

真菌毒素检测与限量标准的现状与问题分析

张新中, 丁辉, 彭涛*, 吴福祥, 苗茜, 潘秀丽

(兰州市食品药品检验所, 兰州 730050)

摘要: 真菌毒素是一类由丝状真菌在适宜条件下产生的有毒次级代谢产物, 极易污染粮谷类食品、食用油及乳制品等, 具有肝毒性、肾毒性、致畸性、致癌性、免疫抑制及破坏生殖系统等毒性, 对人体危害极大, 是继农药残留、兽药残留、重金属污染后, 影响农产品质量安全的又一类关键风险因子, 极大的制约了我国农产品的出口贸易, 同时也造成了我国食品安全的又一问题。本文重点介绍了农产品中真菌毒素的类型品种、毒性特点以及不同检验方法的适用范围、限量及检出限, 阐述了真菌毒素限量标准的研究进展和标准内容, 通过对比国内外真菌毒素的研究种类和进展, 分析目前真菌毒素污染现状及存在的问题, 提出应对策略, 对真菌毒素污染检测的发展进行了展望, 对今后保障饮食安全提供科学依据。

关键词: 真菌毒素; 研究现状; 限量标准

Current situation and problems of mycotoxin detection and limitation standards

ZHANG Xin-Zhong, DING Hui, PENG Tao*, WU Fu-Xiang, MIAO Qian, PAN Xiu-Li

(Lanzhou Food and Drug Inspection Institute, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: Mycotoxins are a class of toxic secondary metabolites produced by filamentous fungi under suitable conditions. They can easily contaminate cereals, edible oils and dairy products, and have hepatotoxicity, nephrotoxicity, teratogenicity, carcinogenicity and immunity, and can inhibit and destroy the toxicity of the reproductive system, which is extremely harmful to the human body. It is another key risk factor that affects the quality and safety of agricultural products after pesticide residues, veterinary drug residues and heavy metal pollution, which greatly restricts the export trade of Chinese agricultural products. It has also caused another problem in Chinese food safety. This paper focused on the types and toxicity characteristics of mycotoxins in agricultural products, as well as the scope of application, limits and detection limits of different test methods, described the research progress and standard content of mycotoxin limit standards, by comparing the types and progress of mycotoxins at home and abroad, analyzed the current status and problems of mycotoxin contamination, proposed countermeasures, and forecasted the development of mycotoxin contamination detection, so as to provide scientific basis for ensuring food safety in the future.

KEY WORDS: mycotoxins; research status; limited standard

基金项目: 甘肃省市场监督管理局, 青年科技创新项目(2018GSFDA044)

Fund: Supported by Gansu Provincial Market Supervision Administration, Youth Science and Technology Innovation Project (2018GSFDA044)

*通讯作者: 彭涛, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 514460878@qq.com

*Corresponding author: PENG Tao, Engineer, Lanzhou Food and Drug Inspection Institute, No.988, Pengjiapin Road, Qilihe District, Lanzhou City, Gansu Province 730050, China. E-mail: 514460878@qq.com

1 引言

目前,人们发现的真菌毒素有 400 多种。我国 GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》重点关注了黄曲霉毒素 B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)、黄曲霉毒素 M₁(aflatoxin M₁, AFM₁)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、赭曲霉毒素 A(ochratoxin A, OTA)和展青毒素(patulin, PAT)6 大类真菌毒素,这些毒素都具有强毒性和高污染频率等特点,主要污染谷物、饲料、果蔬等农产品,通过食物链危害人类健康和畜禽生产安全^[1]。包括我国在内的许多国家都制定了真菌毒素的限量标准,这些限量标准是非关税壁垒的重要组成部分,也是保障我国食品安全和畜牧业健康发展的需要。本文对真菌毒素检测与限量标准的现状与问题进行了梳理、阐述和分析,以期为我国真菌毒素标准的发展提供有益的参考。

2 真菌毒素的概况

霉菌在基质中生长时会产生有毒的代谢物—真菌毒素^[1]。真菌毒素可以引起人或动物的各种病害,称为真菌毒素中毒症。真菌毒素可分为肝毒素、肾毒素、神经毒素、类激素(震颤)等^[2]。目前已知的真菌毒素种类多达 300 种以上,化学性质稳定、耐高温、耐持久、能耐受加工过程中的各种处理,几乎所有的农作物都可能被污染。

2.1 真菌毒素种类

真菌毒素主要分为 3 类,包括曲霉菌属:黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、柄曲霉毒素;镰刀菌属:T-2 毒素、呕吐类毒素、雪腐镰刀菌烯醇、玉米赤霉烯酮、伏马毒素;青霉菌属:橘青霉素、展青霉素、红色青霉毒素、青霉素等^[3-6]。

