

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250206007

引用格式: 郝伟, 杨利芳, 王亮, 等. 食品中常见真菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 165–172.

HAO W, YANG LF, WANG L, *et al.* Development of detecting method of mycotoxins in the food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 165–172. (in Chinese with English abstract).

食品中常见真菌毒素检测技术研究进展

郝 伟, 杨利芳, 王 亮, 刘 琳, 陈志敏*

(石家庄市食品药品检验中心, 石家庄 050031)

摘 要: 真菌毒素是一类由丝状真菌在特定环境条件下产生的有毒次生代谢产物, 具有肾毒性、肝毒性、神经毒性和致畸、致癌以及致突变性, 这类毒素可通过污染谷物、果蔬、坚果等农产品及其加工制品进入食物链, 对人体健康构成严重威胁。因此, 开发高效、灵敏的食品中真菌毒素检测技术显得尤为重要。本文针对目前食品中常见的真菌毒素检测技术进行了系统综述, 重点探讨了不同检测技术在灵敏度、特异性、多组分同步检测以及现场快速筛查方面的技术特征, 剖析了复杂食品基质干扰消除、痕量毒素精准定量、检测标准物质研制等关键技术瓶颈, 为该领域内的深入研究以及国家等各级检测标准的更新优化提供参考, 以期进一步提升食品中真菌毒素检测的准确性和效率, 为食品安全保障提供有力支撑。

关键词: 真菌毒素; 食品检测; 前处理技术; 检测技术

Development of detecting method of mycotoxins in the food

HAO Wei, YANG Li-Fang, WANG Liang, LIU Lin, CHEN Zhi-Min*

(Shijiazhuang Food and Drug Inspection Center, Shijiazhuang 050031, China)

ABSTRACT: Fungal toxins are a class of toxic secondary metabolites produced by filamentous fungi under specific environmental conditions, with nephrotoxicity, hepatotoxicity, neurotoxicity, teratogenicity, carcinogenesis, and mutagenicity. These toxins can enter the food chain by contaminating agricultural products such as grains, fruits, vegetables, nuts, and their processed products, posing a serious threat to human health. Therefore, developing efficient and sensitive detection techniques for fungal toxins in food is particularly important. This article provided a systematic review of common fungal toxin detection technologies in food, focusing on the technical characteristics of different detection technologies in sensitivity, specificity, multi-component synchronous detection, and on-site rapid screening, analyzed the key technical bottlenecks such as complex food matrix interference elimination, precise quantification of trace toxins, and development of detection standard substances, providing reference for in-depth research in this field and the updating and optimization of national and other levels of detection standards, in order to further improve the accuracy and efficiency of fungal toxin detection in food and provide strong support for food safety assurance.

KEY WORDS: mycotoxin; food detection; pretreatment technology; detection technology

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 河北省市场监督管理局科研计划项目(2023ZC47)

第一作者: 郝伟(1983—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品药品安全检测。E-mail: 282060290@qq.com

*通信作者: 陈志敏(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 934266779@qq.com

0 引 言

真菌毒素是一类由产毒丝状真菌在食品中生长繁殖过程中产生的次生有毒代谢产物,主要是由一些子囊菌属的真菌产生,微量的真菌毒素即可对人体或动物的肾脏、肝脏等器官构成严重的威胁^[1]。目前真菌毒素污染仍然是造成食品污染的主要原因之一,其化学性质稳定,加工、储存均难以去除^[2],这些毒素具有不同程度的致癌、致畸、致突变、抑制免疫系统效应,一旦经食物链进入体会干扰正常新陈代谢,造成氧化应激诱导细胞癌变,损害生命健康^[3]。

食品中含有真菌毒素,不仅会影响食品的口感和营养价值,还会降低食品的安全性,影响消费者的健康。同

时,含有真菌毒素的食品在农产品贸易中也会受到限制,影响农产品的出口^[4]。因此多国对真菌毒素在食品中的含量制定了卫生标准并进行严格的监管^[5],我国 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》基于风险评估原则,筛选出可能对公众健康构成较大风险的真菌毒素,包括黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)、黄曲霉毒素 M₁ (aflatoxin, AFM₁)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (vomitoxin, DON)、展青霉素、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)及玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)^[6-12],其中针对消费者膳食暴露量产生较大影响的食物设定了限量要求,且国家市场监督管理总局在《全国食品安全监督抽检实施细则》中也根据食品分类体系,对各品类真菌毒素作出具体要求(见表 1),全力保障食品安全。

表 1 食品污染物中主要真菌毒素特性及限量要求
Table 1 Characteristics and limits of major mycotoxins in food

