DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260331007
引用格式: 白雪, 郭志远, 黄洁, 等. 药食同源物质中多种真菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 191–202.
Bai Xue, Guo Zhiyuan, Huang Jie, et al. Research progress on the detection technologies for multiple mycotoxins in medicinal and food homologous substances [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 191–202. (in Chinese with English abstract).

药食同源物质中多种真菌毒素检测技术研究进展

白 雪[1], 郭志远[1], 黄 洁[1], 李静静[1], 张书玉[2], 杨 乐[2], 朱小红[3*], 艾 芸[1*]

(1. 西安市食品药品检验所, 西安 710119; 2. 西北大学生命科学学院, 西安 710069; 3. 陕西省食品药品检验研究院, 西安 710065)

摘 要: 药食同源物质因其药食两用的特殊属性以及长期摄入的特点, 其真菌毒素污染安全问题越来越凸显。由于真菌毒素具有强毒性和蓄积性, 对人体健康产生危害, 因此实现多种真菌毒素准确、快速筛查, 已成为保障该类产品质量安全、实施有效风险监控的重点环节。本文聚焦了近 5 年来药食同源物质中常见真菌毒素污染状况, 分析了不同种类药食同源物质的基质特性, 重点综述真菌毒素检测的样品前处理技术演进、不同类别品种的优化策略及新型净化材料的应用进展, 并阐述了该领域面临的核心挑战。本文详细剖析了检测方法的关键技术进展与选择策略; 评估了现有典型方法的性能与局限; 最后, 提出了开发通用型前处理方法、结合高分辨质谱技术同时筛查多种真菌毒素所面临的挑战以及推动标准制定等展望, 以期为相关检测方法的标准化以及创新化提供参考。

关键词: 药食同源物质; 真菌毒素; 多残留分析; 样品前处理; 高效液相色谱-串联质谱法
中图分类号: TS207.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0191–12

Research progress on the detection technologies for multiple mycotoxins in medicinal and food homologous substances

BAI Xue[1], GUO Zhi-Yuan[1], HUANG Jie[1], LI Jing-Jing[1], ZHANG Shu-Yu[2], YANG Le[2], ZHU Xiao-Hong[3*], AI Yun[1*]

(1. *Xi'an Institute for Food and Drug Control*, *Xi'an* 710119, *China*; 2. *College of Life Sciences*, *Northwest University*, *Xi'an* 710069, *China*; 3. *Shaanxi Institute for Food and Drug Control*, *Xi'an* 710065, *China*)

ABSTRACT: Owing to their dual nature as both food and medicine, coupled with long-term daily consumption, the safety risks caused by mycotoxin contamination in medicinal and food homologous substances become increasingly prominent. Mycotoxins exhibit strong toxicity and bioaccumulation potential, thereby pose severe threats to human health. Therefore, accurate and rapid screening of multiple mycotoxins has become critical for ensuring the quality and safety of such products and conducting effective risk monitoring. This review systematically summarized the contamination profiles of major mycotoxins in medicinal and food homologous substances in the past 5 years, analyzed

收稿日期: 2026-03-31

第一作者: 白雪(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: 175238280@qq.com
***通信作者:** 朱小红(1972—), 女, 主任药师, 主要研究方向为食品药品检验检测与质量控制。E-mail: 742653574@qq.com
艾芸(1981—), 女, 博士, 主任药师, 主要研究方向为食品药品检验检测与质量控制。E-mail: 453072249@qq.com

the matrix characteristics of different categories, and focused on the progress of sample pretreatment techniques, optimization strategies for various matrices, and the application of novel purification materials, as well as the key challenges in this field. It systematically analyzed the technical advances and selection strategies of detection techniques, and evaluated the performance and limitations of existing typical methods. Finally, it proposed future directions, including the development of universal pretreatment approaches, the challenges of coupling high-resolution mass spectrometry for broad-spectrum simultaneous screening, and the improvement of relevant standard systems, to provide a reference for the standardization and innovation of mycotoxin detection methods.

KEY WORDS: medicinal and food homologous substances; mycotoxins; multi-residue analysis; sample preparation; high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

0 引 言

药食同源物质是我国传统医药与饮食文化融合的特色产物, 按照传统既是食品又是中药材[1]。截至 2024 年 8 月, 国家卫生健康委员会发布的《按照传统既是食品又是中药材的物质目录》共纳入 106 个品种, 且逐渐应用于日常饮食、养生保健及中医药领域。

然而受种植、采收、贮藏及加工等环节的环境因素影响, 药食同源物质在产业链各环节存在被产毒真菌侵染的风险。从现有文献报道来看[2−3], 该类污染呈现两个突出特点: (1)覆盖面广, 果实、种子、根茎、花叶等不同类别品种中均有真菌毒素检出; (2)多毒素共污染现象普遍, 单一样品中常同时检出多种毒素, 其潜在复合风险不容忽视。值得注意的是, 真菌毒素的污染分布并非随机, 而是与各类别的基质特性密切相关, 这种基质与毒素的关联性直接决定了后续前处理与检测策略的选择。