2.2 真菌毒素特点

真菌毒素是一种在食品生产、加工、包装、贮存、运输、销售、直至食用等过程中产生的或由环境污染带入的、非有意加入的化学性危害物质^[7]。真菌毒素是小分子有机化合物,不是复杂的蛋白质分子,所以在机体中无法产生抗体,也不能被机体免疫。人、畜禽食用含有真菌毒素的食物或饲料会发生急性中毒、慢性中毒及致癌作用^[8]。大部分真菌在 20~28 °C 都能生长,在 10 °C 以下或 30 °C,真菌生长显著减弱,在 0 °C 几乎不能生长。一般控制温度可以减少真菌毒素的产生^[8]。

食品中真菌毒素对健康产生危害需具备 3 个要素:真菌毒素本身的毒性;食品中真菌毒素的含量;人体摄入含有真菌毒素食品的量^[9]。根据中国农业科学院农产品加工研究所统计^[9],2001~2011 年 10 年间,受真菌毒素污染的影响,我国出口欧盟食品违例事件达 2559 起,其中真菌毒素超标占 28.6%,高于公众熟知的重金属、食品添加剂、农业残留等因素,在单一事件中比例最高。因此,真菌毒素的污染不仅给国民的食品安全造成巨大威胁,同时已成为我国农产品出口欧盟的最大阻碍,给我国粮油加工和出口企业造成了巨大经济损失。GB 2761-2017^[7]中对真菌毒素受污染品种限量有明确规定,见表 1。

3 真菌毒素标准现状

真菌毒素限量是指真菌毒素在食品原料和(或)食品成品可食用部分中允许的最大含量水平^[7]。欧盟、美国等国家真菌毒素的检验标准(或操作规范)起步较早,但涉及食品种类不多;我国虽起步晚,但历经多次修订,已经逐步形成较为完善的标准体系,可以满足现阶段使用要求。

表 1 GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》中涉及的真菌毒素种类及易受污染品种

Table 1 Mycotoxins and susceptible species involved in GB 2761-2017 National food safety standards-Limits of mycotoxins in food

毒素名称	毒性	世界卫生组织癌症研究机构划定	LD ₅₀ /(mg/kg)	易受污染品种
黄曲霉毒素 B ₁	肝毒素, 致癌物质	一类天然存在的致癌物, 剧毒物质	4.8	玉米、棉籽、花生、麦类、坚果、稻谷、香料、牛奶
黄曲霉毒素 M ₁	肝毒素, 致癌	2B 类致癌物	-	牛乳
赭曲霉毒素 A	肾毒素, 致癌物质	2B 类致癌物	20~22	豆制品、咖啡、水果、玉米、麦类、高粱、葡萄酒
脱氧雪腐镰刀菌烯醇	皮肤坏疽, 出血	3 类致癌物	70.0~76.7	玉米、麦类
玉米赤霉烯酮	雌激素综合征	3 类致癌物	-	玉米、小麦、大米、大麦、小米和燕麦等谷物
展青霉素	有毒物质, 致癌物质	3 类致癌物	10~15	水果及其制品, 尤其是苹果、山楂、梨、番茄、苹果汁和山楂片等

3.1 国外标准

国际食品法典委员会(codex alimentarius commission, CAC)对真菌毒素的限量标准有 Codex Stan 193-1995 《食品及饲料中污染物和毒素的通用标准》、Codex Stan 232-1997 《牛奶中黄曲霉毒素 M₁ 的最大限量》、《澳大利亚新西兰食品标准法典》等; 操作规范主要有 CAC/RCP 45-1997 《降低泌乳动物原料和饲料中黄曲霉毒素 B₁ 操作规范》、CAC/RCP 50-2003 《预防和降低果汁中展青霉素操作规范》等 10 余项^[10,11]。国外对真菌毒素限量指标也有

明确规定^[10], 见表 2。

3.2 我国标准

我国的真菌毒素国家限量标准从 1977 年第 1 次颁布, 历经近 40 年, 2010 年真菌毒素清理工作共分析我国现行有效的涉及真菌毒素标准 100 项, 其中食品卫生标准 27 项, 食用农产品质量安全标准 39 项, 食品质量标准 18 项, 有关的行业标准 16 项等, 涉及黄曲霉毒素 B₁、黄曲霉毒素 M₁、脱氧雪肤镰刀菌烯醇、展青霉素、赭曲霉毒素 A 及玉米赤霉烯酮 6 种真菌毒素^[12,13]。

表 2 国外标准涉及真菌毒素类别及食品种类
Table 2 Foreign standards relate to mycotoxins and food types

标准来源	国际标准	欧盟标准	澳新标准	加拿大标准	美国标准	日本标准
真菌毒素名称	黄曲霉毒素、展青霉素、赭曲霉毒素 A、伏马菌素、脱氧镰刀菌烯醇	伏马菌素	黄曲霉毒素	脱氧镰刀菌烯醇	黄曲霉毒素、脱氧镰刀菌烯醇、伏马菌素、展青霉素	黄曲霉毒素、脱氧镰刀菌烯醇、展青霉素
食品类别	11 种	6 种	2 种	2 种	9 种	3 种