序号	真菌毒素	特性	较大风险食品类别	检测标准/限量要求
1	AFB ₁	肝脏毒性、I类致癌物,高致癌、高致畸、高突变型特点,在常见的真菌毒素中毒性最强	小麦粉、大米、挂面、谷物加工品、玉米粉、谷物粉类、食用植物油、酿造酱、半固体复合调味料、坚果与籽类、熟制方便食品、罐头、速冻面米食品、速冻谷物食品、膨化食品、炒货食品及坚果制品、发酵豆制品、婴幼儿谷类辅助食品、辅食营养补充品、孕妇及乳母营养补充品、运动营养食品、特殊医学用途配方食品、婴幼儿配方食品、餐饮食品(自制花生制品)、食用农产品(生干籽类)	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》/0.5~20 μg/kg
2	AFM ₁	由黄曲霉菌、寄生曲霉和赭曲霉等真菌在特定条件下产生的次级代谢产物, I类致癌物,高致癌、高致畸、高突变型特点	辅食营养补充品、孕妇及乳母营养补充品、运动营养食品、特殊医学用途配方食品、婴幼儿配方食品	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》/0.5 μg/kg
3	DON	主要由禾谷镰刀菌、尖孢镰刀菌、串珠镰刀菌、拟枝孢镰刀菌、粉红镰刀菌、雪腐镰刀菌等菌产生,具有明显的胚胎毒性和致畸作用	小麦粉、玉米粉(片、渣)	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》/1000 μg/kg
4	展青霉素	由曲霉和青霉等真菌产生的一种次级代谢产物,影响生育、致畸、致癌等,是一种神经毒素	果蔬汁类及其饮料、果酒(发酵型)	GB 5009.185—2016《食品安全国家标准 食品中展青霉素的测定》/50 μg/kg
5	OTA	由曲霉和青霉等真菌产生的一种次级代谢产物,主要侵害肝脏与肾脏,二级 B 类致癌物	小麦粉、大米、谷物加工品、玉米粉(片、渣)、谷物碾磨加工品、焙烤咖啡、食用农产品(豆类)	GB 5009.96—2016《食品安全国家标准 食品中赭曲霉毒素 A 的测定》/2.0~10.0 μg/kg
6	ZEN	是由镰刀菌属产生一种毒素,具有免疫毒性、细胞毒性和肝毒性等毒理作用	小麦粉、玉米粉(片、渣)	GB 5009.209—2016《食品安全国家标准 食品中玉米赤霉烯酮的测定》/60 μg/kg

为了预防和减少真菌毒素带来的危害,保障人民食品安全,在做好食品仓储、运输以防止霉菌滋生的同时,进行真菌毒素的检测尤为重要,将其对人类的潜在风险和资源的浪费降到最低。本文对近年来食品中常见真菌毒素检测过程中的前处理技术和检测技术进行总结和比对,以期对真菌毒素的检测及研究提供理论参考。

1 前处理技术

在真菌毒素检测过程中,由于实际样品中毒素含量较低且样品基质复杂,易对检测过程产生干扰,因此在仪器分析之前需对毒素进行高效的富集、分离、净化,从而保障检测结果的准确性和可靠性。目前,国内外针对真菌毒素最常见的样品前处理净化技术主要有免疫亲和柱(immuoaffinity column, IAC)净化技术、固相萃取(solid phase extraction, SPE)技术、液-液萃取(liquid-liquid extraction, LLE)技术、QuEChERS (quick, easy, cheap, effective, rugged, safe)等技术。

1.1 IAC 净化技术

IAC 是利用生物大分子具有对某一类生物大分子特异识别和可逆结合的特性而制成,用以分析检测抗体或抗原的亲亲和层析柱。IAC 净化过程包括上样、淋洗与洗脱 3 个步骤,以实现抗体对被测物的特异性识别,其具有高选择性、高亲和力及易于操作的优势,因此广泛应用于食品安全、蛋白质组学及生物医药等领域中的分离和纯化^[13-14]。在食品安全领域,IAC 技术的创新应用,推动了多毒素同步检测技术的发展。孟春杨等^[15]针对火锅底料基质复杂、多毒素共存的检测难点,开发了五联复合 IAC 用于提取液净化,可同时定性及定量检测火锅底料中的 AFB₁、黄曲霉毒素 B₂ (aflatoxin B₂, AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁ (aflatoxin G₁, AFG₁)、黄曲霉毒素 G₂ (aflatoxin G₂, AFG₂)和 OTA,为火锅底料中真菌毒素暴露的风险评估提供了技术支撑。邵亮亮等^[16]通过建立 DON、ZEN、AFB₁、OTA 的四合一复合 IAC 同步净化、柱后光化学衍生、高效液相色谱二极管阵列检测器和荧光检测器同时检测,实现小麦中这 4 种真菌毒素的同时快速测定。目前 IAC 技术在食品安全检测中的发展趋势:(1)通过改造,提升多目标物同步捕获能力;(2)与新型检测技术联用形成痕量分析体系。

1.2 SPE 技术

SPE 柱是从层析柱发展而来的,基于液-固相色谱理论的样品前处理技术^[17]。采用固体吸附剂吸附、溶剂洗脱的方式富集净化目标物,具有富集倍数和回收率高、试剂用量少、操作简便等优点,主要应用于食品、生物样品以

及环境样品中目标化合物的样品前处理^[18-19]。LIU 等^[20]开发了一种基于腐植酸的 SPE 净化方法,结合液相色谱-串联质谱法对食用油中 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂ 进行了分析。腐植酸经简单处理后可直接用作 SPE 吸附剂处理稀释后的食用油,该方法具有、适应性强、处理便捷及分析快速等优点。BAYRAM 等^[21]以 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂ 为模板,采用本体聚合法制备了分子印迹聚合物,并将其用作 SPE 柱填料,实现了农产品中 4 种黄曲霉毒素的同步分离富集。然而, SPE 技术也存在批次间的重复性差,样品处理时间长,成本较高等问题。

1.3 LLE 技术

LLE 又称溶剂萃取或抽提,是利用有机物在两种互不相溶的溶剂中的溶解性不同,将有机物从一种溶剂转移到另一种溶剂的过程。该技术依赖于目标分析物在两种不同极性溶剂之间的分布情况。目前有传统 LLE^[22]、均相 LLE^[23]、分散液液微萃取等种类^[24-26]。POCHIVALOV 等^[27]使用共晶溶剂(deep eutectic solvent, DES)与玉米赤霉烯酮的酯酮和羟基形成氢键,达到其与固体样品的高效分离,加快了萃取过程并提高了提取效率样本中玉米赤霉烯酮的提取,该方法回收率达到 93%。CHEN 等^[28]采用基于天然低共熔溶剂的分散液液微萃取技术,实现了对花生油和葵花籽油中 AFB₁、AFB₂ 和 AFG₂ 的高效萃取,该前处理技术,相较于传统的 LLE,产生的废液量少、溶剂与样品消耗量低,且对环境更为友好,体现了绿色分析化学的理念与研究趋势。

