

# 二乙烯三胺脱除花生粕中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的工艺优化及机制研究

王梦璐, 贺军波, 张海龙, 齐玉堂, 张维农

(武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023)

**摘要:**旨在为霉变花生粕中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>) 的脱除提供技术支持, 以自然霉变花生粕为实验材料, 用二乙烯三胺脱除花生粕中的 AFB<sub>1</sub>。采用单因素实验优化脱毒条件, 并对二乙烯三胺脱除 AFB<sub>1</sub> 的机制进行研究。结果表明: 二乙烯三胺脱除花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的最佳工艺条件为液料比 5:1、处理温度 50 °C、处理时间 45 min、二乙烯三胺溶液质量浓度 10 mg/mL, 在此条件下 AFB<sub>1</sub> 脱除率为 95.5%; 高效液相色谱和高分辨质谱分析表明, AFB<sub>1</sub> 可能的降解机制是其酮羰基与二乙烯三胺发生脱水反应, 并且反应产物通过离心随着上清液被脱除。二乙烯三胺具有应用于花生粕中 AFB<sub>1</sub> 脱除的潜力。

**关键词:**花生粕; 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>; 二乙烯三胺; 脱毒机制

**中图分类号:** TS201.6; TS221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2023)08-0110-05

## Process optimization and mechanism research for removal of aflatoxin B<sub>1</sub> from peanut meal using diethylenetriamine

WANG Menglu, HE Junbo, ZHANG Hailong, QI Yutang, ZHANG Weinong

(College of Food Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** To provide a technical support for the removal of aflatoxin B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>) from moldy peanut meal, with naturally moldy peanut meal as the experimental material, and diethylenetriamine was used to the removal of AFB<sub>1</sub>. Single factor experiment was used to optimize the detoxification conditions, and the mechanism of removing AFB<sub>1</sub> by diethylenetriamine was studied. The results showed that the optimal conditions for the removal of AFB<sub>1</sub> from peanut meal were obtained as follows: liquid - solid ratio 5:1, reaction temperature 50 °C, reaction time 45 min, mass concentration of diethylenetriamine 10 mg/mL. Under these conditions, the detoxification rate was 95.5%. The high performance liquid chromatography and high - resolution mass spectrometry analysis showed that the possible degradation way of AFB<sub>1</sub> was the dehydration reaction between the ketone carbonyl group in AFB<sub>1</sub> and diethylenetriamine. In addition, in the process of detoxification, reaction products were removed by centrifugation with supernatant. In conclusion, diethylenetriamine has the potential to be used for the removal of AFB<sub>1</sub> from peanut meal.

**Key words:** peanut meal; aflatoxin B<sub>1</sub>; diethylenetriamine; detoxification mechanism

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2023-04-28

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题“油料及其制品加工链条安全控制技术集成与示范”(2020YFC1606805)

作者简介: 王梦璐(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂加工与安全 (E-mail) 739440257@qq.com。

通信作者: 贺军波, 副教授, 博士 (E-mail) junb112he@whpu.edu.cn; 张维农, 教授, 博士 (E-mail) zhangweinong@163.com。

黄曲霉毒素是黄曲霉和寄生曲霉等真菌产生的双呋喃环类毒素<sup>[1]</sup>, 其衍生物有 20 多种, 最主要的是黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>)<sup>[2]</sup>。AFB<sub>1</sub> 具有很强的毒性, 可导致动植物细胞染色体变异, 已被国际癌症研究机构列为 1 类致癌物<sup>[3]</sup>。黄曲霉易感染的油料作物主要有花生、玉米等<sup>[4-6]</sup>, 受污染花生经压榨等方式制油后的花生饼粕含有黄曲霉毒素, 作为饲料使用时少量的黄曲霉毒素就会对动物的生长产生显著

