

黄曲霉毒素脱除技术研究进展

Progress on aflatoxin removing technique

曹 铭 樊明涛

CAO Ming FAN Ming-tao

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

(College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University,
Yangling, Shaanxi 712100, China)

摘要:黄曲霉毒素 B₁ 是毒性和致癌性最强的黄曲霉毒素,被国际肿瘤研究机构列为 I A 类致癌物质,近年来寻找一种高效、安全的脱除黄曲霉毒素的方法成为学者们的研究热点。文章对脱除黄曲霉毒素 B₁ 的物理、化学及生物脱除技术进行综述,包括:物理吸附法、挤压膨化法、辐射处理、微波降解、臭氧降解、氨气熏蒸、生物吸附和生物降解等,并展望黄曲霉毒素 B₁ 脱除技术的发展方向。

关键词:真菌毒素;黄曲霉;降解

Abstract: Aflatoxin B₁ is the best toxicity and carcinogenicity in the aflatoxin, and it is listed in I A level carcinogens by international tumor research institutes. Recently, it becomes the hot spot on how to get a method with high efficient, safe for aflatoxin removing. Meanwhile, summarizes the technologies for aflatoxin removing by physical, chemical and biological methods in this paper, including physical adsorption, extrusion, irradiation, microwave degradation, ozone degradation, ammonia fumigation, biological adsorption, bio-degradable etc.. Moreover, the development of aflatoxin B₁ removing is also prospected.

Keywords: mycotoxins; *Aspergillus flavus*; reduction

黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁) 是二氢呋喃氧杂萜邻酮的衍生物,主要由黄曲霉和寄生曲霉等真菌在代谢过程中产生,它是毒性和致癌性最强的黄曲霉毒素,被国际肿瘤研究机构(IACR)列为 I A 类致癌物质,其致癌性比二甲基亚硝胺强 75 倍。黄曲霉毒素还有致畸及致突变的作用,其毒性比氰化钾强 10 倍,比砒霜强 68 倍^[1,2]。目前,AFB₁ 污染遍布世界各地,在热带和亚热带地区尤为严重^[2],主要存在于稻谷、花生、玉米等作物及其制品中^[3]。中国 GB 2761—2011 标准规定:玉米、花生及其制品的 AFB₁ 限量为 20 μg/kg,稻谷、糙米、大米及植物油脂(花生油、玉米油除

外)为 10 μg/kg,其它食品为 5.0 μg/kg。AFB₁ 性质非常稳定,加热至 268~269 °C 时才开始分解^[4],所以普通的烹调处理不会对其产生影响。因此,研究 AFB₁ 的降解技术意义重大。文章对近年来国内外 AFB₁ 的物理、化学及生物脱除技术进行综述,旨为其后续研究提供参考。

1 物理脱除技术研究

1.1 物理吸附法

物理吸附法是利用多孔固体吸附剂,将固体和气体或液体组成的两相体系中吸附物富集于固体吸附剂表面。Lu Zeng 等^[5]对铝铁柱撑蒙脱石的制备工艺及其对 AFB₁ 的吸附能力进行了研究,结果表明,Al³⁺:Fe³⁺ 摩尔比为 8:1 的铝铁柱撑蒙脱石对黄曲霉毒素的吸附量最大,为 660 μg/g。该制品具有对受污染产品脱除 AFB₁ 的潜力。由于其作用力——范德华力(即分子间的引力)普遍存在于各种吸附剂与吸附物之间,因此无选择性吸附的特性。叶盛群等^[6]考察了活性白土、凹凸棒、沸石、活性炭和改性蒙脱石 5 种吸附脱色剂对菜籽油中 AFB₁ 含量及品质的影响,结果表明,在相同条件(AFB₁ 含量 170 μg/kg,吸附脱色剂添加量 3 g/100 g·油)下,改性蒙脱石对 AFB₁ 的脱毒率最高(89.02%),活性白土的最低(57.47%);当菜籽油中 AFB₁ 含量为 20~200 μg/kg 时,随着 AFB₁ 含量的增加,改性蒙脱石对 AFB₁ 的吸附量呈明显上升趋势,最大吸附量可达 140.76 μg/g;吸附率随着菜籽油中 AFB₁ 含量的增加先升高后降低,最大吸附率可达 92.62%,且菜籽油中 AFB₁ 含量在 110 μg/kg 以下时经改性蒙脱石吸附脱毒后其残留量可降至 10 μg/kg 以下。