1.4 QuEChERS 技术

QuEChERS 是近年来国际上最新发展起来的一种用于农产品检测的快速样品前处理技术,由美国农业部 ANASTASSIADES 教授等于 2003 年开发,该方法集快速、简单、便宜、有效、可靠和安全于一身,是利用吸附剂填料与基质中的杂质相互作用,吸附杂质从而达到净化的目的,实现多种目标物同时提取分析^[29-30]。

QuEChERS 技术主要包括乙腈提取、盐析分层、吸附除杂 3 个过程。RAUSCH 等^[31]利用 QuEChERS 前处理提取方法,富集谷物中 38 种真菌毒素用于后续的检测,该方法回收率达到 61%~120%,实现了多毒素的同步检测。QuEChERS 方法结合高效液相色谱-串联质谱法,可富集牛奶基质中 6 种玉米赤霉烯酮类化合物,使 6 种玉米赤霉烯酮类化合物的检出限和定量限范围分别达到 0.05~0.10 μg/kg 和 0.25~0.50 μg/kg,回收率达到 91.8%~114.5%^[32]。QuEChERS 技术在不同基质中可针对多种目标物的检测分析,具有良好的适用性和可靠性,为相关物质的检测提供了有效的技术手段。

食品中真菌毒素样品前处理技术详见表 2。

表 2 食品中真菌毒素前处理技术比对
Table 2 Comparison of pretreatment techniques for mycotoxins in food

技术名称	优点	缺点
IAC	高选择性和高亲和力、抗原抗体亲和力高、选择性强、稳定性较好	抗体稳定性较差、成本高、不能重复利用、耗时较长
SPE	操作简便、回收率高、稳定性好、应用范围广、易于实现自动化、固定相种类较多	处理时间较长、成本高
LLE	操作简便、广谱性好、成本低	提取效率低、耗时长、大多数需使用有机试剂、不环保
QuEChERS	高效、快速、简便、成本低、试剂用量少、安全、高通量、回收率高	提取效率较低、成本较高、需要专业的技术人员、真菌毒素含量过载时,提取效率会降低

2 检测技术

2.1 色谱技术

色谱法是利用物质的溶解性、吸附性等特性的物理化学分离方法,其分离原理是根据混合物的各组分在互不相溶的两相(称为固定相和流动相)作用的差异作为分离依据的。

2.1.1 液相色谱法

高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC)以液体为流动相,采用高压输液系统,将具有不同极性的单溶剂或不同比例的混合溶剂、缓冲液等流动相泵入装有固定相的色谱柱,在柱内各成分被分离后,进入检测器进行检测,从而实现对试样的分析。通过优化前处理、色谱柱选择及检测条件,可以显著提高检测的准确性和可靠性,为食品安全提供科学依据^[33-37]。韩伟陟等^[38]采用基于免疫磁珠净化的 HPLC 技术测定植物油中 AFB₁、AFB₂、AFG₁ 和 AFG₂ 含量,4 种毒素在 5 种商品植物油基质中的平均回收率为 74.0%~96.0%,该方法准确、灵敏且成本低,适用于植物油中 4 种黄曲霉毒素的同时定性、定量分析。

2.1.2 高效液相色谱-质谱法

高效液相色谱-质谱法 (high performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS)是将 HPLC 的分离能力和质谱(mass spectrum, MS)的鉴定能力相结合,利用液相色谱对复杂样品的高效分离能力,并发挥质谱对化合物的高灵敏度检测和准确结构鉴定的特点,其具有高准确性、高灵敏度和高通量等优势^[39-41]。严晓贤等^[42]选取 AFM₁ 等 17 种乳及乳制品中常检真菌毒素作为研究对象,通过 QuEChERS 净化结合超高效液相色谱-串联三重四极杆质谱法建立了酥油中同时检测 17 种真菌毒素的分析方法,检出限为 0.15~3.00 μg/kg,定量限为 0.50~10.00 μg/kg。该方法灵敏度好,准确度高,可作为日常监测酥油中真菌毒素的有效检测方法。类似的,黄忠亮等^[43]建立自动 SPE 前处理技术结合 HPLC-MS 法检测药食同源杂粮中 14 种真菌毒素,进行定性定量分析,该方法简单高效,灵敏准确,为杂粮基质中真菌毒素监测提供技术手段。但 HPLC-MS

技术因仪器设备昂贵、对进样液净化程度要求高等问题,一定程度上限制了该技术的广泛应用。

2.1.3 薄层色谱法

薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)是利用真菌毒素在紫外光线产生蓝紫色荧光的特性以及荧光的强弱和斑点的大小,进行判定毒素类别和含量,其优点是无需专业设备、操作简便、分离速度快,可同时分离多个样品,对样品前处理要求低等,在定性鉴定、半定量分析中发挥着重要作用。SALISU 等^[44]针对粮食基质的复杂性,对传统 TLC 方法进行系统性优化,以含 5%氯化钠的甲醇/水(3:1, V:V)为提取液,以乙腈和二氯甲烷(3:17, V:V)为展开剂,建立了 TLC 法检测黄曲霉毒素,并将该方法成功应用于 84 批次粮食样品的黄曲霉毒素检测。但 TLC 法仍存在斑点显色稳定性差和定量精度有限的局限。