的影响,因此花生饼粕中黄曲霉毒素的脱除对饲料安全至关重要<sup>[7]</sup>。

目前,花生饼粕中黄曲霉毒素脱除的方法有物理法、化学法和生物法<sup>[8-12]</sup>。物理法是指采用高温、高压、辐照等方式脱毒,但同时也会破坏原料中其他成分。生物法中优良菌种的寻找、纯化、培养等难度均较大。化学法对黄曲霉毒素的脱除能力强,但存在反应效率低和试剂残留等问题,因而需要寻找更高效的脱毒剂。赵国斌<sup>[13]</sup>采用氨气熏蒸法处理受污染花生,在 40℃ 下用体积分数为 10% 的氨气熏蒸 96 h,可以降解消除 95% 的 AFB<sub>1</sub>。林叶等<sup>[14]</sup>用 100 mg/L 的臭氧处理花生粕 10 min,可以将 AFB<sub>1</sub> 含量从 138 μg/kg 降至 30 μg/kg。金华丽等<sup>[15]</sup>优化了柠檬酸处理脱除花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的工艺,在最佳工艺条件下,AFB<sub>1</sub> 含量由 25.75 μg/kg 降至 5.0 μg/kg。已有报道均是通过改变 AFB<sub>1</sub> 结构达到脱毒目的,但是这些脱毒产物均仍残留于花生粕中,可能有一定的安全问题。因此,寻找合适的脱毒剂实现脱毒产物从饼粕中分离具有更好的应用价值。

二乙烯三胺是工业中广泛应用的环氧树脂固化剂、乳化剂和溶剂,具有强碱性和良好水溶性<sup>[16]</sup>。基于 AFB<sub>1</sub> 的结构特点,假设二乙烯三胺与 AFB<sub>1</sub> 反应形成脱毒产物,二乙烯三胺的引入可提高脱毒产物的水溶性,在降低花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量的同时可将脱毒产物经离心脱除。因此,本文采用二乙烯三胺脱除花生饼粕中的 AFB<sub>1</sub>,通过单因素实验优化了工艺条件,并利用高效液相色谱法和质谱法对脱毒机制进行了分析,以期为霉变花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的脱除提供技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

花生粕,市售;AFB<sub>1</sub> 标准品(纯度 98%),Sigma - Aldrich 公司;二乙烯三胺(纯度 98%),阿拉丁公司;免疫亲和柱,北京中科汇仁科技有限公司;甲醇、乙腈,色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;实验用水均为超纯水。

#### 1.1.2 仪器与设备

TG-16 离心机,湖南凯达科学仪器有限公司;THZ-82 水浴恒温振荡器,江苏金坛亿通电子有限公司;GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司;Agilent 1260 型高效液相色谱仪(配置紫外和荧光检测器),安捷伦科技有限公司;PHRED-HR 光化学衍生器,北京中科汇仁科技有限公司;JMS-

T100LP Accu TOF 质谱仪,日本 JEOL 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的脱除

花生粕自然霉变(室温、水分活度约 0.9)14 d,晾干,研磨成粉状并过 0.15 mm(100 目)筛。称取 5 g 花生粕粉,按一定液料比加入一定质量浓度的二乙烯三胺溶液,在一定温度下水浴振荡处理一定时间,5 000 r/min 离心 10 min 后除去上清液,沉淀物在恒温干燥箱中 50℃ 烘 48 h,研磨后过 0.15 mm 筛<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.2 二乙烯三胺脱除 AFB<sub>1</sub> 机制研究

配制 100 μg/mL AFB<sub>1</sub> 标准溶液(以甲醇为溶剂),按照脱毒实验优化的条件(处理温度和处理时间)与二乙烯三胺溶液(1 mg/mL 和 2 mg/mL)以体积比 1:1 进行反应。用荧光-高效液相色谱检测反应产物中的 AFB<sub>1</sub> 含量及产物峰,并用电喷雾质谱全扫描及串联质谱技术测定产物相对分子质量,分析产物可能的结构。

#### 1.2.3 AFB<sub>1</sub> 含量的测定

采用 GB 5009.22-2016《食品安全国家标准食品中黄曲霉毒素 B 族和 G 族的测定》中的高效液相色谱-柱后光化学衍生法测定 AFB<sub>1</sub> 的含量。