注: 数据材料截止 2018 年 12 月。

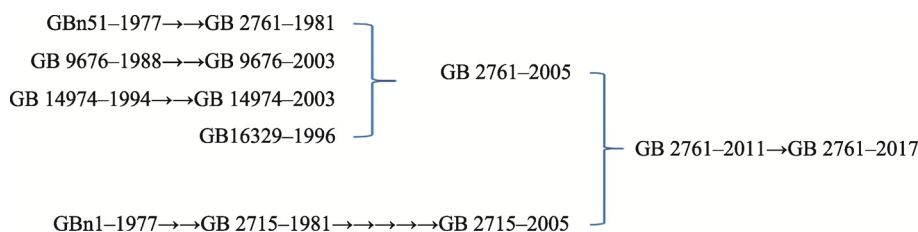


图 1 我国真菌毒素类标准修订历程
Fig.1 Revision history of mycotoxins in China

我国真菌毒素限量标准经过不断完善, 食品种类和指标数目有明显增加, 见表 3。

表 3 我国标准修订前后对比
Table 3 Comparison before and after revision of Chinese standards

标准号	污染物数目	食品类别	指标数目
GB2761-2005 (清理前)	4	8	13
GB2761-2011 (清理后)	6(增加了赭曲霉毒素 A 和玉米赤霉烯酮)	10	28

新修订的 GB 2761-2017 《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》^[7], 详细规定了食品中 6 种毒素: 黄曲霉毒素 B₁、黄曲霉毒素 M₁、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、展青霉素、赭曲霉毒素 A 及玉米赤霉烯酮的限量指标, 同时规定了 10 类食品共 40 个限量指标。其中, 婴幼儿谷类辅助食品第 1

次被收录进标准限量。

经过十几年的发展, 我国制定了一系列的真菌毒素相关标准, 但还需要在检测技术、作用毒理、公共危害等领域得到加强的基础上逐步改进和丰富。研究人员曾对我国真菌毒素的检测标准进行探讨^[14,15], 但那些被讨论过的标准很多已被废止, 侧面反映了近些年来我国真菌毒素标准制定的活跃。

3.3 我国检验标准分类

真菌毒素的检测方法主要有酶联免疫法^[16]、荧光光度法^[17,18]、高效液相色谱法^[19,20]和液相色谱-质谱联用法^[21,22]等。酶联免疫法每次只能检测 1 种真菌毒素, 通常用于快速筛查; 荧光光度法易受基质干扰, 测定黄曲霉毒素时需要进行化学衍生; 液相色谱-质谱联用法由于设备较为昂贵, 不利于检测方法的普及与推广; 高效液相色谱法具有选择性好、抗干扰能力强、灵敏度高等优点, 是目前测定真菌毒素使用最为普遍的方法之一^[23-25]。

在天然食物中以黄曲霉毒素 B₁ 最为多见, 危害性也最强, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局规定黄曲霉毒素 B₁ 是大部分食品的必检项目之一^[26]。黄曲霉毒素 B₁ 的检测方法及限量^[27]如表 4 所示。

黄曲霉毒素 M₁ 通常存在于乳制品中, 使用同位素稀释液相色谱-串联质谱法等 3 种检测方法。黄曲霉毒素 M₁ 的检测方法及限量^[28]如表 5 所示。

脱氧雪腐镰刀菌烯醇可对人、畜产生广泛的毒性效应, 如食欲降低、体重减轻、代谢紊乱等。主要 4 种检验方法, 满足于检测需求。脱氧雪腐镰刀菌烯醇的检测方法及限量^[29]如表 6 所示。

研究发现, 展青霉素的作用具有两重性。但展青霉素污染食品和饲料后产生的毒性作用远大于其药用价值, 因此它没有被作为抗生素使用而是作为生物毒素进行了研究。展青霉素的检测方法及限量^[30]如表 7 所示。

赭曲霉毒素是由曲霉属的 7 种曲霉和青霉属的 6 种青霉菌产生的一组重要的、污染食品的真菌毒素, 其中毒性最大、分布最广、产毒量最高、对农产品的污染最重、与人类健康关系最密切的是赭曲霉毒素 A^[31-33]。赭曲霉毒素 A 的检测方法及限量^[34]如表 8 所示。

玉米赤霉烯酮具有类雌激素作用, 能造成动物急慢

性中毒, 作用于生殖系统, 可使家畜、家禽和实验小鼠产生雌性激素亢进症。妊娠期的动物(包括人)食用含玉米赤霉烯酮的食物可引起流产、死胎和畸胎。玉米赤霉烯酮的耐热性较强, 110 °C 下处理 1 h 才被完全破坏^[32,33]。玉米赤霉烯酮的检测方法及限量^[35]如表 9 所示见。

4 存在的问题

农产品在生长、采收、贮运、销售等过程中, 极易受到各种病原菌的侵染而发生腐烂, 进而造成巨大的经济损失。现阶段, 真菌毒素的研究已经取得一些进展, 但是仍然存在许多问题^[36-40]。第一, 缺乏新型准确、高灵敏、高通量、低成本的检验检测技术, 提取、净化等前处理效果不理想, 加标回收率和日间精密度有待提高, 同时, 缺少真菌毒素快速筛查试剂盒。第二, 国内外真菌毒素限量标准有待完善和提高。主要表现在涉及的品种不够全面, 限量标准表述单一, 划分笼统等方面。第三, 缺少技术指导, 真菌毒素防治推广普及不到位^[41-44]。真菌毒素的国标限量是食品安全的末端保障, 正确指导农产品的仓储、加工、运输, 避免或减少真菌毒素的产生, 避免交叉污染、避免带入, 是从源头管控的有效途径^[45-47]。因此, 应严格规定农产品生长、流通各个环节的关键控制点^[48,49]。