由于物理吸附是分子间的吸力所引起的吸附,其结合力较弱、吸附热较小,吸附和解吸速度也都较快。被吸附物质也更容易解吸出来,而且吸附剂与被吸附物质的性质不发生

作者简介:曹铭(1988—),男,西北农林科技大学在读硕士研究生。

E-mail: caoming885@sina.cn

收稿日期:2014-11-26

变化,因此吸附剂可回收再利用。上述研究也证实,物理吸附法可有效降低食物中 AFB₁ 的含量,但该法选择性差、吸附容量小,而且由于其作用力较弱、解吸较快,因此吸附稳定性较差,要将其应用于食品工业还有待进一步研究。

1.2 挤压膨化法

挤压膨化是利用挤压机通过摩擦、剪切和加热产生高温、高压,使物料经受挤压、混炼、剪切、熔融、杀菌和熟化等一系列复杂的连续化处理。当物料从挤压机模孔挤出后,由于压力骤降至常压,所以水分急剧汽化而产生巨大的膨胀力,使物料瞬间膨化,形成多孔状的产品^[7,8]。该技术因具有生产效率高、成本低、能耗低、产品质量好等诸多优点,在食品工业得到了广泛应用。近年来研究证实,挤压膨化加工能有效降解物料中的 AFB₁。Castells 等^[9]的研究表明,在物料初始含水量为 24%或 27%,挤压温度为 170℃,挤压时间为 70 s 时,米粉中 AFB₁ 的去除率可达 95%左右。Firibu K Saalia 等^[10]的研究表明,挤压膨化处理可降低花生粕中的黄曲霉毒素含量,且不影响其营养成分,但同时也发现,该技术对自然污染花生粕中黄曲霉毒素的降解效果较人为污染的差。在 pH 值为 8,初始含水量为 20%,挤压头直径为 2.5 mm,挤压温度为 140℃时,人为污染花生粕中黄曲霉毒素的降解率为 91.31%(从初始浓度为 $(523.11 \pm 4.96) \mu\text{g/kg}$ 降至 $(45.16 \pm 0.66) \mu\text{g/kg}$);在 pH 值为 8,初始含水量为 35%,挤压头直径为 2.5 mm,挤压温度为 140℃时,自然污染花生粕中黄曲霉毒素的降解率为 59.08%(从初始浓度为 $(366.00 \pm 4.13) \mu\text{g/kg}$ 降至 $(157.45 \pm 1.09) \mu\text{g/kg}$)。上述研究表明,物料的种类对挤压膨化降解 AFB₁ 效果的影响不大,而物料的形态对其的影响较大。此外还有研究^[11]表明,向物料中添加赖氨酸和甲胺可以促进挤压降解黄曲霉毒素的效果。

尽管挤压膨化处理对物料中蛋白质的营养品质不产生影响^[10],但由于处理温度较高对物料中的热敏成分会有一些影响,而且经挤压处理后物料的形态及性质均会发生改变。所以,该技术的应用受到较大的局限。

1.3 辐射处理

辐照技术是一种非热力加工技术,利用电离辐射与物质的相互作用所产生的物理、化学和生物效应,对物质或食品进行加工处理,实现射线对食品分子的修饰以及降解食品中的有害物质的目的,是一种有效提高食品安全性和延长食品货架期的绿色食品加工方法^[12]。已有的研究^[13,14]表明,该技术可以通过以下两条途径来控制食品中 AFB₁ 的含量:① 杀灭产毒微生物;② 辐照可有效地破坏 AFB₁ 的化学结构,使其终端咪唑环双键发生加成反应,降低毒害。