2.2 免疫技术

免疫学原理是利用抗原与抗体之间的特异性结合反应,将其与一些可检测的信号如荧光、酶促反应等结合,通过检测信号进行目标物质的定性及定量分析。具有灵敏度高、特异性强、快速简便、仪器设备成本低等优势。目前,常用于真菌毒素的免疫学检测方法主要有酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)、免疫层析分析技术(immunoassay, ICA),其中 ELISA 适合大量样本初次筛查,而 ICA 操作简单,耗时短,适合现场快速检测。

2.2.1 酶联免疫吸附法

ELISA 是一种基于抗原-抗体特异性结合的高灵敏度检测技术,通过酶标记的抗体或抗原,将免疫反应转化为可定量分析的信号,从而实现对毒素的定性和定量检测。ELISA 灵敏度高、操作简便,成本低,适用于大批量样品的快速筛查^[45-47]。

由于真菌毒素作为小分子毒素,具有较低的免疫原性,难以得到相应的优异抗体^[48]。蔡冲^[49]制备建立 AFM₁ 抗独特型纳米抗体替代 AFM₁ 标准品,抗独特型纳米抗体不仅可以作为替代抗原进行免疫学检测,同时还可以替代真菌毒素标准品,建立无毒、环境友好的检测方法,可以最大程度地减小对操作人员的危害还能够避免环境的二次

污染,采用该方法对收集的 20 份实际样品进行测定,结果与高效液相色谱-串联质谱法结果具有较好的一致性。表明建立的纳米抗体替代标准品 ELISA 免疫检测方法可应用于乳制品中 AFB₁ 的污染监测。但目前纳米抗体的规模化生产仍存在稳定性较低,且对结构类似物存在交叉反应等劣势。

2.2.2 免疫层析技术

ICA 是一种基于特异性免疫反应的快速检测方法,结合了色谱层析技术和免疫标记技术,具有操作简便、快捷,无需任何特殊设备,肉眼即可观察结果等优势^[50-51]。

边瑞丽等^[52]采用芳香添加剂介导的晶种法制备金纳米棒(AuNRs),利用其独特的光学特性,成功构建了免疫层析试纸条法检测玉米中的 AFB₁,10 min 即可完成定量检测,检出限达到 0.124 ng/mL。陈绅等^[53]建立了基于金纳米花(AuNFs)标记物的免疫层析试纸条方法,可同时检测大米中 DON 和 AFB₁ 含量。选用 AuNFs 作为标记物提高了试纸条灵敏度,实现了谷物中 DON 和 AFB₁ 的多重定量检测,可视化检出限分别为 0.2 ng/mL、0.5 ng/mL,满足日常检测需求,为谷物等现场快速筛查、风险检测和预警提供了良好的检测方法。但当前 ICA 技术仍面临定量依赖主观判读、动态范围窄等局限。

2.3 生物传感器法

生物传感器是一种利用生物识别元件(如酶、抗体、抗原等)与物理化学换能器相结合的仪器,传感器能够通过生物识别元件与目标真菌毒素的特异性结合,引发一系列物理或化学变化,从而实现对真菌毒素的快速、准确检测^[54-55]。

祁兴普等^[56]通过 DNA 碱基互补配对,构建了一种新颖的比率色传感器用于 OTA 的检测,研究结果表明,在 0.01~1000 ng/mL 质量浓度范围内,A₄₀₀/A₅₈₀ 比值和 OTA 浓度的对数之间呈现良好的线性关系,检出限可达 0.033 ng/mL,成功地应用于实际样品中 OTA 的检测,回收率达到 93.9%~96.0%。方鹏等^[57]建立了一种基于靶标诱导滚环扩增放大荧光信号的无标记适配体快速检测

OTA 的生物传感器检测方法,该方法具有较高的特异性,检出限低至 6.6×10⁻² nmol/L,成功应用于稻谷样品的分析检测。该生物传感器无需复杂化学标记、操作简单、成本低廉,为食品安全现场快速检测提供了参考。

然而食品中通常存在多种毒素污染的实际情况,开发能够同时检测多种毒素的高效平台成为当前研究的必然趋势。李静芝^[58]建立了一种基于磁分离和双色上转换的高灵敏免疫荧光传感器技术,用于同时检测伏马毒素 B₁ 和 ZEN,磁分离后以 480 nm 和 550 nm 处的发射峰分别作为 AFB₁ 和 ZEN 浓度的监测信号,实现多种毒素的同时检测。秦英凯等^[59]建立磁控双色上转换荧光法同时检测玉米和燕麦粉中 OTA 与 ZEN 的含量,对 OTA 的检出限为 3.97×10⁻² ng/mL,对 ZEN 的检出限为 3.11×10⁻² ng/mL,加标回收率为 91.7%~109.4%,该方法检测灵敏度高,特异性好,为多种真菌毒素的检测提供了可靠依据。但生物传感器方法在实际应用中,可能受到样品基质复杂性的干扰,影响检测的准确性和稳定性,且该技术设备成本较高、操作流程复杂,导致其在基层检测机构的难以普及。

2.4 光谱法

光谱法是一种利用光谱信息进行物质分析的技术,在食品真菌毒素检测方面,常用的光学技术有近红外光谱法^[60]、荧光光谱^[61]、拉曼光谱^[62]、光谱成像^[63]等技术,相比传统方法,光谱分析技术具有快速、环保、无损等技术优势,更符合现代食品检测的需求。

