.
- [19] 艾有伟, 刘超群, 陈艳丽. 香菇、平菇酶解液成分及其免疫功能研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(19): 258-261.
AI Y W, LIU C Q, CHEN Y L. Composition analysis and immunological functions of enzymatic hydrolysates of *lentinus edodes* and oyster mushroom prepared with papain [J]. *Food Science*, 2011, 32(19): 258-261.