王辰龙等^[15]以市售花生油为原料,选取酸值、过氧化值、碘值、维生素 E 和反式脂肪酸作为检测指标,研究不同辐照剂量下⁶⁰Co 辐照对花生油中 AFB₁ 降解率及对花生油品质的影响。结果表明:在食品辐照所限定的剂量内,⁶⁰Co 辐

照可以有效减少 AFB₁ 残留,且花生油的各项理化指标变化均未超出国家标准,其中 10 kGy 的辐照处理对初始 AFB₁ 含量为 2,4,6,8,10 mg/kg 的花生油的 AFB₁ 降解率分别为 100%,100%,98.3%,96.1%,95.2%。⁶⁰Co 辐照不仅对降解 AFB₁ 有效,而且对花生油品质 and 安全性无显著影响。朱佳廷等^[16]采用⁶⁰Co γ 射线辐照 AFB₁ 纯品水溶液和稻米,研究了辐照对水溶液中及稻米中 AFB₁ 的降解效果。结果显示,水溶液中 AFB₁ 的降解率随着辐照剂量的增加而增加,在 4 kGy 的辐照剂量下,降解率达到 95%;当剂量增加到 6 kGy 时,降解率基本维持在 95%左右,此后降解率的增长随着辐照剂量的增加而趋于缓慢;稻米中 AFB₁ 的降解率亦随着辐照剂量的增加而增加,在 4 kGy 的辐照剂量下,降解率达到 42%;在 6 kGy 时,降解率可达到 84%;当辐照剂量增至 10 kGy 时,降解率达到 98%,此后降解率的增加随着辐照剂量的增加也趋于缓慢。 γ 射线辐照对 AFB₁ 具有良好的降解效果。Ghanem 等^[17]考察了 γ 射线对食品和饲料作物中 AFB₁ 的灭活效果。结果表明,各样品的 AFB₁ 降解率与 γ 射线照射剂量呈正相关关系,与样品中的油脂含量呈负相关关系。辐照剂量为 10 kGy 时,对大麦、麸皮、玉米中 AFB₁ 的降解率分别为 89.86%,86.00%,84.23%。

上述研究表明,辐照处理对食物中 AFB₁ 的去除效果显著,而且采用辐照技术去除食物中的 AFB₁ 具有如下优势^[18,19]:① 几乎不产生热效应,可最大限度地保持食物中的热敏成分;② 快速、均匀且穿透力强,可对不同形状及已包装的食物进行处理;③ 没有非食物成分的残留;④ 操作简便,能耗低且易于规模化生产。

1.4 微波降解

微波降解是利用微波能量使目标成分分子高速旋转,产生强烈的刺激作用并削弱其某些化学键直至断裂,从而达到降解目标物的目的^[20]。有研究^[21]表明,存在于物料中的水分可以打开 AFB₁ 的内酯环,形成末端羧酸,在高温作用下会发生脱羧反应,从而降低其毒性。因此,微波处理过程中的热效应也可能会使物料的 AFB₁ 毒性降低。

Farag 等^[22,23]考察了微波处理对玉米中黄曲霉毒素降解效果的影响。结果表明,随微波功率的增加及微波处理时间的延长,花生中黄曲霉毒素的降解效果越好;花生在微波功率为 1.6 kW 和 3.2 kW 的条件下分别处理 16 min 和 5 min,其黄曲霉毒素的降解率均可达 95%以上。王周利等^[21]考察了微波辐照功率、微波辐照时间以及 AFB₁ 初始含量对其降解效率的影响,并与传统加热法进行比较,结果显示:微波辐照主要利用非热效应对 AFB₁ 进行降解,当功率为 250 W、时间为 30 min 时,AFB₁ 降解率大于 90%。而且王勇等^[24]研究发现,微波辅助碱法降解 AFB₁ 不仅能确保米蛋白产品安全无毒,还可提高米蛋白的溶解性、起泡性和持油性。