但是实现多真菌毒素的高效同步检测仍面临一些瓶颈。首先是不同类别品种的内源性成分差异显著, 高糖、高脂、高色素、高纤维等基质特性易引发较强的基质效应(matrix effect, ME), 干扰定量准确性; 其次是真菌毒素种类繁多、极性跨度大, 从非极性到强极性毒素难以通过单一色谱体系实现同步分析; 此外, 现行标准体系对药食同源基质中多真菌毒素的覆盖范围有限。这些是当前多真菌毒素高通量筛查技术实现规模化应用的主要限制因素。

因此, 本文按药用部位分类梳理, 首先归纳不同类别药食同源物质中真菌毒素的污染特征及其与基质特性的关联; 其次剖析基质干扰机制, 分类总结前处理优化方案与新型净化材料的应用进展; 随后对比主流检测技术的性能优势与适用范围; 最后提出当前研究的核心挑战并展望发展方向, 以期为复杂基质中多真菌毒素高通量同步检测方法的建立与标准体系的完善提供参考。

1 药食同源物质分类

本文所述药食同源物质, 是依据国家卫生健康委员会等主管部门发布的《按照传统既是食品又是中药材的物质目录》(截至 2024 年 8 月最新公告, 共 106 种)。药食同源物质来源广泛, 其基质特性直接影响真菌毒素的污染风险及检测方法, 为服务于后续检测前处理策略的分类讨论, 本文参考 2025 年版《中国药典》记载的药用部位及食用用途, 将所有药食同源物质统一划分为果实类、种子类、根茎类、花叶类、全草类、皮类、菌藻类、动物类共 8 个类别, 具体分类及各类别核心基质特性见表 1。

如表 1 所示, 不同类别药食同源物质的基质特性差异显著。基质中大量存在的多糖、油脂、天然色素、挥发油等组分, 一方面会影响真菌生长产毒, 造成不同品类间毒素污染特征的区别; 另一方面也会带来基质干扰问题, 给真菌毒素的提取净化与准确定量带来挑战。

2 药食同源物质中主要真菌毒素

真菌毒素是产毒真菌生成的次级代谢产物, 化学结构类型丰富, 多数组分理化性质较为稳定, 可在种植、采收、贮藏及加工等多个环节对药食同源物质造成污染。与普通食品基质不同, 药食同源物质富含多糖、皂苷、挥发油、色素等内源性活性成分, 基质组成更为复杂, 其真菌毒素的污染分布也并非随机, 而是与自身基质理化特性高度相关(表 1)。污染该类物质的真菌毒素主要来源于曲霉属、镰刀菌属、青霉属及链格孢属等, 其污染规律与对应的检测干扰特征可结合基质特性分述如下。

曲霉属毒素以黄曲霉毒素(aflatoxin, AF)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)为核心代表, 是目前药食同源物质中污染范围较广、毒性较强的一类毒素。其中黄曲霉毒素脂溶性强, 在种子类高脂基质(如薏苡仁、莲子)中更易富集; 高油脂环境既会促产毒真菌生长, 也会在前处理过程中与毒素共同被提取, 引发严重的质谱离子抑制效应。OTA 化学性质稳定, 可污染根茎类(甘草、黄芪)、菌藻类(茯苓)等多种基质; 其与高多糖、高纤维基质结合紧密, 传统提取方法回收率易出现波动, 对提取效率提出了更高要求。

镰刀菌属毒素以伏马毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、T-2 毒素(T-2 toxin, T-2)为代表, 多为水溶性或中强极性物

表 1　药食同源物质分类和基质特性

Table 1　Classification and matrix characteristics of medicinal and edible homologous substances

分类	药用部位	代表品种	核心基质特点
果实类	成熟或近成熟的果实	枸杞子、山楂、大枣、桑椹、乌梅、龙眼肉、罗汉果	以高糖为核心共性, 多数品种富含果胶、有机酸
种子类	植物成熟的种子、种仁	莲子、薏苡仁、黑芝麻、杏仁(甜)、决明子、酸枣仁	高油脂(天然富含脂肪酸)、部分品种含蜡质, 多数品种高淀粉、高膳食纤维
根茎类	植物的根、根茎、块根	山药、甘草、葛根、黄芪、党参、黄精	高淀粉、高膳食纤维, 多数品种富含多糖、皂苷类成分
花叶类	植物的花、花蕾、叶、嫩枝	菊花、金银花、代代花、桑叶、荷叶、紫苏	天然色素种类丰富(叶绿素、花青素、黄酮类色素), 多酚类成分含量高
全草类	植物干燥或新鲜的地上部分、全草	薄荷、藿香、鱼腥草、蒲公英、马齿苋	基质成分复杂, 多数品种富含挥发油
皮类	植物的树皮、成熟果皮(含外层果皮)	肉桂、花椒、陈皮(橘皮)、橘红	均含挥发油、高纤维素, 果皮类品种富含天然色素
菌藻类	真菌的菌核、子实体, 藻类的干燥叶状体	茯苓、灵芝、昆布	真菌类富含活性多糖, 藻类(昆布)富含矿物质与膳食纤维
动物类	动物的整体、组织、生理分泌物或加工品	阿胶、蜂蜜、牡蛎、鸡内金	富含多肽/胶原蛋白(阿胶)、糖类(蜂蜜、鸡内金)