#### 1.2.4 脱毒产物的电喷雾质谱全扫描及串联质谱分析条件

电喷雾离子源;扫描方式为正、负离子扫描;检测方式为多反应监测 MRM;毛细管电压正模式 4.0 kV,负模式 3.5 kV;干燥气温度 300℃;干燥气流速 9 L/min;雾化压力 310 kPa。

## 2 结果与分析

### 2.1 二乙烯三胺脱除 AFB<sub>1</sub> 工艺优化

#### 2.1.1 液料比对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响

固定处理温度 40℃、二乙烯三胺溶液质量浓度 10 mg/mL、处理时间 30 min,探究液料比对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响,结果如图 1 所示。

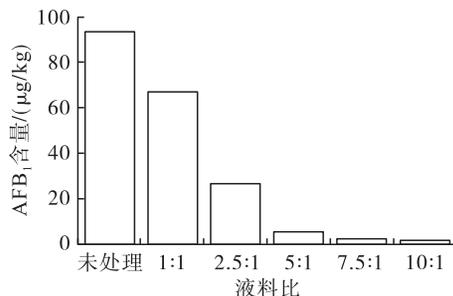


图 1 液料比对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量的影响

由图 1 可知,未处理花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量为 93.47 μg/kg,经二乙烯三胺处理后 AFB<sub>1</sub> 含量随着液料比增加而明显降低。当液料比由 1:1 增到 2.5:1

时, AFB<sub>1</sub> 含量由 67.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$  迅速降至 26.73  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 当液料比达到 5:1 时, AFB<sub>1</sub> 含量降至 5.73  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 远低于 GB 2761—2017 规定的花生及其制品中 AFB<sub>1</sub> 的限量(20  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ); 继续增大液料比至 7.5:1 和 10:1 时, AFB<sub>1</sub> 脱除效果变化较小。因此, 选择最佳液料比为 5:1。金华丽等<sup>[15]</sup> 研究柠檬酸对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 脱除效果时优化得到的液料比也为 5:1。

### 2.1.2 处理温度对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响

固定液料比 5:1、二乙烯三胺溶液质量浓度 10  $\text{mg}/\text{mL}$ 、处理时间 30 min, 探究处理温度对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响, 结果如图 2 所示。

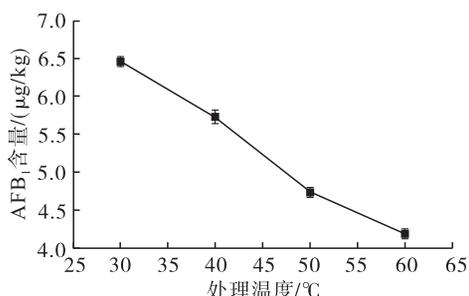


图2 处理温度对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量的影响

由图 2 可知, 经二乙烯三胺处理后花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量均低于 20  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 当处理温度从 30  $^{\circ}\text{C}$  升高至 40、50、60  $^{\circ}\text{C}$  时, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量分别降至 5.73、4.74、4.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。结合成本考虑, 选择最佳处理温度为 50  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.1.3 二乙烯三胺溶液质量浓度对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响

固定液料比 5:1、处理温度 50  $^{\circ}\text{C}$ 、处理时间 30 min, 探究二乙烯三胺溶液质量浓度对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响, 结果如图 3 所示。

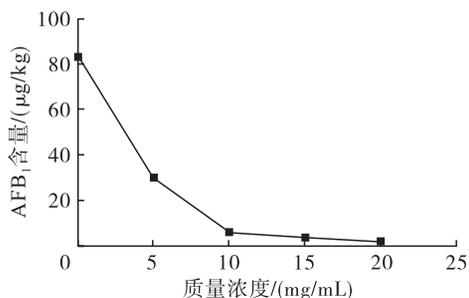


图3 二乙烯三胺溶液质量浓度对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量的影响

由图 3 可知, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量随着二乙烯三胺溶液质量浓度的增加而明显降低。二乙烯三胺溶液质量浓度由 0 增加到 10  $\text{mg}/\text{mL}$  时, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量由 83.15  $\mu\text{g}/\text{kg}$  迅速降低至 6.04  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 已远低于 20  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。继续增大二乙烯三胺溶液质量浓度至 15  $\text{mg}/\text{mL}$  及 20  $\text{mg}/\text{mL}$  时, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量分别降至 3.71  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 2.11  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,