上述研究表明,微波处理对食物中 AFB₁ 的去除效果显

著,对物营养品质影响较小,且不会产生二次污染。但微波处理时其穿透、吸收、反射会相互影响,同时会使物料不均匀受热^[25],而且难以实现规模化生产。

1.5 其它方法

高压脉冲放电产生的等离子体能利用高能电子轰击、光化学氧化、液电空化效应等综合效应,使有机污染物降解^[26]。张岩等^[27]对等离子体降解 AFB₁ 的工艺条件进行优化。结果表明:等离子体降解黄曲霉毒素 B₁ 的最佳工艺为作用功率 200 W、作用时间 80 s、极距 3 cm,降解率可达 51.67%。该法虽具有简单快速、无化学污染、低能耗、易实现与现有的农产品生产线耦合链接等优点,尚需进一步深入研究其降解产物的安全性。还有研究^[28]发现,紫外辐照处理可以降低 AFB₁ 的毒性。但也有研究^[29]认为,紫外处理对 AFB₁ 含量无影响。

2 化学脱除技术研究

化学法主要是利用化学试剂使抑制物料中黄曲霉的生长,从而降低毒素的合成,或使其中的黄曲霉毒素氧化、分解。在中性、酸性溶液中 AFB₁ 很稳定,当体系 pH 为 1~3 时 AFB₁ 稍有分解;当体系 pH 为 9~10 时 AFB₁ 能迅速分解;5%的次氯酸钠溶液可使其完全分解^[4]。山长城^[30]研究发现,在强氧化剂的作用下,亚硫酸根等基团会结合至黄曲霉毒素的二氢呋喃的 15 和 16 位置上,使其失去毒性;在碱性条件下,黄曲霉毒素的内酯环会发生断裂,形成香豆素钠盐或铵盐,使其毒性消失。

2.1 臭氧降解

臭氧是一种氧化性比氯还要高的强氧化剂,在水中有极强的氧化分解能力,可选择性地与化合物中杂原子发生反应,使化合物最终产生小分子物质^[31,32]。研究^[33]表明,臭氧处理可破坏 AFB₁ 终端呋喃环的双键,从而明显降低产物的毒性。

Zorlügenç B 等^[34]研究了臭氧和臭氧水对无花果中 AFB₁ 降解效果的影响。结果表明,采用 13.8 mg/L 的臭氧处理无花果 30, 60, 180 min, 其 AFB₁ 降解率分别为 48.77%, 72.39%, 95.21%;采用 (1.71±0.17) mg/L 的臭氧水处理无花果 30, 60, 180 min, 其 AFB₁ 降解率分别为 0.76%, 83.25%, 88.62%。Inan 等^[35]考察了不同浓度(16, 33, 66 mg/L)和不同时间(7.5, 15.0, 30.0, 60.0 min)的臭氧熏蒸处理对红辣椒 AFB₁ 降解效果和色泽的影响。结果表明,在环境温度为 25℃,相对湿度为 60%的条件下,初始 AFB₁ 含量为 32 μg/kg 的红辣椒经 66 mg/L 臭氧处理 60 min, 其 AFB₁ 含量可降至 2 μg/kg。且该处理条件对样品的色泽无显著性影响。Luo Xiao-hu 等^[36]对臭氧熏蒸处理降解玉米中 AFB₁ 的效果及安全性进行了研究。结果表明,玉米含水量为 13.47%时臭氧熏蒸降解 AFB₁ 的效果优于含水量为 20.37%时的;在玉米含水量为 13.47%,臭氧浓度为

90 mg/L 条件下,分别处理 20 min 和 40 min,可使玉米(初始 AFB₁ 含量为 83 μg/kg)中的 AFB₁ 含量降至 18.12 μg/kg 和 9.9 μg/kg;体外肝细胞凋亡试验表明,空白对照与经臭氧处理组的 HepG2 细胞的存活率差异不显著。说明臭氧熏蒸处理可以快速、有效降解 AFB₁,并且降解产物安全无毒。

