

坚果和干果中黄曲霉毒素的污染、检测与控制

王刘庆, 王 瑶, 王 多, 王 蒙*

(北京农业质量标准与检测技术研究中心, 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097)

摘 要: 坚果和干果在生产、加工和储藏过程中易受到黄曲霉毒素污染。黄曲霉毒素是一类毒性极强的真菌毒素, 其中黄曲霉毒素 B₁ 污染最普遍、毒性最强, 其易引发急、慢性毒性, 致癌、致畸、免疫抑制等多种危害, 严重威胁果品安全, 危害人类健康。坚果和干果中黄曲霉毒素污染状况的阐释能够更加明晰其在不同果品中的污染差异, 为有针对性地控制毒素污染奠定了基础。坚果和干果中黄曲霉毒素的准确检测是分析其污染状况的前提。另外, 如何防控黄曲霉毒素在坚果和干果中的污染, 降低黄曲霉毒素对人类健康的影响, 一直是研究的重点。本文对国内外坚果和干果中黄曲霉毒素的污染情况及限量标准, 黄曲霉毒素的检测方法和防控措施进行了综述, 以期对坚果和干果中黄曲霉毒素的污染控制提供理论基础和指导。

关键词: 坚果; 干果; 黄曲霉毒素; 污染; 检测; 控制

Contamination, determination and control of aflatoxin in nuts and dry fruits

WANG Liu-Qing, WANG Yao, WANG Duo, WANG Meng*

(Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing (BRCAST), Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, Beijing, 100097, China)

ABSTRACT: Nuts and dry fruits are susceptible to aflatoxins contamination during growth, processing and storage. Aflatoxin is a kind of highly toxic mycotoxins. Among them, aflatoxin B₁ is the most common and most toxic, and it is easy to cause acute and chronic toxicity, carcinogenic, teratogenic, immunosuppressive and other hazards, which seriously threatens fruit safety and endangers human health. The interpretation of aflatoxin contamination in nuts and dried fruits can clarify the difference in pollution among different fruits and lay the foundation for targeted control of toxin contamination. Accurate detection of aflatoxins in nuts and dried fruits is a prerequisite for ensuring a clear understanding of the pollution status. In addition, how to prevent and control the contamination of aflatoxins in nuts and dried fruits and reduce their harmful impacts on human health has always been the focus of research. In this paper, the contamination and limit standard of aflatoxin in nuts (dry fruits) at home and abroad, the detection methods and control measures of aflatoxin were briefly summarized, which might provide the theoretical basis and guidance for the control of aflatoxin contamination in nuts and dried fruits.

KEY WORDS: nuts; dry fruits; aflatoxin; contamination; detection; control

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP2018013)

Fund: Supported by National Agricultural Products Quality and Safety Risk Assessment Project (GJFP2018013)

*通讯作者: 王蒙, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: wangm@brcast.org.cn

*Corresponding author: WANG Meng, Ph.D, Associate Professor, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, No.11 Middle Road of Shuguanghuayuan, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: wangm@brcast.org.cn

1 引言

黄曲霉毒素(aflatoxins, AFT)是一类主要由黄曲霉(*Aspergillus flavus*)和寄生曲霉(*A. parasiticus*)产生的毒性极强的真菌毒素,其基本结构是双呋喃环和香豆素^[1,2]。目前已经鉴定出的黄曲霉毒素多达 18 种,包括黄曲霉毒素 B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)、B₂(aflatoxin B₂, AFB₂)、G₁(aflatoxin G₁, AFG₁)、G₂(aflatoxin G₂, AFG₂)等,其中 AFB₁是农产品污染最为普遍且毒性最强的黄曲霉毒素^[3]。黄曲霉毒素被国际癌症治疗机构列为 I 级致癌物,具有急慢性毒性、致癌、致畸和致突变性^[4]。在非洲、中国和东南亚的部分地区,肝癌的发病率与黄曲霉毒素的污染情况有着密切的联系^[5]。

黄曲霉毒素是无色、无味、无臭的晶体物质,熔点为 200~300 ℃,易溶于甲醇、丙酮、氯仿和乙腈等有机溶剂,不溶于正己烷、石油醚和乙醚,微溶于水。黄曲霉毒素具热稳定性,温度高达 268 ℃才能够分解,但在碱性条件(pH 9.0~10.0)易分解,然该反应可逆,当 pH 恢复至中性、酸性,黄曲霉毒素又会出现^[6]。玉米、大豆等粮油作物易受黄曲

霉毒素污染。另外,近年来,果品中黄曲霉毒素检出率和污染水平也较高,特别是干果和坚果中较常见,主要包括核桃、开心果、榛子、杏仁、葡萄干等。在坚果和干果中,黄曲霉毒素不仅污染检出率高,而且污染程度较高,甚至超过限量标准几十倍^[7]。本文就坚果和干果中黄曲霉毒素的污染状况及其限量标准、黄曲霉毒素的检测技术及其污染防控分别展开综述,有助于明晰现阶段坚果和干果中的黄曲霉毒素的污染问题,以期为今后防控坚果和干果中的毒素污染问题提供指导。