AFB<sub>1</sub> 脱除效果变化较小。因此, 选择最佳二乙烯三胺溶液质量浓度为 10  $\text{mg}/\text{mL}$ 。

### 2.1.4 处理时间对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响

固定液料比 5:1、处理温度 50  $^{\circ}\text{C}$ 、二乙烯三胺溶液质量浓度 10  $\text{mg}/\text{mL}$ , 探究处理时间对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响, 结果如图 4 所示。

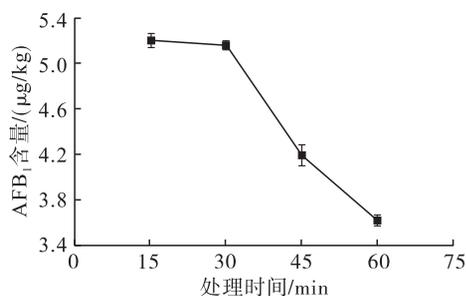


图4 处理时间对花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量的影响

由图 4 可知, 处理时间为 15、30、45 min 和 60 min 时, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的含量均远低于 20  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。当处理时间由 15 min 延长到 30 min 时, AFB<sub>1</sub> 含量无明显变化, 约为 5.19  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。处理时间由 30 min 延长到 45 min 时, AFB<sub>1</sub> 含量下降了 0.95  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。而当处理时间由 45 min 延长到 60 min 时, AFB<sub>1</sub> 含量仅下降 0.59  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。结合实际成本等因素, 确定最佳处理时间为 45 min。

综上, 二乙烯三胺脱除花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的最佳条件为液料比 5:1、处理温度 50  $^{\circ}\text{C}$ 、二乙烯三胺溶液质量浓度 10  $\text{mg}/\text{mL}$ 、处理时间 45 min。在最佳条件下, 花生粕中 AFB<sub>1</sub> 脱除率达 95.5%。

## 2.2 二乙烯三胺脱除 AFB<sub>1</sub> 的机制

为了更直接了解二乙烯三胺脱除 AFB<sub>1</sub> 的机制, 进行了模拟体系研究, 即将 AFB<sub>1</sub> 标准品与二乙烯三胺反应。在最佳实验条件下(50  $^{\circ}\text{C}$ 、45 min), AFB<sub>1</sub> 标准品溶液(100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )与二乙烯三胺溶液(1  $\text{mg}/\text{mL}$  和 2  $\text{mg}/\text{mL}$ )混合反应后, AFB<sub>1</sub> 标准品质量浓度从 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  分别降至 1.24  $\mu\text{g}/\text{mL}$  和 0.35  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。二乙烯三胺的加入导致体系呈碱性, 所以高效液相色谱谱图中 AFB<sub>1</sub> 的保留时间从 18.492 min 分别降至 18.186 min 和 18.173 min, 信号强度降低非常显著, 说明 AFB<sub>1</sub> 与二乙烯三胺发生了反应。此外, 二乙烯三胺质量浓度为 2  $\text{mg}/\text{mL}$  时, 在 12.747 min 出现新的信号峰, 可能是二乙烯三胺与 AFB<sub>1</sub> 反应的产物峰。

为了进一步推导产物结构, 对模拟体系进行了高分辨质谱表征, 结果见图 5。质荷比为 313.070 0 处峰为 AFB<sub>1</sub> 的分子离子峰(见图 5a), AFB<sub>1</sub> 与 2  $\text{mg}/\text{mL}$  二乙烯三胺溶液反应后, 在质荷比为 398.171 1 处有一离子峰(见图 5b), 可能为 AFB<sub>1</sub> 与