表 4 黄曲霉毒素 B₁ 在不同食品的检验标准及限量
Table 4 Test standards and limits for aflatoxin B₁ in different foods

检验方法	检出限/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	适用范围	判定依据	限量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)
同位素稀释液 相色谱- 串联质谱法	当称取样品 5 g 时, 检出限为 0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。			
高效液相色谱- 柱前衍生法	当称取样品 5 g 时, 柱前衍生法的检出 限为 0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。			
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》	当称取样品 5 g 时, 柱后光化学衍生法、 柱后溴衍生法、柱后碘衍生法、柱后电 化学衍生法的检出限为 0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定 量限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 无衍生器法的检出限 为 0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	谷物及其制品、豆类 及其制品、坚果及籽类、 油脂及其制品、调味品、 婴幼儿配方食品和 婴幼儿辅助食品	GB 2761-2017 《食品安全国家 标准食品中真菌 毒素限量》	谷物及其制品: 5.0~20 豆类及其制品: 5.0 坚果及籽类: 5.0~20 油脂及其制品: 10~20 调味品: 5.0 特殊膳食用食品: 0.5 (覆盖面: 6 类食品)
酶联免疫 吸附筛查法	当称取谷物、坚果、油脂、调味品等样 品 5 g 时, 方法检出限为 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量 限为 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 当称取特殊膳食用食品样 品 5 g 时, 方法检出限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。			
薄层色谱法	最低检出量为 0.0004 μg , 检出限为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	谷物及其制品、豆类及 其制品、坚果及籽类、 油脂及其制品、调味品		

表 5 黄曲霉毒素 M₁ 在不同食品的检验标准及限量
Table 5 Test standards and limits for aflatoxin M₁ in different foods

检验方法	检出限/(μg/kg)	适用范围	判定依据	限量/(μg/kg)	
GB 5009.24-2016《食品安全国家标准食品中黄曲霉毒素 M 族的测定》	同位素稀释液相色谱-串联质谱法	称取液态乳、酸奶 4 g 时, 检出限为 0.005 μg/kg, 定量限为 0.015 μg/kg; 称取乳粉、特殊膳食用食品、奶油和奶酪 1 g 时, 检出限为 0.02 μg/kg, 定量限为 0.05 μg/kg。	乳、乳制品和含乳特殊膳食用食品	GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》	乳及乳制品: 0.5 特殊膳食用食品: 0.5 (覆盖面: 2 类食品)
	高效液相色谱法	称取液态乳、酸奶 4 g 时, 检出限为 0.005 μg/kg, 定量限为 0.015 μg/kg; 称取乳粉、特殊膳食用食品、奶油和奶酪 1 g 时, 检出限为 0.02 μg/kg, 定量限为 0.05 μg/kg。			
	酶联免疫吸附筛查法	称取液态乳 10 g 时, 检出限为 0.01 μg/kg, 定量限为 0.03 μg/kg。称取乳粉和含乳特殊膳食用食品 10 g 时, 检出限为 0.1 μg/kg, 定量限为 0.3 μg/kg。称取奶酪 5 g 时, 检出限为 0.02 μg/kg, 定量限为 0.06 μg/kg。			

表 6 脱氧雪腐镰刀菌烯醇在不同食品的检验标准及限量
Table 6 Test criteria and limits for deoxynivalenol in different foods

检验方法	检出限/(μg/kg)	适用范围	判定依据	限量/(μg/kg)	
GB 5009.111-2016《食品安全国家标准食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰化衍生物的测定》	同位素稀释液相色谱-串联质谱法	当称取谷物及其制品、酒类、酱油、醋、酱及酱制品试样 2 g 时, 检出限为 10 μg/kg, 定量限为 20 μg/kg。当称取酒类试样 5 g 时, 检出限为 5 μg/kg, 定量限为 10 μg/kg。	谷物及其制品、酒类、酱油、醋、酱及酱制品	GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》	谷物及其制品: 1000 (覆盖面: 1 类食品)
	免疫亲和层析净化高效液相色谱法	当称取谷物及其制品、酱油、醋、酱及酱制品试样 25 g 时, 检出限为 100 μg/kg, 定量限为 200 μg/kg; 当称取酒类试样 20 g 时, 检出限为 50 μg/kg, 定量限为 100 μg/kg。			
	薄层色谱测定法	最低检出量为 100 ng, 检出限为 300 μg/kg。			
	酶联免疫吸附筛查法	当称取谷物及其制品样品 5 g 时, 检出限为 200 μg/kg, 定量限为 250 μg/kg。			