2 坚果和干果中黄曲霉毒素的污染情况及限量标准

黄曲霉可在收获、贮藏、干制等不同环节侵染坚果(干)果,导致霉变,破坏其营养价值,造成经济损失,更为严重的是其产生的黄曲霉毒素对人类危害巨大。黄曲霉毒素的污染除了造成粮食作物产量的大幅降低和品质严重下降,导致严重的经济损失^[8],而且对坚果(干)果的污染也较严重,主要污染无花果干、核桃开心果等坚果及葡萄干、枣干、杏干和梅干等干果(表 1)。

表 1 坚果和干果中黄曲霉毒素污染情况
Table 1 Aflatoxin contamination in nuts and dry fruits

国家	年份	种类	数量	AFB ₁		AFT		参考文献
				检出率/%	检出值/(μg/kg)	检出率/%	检出值/(μg/kg)	
摩洛哥	2006	葡萄干	20	20.0	最大值: 13.9	20.0	最大值: 13.9	[7]
		无花果干	20	5.0	最大值: 0.3	30.0	最大值: 32.9	
		核桃	20	30.0	最大值: 2500	30.0	最大值: 4320	
		开心果	20	45.0	最大值: 1430	45.0	最大值: 1450	
希腊	2012	葡萄类干果	26	23.1	均值: 1.4	—	—	[9]
爱尔兰	2011	杏干	30	23.3	0.2~5.3	—	—	[10]
		梅干	15	13.3	0.2~1.2	—	—	
		开心果	8203	23.4	<LOD~369.1	23.5	<LOD~390.5	
意大利	2011	干栗子	14	21.4	<LOD~5.25	—	—	[12]
		栗粉	37	62.2	<LOD~67.9	—	—	
土耳其	2008	干果	98	7.1	0.2~4.3	—	—	[13]
	2008~2009	开心果	120	49.2	0.1~4.1	49.2	0.1~7.7	[14]
巴基斯坦	2012~2015	干果、坚果	624	—	—	26.4	0.2~30.1	[15]
	2013	干果、坚果	307	43.0	LOD~14.5	43.0	LOD~21.3	
	2009	干果、坚果	180	—	—	29.4	0.7~14.5	
		干果	75	—	—	22.7	0.8~12.5	
		坚果	105	—	—	34.3	0.7~14.5	
	2011~2012	枣	96	39.6	均值: 2.13	39.6	LOD~26.6	[18]
		枣制品	57	31.6	均值: 2.29	31.6	LOD~16.7	

为保护消费者健康,许多国家和国际组织均制定了坚(干)果中黄曲霉毒素的限量标准。一般而言,发展中国家设立的毒素限量大多较为宽松,部分国家甚至没有限量标准;而发达国家设立的毒素限量水平较为严格。相对而言,欧盟作为贸易进口国,其制定的坚果黄曲霉毒素限量标准较为严格,也有个别国家对指定产品的黄曲霉毒素限量比欧盟更严格,如日本规定进口食品中 AFB₁ 的残留量为“不得检出”;摩洛哥规定开心果和杏仁中 AFB₁ 的限量为 1 μg/kg;克罗地亚规定杏仁、榛子、核桃中 AFT 的限量为 3 μg/kg。美国作为坚果贸易出口国,出于贸易保护目的,其 AFT 总量的限制标准相对宽松,限量值为 20 μg/kg。大多国家制定的 AFB₁ 限量为 5 μg/kg, AFT 为 10 μg/kg 或 15 μg/kg;中国制定的标准包括熟制坚果及籽类中 AFB₁ 限量为 5 μg/kg,而没有总量限制的要求;考虑到真菌毒素的协同作用,已有学者呼吁完善我国食品中黄曲霉毒素的限量标准,与国际接轨。

3 黄曲霉毒素的检测

目前,黄曲霉毒素的分析技术主要分确证性检测技术和快速检测技术两大类。确证性检测技术主要指利用大型精密仪器进行检测,如薄层色谱法(thin-layer chromatography, TLC)、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)和质谱(mass spectrum, MS)等联用技术。快速检测技术主要是基于免疫化学基础上的免疫分析方法如免疫亲和色谱-荧光检测法(immuno-

affinity chromatography-fluorescent detection, IAC-FLD)、酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)和胶体金免疫层析测定(colloidal gold immune chromatography assay, GICA)等。

3.1 高效液相色谱法

高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)具有分离和检测效能高、分析快速等特点,且其可与紫外检测器(ultraviolet detector, UVD)、二极管阵列检测器(diode array detector, DAD)、荧光检测器(fluorescence detector, FLD)、质谱(mass spectrum, MS)等多种检测器联用,是目前真菌毒素检测最重要的方法之一。对于分子本身可产生荧光但强度较弱的黄曲霉毒素(如 AFB₁、AFG₁),需经柱前或柱后衍生、优化流动相条件(如使用离子对试剂、改变流动相 pH 等)以增强荧光信号方能用 FLD 定量检测^[19]。HPLC 法可同时分离出各种黄曲霉毒素,具有灵敏度高、特异性强、结果准确、检测限低等优点。HPLC 法检测黄曲霉毒素对前处理的要求较高,需将基质中干扰成分尽可能除去,否则不仅会影响定性、定量,还可能出现假阳性或假阴性结果。表 2 中总结了自 2007 年以来,坚果及干果中黄曲霉毒素的前处理和 HPLC-FLD 检测方法。