张悦湘等^[64]构建了花生油中 AFB₁ 的表面增强拉曼光谱快速定量检测方法,该方法利用表面增强拉曼光谱技术对 AFB₁ 的特征信号进行强化,使得检出限低至 0.02 mg/kg。王成宏等^[65]采用多种化学计量学方法,基于激光诱导荧光技术检测人工污染的花生中 AFB₁,建立了对单粒花生 AFB₁ 浓度的分类和预测。结果显示,建立的定性模型能够精准判别花生是否受 AFB₁ 污染,预测正确率高达 100.00%,可应用花生中的 AFB₁ 的定性和定量检测。但该技术仍存在基质效应、模型泛化、荧光背景干扰等问题。

食品中真菌毒素检测技术详见表 3。

表 3 食品中真菌毒素的常见检测技术比对
Table 3 Comparison of detection techniques for mycotoxins in food

技术名称	优点	缺点
HPLC	高灵敏度与准确度	样品前处理和仪器检测过程复杂烦琐
HPLC-MS	高灵敏度与准确度,应用范围广	成本高,对样品的净化程度要求高
TLC	简便快捷,成本低,适合快速筛查	灵敏度低、易受主观影响,且难以精准定量
ELISA	检测速度快,可携性强,成本低	使用的抗体容易受到环境因素的影响,假阳性高
ICA	简便快捷,无需任何特殊设备	灵敏度低,假阳性高
生物传感器	高效率,操作简便	灵敏度低,抗体稳定性较差(保质期短),成本高以及不能重复利用
光谱法	操作简便,成本低,有在线识别的潜力	灵敏度低,定量精度差,分离能力有限

3 结束语

食品中真菌毒素污染作为全球食品安全治理的顽固性难题,广泛影响各种食品与农产品,尤其是在花生、玉米、坚果和豆类等食品中最为严重。真菌毒素的隐蔽性强,无法通过感官识别,理化性质稳定,且多数产毒真菌会产生多种有毒代谢产物,易造成食品中多种真菌毒素共污染,即使微量存在,也会威胁人类和动物健康,因此开发精准、快速、普适的先进检测方法意义重大。

近年来,食品真菌毒素检测研究进步显著。传统检测技术如色谱法、免疫分析法,通过优化前处理流程和升级仪器性能,提升了检测准确性与重现性。同时,基于纳米材料、生物传感器和分子印迹技术的新型检测方法发展迅猛,在快速检测、多毒素同步检测和现场快速筛查领域优势突出。CRISPR-CAS 基因编辑技术及人工智能辅助的数据分析模型,为真菌毒素高通量检测与风险预测提供新思路。然而,现有技术仍面临复杂食品基质干扰检测结果、痕量毒素富集效率低、便携式设备成本较高等挑战,亟需在标准化、实用性和跨平台整合方面实现突破。随着材料科学、生物技术与人工智能的深度融合,真菌毒素检测将向更精准、更智能、更普适的方向发展,如研发新型纳米复合材料,提升对痕量毒素的吸附与富集能力;借助人工智能算法,实现对复杂检测数据的智能分析与处理,有效克服基质干扰;通过多学科交叉,开发低成本、便携式的一体化检测设备,推动检测技术的广泛应用,为食品安全构筑起坚固防线,全方位满足日益增长的食品安全检测需求。