二乙烯三胺反应后的产物峰。

根据 AFB<sub>1</sub> 的分子结构分析,其存在 3 个毒性位点<sup>[18]</sup>。毒性位点 1 为呋喃环双键,是毒素与蛋白质和核酸形成复合物的作用位点<sup>[19]</sup>;毒性位点 2 为内酯环部分,易受到水解作用,也是较活跃的毒性降解位点;毒性位点 3 为环戊烯酮上羰基,易发生化学反应<sup>[20]</sup>。

根据 AFB<sub>1</sub> 的结构特点,其与二乙烯三胺反应可能位点有 2 个,可能的降解产物有 3 种: AFB<sub>1</sub> 毒性

位点 3 与二乙烯三胺脱水反应生成产物 1; AFB<sub>1</sub> 毒性位点 2 与二乙烯三胺发生氨解反应生成产物 2; AFB<sub>1</sub> 毒性位点 2 和 3 均与二乙烯三胺反应生成产物 3(见图 6)。根据图 5b 推测,二乙烯三胺可能与 AFB<sub>1</sub> 生成产物 1,因为根据毒性位点 2 和 3 的反应活性, AFB<sub>1</sub> 降解位点更易在酮羰基上发生,反应式为  $C_{17}H_{12}O_6 + C_4H_{13}N_3 = C_{21}H_{23}N_3O_5 + H_2O$ 。

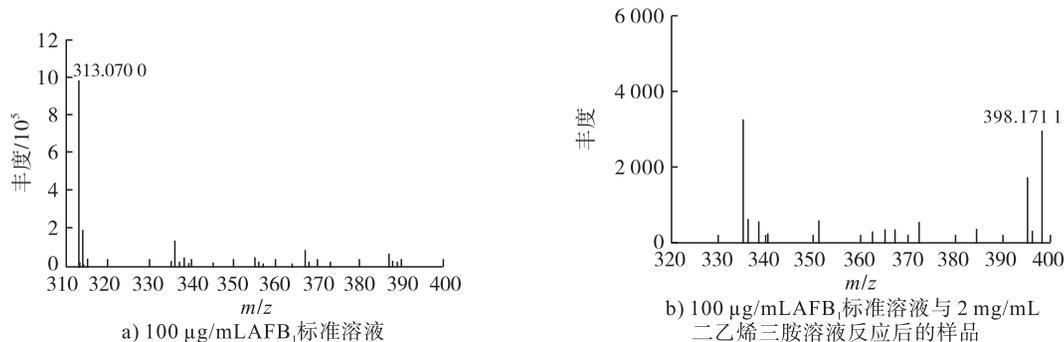
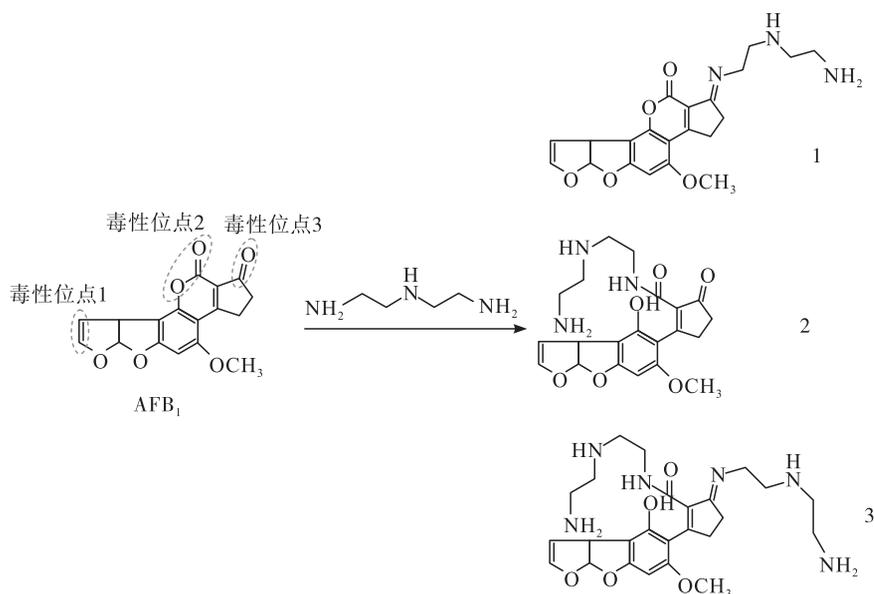