目前黄曲霉毒素提取的常用前处理方法有固相萃取(solid-phase extraction, SPE)、免疫亲和柱(immuno-affinity column, IAC)萃取等。SPE 不但高效、快速,而且对环境污染少、简便、安全,符合现代检测的要求。传统的 SPE 技

表 2 坚(干)果中黄曲霉毒素的 HPLC-FLD 检测方法
Table 2 Determination of aflatoxin in nuts (dry fruits) by HPLC-FLD

样品	前处理方法	检测波长/nm		回收率/%	定量限/(μg/kg)	参考文献
		激发	发射			
杏仁/西梅干	IAC	365	445	83.4~97.1	0.3~0.9	[10]
开心果	IAC	360	440	61.0~89.3	30~80 (LOD)	[14]
葡萄干	IAC	365	445	88.9~102.1	0.4~0.7	[20]
桑葚干/椰枣干/无花果干/杏干	IAC	365	435	74.4~92.5	0.07~0.30	[21]
杏仁/榛子	加压液体萃取	366	440	76.0~93.0	0.04~0.2	[22]
开心果	IAC	365	435	61.8~97.8	0.4 LOD	[23]
榛子/无花果干	IAC	360	440	86.1~94.2	0.21~0.27	[24]
巴西坚果	IAC	362	425/455	85.0~87.6	0.25	[25]
开心果	IAC	365	435	80.1~93.4	0.3~0.6	[26]
杏仁/核桃/杏/榛子/开心果/腰果	IAC	365	435	90.1~112.3	0.19~1.4	[27]
开心果	IAC	365	435	73.9~88.1	0.05~0.1	[28]
巴西坚果/杏仁	SPE	365	450	80.4~84.3	0.75	[29]
核桃/松子	多功能净化柱	360	440	> 80	0.008~0.036 (LOD)	[30]

术主要利用吸附剂保留其中被测物质,通过活化、上样、清洗、洗脱 4 个步骤对目标化合物进行分离和富集,广泛应用于黄曲霉毒素的检测。随着 SPE 的发展,基于分子识别及免疫亲和作用的固相萃取小柱也常用于真菌毒素的净化处理。免疫亲和柱是 20 世纪 90 年代在分析领域得到应用的一种新技术,它是将一定量的单克隆抗体固定合适的载体上,可针对单一黄曲霉毒素,也有可同时处理多种黄曲霉毒素的 IAC 柱,为毒素的联合测定提供了条件。由于 IAC 柱所具有的特异性,排除了样品中的大多数干扰杂质,进而提高了检测灵敏度,是目前国内外较常用的检测黄曲霉毒素的前处理方法。但 IAC 的净化效果易受基质、pH 值、溶剂、盐浓度等因素的影响,同时 IAC 的价格昂贵,难以重复利用,检测成本较高。近年来,QuEChERS(quick, easy, cheap, effective, rugged and safe)技术作为一项新兴的高效提取净化技术,已在毒素的分析检测得到应用。一般而言,QuEChERS 技术分为提取、盐析和净化 3 个步骤。即先以有机溶剂(如:乙腈、丙酮等)与水按照一定比例混合后萃取待测物,再经过盐析步骤(如:无水硫酸镁和氯化钠等),盐析分层后,少量的色素、糖以及蛋白质等组分会不可避免的与真菌毒素共萃取出来,这些组分的残留会干扰样品分析结果。净化过程中通过选择不同净化剂除去干扰组分,如 N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA)结构上有 2 个氨基,可与分子结构上含有羟基的极性物质发生氢键相互作用,吸附共萃取物中的极性有机酸、极性色素等杂质,在净化非极性类真菌毒素,包括黄曲霉毒素中的杂质效果较好。

3.2 高效液相色谱与质谱联用技术

高效液相色谱与质谱联用技术(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)也是目前检测坚(干)果中黄曲霉毒素的主要方法

之一。HPLC-MS/MS 技术在提高分析灵敏度和可靠性的同时,适用于多种毒素的同时检测,且对样品前处理要求不高。表 3 总结了 2007 年以来利用 HPLC-MS/MS 检测坚(干)果中黄曲霉毒素的前处理方法及检测技术。

3.3 免疫层析技术

以膜为固相载体的免疫层析技术是在单克隆抗体技术、胶体金免疫技术和新材料技术基础上发展起来的一种新型筛查方法;其中 GICA 是以胶体金作为示踪标记物,具有灵敏度高、特异性强、稳定性好、操作简便等优点,结果判断直观可靠,非常适合于大批量样品的现场快速检测。虽然目前这种方法还只能半定量,但作为一种快速筛查手段,可高效筛除毒素污染的农产品,进而保护人民的身体健康。目前应用 GICA 技术检测坚(干)果中 AFB₁ 和 AFB₂ 已有文献报道^[39,40],随着新材料技术的发展,金包银纳米粒子、磁微粒、量子点等用于毒素抗体的标记,和金纳米颗粒标记抗体技术相比,试纸条灵敏度,重复性和稳定性都相应提高。此外,目前已有商业化的胶体金免疫层析试纸条检测开心果、葵花籽、无花果及腰果等坚果中的 AFB₁,最低检出限为 4 μg/kg,检测时间为 5 min,还可配有读卡仪实现定量检测。鉴于多种真菌毒素混合污染的情况时有发生,单一毒素定性已不能满足未来的检测需求,因此以胶体金试纸条为基础的多重检测模式已成为快速检测领域的研究重点。