臭氧制备简单,使用方便,且没有任何毒副残留,适用于降解大规模的含 AFB₁ 的食物。但臭氧为强氧化剂,会破坏食物中维生素和蛋白质等营养成分^[37]。

2.2 氨气熏蒸

氨气熏蒸法是利用氨气与物料中游离水结合形成氢氧化氨和黄曲霉毒素发生脱羟基反应,破坏黄曲霉毒素特有的内酯环,从而使其降解^[38]。

赵国斌^[38]采用氨气熏蒸法对污染黄曲霉毒素 AFB₁ 的花生进行处理,重点考察了氨气浓度、氨熏温度、花生含水量和熏蒸时间等对 AFB₁ 降解率的影响。结果表明,氨气熏蒸法最佳条件为:氨气浓度 10%,熏蒸温度 40℃,花生含水量 30%,氨熏时间 96 h,最高降解率为 95.06%,降解效果显著。陈志娟等^[39]对氨气熏蒸降解玉米中 AFB₁ 的条件进行了优化,重点探讨了氨熏温度、氨气浓度、氨熏时间及玉米含水量对 AFB₁ 降解率的影响。结果表明,氨气熏蒸降解玉米中 AFB₁ 的最优工艺组合为:氨熏温度 37℃,玉米含水量 20%,氨气体积分数 7.05%,氨熏时间 96 h。该条件下玉米中 AFB₁ 降解率为 92%。梁俊平^[40]对氨气熏蒸法降解花生及花生粕中黄曲霉毒素的工艺进行了研究。结果表明,对于花生氨气熏蒸降解 AFB₁ 的最佳工艺条件为:氨气浓度 7%、熏蒸温度 40℃、时间 48 h、含水量 25%,该条件下 AFB₁ 降解效果为 83.5%;对于花生粕氨气熏蒸降解 AFB₁ 的最佳工艺条件为:氨气浓度 10%、氨熏温度 31℃、时间 102 h、含水量 24%,经该条件处理后的花生粕中 AFB₁ 未被检出,可认为降解率达 100%。

氨气熏蒸法易于操作、氨气来源广泛、成本低廉、降解率高,且研究^[41]已证实其生成物无毒,但由于在实际生产中氨熏周期较长,使其在生产实践中的应用受到一定的限制。

2.3 其它方法

另有研究发现,采用石灰水、聚乙烯吡咯烷酮、二氧化氯、次氯酸钠、亚硫酸钠、肉桂油和丁香酚等化学物质对 AFB₁ 均有一定的脱除效果^[42,43];某些植物的提取物也能降解 AFB₁,其主要活性成分为生物碱^[44]。

3 生物脱除技术研究进展

生物降解技术是利用微生物及其产生的酶对物料中的 AFB₁ 进行吸附或降解。该法处理条件温和,对物料原有品质的影响较少,而且还可能增强物料的营养价值^[45]。

3.1 生物吸附

一些微生物可以通过疏水相互作用以非共价方式结合 AFB₁,从而吸附并去除物料中的 AFB₁,减少其危害。So-

maieh等^[46]以受 AFB₁ 污染的开心果为原料,研究酿酒酵母和鼠李糖乳杆菌菌株 GG 对 AFB₁ 吸附效果的影响。结果表明,当 AFB₁ 初始浓度为 10 μg/kg 时,酿酒酵母和鼠李糖乳杆菌菌株 GG 对 AFB₁ 的结合能力分别为 40%,35%;初始浓度为 20 μg/kg 时,酿酒酵母和鼠李糖乳杆菌菌株 GG 对 AFB₁ 的结合能力分别为 70%,60%。该研究还发现,酸处理和热处理均以增强两种菌株对 AFB₁ 的结合能力。此外,Adrián 等^[47]研究发现 *Lactobacillus casei* Shirota 菌株能将 AFB₁ 粘附到细胞膜内,而且该菌株还可以显著降低 AFB₁ 在肠道中的吸收作用,即使长时间暴露在 AFB₁ 中也可以避免毒素的危害。但由于这种结合方法没有特异性,菌体浓度、温度等因素对结合体的稳定性有较大影响,而且必须分离已吸附毒素的微生物^[48]。起码目前该技术的应用价值不大。