图 5 AFB<sub>1</sub> 标准溶液与脱毒产物的高分辨质谱图



注:1. AFB<sub>1</sub> 毒性位点 3 与二乙烯三胺脱水反应产物;2. AFB<sub>1</sub> 毒性位点 2 与二乙烯三胺氨解反应产物;3. AFB<sub>1</sub> 毒性位点 2 和 3 均与二乙烯三胺反应产物

图 6 AFB<sub>1</sub> 与二乙烯三胺可能的反应产物

### 3 结论

本文以自然霉变的花生粕为研究对象,选择二乙烯三胺溶液进行花生粕中 AFB<sub>1</sub> 的脱毒研究。结果表明,最佳脱毒条件为液料比 5:1、处理温度 50℃、处理时间 45 min、二乙烯三胺溶液质量浓度 10 mg/mL,在此条件下 AFB<sub>1</sub> 脱除率达 95.5%,脱毒花生粕中 AFB<sub>1</sub> 含量远低于国标限量的 20 µg/mL。AFB<sub>1</sub> 的可能降解机制是其毒性位点 3 与二乙烯三胺脱水反应生成产物 1。然而,二乙烯三胺具有一定的毒性,虽然脱毒产物能经水洗而脱除,但处理后

的花生粕能否作为动物饲料使用,还需进一步开展毒理性实验,以确保其饲用安全性。本研究为高效脱除花生粕中 AFB<sub>1</sub> 提供一种有效解决方案。

### 参考文献:

- [1] FEIBEIMAN T P, COTTY P J, DOSTER M A, et al. A morphologically distinct strain of *Aspergillus nomius* [J]. *Mycologia*, 1998, 90(4): 618–623.
- [2] FAN S, ZHANG F, LIU S, et al. Removal of aflatoxin B<sub>1</sub> in edible plant oils by oscillating treatment with alkaline electrolysed water[J]. *Food Chem*, 2013, 141(3): 3118–3123.
- [3] IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to

- humans; some naturally occurring substances. food items and constituents [ M ]. Lyon, France: World Health Organization, 1993.
- [4] SCHWARTZBORD J R, BROWN D L. Aflatoxin contamination in Haitian peanut products and maize and the safety of oil processed from contaminated peanuts [ J ]. Food Control, 2015, 56: 114 – 118.
- [5] BATAL A, DALE N, CAFÉ M. Nutrient composition of peanut meal [ J ]. J Appl Poul Res, 2005, 14(2): 254 – 257.
- [6] ZHAO X, CHEN J, DU F. Potential use of peanut by – products in food processing: a review [ J ]. J Food Sci Technol, 2012, 49(5): 521 – 529.
- [7] RODRÍGUEZ A, RODRÍGUEZ M, MARTÍN A, et al. Evaluation of hazard of aflatoxin B<sub>1</sub>, ochratoxin A and patulin production in dry – cured ham and early detection of producing moulds by qPCR [ J ]. Food Control, 2012, 27(1): 118 – 126.
- [8] 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/OL ]. Toxins, 2016, 8(11): 332 [ 2022 – 05 – 10 ]. <https://doi.org/10.3390/toxins8110332>.
- [9] STEFANO V D, PITONZO R, BARTOLOTTA A. et al. Effects of  $\gamma$  – irradiation on the  $\alpha$  – tocopherol and fatty acids content of raw unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*) [ J ]. LWT – Food Sci Technol, 2014, 59(1): 572 – 576.
- [10] STEFANO V D, PITONZO R, CICERO N, et al. Mycotoxin contamination of animal feedingstuff: detoxification by gamma – irradiation and reduction of aflatoxins and ochratoxin A concentrations [ J ]. Food Addit Contam A, 2014, 31(12): 2034 – 2039.
- [11] VELAZHAHAN R, VIJAYANANDRAJ S, VIJAYA – SAMUNDEESWARI 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.
- [12] ORUÇ H H, SORUCU A, TÜRKMEN I I, et al. Determination of various mycotoxin concentrations in the feedstuffs and feed produced by a feed manufacturer in Turkey [ J ]. Kafkas Univ Vet Fak, 2012, 18(4): 633 – 638.
- [13] 赵国斌. 氨气熏蒸法降解花生中的黄曲霉素 B<sub>1</sub> [ J ]. 食品研究与开发, 2014, 35(3): 111 – 113.
- [14] 林叶, 李进伟, 蒋将, 等. 臭氧去除黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 工艺优化及其对花生粕营养品质的影响 [ J ]. 中国油脂, 2015, 40(11): 28 – 32.
- [15] 金华丽, 史秋映. 柠檬酸处理对花生粕中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 脱毒效果的研究 [ J ]. 河南工业大学学报 ( 自然科学版 ), 2013, 34(3): 39 – 42.
- [16] 陈璐. 工作场所空气中乙胺、异丙胺、正丁胺和二乙胺三胺的离子色谱法研究 [ D ]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2021.
- [17] 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.
- [18] 赵春霞, 王轶, 吕育财, 等. 黄曲霉毒素的生物降解研究进展 [ J ]. 湖北农业科学, 2016, 55(20): 5172 – 5176.
- [19] NICLÁS – VÁZQUEZ I, MÉNDEZ – AIBORES A, MORENO – MARTÍNEZ E, et al. Role of lactone ring in structural, electronic, and reactivity properties of aflatoxin B<sub>1</sub>: a theoretical study [ J ]. Arch Environ Con Tox, 2010, 59(3): 393 – 406.
- [20] 孙统政, 王娜, 田俊, 等. 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 检测与脱毒方法最新研究进展 [ J ]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 789 – 799.