4 黄曲霉毒素的防控

由于坚(干)果中黄曲霉毒素污染的普遍性和高发性,风险控制至关重要,不仅能挽回巨大的经济损失,而且能使人们放心安全食用品质优良的坚(干)果,保障人们身体健康。黄曲霉毒素污染风险的控制,一方面是产毒真菌的防控,产毒真菌的防控能有效地限制和降低坚(干)果带菌

表 3 坚(干)果中黄曲霉毒素的 HPLC-MS/MS 检测方法
Table 3 Determination of aflatoxin in nuts (dry fruits) by HPLC-MS/MS

样品	前处理方法	回收率/%	定量限/(μg/kg)	参考文献
开心果/榛子/核桃/夏威夷果/松子/杏仁	QuEChERS+ DLLME	65.8~97.9	0.6~1.0	[31]
洋地栗及其饮品	SPE	71~81	1~1.2	[32]
苹果/梨/葡萄/橙汁/菠萝汁/葡萄汁/桃汁/果干	稀释进样	70~113	0.03~0.4	[33]
无花果干/李干/果酱	固液萃取	54~87	0.6~0.97	[34]
葡萄干/无花果/开心果	稀释进样	74~110	1.0	[35]
椰子/苹果干/菠萝干/蔓越莓(AFB ₁ /AFG ₂); 杏仁/无花果干(AFB ₂ /AFG ₂); 木瓜干/芒果干/猕猴桃干/葡萄干(AFG ₂)	SPME	94.5~109.1	0.02	[36]
蔓生果干/无花果干/杏干	SPE	83~103	0.01~0.49	[37]
杏仁	IAC	86~105.6	0.166~0.768	[38]

的可能性, 进而减少黄曲霉毒素的污染; 另一方面是黄曲霉毒素的控制和去除, 特别是对于已污染黄曲霉毒素的坚(干)果, 如何去除毒素, 进而增加坚(干)果利用率及其食用安全性。

4.1 物理控制

4.1.1 物理吸附

吸附法脱毒是指使用吸附剂结合黄曲霉毒素从而达到降低食品中黄曲霉毒素含量的目的。常见的吸附剂主要包括活性炭、皂土和葡甘露聚糖等^[41]。吸附法首次提出是在 1980 年, Decker 等^[42]提出在体外条件下、当 pH 为中性时, 活性炭能够吸附黄曲霉毒素, 形成稳定复合物, 降低其利用率。齐德生^[43]、史莹华^[44]和齐云霞^[45]等相继指出蒙脱石能够吸附原料中的黄曲霉毒素, 显著降低其含量, 每克蒙脱石能吸附约 613.5~628.9 μg 黄曲霉毒素。天然钠沸石能去除无花果中的 AFB₁, 其去除率为 38%~100%, 且中低初始浓度 AFB₁ 的去除效率比高浓度要好; 但不能很好地去除 AFB₂^[46]。然而, 吸附法仅是一物理反应, 并不会破坏毒素的毒性结构, 对环境的影响依然存在。

4.1.2 照射技术

辐照降解技术能直接破坏毒素, 降低毒素的毒力, 还能最大程度地保留坚(干)果的内在品质, 具有一定优势。真菌毒素辐照降解受多重因素影响, 包括吸收剂量、毒素初始浓度、真菌数量、水分含量和坚(干)果基质成分等。真菌毒素初始浓度和辐照剂量都可影响降解效果, 初始浓度越低, AFB₁ 的降解率越高^[47,48]。当毒素的初始浓度一定时, 真菌毒素的降解率与辐照强度呈正相关。经 5 kGy 辐照处理可降解 44%~48% 的 AFB₁, 而 10 kGy 辐照处理时降解率达到 82%~88%, 20 kGy 辐照处理时则可完全降解 AFB₁^[49]。此外, 不同毒素可耐受的辐照剂量不同。有研究结果表明 AFB₂ 和 AFG₂ 对辐照的抗性要强于 AFB₁ 和 AFG₁^[50]。这可能是由于 AFB₁ 和 AFG₁ 呋喃环中具有 C₈、C₉ 不饱和双键, 是自由基攻击的位点, 而 AFB₂ 和 AFG₂ 呋喃环中不存在双键, 进而不易被自由基攻击而分解^[51]。辐照处理应用在坚(干)果中黄曲霉毒素的去除已有文献报道。10 kGy 剂量的辐照处理开心果后, 去皮开心果和未去皮开心果中 AFB₁ 的降解率分别为 68.8% 和 84.6%^[52]。

紫外照射技术作为一种去除真菌毒素的有效方法, 以其二次污染小、对降解体系影响小等优点广泛应用于食品中黄曲霉毒素的去除。样品水分含量可能会影响紫外线降解毒素的效果。经 265 nm 的 UV-C 照射 15 min 后, 10% 水分含量的干果中黄曲霉毒素总量去除率显著高于 16% 水分的干果, 这可能是由于高水分含量有利于真菌产毒, 进而导致黄曲霉毒素总量增加^[53]。但随紫外照射时间延长, 不同含水量下黄曲霉毒素的去除率无显著差异, 说明紫外对毒素的去除率随照射时间的延长而增加, 而与初始浓度

无关。利用 87.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外照射被 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ AFB₁ 污染的开开心果, 经 3 h 和 13 h 后, 毒素含量分别降低了 21.8% 和 57.8%^[54]。