表 7 展青霉素在不同食品的检验标准及限量
Table 7 Test standards and limits for patulin in different foods

检验方法	检出限/(μg/kg)	适用范围	判定依据	限量/(μg/kg)	
GB 5009.185-2016《食品安全国家标准食品中展青霉素的测定》	同位素稀释液相色谱-串联质谱法	净化方式为混合型阴离子交换柱的澄清果汁、苹果酒的检出限和定量限为 1.5 μg/kg 和 5 μg/kg, 固体、半流体的检出限和定量限为 3 μg/kg 和 10 μg/kg; 净化方式为净化柱法的澄清果汁、苹果酒的检出限和定量限为 3 μg/kg 和 10 μg/kg, 固体、半流体的检出限和定量限为 6 μg/kg 和 20 μg/kg。	苹果和山楂为原料的水果及其制品、果蔬汁类和酒类	GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》	水果及其制品: 50 饮料类: 50 酒类: 50 (覆盖面: 3 类食品)
	高效液相色谱法	液体试样的检出限为 6 μg/kg, 定量限为 20 μg/kg; 固体、半流体试样的检出限为 12 μg/kg, 定量限为 40 μg/kg。			

表 8 赭曲霉毒素 A 在不同食品的检验标准及限量
Table 8 Test standards and limits for ochratoxin A in different foods

检验方法	检出限/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	适用范围	判定依据	限量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)
免疫亲和层析净化液相色谱法	粮食和粮食制品、食用植物油、大豆、油菜籽、葡萄干、胡椒粒/粉的检出限和定量限分别为 0.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；酒类的检出限和定量限分别为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 0.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；酱油、醋、酱及酱制品的检出限和定量限分别为 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	谷物、油料及其制品、酒类、酱油、醋、酱及酱制品、葡萄干、胡椒粒/粉		谷物及其制品: 5.0 豆类及其制品: 5.0 酒类: 2.0 坚果及籽类: 5.0 饮料类: 5.0~10.0 (覆盖面: 5类食品)
GB 5009.96-2016《食品安全国家标准食品中赭曲霉毒素 A 的测定》	离子交换固相萃取柱净化高效液相色谱法	葡萄酒检出限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{L}$, 定量限为 0.33 $\mu\text{g}/\text{L}$; 其他样品检出限为 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 3.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	玉米、稻谷(糙米)、小麦、小麦粉、大豆、咖啡、葡萄酒	GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》
免疫亲和层析净化液相色谱-串联质谱法	玉米、小麦等粮食产品、辣椒及其制品等检出限和定量限分别为 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；啤酒等的检出限和定量限分别为 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；熟咖啡、酱油等的检出限和定量限分别为 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	玉米、小麦等粮食产品、辣椒及其制品等、啤酒等酒类、酱油等产品、生咖啡、熟咖啡		
酶联免疫吸附测定法	检出限和定量限分别为 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	玉米、小麦、大麦、大米、大豆及其制品		
薄层色谱测定法	检出限为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	小麦、玉米、大豆		

表 9 玉米赤霉烯酮在不同食品的检验标准及限量
Table 9 Test standards and limits for zearalenone in different foods

检验方法	检出限/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	适用范围	判定依据	限量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)
GB 5009.209-2016《食品安全国家标准食品中玉米赤霉烯酮的测定》	液相色谱法	粮食和粮食制品的检出限为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；酒类的检出限为 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 66 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；酱油、醋、酱及酱制品的检出限为 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 165 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；大豆、油菜籽、食用植物油的检出限为 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限 33 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	粮食和粮食制品, 酒类, 酱油、醋、酱及酱制品, 大豆、油菜籽、食用植物油	GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》
荧光光度法	检出限为 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 33 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	大豆、油菜籽、食用植物油		谷物及其制品: 60 (覆盖面: 1类食品)
液相色谱-质谱法	检出限为 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。	牛肉、猪肉、牛肝、牛奶、鸡蛋		

5 展望

食用农产品、油脂及其制品等都是我国重要的食用消费品, 同时也是真菌毒素的主要污染来源之一。如何快速、高效地探寻出针对特定真菌毒素阻控技术和现场检测技术将成为今后研究的重点和难点。使用化学杀菌剂和消毒剂可达到较好的抑菌效果, 但是化学残留的问题一直没有得到有效解决, 为此项技术的推广带来了诸多困难。立足于生物控制具有环境友好的优点, 采取生物和化学相结合的

方法, 开发高效、低毒的杀菌剂、消毒剂和环境友好的拮抗微生物产品能够更好地避免产毒真菌侵入, 减少食品携带产毒菌的可能性^[50,51]。未来应更加注重毒素累积的关键点, 把握源头和过程控制, 建立绿色、安全、环保的真菌毒素全程管控技术规范。最后, 在原有基础上不断研发检测方法特别是快检方法, 补充毒理学实验及安全性评价。

参考文献

- [1] Stoev SD. Foodborne Mycotoxicoses, risk assessment and underestimated hazard of masked mycotoxins and joint mycotoxin effects