参考文献

- [1] AGRIOPOULOU S, STAMATELOPOULOU E, VARZAKAS T. Advances in occurrence, importance, and mycotoxin control strategies: Prevention and detoxification in foods [J]. *Foods*, 2020, 9(2): 137.
- [2] 潘程, 张云鹏, 刘晓萌, 等. 农产品中真菌毒素检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(11): 3571–3580.
PAN C, ZHANG YP, LIU XM, *et al.* Recent progress of mycotoxin determination in agricultural products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(11): 3571–3580.
- [3] ESKOLA M, KOS G, ELLIOTT CT, *et al.* Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited ‘FAO estimate’, of 25% [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(16): 2773–2789.
- [4] 程裕贵, 胡靖康, 江湖, 等. 粮食中主要真菌毒素及分析方法研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(6): 225–234.
Cheng YG, Hu JK, Jiang H, *et al.* Mycotoxins Contamination in Cereals and Analytical Methods [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(6): 225–234.
- [5] LIU Y, YAMDEU JHG, GONG YY, *et al.* A review of postharvest approaches to reduce fungal and mycotoxin contamination of foods [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1521–1560.
- [6] CACERES I, KHOURY AA, KHOURY RE, *et al.* Aflatoxin biosynthesis and genetic regulation: A review [J]. *Toxins (Basel)*, 2020, 12(3): 150.
- [7] 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: A review [J]. *Food Science*, 2018, 39(7): 312–320.
- [8] VAZ A, CABRAL SA, RODRIGUES P, *et al.* Detection methods for aflatoxin M₁ in dairy products [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(2): 246.
- [9] 蔡硕, 王周利, 岳田利, 等. 谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇控制的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(4): 1267–1275.
CAI S, WANG ZL, YUE TL, *et al.* Research progress of deoxynivalenol control in cereals and their products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(4): 1267–1275.
- [10] 王亚楠, 王志青, 祖琳, 等. 食品中展青霉素的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7410–7416.
WANG YN, WANG ZQ, ZU L, *et al.* Research progress of patulin in food [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(18): 7410–7416.
- [11] 南米娜, 辛雪燕, 薛华丽, 等. 葡萄及其制品中赭曲霉毒素 A 的污染现状及检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(3): 122–130.
NAN MN, XIN XY, XUE HL, *et al.* Research advance on the contamination status and detection of ochratoxin A in *Vitis vinifera* L. and its products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(3): 122–130.
- [12] 何雨朔, 李萌萌, 刘远晓, 等. 玉米赤霉烯酮及其衍生物的毒性和转化研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 289–297.
HE YS, LI MM, LIU YX, *et al.* Advances in studies on toxicity and transformation of zearalenone and its derivatives [J]. *Food Science*, 2023, 44(15): 289–297.
- [13] SHARMEEN S, SUH K, KYEI I, *et al.* Immunoaffinity chromatography for protein purification and analysis [J]. *Current Protocols*, 2023, 3(8): 867.
- [14] 顾一丹, 马悦, 陈金男, 等. 基于壳聚糖微球的黄曲霉毒素 B 免疫亲和柱开发制备[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(7): 217–224.
GU YD, MA Y, CHEN JN, *et al.* Development and preparation of immunoaffinity column for aflatoxin B₁ based on chitosan microspheres [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(7): 217–224.
- [15] 孟春杨, 吴玉田, 邹璐, 等. 免疫亲和柱净化超高效液相色谱测定火锅底料中的串联质谱法同时 5 种真菌毒素[J]. *食品科技*, 2024, 49(2): 334–339.
MENG CY, WU YT, ZOU L, *et al.* Simultaneous determination of 5 mycotoxins in hot pot seasoning by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with Immunoaffinity column clean-up [J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(2): 334–339.
- [16] 邵亮亮, 应美蓉, 杜京霖, 等. 复合免疫亲和柱净化高效液相色谱法同时测定小麦中的 4 种真菌毒素[J]. *食品科技*, 2021, 46(2): 328–334.
SHAO LL, YING MR, DU JL, *et al.* Simultaneous determination of four mycotoxins in wheat by high performance liquid chromatography with combination [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(2): 328–334.
- [17] ARABI M, OSTOVAN A, BAGHERI AR, *et al.* Strategies of molecular imprinting-based solid-phase extraction prior to chromatographic analysis [J]. *TrAC-Trend in Analytical Chemistry*, 2020, 128: 115923.
- [18] 王俊. 分子印迹整体柱的制备及其在痕量赭曲霉毒素 A 监测中的应用[D]. 福州: 福州大学, 2019.
WANG J. Preparation of molecularly imprinted monolithic column and their application in the monitoring of trace ochratoxin A [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019.
- [19] 刘炉英, 刘锦辉, 胡小刚. 基于核酸适配体修饰复合纳米纤维的分散固相萃取技术在赭曲霉毒素 A 检测中的应用[J]. *分析化学*, 2021,