4.1.3 热处理

黄曲霉毒素的分解温度高达 237~306 $^{\circ}\text{C}$, 但一般情况下, 普通烹饪温度只能达到 150 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 难以破坏食物中的黄曲霉毒素^[55], 若采用更高的温度, 食品的营养和感官品质就会受到破坏, 但是热处理并非完全无效。120 $^{\circ}\text{C}$ 处理 120 min 和 150 $^{\circ}\text{C}$ 处理 30~120 min 烘烤开心果都能大幅降低黄曲霉毒素含量, 特别是 150 $^{\circ}\text{C}$ 处理 120 min 能使毒素含量下降超过 95%^[56]。

4.2 化学控制

目前应用在坚(干)果黄曲霉毒素控制的化学方法主要是臭氧降解, 臭氧是一种具有特殊气味的不稳定气体, 是已知最强的氧化剂之一。臭氧能有效降解开心果中污染的黄曲霉毒素, 9.0 mg/L 臭氧处理 420 min, 能使 AFB₁ 和黄曲霉毒素总量分别下降 23% 和 24%, 其中臭氧浓度和暴露时间是降解黄曲霉毒素的关键^[57]。臭氧控制黄曲霉毒素污染具有高效性、品质损失少、加工过程适用以及环境友好等优点。

4.3 生物控制

4.3.1 微生物对黄曲霉毒素的吸附作用

微生物吸附不同于物理吸附, 吸附效率不受吸附材料自身特性如孔径大小、接触面积等的影响。相反, 微生物吸附是依靠菌体细胞壁与毒素结合作用, 达到一个稳定状态, 从而降低毒素污染。Rahaie 等研究表明, 酿酒酵母能吸附去除开心果中的 AFB₁, 去除率达 55%~73%; 热或酸处理的鼠李糖乳杆菌也能去除开心果中的 AFB₁, 去除率达 85%~90%^[58]。

4.3.2 微生物对黄曲霉毒素的降解作用

真菌毒素的生物降解是指毒素的分子结构被微生物所产生的次级代谢产物或所产生的酶分解破坏, 生成低毒甚至无毒的降解产物的过程。AFB₁ 的降解主要是通过破坏其结构中的 4 个位置: 香豆素结构中的内酯环部分, 经水解反应形成酚式化合物; 破坏呋喃环双键, 呋喃环能够与蛋白和核酸进行结合, 与致毒性有密切联系; 环戊烯酮环, 通过取代反应、加成反应来降低毒性; 苯环上的甲氧基^[59,60]。李文明^[61]的研究表明, 施氏假单胞菌对 AFB₁ 的降解率能够达到 90%。Liu 等^[62,63]从假蜜环菌 E-20 的胞内蛋白中分离得到的一种 AFB₁ 降解酶, 分子量 51.8 kDa, 最适 pH 为 6.8, 最适作用温度 35 $^{\circ}\text{C}$, 经后续研究发现, 此酶为一种单加氧酶, 可破坏 AFB₁ 的双呋喃环。橙色粘细菌 ANSM068 胞外分离纯化获得的 AFB₁ 降解酶, 分子量 32 kDa, 最适 pH 6.0, 最适温度 35 $^{\circ}\text{C}$ ^[64]。另有研究表明, 枯草芽孢杆菌能降解开心果中 95% 的黄曲霉毒素^[65]。

5 结 语

食品安全问题一直以来都是全世界人民所关心、关注的重大问题。坚(干)果中黄曲霉毒素污染大大降低了其食用的安全性,给消费者的健康带来了隐患。与此同时,坚(干)果中黄曲霉毒素的污染也对经济和进出口贸易产生了较大的影响。当务之急是加强黄曲霉毒素的防控措施,开发更快速、准确并且能广泛应用的检测方法。近年来,黄曲霉毒素的防控措施与检测技术的相关研究均取得了较大进展。生物降解目前看来是比较有发展前景的脱毒手段,但降解产物的安全性仍需进一步探讨,能够大规模生产、应用的降解制剂仍需进一步开发。随着检测领域新技术的发展与创新,黄曲霉毒素的检测也朝着快速、准确、适用性广的方向发展。