3.2 生物降解

Mohsen 等^[49]研究了从伊朗开心果中分离的枯草芽孢杆菌 UTBSP1 对 AFB₁ 的降解效果。结果表明,枯草芽孢杆菌 UTBSP1 能够显著降低营养肉汤培养基和开心果中的 AFB₁,其降解率分别为 85.66% 和 95%;无细胞上清液对 AFB₁ 的最佳降解条件为:温度 35~40 °C,时间 24 h,该条件下 AFB₁ 的降解率为 78.39%。李超波等^[50]以与 AFB₁ 结构类似物香豆素为惟一碳源进行 AFB₁ 降解菌株初筛,得到的活性菌株的培养液分别与 AFB₁ 标准品(2.5 μg/mL)共同作用,以 AFB₁ 降解率为指标进行复筛。从金毛羚牛粪便中筛选出的菌株 F4 降解活性最好,去除 AFB₁ 的能力达到 90.03%。根据 F4 菌株 16S rRNA 序列同源性分析,结合形态、生理生化特性,初步确定菌株 F4 为施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*)。该菌株的降解活性与细胞浓度呈正相关。当 pH 7.0,35 °C,菌细胞作用 72 h 后毒素降解率达到 82.91%。刘睿杰等^[51]对采用巨大芽孢杆菌固态发酵法去除 AFB₁ 前后花生粕中蛋白质、氨基酸、总黄酮、总糖、灰分等营养成分的变化情况进行了研究,结果表明,发酵前后除总糖被菌体细胞利用有所减少外,其他几个成分含量都有所提升或者基本不变,特别是总蛋白质和总氨基酸,分别提高了 25.16% 和 5.08%。说明该法能有效去除花生粕中的 AFB₁,而且不会造成花生粕营养价值的降低。上述研究表明,生物降解技术能有效降解 AFB₁,处理条件温和,无化学残留,对样品品质影较少。但该法工艺较为复杂且成本高,目前在实际生产中的应用受到限制。

此外,徐丹等^[52]研究表明,黑曲霉既能抑制黄曲霉生长、产毒,又能降解 AFB₁。

4 展望

近年来学者对物理、化学及生物脱除黄曲霉毒素的技术进行了较为全面的研究,也取得了一定的成果。但现有的研究主要侧重于对黄曲霉毒素的降解能力,缺乏对降解机理及

降解产物毒性方面的深入研究。寻找一种高效、安全的脱除黄曲霉毒素的方法是学者们的共同追求,而生物降解技术是最优的选择之一,该法反应条件温和,且其本身和降解生成物并不会对人、畜造成危害,必将会成为今后的研究热点。随着生物化学、分子生物学、基因工程及酶工程等技术的发展,生物酶降解黄曲霉毒素技术将有望在食品、饲料等行业的实际生产中得以应用。