- 49(12): 2096–2105.
- LIU LY, LIU JH, HU XG. Dispersive solid-phase extraction technology based on aptamer modified composite nanofibers and its application in detection of ochratoxin A [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49(12): 2096–2105.
- [20] LIU P, LIAO YH, ZHENG HB, *et al.* Facile dispersive solid-phase extraction based on humic acid for the determination of aflatoxins in various edible oils [J]. Analytical Methods, 2020, 12(18): 2308–2316.
- [21] BAYRAM E, YILMAZ E, UZUN L, *et al.* Multiclonal plastic antibodies for selective aflatoxin extraction from food samples [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 829–837.
- [22] 蒋志维, 覃洁, 陈谢平, 等. 高效液相色谱法测定食用植物油中黄曲霉毒素 B₁ 前处理方法的改进[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(4): 160–162.
- JIANG ZW, QIN J, CHEN XP. Improvement of pretreatment method for determination of aflatoxin B₁ in edible vegetable oil by HPLC [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(4): 160–162.
- [23] DMITRIENKO SG, APYARI VV, GORBUNOVA MV. *et al.* Homogeneous liquid-liquid microextraction of organic compounds [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2020, 75: 1371–1383.
- [24] YU FJ, ZHANG JN, TAO YM, *et al.* High-throughput subzero-temperature assisted homogenous liquid-liquid extraction for the fast sample preparation of multiple phenolic compounds in propolis [J]. Journal of Chromatography B, 2021, 1179: 122823.
- [25] JAHANI E, MOVASSAGHHAZANI M, MOGADDAM MRA. In-syringe homogenous liquid-liquid extraction combined with ionic liquid based dispersive liquid-liquid microextraction for the extraction of aflatoxin B₁ from edible vegetable oil samples prior to HPLC-FLD analysis [J]. Microchemical Journal, 2024, 197: 109690.
- [26] 邓年. 分散液液微萃取在水果果汁中真菌毒素与农药残留提取方法研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- DENG N. Study on determination of pesticides and mycotoxins in fruit juice by dispersive liquid-liquid microextraction [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
- [27] POCHIVALOV A, PAVLOVA K, GARMONOV S, *et al.* Behaviour of deep eutectic solvent based on terpenoid and long-chain alcohol during dispersive liquid-liquid micro-extraction: Determination of zearalenone in cereal samples [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 366: 120231.
- [28] CHEN M, LI M, ZHANG W X, *et al.* Natural deep eutectic solvent-based dispersive liquid-liquid microextraction coupled with direct analysis in real time mass spectrometry: A green temperature-mediated analytical strategy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(35): 10919–10928.
- [29] 赵英莲, 张梓琪, 赵鑫, 等. QuEChERS 技术在食品真菌毒素检测中的研究进展[J]. 中国酿造, 2020, 39(1): 1–5.
- ZHAO YL, ZHANG ZQ, ZHAO X, *et al.* Research progress on QuEChERS technology in the detection of mycotoxins in food [J]. China Brewing, 2020, 39(1): 1–5.
- [30] 刘远晓, 关二旗, 卞科, 等. QuEChERS 法在食品有机污染物检测中的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 294–300.
- LIU YX, GUAN ERQ, BIAN K, *et al.* A review of the application of QuEChERS in the determination of organic contaminants in foods [J]. Food Science, 2017, 38(19): 294–300.
- [31] RAUSCH AK, BROCKMEYER R, SCHWERDTLE T. Development and validation of a QuEChERS-based liquid chromatography tandem mass spectrometry multi-method for the determination of 38 native and modified mycotoxins in cereals [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(16): 4657–4669.
- [32] 谢瑜杰. 乳及乳制品中 6 种玉米赤霉烯酮类化合物残留量测定[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- XIE YJ. Determination of six zearanol residues in milk and dairy products [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [33] ZHANG B, YU LT, LU ZJ, *et al.* Rapid determination of aflatoxin B₁ by an automated immunomagnetic bead purification sample pretreatment method combined with high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Separation Science, 2020, 43(17): 3509–3519.
- [34] 梁桂娟, 张琼, 杨波. 高效液相色谱-荧光检测法检测大米中的赭曲霉毒素 A[J]. 中国酿造, 2015, 34(8): 136–138.
- LIANG GJ, ZHANG Q, YANG B. Determination of ochratoxin A in rice by HPLC-FLD [J]. China Brewing, 2015, 34(8): 136–138.
- [35] 李丹娜, 王建山. 磁性离子液体复合材料固相萃取-超高效液相色谱法测定植物油中呕吐毒素[J]. 分析试验室, 2024, 43(7): 998–1003.
- LI DN, WANG JS. Determination of vomitoxin in vegetable oils by solid-phase extraction of magnetic ionic liquid composite material with ultra performance liquid chromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2024, 43(7): 998–1003.
- [36] 于美贞. 水果及其制品中展青霉素的调查分析及食品安全影响因素的研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- YU MZ. Investigation and analysis of patulin in fruit and its products and research on influencing factors of food safety [D]. Ji'nan: Shandong University, 2023.
- [37] 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 kinds of mycotoxins in grains by high performance liquid chromatography [J]. Food Science, 2015, 36(6): 206–210.
- [38] 韩伟陟, 郑书展, 罗荪琳, 等. 免疫磁珠净化/高效液相色谱检测植物油中黄曲霉毒素含量[J]. 分析测试学报, 2024, 43(6): 921–927.
- HAN YZ, ZHENG SZ, LUO SL, *et al.* Determination of aflatoxins in vegetable oils by immunomagnetic beads cleanup with high performance chromatography [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(6): 921–927.
- [39] CANPONE L, PICCINELLI A L, CELANO R, *et al.* Rapid and automated on-line solid phase extraction HPLC-MS/MS with peak focusing for the determination of ochratoxin A in wine samples [J]. Food Chemistry, 2018, 224: 128–135.
- [40] 孙晓冬, 郝杰, 毛婷, 等. 固相萃取柱净化-超高效液相色谱-串联质谱法快速测定液态乳中 14 种真菌毒素[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 292–301.
- SUN XD, HAO J, MAO T, *et al.* Determination of 14 kinds of mycotoxins in liquid milk by solid-phase extraction coupled with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Science, 2018, 39(18): 292–301.
- [41] 张烁, 周爽, 裴晓燕, 等. 免疫亲和柱结合超高效液相色谱-串联质谱法测定牛奶中的 16 种真菌毒素比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(3): 234–242.
- ZHANG S, ZHOU S, PEI XY, *et al.* Comparative study of immunoaffinity columns combined with ultraperformance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for determination of 16 kinds of mycotoxins in milk [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(3): 234–242.
- [42] 严晓贤, 吴兴强, 夏寒, 等. 改进 QuEChERS 方法结合超高效液相色谱-串联质谱法测定酥油中 17 种真菌毒素[J/OL]. 中国油脂, 1-14. [2025-03-25]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240245>
- YAN XX, WU XQ, XIA H, *et al.* Determination of 17 kinds of mycotoxins in ghee by ultra performance liquid chromatography-tandem