- or interaction[J]. *Environ Toxicol Pharm*, 2015, 39(2): 794–809.
- [2] Rocha M, Maia F, Guedes M, *et al*. Mycotoxins and their effects on human and animal health [J]. *Food Control*, 2014, 36(1): 159–165.
- [3] 黄天培, 何佩茹, 潘洁茹, 等. 食品常见真菌毒素的危害及其防止措施[J]. *生物安全学报*, 2011, 20(2): 108–112.
Huang TP, He PR, Pan JR, *et al*. Health hazard to humans and prevention strategies of food-borne mycotoxins [J]. *J Bio saf*, 2011, 20(2): 108–112.
- [4] 罗自生, 秦雨, 徐艳群, 等. 黄曲霉毒素的生物合成、代谢和毒性研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(3): 250–257.
Luo ZS, Qin Y, Xu YQ, *et al*. Recent progress in the biosynthesis, metabolism and toxicity of aflatoxins [J]. *Food Sci*, 2015, 36(3): 250–257.
- [5] 刘东璞, 卢凤美, 姚海涛, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 诱导大鼠肝癌模型的建立[J]. *黑龙江医药科学*, 2012, 35(6): 47–48.
Liu DP, Lu FM, Yao HT, *et al*. Establishment of a rat model of liver cancer induced by aflatoxin B₁ [J]. *Heilongjiang Med Sci*, 2012, 35(6): 47–48.
- [6] 张维蔚, 何洁仪, 李迎月, 等. 2009-2013 年广州市市售粮油食品黄曲霉毒素 B₁ 调查[J]. *中国食品卫生杂志*, 2015, 27(3): 291–294.
Zhang WW, He JY, Li YY, *et al*. Analysis on contamination of aflatoxin B₁ in food and oil in Guangzhou from 2009 to 2013 [J]. *Chin J Food Hygi*, 2015, 27(3): 291–294.
- [7] GB 2761-2017 食品安全国家标准食品中真菌毒素限量[S].
GB 2761-2017 National food safety standards-Limits of mycotoxins in food [S].
- [8] 静平, 宋琳琳, 鲍蕾, 等. 植物油中真菌毒素污染的防控[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(12): 3843–3847.
Jing P, Song LL, Bao L, *et al*. The prevention of mycotoxins in vegetable oil [J]. *J Food SafQual*, 2014, 5(12): 3843–3847.
- [9] 孟雯, 真菌毒素超标已成我国农产品出口欧盟最大阻碍[J]. *食品安全导刊*, 2014, (11): 15.
Meng W. Excessive toxins have become the biggest obstacle to Chinese agricultural exports to the EU [J]. *Chin Food Saf Mag*, 2014, (11): 15.
- [10] WHO. Global strategy for food safety: safer food for better health. Food safety programme 2002 [Z]. Geneva, Switzerland: world health organization (WHO), 2002.
- [11] FAO. Worldwide regulation for mycotoxins in food and feed[Z]. Rome, Italy: food and agriculture organization of the United Nations, 2004.
- [12] 郭卫, 韩小贤, 李洋, 等. 粮油食品中真菌毒素的研究进展[J]. *粮油加工*, 2010, (7): 104–107.
Guo W, Han XX, Li Y, *et al*. Research advances of mycotoxins in cereal and oil food [J]. *Grain Oil Process*, 2010, (7): 104–107.
- [13] 李慧云, 王军, 张宝善. 真菌毒素对食品的污染及防止措施[J]. *食品研究与开发*, 2004, 25(3): 26–30.
Li HY, Wang J, Zhang BS. Pollution of mycotoxins to food and preventive measures [J]. *Food Res Dev*, 2004, 25(3): 26–30.
- [14] 刘莹, 王珮玥, 刘雪平, 等. 我国现行食品与饲料中真菌毒素限量及检测标准概述[J]. *中国酿造*, 2014, 33(7): 10–19.
Liu Y, Wang PY, Liu XP, *et al*. Review of current Chinese regulations of maximum residue levels and testing standard of mycotoxin in foods and feeds [J]. *Chin Brew*, 2014, 33(7): 10–19.
- [15] 苏福荣, 王松雪, 孙辉, 等. 国内外粮食中真菌毒素限量标准制定的现状与分析[J]. *粮油食品科技*, 2007, 15(6): 57–59.
Su FR, Wang SX, Sun H, *et al*. The state of mycotoxin maximum limit of grain [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2007, 15(6): 57–59.
- [16] 曹冬梅, 许杨, 涂追, 等. 基于纳米抗体-碱性磷酸酶融合蛋白的一步酶联免疫吸附分析法检测黄曲霉毒素 B₁ [J]. *分析化学*, 2016, 44(7): 1085–1091.