参考文献

- 1 余以刚,邱杨,吴晖,等. 几种传统食品中黄曲霉毒素 B₁ 的检测与安全性评价[J]. 食品与机械,2007,23(4):110~111.
- 2 赖卫华,刘道峰,邓省亮. 胶体金免疫层析法检测酱油中黄曲霉毒素 B₁[J]. 食品与机械,2012,28(1):70~72.
- 3 张丽丽,张娟,王远亮. 稻谷中产黄曲霉毒素菌株的筛选与鉴定[J]. 食品与机械,2012,28(3):6~9.
- 4 夏延斌,甄增立,谢笔钧. 食品化学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001:388.
- 5 Zeng Lu, Wang Shu-ping, Peng Xiao-qin, et al. Al-Fe PILC preparation, characterization and its potential adsorption capacity for aflatoxin B₁[J]. Applied Clay Science, 2013, 83~84: 231~237.
- 6 叶盛群,谌刚,韩秀山. 食用油吸附脱色剂对植物油中黄曲霉毒素含量的影响[J]. 精细与专用化学品,2013,21(7):20~22.
- 7 杜冰,梁淑如,程燕锋,等. 挤压膨化加工过程参数及其影响[J]. 食品与机械,2008,24(5):133~136.
- 8 赵林华,熊电波. 影响食品挤压膨化品质的因素及对策[J]. 食品与机械,2003,19(3):38~39.
- 9 Castells Miren, Marlín Sonia, Sanchis Vicente, et al. Reduction of aflatoxins by extrusion-cooking of rice meal[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(7): C369~C377.
- 10 Firibu K Saalia, Robert D Phillips. Degradation of aflatoxins by extrusion cooking: Effects on nutritional quality of extrudates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1496~1501.
- 11 Saalia F K, Phillips R D. Reduction of aflatoxins in peanut meal by extrusion cooking in the presence of nucleophiles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1511~1516.
- 12 哈益明. 辐照技术在保障食品安全中的作用和应用领域[C]//中国核科学技术进展报告——中国核学会 2009 年学术年会论文集(第一卷·第 8 册). 北京:中国核学会,2009:48~53.
- 13 王锋. 黄曲霉毒素 B₁ 的辐射降解机理及产物结构特性分析[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
- 14 Wang Feng, Xie Fang, Xue Xiao-feng, et al. Structure elucidation and toxicity analyses of the radiolytic products of aflatoxin B₁ in methanol-water solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1192~1202.
- 15 王辰龙,陈蕾,闫晓明. ⁶⁰Co 辐照降解花生油中黄曲霉毒素 B₁ 及对花生油品质的影响[J]. 中国油脂,2014,39(2):53~56.
- 16 朱佳廷,冯敏,严建民,等. 辐照对稻米中黄曲霉毒素的降解效果