- mass spectrometry coupled with a modified QuEChERS method [J/OL]. *China Oils and Fats*, 1-14. [2025-03-25]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240245>
- [43] 黄忠亮, 王海波, 廖强, 等. 液质联用法结合自动固相萃取同时测定药食同源杂粮中14种真菌毒素[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(8): 146-150.
- HUANG ZL, WANG HB, LIAO Q, *et al.* Simultaneous determination of 14 kinds of mycotoxins in medicine and food homologous coarse cereals by liquid chromatography tandem mass spectrometry combined with automatic solid phase extraction [J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(8): 146-150.
- [44] SALISU B, ANUA SM, ISHAK WW, *et al.* Development and validation of quantitative thin layer chromatographic technique for determination of total aflatoxins in poultry feed and food grains without sample clean-up [J]. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 2021, 8(4): 656
- [45] SAINI RV, VAID P, SALNI NK, *et al.* Recent advancements in the technologies detecting food spoiling agents [J]. *Journal of Functional Biomaterials*, 2021, 12(4): 67.
- [46] FADLALLA MH, LING SM, WANG RZ, *et al.* Development of ELISA and lateral flow immunoassays for ochratoxins (OTA and OTB) detection based on monoclonal antibody [J]. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2020, 10: 80.
- [47] TONG WP, FANG H, XIONG HP, *et al.* Eco-friendly fluorescent ELISA based on bifunctional phage for ultrasensitive detection of ochratoxin A in corn [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2429.
- [48] AL-RUBAYE A, NABOK A, CATANANTE G, *et al.* Detection of ochratoxin A in aptamer assay using total internal reflection ellipsometry [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 263: 248-251.
- [49] 蔡冲. 黄曲霉毒素 M₁ 抗独特型纳米抗体及无毒免疫检测方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- CAI C. Development of anti-idiotypic nanobody and its nontoxic immunoassays for aflatoxin M₁ [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [50] HE KY, BU T, ZHAO S, *et al.* Well-orientation strategy for direct binding of antibodies: development of the immunochromatographic test using the antigen modified Fe₂O₃ nanopores for sensitive detection of aflatoxin B₁ [J]. *Food chemistry*, 2021, 364: 129583.
- [51] 王宇龙, 王荷, 赵志磊, 等. 基于核酸适配体的侧流层析技术同步检测赭曲霉毒素 A 和黄曲霉毒素 B₁ [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3441-3448.
- WANG YL, WANG H, ZHAO ZL, *et al.* Synchronous detection of ochratoxin A and aflatoxin B₁ by lateral flow chromatography based on nucleic acid aptamers [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(9): 3441-3448.
- [52] 边瑞丽, 何保山, 任文洁. 基于金纳米棒免疫层析试纸条快速检测玉米中的黄曲霉毒素 B₁ [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(5): 97-103.110.
- BIAN RL, HE BS, REN WJ. Sensitive detection of aflatoxin B₁ in maize based on Au nanorods immunochromatographic test strip [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 45(5): 97-103, 110.
- [53] 陈绅, 郑欣瑶, 林梦倩, 等. 基于金纳米花免疫层析法同时检测大米中呕吐毒素和黄曲霉毒素 B₁ 含量 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 10(19): 188-196.
- CHEN S, ZHENG XY, LIN MQ, *et al.* Simultaneous detection of deoxynivalenol and aflatoxin B₁ content in rice based on gold nanoflowers immunochromatography assay [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 10(19): 188-196.
- [54] DAI S, WU S, DUAN N, *et al.* A near-infrared magnetic aptasensor for Ochratoxin A based on near-infrared upconversion nanoparticles and magnetic nanoparticles [J]. *Talanta*, 2016, 158: 246-253.
- [55] HE D, WU Z, CUI B, *et al.* Building a fluorescent aptasensor based on exonuclease-assisted target recycling strategy for one-step detection of T-2 toxin [J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12: 625-632.
- [56] 祁兴普, 王俊凯, 邹婷婷, 等. 基于磁性纳米粒子的比色适配体传感器检测赭曲霉毒素 A [J]. *食品工业科技*, 2024, 45(11): 253-259.
- QI XP, WANG JK, ZOU TT, *et al.* A colorimetric aptamer sensor based on magnetic nanoparticle for the detection of ochratoxin A [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(11): 253-259.
- [57] 方鹏, 王帅, 毛瑜, 等. 基于靶标诱导滚环扩增的无标记适配体生物传感器快速检测赭曲霉毒素 A [J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(3): 174-180.
- FANG P, WANG S, MAO Y, *et al.* A label-free aptamer biosensor for rapid detection of ochratoxin a based on target-induced rolling circle amplification [J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(3): 174-180.
- [58] 李静芝. 食品中伏马毒素 B₁ 和玉米赤霉烯酮同时检测的上转换荧光传感技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- LI JZ. Research on the upconversion fluorescence sensing technology for simultaneous detection of fumonisin B₁ and zearalenone in food [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [59] 秦英凯, 李双, 王瑜, 等. 磁控双色上转换荧光适配体传感器同时检测玉米和燕麦粉中的赭曲霉毒素 A 与玉米赤霉烯酮 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(8): 2580-2588.
- QING YK, LI S, WANG Y, *et al.* Simultaneous determination of ochratoxin A and zearalenone in maize and oat flour by magnetically controlled Bi-color upconversion fluorescent aptasensor [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(8): 2580-2588.
- [60] HE X, ZHAO T, SHEN F, *et al.* Online detection of naturally DON contaminated wheat grains from China using vis-NIR spectroscopy and computer vision [J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 201: 1-10.
- [61] 吴启芳. 激光诱导荧光光谱的开心果黄曲霉毒素 B₁ 污染检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- WU QF. Detection of aflatoxin B₁ contamination in pistachio using laser induced fluorescence spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [62] LI J, YAN H, TAN X, *et al.* Cauliflower-inspired 3D SERS substrate for multiple mycotoxins detection [J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(6): 3885-3892.
- [63] TAO F, YAO H, HRUSKA Z, *et al.* Recent development of optical methods in rapid and non-destructive detection of aflatoxin and fungal contamination in agricultural products [J]. *TrAC-trends In Analytical Chemistry*, 2018, 100: 65-81.
- [64] 张悦湘, 李永玉, 彭彦昆, 等. 花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的表面增强拉曼光谱快速检测 [J]. *分析化学*, 2023, 51(11): 1825-1834.
- ZHANG YX, LI YY, PENG YK, *et al.* Rapid detection of aflatoxin B₁ in peanut oil by surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(11): 1825-1834.
- [65] 王成宏, 何学明, 都立辉, 等. 基于激光诱导荧光光谱技术检测花生中黄曲霉毒素 B₁ [J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(8): 164-172
- WANG CH, HE XM, DU LH, *et al.* Detection of aflatoxin B₁ in peanuts based on laser induced fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(8): 164-172.

(责任编辑: 于梦娇)