参考文献

- [1] Fetaih HA, Dessouki AA, Hassanin AAI, *et al.* Toxopathological and cytogenetic effects of aflatoxin B₁ (AFB₁) on pregnant rats [J]. *Pathol Res Pract*, 2014, 210(12): 1079–1089.
- [2] Yu L, Yang Z, Hu C, *et al.* Highly sensitive electrochemical impedance spectroscopy immunosensor for the detection of AFB₁ in olive oil [J]. *Food Chem*, 2015, (176): 22–26.
- [3] Abdel HH, Palmery MM, Saso L, *et al.* Relaxant effects of aflatoxins on isolated guinea pig trachea [J]. *Toxicol Sci*, 2000, 55(1): 162–170.
- [4] Bennett JW, Klich M. Mycotoxins [J]. *Encyclopedia Microbiol*, 2003, 16(3): 497–516.
- [5] Wogan GN. Impacts of chemicals on liver cancer risk [J]. *Semin Canc Biol*, 2000, 10(3): 201–210.
- [6] Stefan B, Arantxa E, Julia K, *et al.* Chemistry and biology of mycotoxins and related fungal metabolites [J]. *Chem Rev*, 2009, 109(9): 3903–3909.
- [7] Juan C, Zinedine A, Moltó JC, *et al.* Aflatoxins levels in dried fruits and nuts from Rabat-Salé area, Morocco [J]. *Food Contr*, 2008, 19(9): 849–853.
- [8] Shcherbakova L, Statsyuk N, Mikityuk O, *et al.* Aflatoxin B₁ degradation by metabolites of *phomaglomerata* PG41 isolated from natural substrate colonized by aflatoxigenic *Aspergillus flavus* [J]. *Jundishapur J Microbiol*, 2015, 8(1): 10–15.
- [9] Kollia E, Kanapitsas A, Markaki P. Occurrence of aflatoxin B₁ and ochratoxin A in dried vine fruits from Greek market [J]. *Food Add Contamin*, 2014, 7(1): 11–16.
- [10] Janati SSF, Beheshti HR, Asadi M, *et al.* Preliminary survey of aflatoxins and ochratoxin A in dried fruits from Iran [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2012, 88(3): 391–395.
- [11] Dini A, Khazaeli P, Roohbakhsh A, *et al.* Aflatoxin contamination level in Iran's pistachio nut during years 2009–2011 [J]. *Food Control*, 2013, 30(2): 540–544.
- [12] Pietri A, Rastelli S, Mulazzi A, *et al.* Aflatoxins and ochratoxin A in dried chestnuts and chestnut flour produced in Italy [J]. *Food Control*, 2012, 25(2): 601–606.
- [13] Bircan C. Incidence of ochratoxin A in dried fruits and co-occurrence with aflatoxins in dried figs [J]. *Food Chem Toxicol*, 2009, 47(8): 1996–2001.
- [14] Set E, Erkmén O. The aflatoxin contamination of ground red pepper and pistachio nuts sold in Turkey [J]. *Food Chem Toxicol*, 2010, 48(8): 2532–2537.
- [15] Asghar MA, Ahmed A, Zahir E, *et al.* Incidence of aflatoxins contamination in dry fruits and edible nuts collected from Pakistan [J]. *Food Control*, 2017, (78): 169–175.
- [16] Masood M, Iqbal SZ, Asi MR, *et al.* Natural occurrence of aflatoxins in dry fruits and edible nuts [J]. *Food Control*, 2015, (55): 62–65.
- [17] Luttfullah G, Hussain A. Studies on contamination level of aflatoxins in some dried fruits and nuts of Pakistan [J]. *Food Control*, 2011, 22(3): 426–429.
- [18] Iqbal SZ, Asi MR, Jinap S. Aflatoxins in dates and dates products [J]. *Food Control*, 2014, 43(5): 163–166.
- [19] 李志霞, 聂继云, 闫震, 等. 果品主要真菌毒素污染检测、风险评估与控制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 332–347.
- [20] Li ZX, Nie JY, Yan Z, *et al.* Progress in research of detection, risk assessment and control of the mycotoxins in fruits and fruit products [J]. *Sci Agric Sin*, 2017, 50(2): 332–347.
- [21] Feizy J, Beheshti HR, Asadi M. Ochratoxin A and aflatoxins in dried vine fruits from the Iranian market [J]. *Mycotox Res*, 2012, 28(4): 237–242.
- [22] Heshmati A, Zohrevand T, Khaneghah AM, *et al.* Co-occurrence of aflatoxins and ochratoxin A in dried fruits in Iran: Dietary exposure risk assessment [J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, (106): 202–208.
- [23] Campone L, Piccinelli AL, Aliberti L, *et al.* Application of pressurized liquid extraction in the analysis of aflatoxins B₁, B₂, G₁ and G₂ in nuts [J]. *J Sep Sci*, 2009, 32(21): 3837–3844.
- [24] Cheraghali AM, Yazdanpanah H, Doraki N, *et al.* Incidence of aflatoxins in Iran pistachio nuts [J]. *Food Chem Toxicol*, 2007, 45(5): 812–816.
- [25] Kabak B. Aflatoxins in hazelnuts and dried figs: Occurrence and exposure assessment [J]. *Food Chem*, 2016, (211): 8–16.
- [26] Iamanaka BT, Nakano F, Lemes DP, *et al.* Aflatoxin evaluation in ready-to-eat brazil nuts using reversed-phase liquid chromatography and post-column derivatization [J]. *Food Addit Contam A*, 2014, 31(5): 917–923.
- [27] Jahanmard E, Azarani F, Sharifi M, *et al.* Aflatoxin in pistachio nuts used as ingredients in Gaz sweets produced in Isfahan, Iran [J]. *Food Add Contam B*, 2014, 7(1): 70–73.
- [28] Siahi SMR, Ansarin M, Tahavori A, *et al.* Determination of aflatoxins in nuts of Tabriz confectionaries by ELISA and HPLC methods [J]. *Adv Pharm Bull*, 2012, 2(1): 123–126.
- [29] Ghali R, Khelifa KH, Ghorbel H, *et al.* Aflatoxin determination in commonly consumed foods in Tunisia [J]. *J Sci Food Agric*, 2010, 90(14): 2347–2351.
- [30] Reis TA, Oliveira TD, Baquiao AC, *et al.* Mycobiota and mycotoxins in Brazil nut samples from different states of the Brazilian Amazon region [J]. *Int J Food Microbiol*, 2012, 159(2): 61–68.
- [31] Wang J, Liu XM. Contamination of aflatoxins in different kinds of foods in China [J]. *Biomed Environ Sci*, 2007, 20(6): 483–487.