- [J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 324~326.
- 17 Ghanem I, Orfi M, Shamma M. Effect of gamma radiation on the inactivation of aflatoxin B₁ in food and feed crops[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2008, 39(4): 787~791.
- 18 张莹, 朱加进. 电子束辐照技术及其在食品工业的应用研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 236~239, 258.
- 19 李璇, 郑建仙. 辐照技术及在食品保藏中应用的现状与未来(上)[J]. 食品与机械, 1997(4): 8~9.
- 20 王周利, 王玉堂, 刘学波, 等. 玉米粉中黄曲霉毒素 B₁ 微波降解技术[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 193~197.
- 21 Bulent Kabak. The fate of mycotoxins during thermal food processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(4): 549~554.
- 22 Farag R S, Rashed M M, Abo Hgger Amel A A. Aflatoxin destruction by microwave heating [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 1996, 47(3): 197~208.
- 23 Luter L, Wyslouzil W, Kashyap S C. The destruction of aflatoxins in peanuts by microwave roasting[J]. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 1982, 15(3): 236~238.
- 24 王勇, 赵秀平, 王韧, 等. 微波辅助碱法降解黄曲霉毒素工艺对米蛋白品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 1~4, 15.
- 25 樊伟伟, 黄惠华. 微波杀菌技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 143~147.
- 26 李阳, 陈永铎, 赵红杰, 等. 窄前沿高压脉冲放电等离子体降解水中苯胺[J]. 环境工程学报, 2014, 12(8): 5 361~5 366.
- 27 张岩, 董晓娜, 姜文利, 等. 等离子体降解黄曲霉毒素 B₁ 的试验研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(9): 114~118.
- 28 Liu Rui-jie, Chang Ming, Jin Qing-zhe, et al. Degradation of aflatoxin B₁ in aqueous medium through UV irradiation[J]. European Food Research and Technology, 2011, 233(6): 1 007~1 012.
- 29 肖丽霞, 汪芬, 于洪涛, 等. 紫玉米中黄曲霉毒素 B₁ 和富马毒素 B₁ 的脱毒研究[J]. 食品科学, 2011, 32(9): 114~117.
- 30 山长坡. 化学法脱除花生中黄曲霉毒素及其对其品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- 31 朱玲凤, 李高阳, 张菊花, 等. 高浓度臭氧水对柑橘多菌灵的降解及其精油品质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 49~53.
- 32 任燕, 曾艳, 秦礼康. 臭氧处理马铃薯淀粉加工废水降污效果研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 26~29, 61.
- 33 Luo Xiao-hu, Wang Ren, Wang Li, et al. Structure elucidation and toxicity analyses of the degradation products of aflatoxin B₁ by aqueous ozone[J]. Food Control, 2013, 31(2): 331~336.
- 34 Zorlügenç B, Zorlügenç F K, Öztekin S, et al. The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B₁ in dried figs[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(12): 3 593~3 597.
- 35 Inan F, Pala M, Doymaz I. Use of ozone in detoxification of aflatoxin B₁ in red pepper[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 425~429.
- 36 Luo Xiao-hu, Wang Ren, Wang Li, et al. Effect of ozone treatment on aflatoxin B₁ and safety evaluation of ozonized corn[J]. Food Control, 2014, 37(3): 171~176.
- 37 张芳, 单晓红, 孙秀兰, 等. 响应面优化臭氧对花生粕中黄曲霉毒素 B₁ 的降解效果[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(5): 494~500.
- 38 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.
- 39 陈志娟, 刘阳, 邢福国, 等. 氨气熏蒸降解玉米中黄曲霉毒素 B₁ 的条件优化[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 33~37.
- 40 梁俊平. 氨气熏蒸法降解花生及花生粕中黄曲霉毒素方法的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- 41 Thomas J, Alan D. High field ¹H. NMR studies on the ammination of aflatoxin B₁[J]. Tetrahedron, 1989, 45(8): 2 451~2 464.
- 42 曹泽虹, 高明侠, 苗敬芝, 等. 花生粕酶水解液中黄曲霉毒素 B₁ 脱除方法的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 394~397.
- 43 袁媛, 邢福国, 刘阳. 植物精油抑制真菌生长及毒素积累的研究[J]. 核农学报, 2013, 27(8): 1 168~1 172.
- 44 Vijayanandraj S, Brinda R, Kannan K, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ by an aqueous extract from leaves of *Adhatoda vasica* Nees[J]. Microbiological Research, 2014, 169(4): 294~300.
- 45 孙丰芹, 金青哲, 王兴国, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 的生物脱毒研究进展[J]. 粮油食品科技, 2011, 19(1): 39~41.
- 46 Somaieh Rahaie, Zahra Emam-Djomeh, Sayed Hadi Razavi, et al. Evaluation of aflatoxin decontaminating by two strains of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus rhamnosus* strain GG in pistachio nuts[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2012, 47(8): 1 647~1 653.
- 47 Adrián Hernandez-Mendoza, Doralinda Guzman-De-Peña, Aarón Fernando González-Córdova, et al. In vivo assessment of the potential protective effect of *Lactobacillus casei* Shirota against aflatoxin B₁[J]. Dairy Science & Technology, 2010, 90(6): 729~740.
- 48 李文明. 黄曲霉毒素 B₁ 生物降解产物的分离鉴定及其致突变性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- 49 Mohsen Farzaneh, Shi Zhi-qi, Alireza Ghassempour, et al. Aflatoxin B₁ degradation by *Bacillus subtilis* UTBSP1 isolated from pistachio nuts of Iran[J]. Food Control, 2012, 23(1): 100~106.
- 50 李超波, 李文明, 杨文华, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 降解菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 微生物学报, 2012, 52(9): 1 129~1 136.
- 51 刘睿杰, 孙丰芹, 常明, 等. 巨大芽孢杆菌固态发酵法去除黄曲霉毒素 B₁ 工艺对花生粕品质的影响[J]. 中国油脂, 2012, 37(12): 18~21.
- 52 徐丹, 孙秀兰, 李永仙, 等. 黑曲霉对黄曲霉生长、产毒及黄曲霉毒素 B₁ 的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2011, 23(6): 490~492, 499.