Cao DM, Xu Y, Tu Z, *et al*. One-step enzyme linked immunosorbent assay for detection of aflatoxin B₁ using a nanobody-alkaline phosphatase fusion protein [J]. *Chin J Anal Chem*, 2016, 44(7): 1085–1091.
- [17] 王晶, 张鹏, 张艺兵, 等. 免疫亲和层析净化荧光光度法快速测定酱油及醋中黄曲霉毒素[J]. *中国食品卫生杂志*, 2003, 15(5): 412–414.
Wang J, Zhang P, Zhang YB, *et al*. Determination of aflatoxins in soy sauce and vinegar by fluorometry coupled with immunoaffinity column [J]. *Chin J Food Hyg*, 2003, 15(5): 412–414.
- [18] 胡佳薇, 田丽, 王敏娟, 等. 超高效液相色谱-大体积流通池荧光法检测食品中的 4 种黄曲霉毒素[J]. *中国卫生检验杂志*, 2017, 27(8): 1109–1111, 1130.
Hu JW, Tian L, Wang MJ, *et al*. Determination of 4 aflatoxin in food by ultra-high performance liquid chromatography and fluorimetric detection combined with large volume flow cell [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2017, 27(8): 1109–1111, 1130.
- [19] 黎睿, 谢刚, 王松雪. 高效液相色谱法同时检测粮食中常见 8 种真菌毒素的含量[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 206–210.
Li R, Xie G, Wang SX. Simultaneous analysis of 8 mycotoxins in grains by high performance liquid chromatography [J]. *Food Sci*, 2015, 36(6): 206–210.
- [20] Jinap S, Rahmani A, Khatib A, *et al*. Simultaneous detection of 12 mycotoxins in cereals using RP-HPLC-PDA-FLD with PHRED and a post-column derivatization system [J]. *Food Addit Contam*, 2011, 28(4): 494–501.
- [21] 李蓉, 何春梅, 杨璐齐, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法测定焙烤食品及其原料中 11 种真菌毒素[J]. *色谱*, 2017, 35(8): 808–815.
Li R, He CM, Yang LQ, *et al*. Determination of 11 mycotoxins in baked foods and raw materials by ultra performance liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high-resolution mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2017, 35(8): 808–815.
- [22] 高蓓, 姜德铭, 杨永坛. 同位素内标-液相色谱-串联质谱法同时测定粮食及其制品中的 5 种真菌毒素[J]. *色谱*, 2017, 35(6): 601–607.
Gao B, Jiang DM, Yang YT. Simultaneous determination of five mycotoxins in various grains and their products by liquid chromatography-tandem mass spectrometry with isotope internal standard [J]. *Chin J Chromatogr*, 2017, 35(6): 601–607.
- [23] 王刘庆, 姜冬梅, 王瑶, 等. 果品及其制品中赭曲霉毒素 A 污染的发生、控制和检测[J]. *食品科学*, 2018, 39(23): 289–298.
Wang LQ, Jiang DM, Wang Y, *et al*. Occurrence, control and determination of ochratoxin A contamination in fruits, nuts and related products [J]. *Food Sci*, 2018, 39(23): 289–298.
- [24] 张牧臣, 郑楠, 王加启. 食品中黄曲霉毒素 B₁ 污染研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 312–320.
Zhang MC, Zheng N, Wang JQ. Aflatoxin B₁ contamination in foods: areview [J]. *Food Sci*, 2018, 39(7): 312–320.
- [25] 涂青, 邓秀娟, 伍贤学, 等. 普洱茶黄曲霉毒素污染风险及其抑制研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(13): 4180–4186.
Tu Q, Deng XJ, Wu XX, *et al*. Research progress on the risk of aflatoxin contamination and its inhibition in Pu'er tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(13): 4180–4186.
- [26] FAO/WHO. Pesticide residues in food 1994. Report of the joint meeting of the FAO panel of experts on pesticide residues in food and the environment and the WHO expert group on pesticide residues [EB/OL]. [2005-05-30]. <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPP/Pesticid/JMPR/Download/94eva/prelim.pdf>.