(上接第 103 页)

- [15] 沈琪, 刘元法, 徐振波, 等. 非水相酶促酸解制备类可可脂的工艺研究 [ J ]. 中国油脂, 2011, 36(7): 41 – 45.
- [16] HUANG Z, GUO Z, XIE D, et al. *Rhizomucor miehei* lipase – catalysed synthesis of cocoa butter equivalent from palm mid – fraction and stearic acid: characteristics and feasibility as cocoa butter alternative [ J/OL ]. Food Chem, 2021, 343(5): 128407 [ 2023 – 04 – 24 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128407>.
- [17] SONPRASERT T, ORNLA – IED P, SONWAI S. Synthesis of confectionery fat from illipé butter stearin and palm mid – fraction blend via enzymatic interesterification [ J ]. Int J Food Sci Tech, 2022, 57(5): 3150 – 3161.
- [18] 金俊, MWINYI P W, 郑立友, 等. 5 种亟待开发的类可可脂木本油料脂肪 [ J ]. 中国油脂, 2017, 42(4): 1 – 7.
- [19] 黄楚楚, 熊辉煌, 龚斌, 等. 脂肪酶催化单油酸甘油酯制备功能性 1,3 – 甘油二酯 [ J ]. 食品科学, 2015, 36(22): 1 – 5.
- [20] 万建春, 李维瑶, 俞建国, 等. 酶法合成类可可脂研究进展 [ J ]. 粮食与油脂, 2011(11): 1 – 4.
- [21] 谭志强. 酶促酯交换法制备低热量乌柏类可可脂的研究 [ D ]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [22] 徐学兵, 胡晓中, 张根旺. 茶油酶促改性一步反应影响因素研究 [ J ]. 中国油脂, 1996, 21(1): 33 – 35.
- [23] 池永清, 徐学兵, 毕艳兰, 等. 制备类可可脂原料用油的研究进展 [ J ]. 中国油脂, 2017, 42(5): 48 – 53.
- [24] 安晓东. 酶的非离子表面活性剂修饰对酶促酯交换行为的影响 [ D ]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [25] 马芳, 宋海东, 魏安池, 等. Lipozyme TL IM 酶促酯交换棕榈油中间熔点物制备类可可脂的研究 [ J ]. 河南工业大学学报 ( 自然科学版 ), 2014, 35(3): 21 – 24, 36.