- [31] Arroyo-Manzanares N, Huertas-Pérez JF, Gámiz-Gracia L, *et al.* A new approach in sample treatment combined with UHPLC-MS/MS for the determination of multiclass mycotoxins in edible nuts and seeds [J]. *Talanta*, 2013, 115(17): 61–67.
- [32] Rubert J, Sebastià N, Soriano JM, *et al.* One-year monitoring of aflatoxins and ochratoxin A in tiger-nuts and their beverages [J]. *Food Chem*, 2011, 127(2): 822–826.
- [33] Beltrán E, Ibáñez M, Portolés T, *et al.* Development of sensitive and rapid analytical methodology for food analysis of 18 mycotoxins included in a total diet study [J]. *Anal Chim Acta*, 2013, 783(11): 39–48.
- [34] Škrbić B, Antić I, Cvejanov J. Determination of mycotoxins in biscuits, dried fruits and fruit jams: assessment of human exposure [J]. *Food Add Contam A*, 2017, 34(6): 1012–1025.
- [35] Spanjer MC, Rensen PM, Scholten JM. LC-MS/MS multi-method for mycotoxins after single extraction, with validation data for peanut, pistachio, wheat, maize, cornflakes, raisins and figs [J]. *Food Add Contam A*, 2008, 25(4): 472–489.
- [36] Nonaka Y, Saito K, Hanioka N, *et al.* Determination of aflatoxins in food samples by automated on-line in-tube solid-phase microextraction coupled with liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2009, 1216(20): 4416–4422.
- [37] Campone L, Piccinelli AL, Celano R, *et al.* A fully automated method for simultaneous determination of aflatoxins and ochratoxin A in dried fruits by pressurized liquid extraction and online solid-phase extraction cleanup coupled to ultra-high-pressure liquid chromatography–tandem mass spectrometry [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2015, 407(10): 2899–2911.
- [38] Rodrigues P, Venâncio A, Lima N. Aflatoxigenic fungi and aflatoxins in Portuguese almonds [J]. *Sci World J*, 2012, 2012(4): 471926.
- [39] Liao JY, Li H. Lateral flow immunodipstick for visual detection of aflatoxin B₁ in food using immuno-nanoparticles composed of a silver core and a gold shell [J]. *Microchim Acta*, 2010, 171(3–4): 289–295.
- [40] Tang D, Saucedo JC, Lin Z, *et al.* Magnetic nanogold microspheres-based lateral-flow immunodipstick for rapid detection of aflatoxin B₂ in food [J]. *Biosens Bioelectron*, 2009, (25): 514–518.
- [41] Jaynes WF, Zartman RE, Hudnall WH. Aflatoxin B₁ adsorption by clays from water and corn meal [J]. *Appl Clay Sci*, 2007, 36(s1–3): 197–205.
- [42] Decker WJ, Corby DG. Activated charcoal adsorbs aflatoxin B₁ [J]. *Veterin Human Toxicol*, 1980, 22(6): 388–398.
- [43] 齐德生, 刘凡, 于炎湖, 等. 蒙脱石对黄曲霉毒素 B₁ 的吸附作用[J]. *矿物学报*, 2004, 24(4): 341–346.
- Qi DS, Liu F, Yu YH, *et al.* Study on the adsorption of aflatoxin B₁ on montmorillonite [J]. *Acta Miner Sin*, 2004, 24(4): 341–346.
- [44] 史莹华, 许梓荣, 孙宇, 等. 蒙脱石纳米复合物吸附猪日粮中黄曲霉毒素 B₁ 效果的研究[J]. *动物营养学报*, 2007, 19(6): 742–747.
- Shi YH, Xu ZR, Sun Y, *et al.* Study on adsorption of dietary aflatoxin B₁ by montmorillonite nanocomposite in pigs [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2007, 19(6): 742–747.
- [45] 齐云霞, 夏伦志, 吴东, 等. 蒙脱石对黄曲霉毒素 B₁ 吸附机制的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(35): 13606–13609.
- Qi YX, Xia LZ, Wu D, *et al.* Research progress of bonding mechanisms between aflatoxin B₁ and montmorillonite [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41(35): 13606–13609.
- [46] Fooladi MH, Farahnaky A. Aflatoxin removal from pistachio nuts by natural natrolite [J]. *J Food Sci*, 2003, 68(4): 1225–1228.
- [47] 彭春红, 周林燕, 李淑荣, 等. ⁶⁰Co-γ 射线对赭曲霉毒素 A 辐照的降解效果[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(7): 174–179.
- Peng CH, Zhou LY, Li SR, *et al.* Studies on the effects of ⁶⁰Co-γ ray radiation on the degradation of ochratoxin A [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2015, 15(7): 174–179.
- [48] Wang F, Xie F, Xue X, *et al.* Structure elucidation and toxicity analyses of the radiolytic products of aflatoxin B₁ in methanol-water solution [J]. *J Hazard Mat*, 2011, 192(3): 1192–1202.
- [49] Aziz NH, Laa M, Fme F. Reduction of fungi and mycotoxins formation in seeds by gamma-radiation [J]. *J Food Saf*, 2010, 24(2): 109–127.
- [50] Jalili M, Jinap S, Noranizan MA. Aflatoxins and ochratoxin A reduction in black and white pepper by gamma radiation [J]. *Rad Phys Chem*, 2012, 81(11): 1786–1788.
- [51] 刘斌, 熊善柏, 熊光权, 等. 辐照技术在食品污染物控制方面的研究进展[J]. *核农学报*, 2010, 24(4): 784–789.
- Liu B, Xiong SB, Xiong GQ, *et al.* Development of irradiation technique on controlling food contamination residue [J]. *J Nuclear Agric Sci*, 2010, 24(4): 784–789.
- [52] Ghanem I, Orfi M, Shamma M. Effect of gamma radiation on the inactivation of aflatoxin B₁ in food and feed crops [J]. *Brazilian J Microbiol*, 2008, (39): 787–791.
- [53] Jubeen F, Bhatti IA, Khan MZ, *et al.* Effect of UV-C irradiation on aflatoxins in ground nut (*Arachis hypogea*) and tree nuts (*Juglans regia*, *Prunus dulcis* and *Pistachio vera*) [J]. *J Chem Soc Pakistan*, 2012, 34(6): 1366–1375.
- [54] Mazaheri M. Effect of UV radiation on different concentrations of aflatoxin B₁ in pistachio [J]. *Acta Horticult*, 2012, (963): 41–46.
- [55] Kamimura H. Removal of mycotoxins during food processing [J]. *Japan Soc Mycotoxicol*, 1999, (12): 88–94.
- [56] 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.
- [57] Akbas MY, Ozdemir M. Effect of different ozone treatments on aflatoxin degradation and physicochemical properties of pistachios [J]. *J Sci Food Agric*, 2010, 86(13): 2099–2104.
- [58] Rahaie S, Emam-Djomeh Z, Razavi SH, *et al.* Evaluation of aflatoxin decontaminating by two strains of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus rhamnosus* strain GG in pistachio nuts [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2012, 47(8): 1647–1653.
- [59] 刘英丽, 毛慧佳, 刘慧琳, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 生物法脱毒机制及产物毒性评价[J]. *食品工业科技*, 2018, (3): 324–329.
- Liu YL, Mao HJ, Liu HL, *et al.* Progress in biological detoxification of aflatoxin B₁ and its degradation metabolites toxicity evaluation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, (3): 324–329.
- [60] Samuel MS, Sivaramakrishna A, Mehta A. Degradation and detoxification of aflatoxin B₁ by *Pseudomonas putida* [J]. *Int Biodeter Biodegrad*, 2014,