- [27] 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[S].
GB 5009.22-2016 National food safety standard-Determination of aflatoxin group B and G in food [S].
- [28] Sirot V, Fremy JM, Leblanc JC. Dietary exposure to mycotoxins and health risk assessment in the second french total diet study [J]. Food Chem Toxicol, 2013, 52: 1-11.
- [29] GB 5009.111-2016 食品安全国家标准食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰化衍生物的测定[S].
GB 5009.111-2016 National food safety standard-Determination of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in food [S].
- [30] GB 5009.185-2016 食品安全国家标准食品中展青霉素的测定[S].
GB 5009.185-2016 National food safety standard-Determination of patulin in food [S].
- [31] Abia WA, Warth B, Sulyok M, *et al.* Determination of multi-mycotoxin occurrence in cereals, nuts and their products in Cameroon by liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) [J]. Food Control, 2013, 31(2): 438-453.
- [32] Assatarakul K, Churey JJ, Manns DC, *et al.* Patulin reduction in apple juice from concentrate by UV radiation and comparison of kinetic degradation models between apple juice and apple cider [J]. J Food Prot, 2012, 75(4): 717-724.
- [33] Cheong KK, Strub C, Montet D, *et al.* Effect of different light wavelength on the growth and ochratoxin A production in *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus westerdijkiae* [J]. Fungal Biol, 2016, 120(5): 745-751.
- [34] GB 5009.96-2016 食品安全国家标准食品中赭曲霉毒素 A 的测定[S].
GB 5009.96-2016 National food safety standard-Determination of ochratoxin A in food safety standard [S].
- [35] GB 5009.209-2016 食品安全国家标准食品中玉米赤霉烯酮的测定[S].
GB 5009.209-2016 National food safety standard-Determination of zearalenone in food [S].
- [36] 邹忠义, 黄斐, 李洪军. 紫外光辐照对脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 毒素的去除作用[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 7-11.
Zou ZY, Huang F, Li HJ. Removal of deoxynivalenol and T-2 Toxin by ultraviolet irradiation [J]. Food Sci, 2015, 36(19): 7-11.
- [37] 邹忠义, 黄斐, 孙建利, 等. 食品添加剂对脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 毒素体外去除作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(4): 1613-1624.
Zou ZY, Huang F, Sun JL, *et al.* Effects of food additives on the removal of inolenol and T-2 toxins from deoxygenated sickles [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(4): 1613-1624.
- [38] 袁毅, 张一平, 董曼佳, 等. 时间分辨荧光免疫层析法检测大米中黄曲霉毒素 B₁ 的不确定度分析[J]. 生物加工过程, 2018, 16(2): 93-101.
Yuan Y, Zhang YP, Dong MJ, *et al.* Uncertainty analysis of the detection of aflatoxin B₁ in rice by time-resolved fluorescence immunochromatographic [J]. Chin J Bioproc Eng, 2018, 16(2): 93-101.
- [39] 毕小娟, 陈代文, 余冰, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 对断奶仔猪生长性能、肝脏组织及肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(8): 3276-3284.
Bi XJ, Chen DW, Yu B, *et al.* Effects of aflatoxin B₁ on growth performance liver tissue and intestinal health of weaning piglets [J]. J Anim Nutr, 2018, 30(8): 3276-3284.
- [40] Ayse BE, Atilla E. DNA damage checkpoint response to aflatoxin B₁ [J]. Environ Toxicol Pharm, 2018.
- [41] Mohamed SA, Ahmed MNA, Adham AAS, *et al.* Effect of some safe feed additives on growth performance, blood biochemistry, and bioaccumulation of aflatoxin residues of Nile tilapia fed aflatoxin-B₁ contaminated diet [J]. Aquaculture, 2018.
- [42] Willison EC, Larissa BR, Antnio PN, *et al.* Extended validation of a sensitive and robust method for simultaneous quantification of aflatoxins B₁, B₂, G₁ and G₂ in Brazil nuts by HPLC-FLD [J]. J Food Compos Anal, 2017, 60: 90-96.
- [43] 陈芳芳, 栾传磊, 王林, 等. 玉米中黄曲霉毒素 B₁ 等 3 种真菌毒素的高效液相色谱测定法[J]. 环境与健康杂志, 2016, (7).
Chen FF, Luan CL, Wang L, *et al.* High performance liquid chromatography for determination of *Aspergillus aflatoxin B₁* in Corn [J]. J Environ Health, 2016, 7.
- [44] Nicholas WT, Heli B, Monika SV, *et al.* Analytical methods for determination of mycotoxins: An update (2009-2014) [J]. Anal Chim Acta, 2015.
- [45] 李昆, 姚婷, 宁雪雪, 等. 黄曲霉毒素的研究进展[J]. 农产品加工, 2017, 12.
Li K, Yao T, Ning XX, *et al.* Research progress on aflatoxin [J]. Process Agric Prod, 2017, 12.
- [46] Nicole J. Mitchell, Erin B, *et al.* Potential economic losses to the US corn industry from aflatoxin contamination [J]. Food Addit Contam A, 2016, (3).
- [47] Stefania V, Vincenzo L, Michelangelo P, *et al.* Determination of deoxynivalenol in wheat bran and whole-wheat flour by fluorescence polarization immunoassay [J]. Food Anal Method. 2014, (4).
- [48] GB 2761-2011 食品安全国家标准食品中真菌毒素限量[S].
GB 2761-2011 National food safety standard-Limit of mycotoxins in food [S].
- [49] Pestka JJ, Zhou HR, Moon Y, *et al.* Cellular and molecular mechanisms for immune modulation by deoxynivalenol and other trichothecenes: unraveling a paradox [J]. Toxicol Lett, 2004, 153(1): 61-73.
- [50] Ttipathi S, Mishra HN. Studies on the efficacy of physical, chemical and biological aflatoxin B₁ detoxification approaches in red chilli powder [J]. Int J Food Saf Nutr Publ Health, 2009, 2(1): 69-77.
- [51] Jiang HY, Wang WJ, Zhu JH, *et al.* Determination of zearanol and its metabolites in bovine muscle and liver by a chemiluminescence enzyme immunoassay: Compared to an ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectroscopy method [J]. Luminescence, 2014, 29(4): 393-400.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



张新中, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为食品检测及质量管理。
E-mail: 1049834448@qq.com



彭涛, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品检验检测。
E-mail: 514460878@qq.com