86(1): 202–209.

- [61] 李文明, 杨文华, 李海星, 等. 施氏假单胞菌 *F₄* 对黄曲霉毒素 *B₁* 的酶解作用及其降解产物的初步分析[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(2): 11–16.

Li WM, Yang WH, Li HX, et al. Enzymolysis of aflatoxin *B₁* by *Pseudomonas stutzeri F₄* and analysis of the degrading products [J]. Food Ferment Ind, 2013, 39(2): 11–16.

- [62] Liu DL, Yao DS, Liang YQ, et al. Production, purification, and characterization of an intracellular aflatoxin-detoxifying enzyme from *Armillariella tabescens* (E-20) [J]. Food Chem Toxicol, 2001, 39(5): 461–466.

- [63] Cao H, Liu D, Mo X, et al. A fungal enzyme with the ability of aflatoxin *B₁* conversion: purification and ESI-MS/MS identification [J]. Microbiol Res, 2011, 166(6): 475–483.

- [64] Zhao LH, Guan S, Gao X, et al. Preparation, purification and characteristics of an aflatoxin degradation enzyme from *Myxococcus fulvus* ANSM068 [J]. J Appl Microbiol, 2011, 110(1): 147–155.

- [65] Farzaneh M, Shi ZQ, 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.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



王刘庆, 博士, 主要研究方向为农产品质量与安全。

E-mail: wangliuqing2014@163.com



王 蒙, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。

E-mail: wangm@brcast.org.cn

“食品添加剂”专题征稿函

食品添加剂是为改善食品色、香、味等品质, 以及为防腐和加工工艺的需要而加入食品中的人工合成或者天然物质。食品添加剂是食品工业发展的必然产物, 食品添加剂法规和标准是保证其安全使用和保护消费者健康的重要措施。

鉴于此, 本刊特别策划“食品添加剂”专题。专题将围绕**添加剂种类**(酸度调节剂、抗结剂、消泡剂、抗氧化剂、漂白剂、膨松剂、着色剂、护色剂、酶制剂、增味剂、营养强化剂、防腐剂、甜味剂、增稠剂、香料等)、**添加剂作用及原理**、**添加剂的开发与应用**、**添加剂的滥用误用**、**添加剂的安全标准法规等**或您认为该领域有意义的话题展开讨论。计划在**2019年4月**出版。

鉴于您在该领域的成就, 主编**吴永宁**研究员特邀请您为本专题撰写稿件, 综述、研究论文、研究简报均可, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。请在**2019年3月10号**前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下, 再次感谢您的关怀与支持!

谢谢您的参与和支持!

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com(备注: 投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者登录-注册投稿-投稿选择“专题: 食品添加剂”)

E-mail: jfoodsq@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部