质。该类毒素在富含淀粉的种子类、根茎类及全草类基质中污染较为突出: 伏马毒素极性强, 与淀粉基质结合力较高, 溶剂提取难度较大; ZEN 在薏苡仁、香辛料中检出率较高, 常与黄曲霉毒素形成共污染; T-2 细胞毒性强, 在花类、香辛料中需重点关注, 其痕量存在对检测灵敏度要求较高。

青霉属毒素以桔青霉素(citrinin, CIT)、展青霉素(patulin, PAT)、霉酚酸(mycophenolic acid, MPA)为代表, 多产生于贮藏阶段, 与仓储温湿度管控不当直接相关。其中 CIT、MPA 易污染高淀粉、高多糖的根茎类与种子类基质; PAT 则多见于高糖的果实类深加工产品(如蜂蜜), 其极性强、易与糖类物质发生缔合, 常规净化步骤分离效果有限。

链格孢属毒素以交链孢酚(alternariol, AOH)、交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)为代表, 在根茎类、果实种子类基质中均有检出。该类毒素常与其他真菌毒素形成共污染, 且药食同源基质中的大量次生代谢物与其结构相近, 对前处理的选择性与色谱分离度提出了更高要求。不同产毒菌属的毒素在各类基质中的污染分布与风险特征见表 2。

结合表 2 的污染特征可见, 药食同源物质中真菌毒素的污染分布与基质理化特性密切相关, 不同类型基质对应的污染风险与检测干扰各有侧重: 高脂基质中脂溶性毒素更易富集, 且前处理过程中油脂易与毒素共同被提取, 会加剧质谱离子抑制效应; 高糖、高胶质基质中毒素易与多糖、胶体成分发生缔合, 易导致提取回收率偏低; 高色素、高挥发油基质中的内源性杂质, 易造成色谱基线漂移、质谱信号抑制, 对检测干扰更为显著。这种差异化的污染特征与基质干扰机制, 使得单一前处理方案难以同时适配所有基质类型, 因此需针对不同类别药食同源物质建立差异化的前处理优化策略。

3　真菌毒素的相关法规限量标准及趋势

药食同源物质兼具食用与药用价值, 可能存在长期低剂量摄入的暴露场景, 部分真菌毒素可带来致癌、致畸、肝肾损伤或生殖损伤等潜在健康风险。为控制真菌毒素风险, 主要国家制定了相应的限量标准(表 3)。我国对药食同源物质中真菌毒素的限量要求逐步完善, 《中国药典》自 2010 年版首次规定 5 种中药材的黄曲霉毒素检测要求以来, 历经 2015 年版扩展至 19 种、2020 年版增加至 24 种并首次引入薏苡仁中 ZEN 限量, 直至 2025 年版进一步新增麸炒薏苡仁饮片的多毒素检测要求并在黄芪、槟榔等品种中引入 OTA 检测, 管控范围持续扩大。然而, 从现行标准体系的整体架构来看, 其核心问题并非完全缺乏限量标准, 而是标准的覆盖深度与广度仍难以匹配实际需求。一方面, 药典管控品种目前仅涉及 24 种药材, 相对于 106 种药食同源物质目录而言覆盖率明显不足; 另一方面, 除 AFB_1 等少数毒素外, DON、ZEN、OTA 等关键毒素的限量要求尚未系统延伸至药材领域, GB 2761—2017 虽严于药典标准, 但其适用范围仍以食品基质为主。这种“品种覆盖不全、毒素覆盖不全”的局限性在各国标准中普遍存在: 美国药典(United States Pharmacopeia-National Formulary, USP-NF)未对饮片作专门区分, 欧洲药典对香料 OTA 的专门规定难以推广至全部药食同源基质, 韩国药典第十二版虽体现本国用药习惯但无 ZEN、OTA 规定, 日本药典则未对 AFB_1 单独限量且未指定单一药材[30]。值得注意的是, 现有标准多以单一或少数几种毒素的限量规定为主, 缺乏针对多类别真菌毒素同步筛查的方法标准, 这与 2025 年版《中国药典》9305 指导原则提出的 33 种真菌毒素高通量筛查需求

表 2 药食同源物质中主要真菌毒素的分类和污染特征

Table 2 Classification and contamination profiles of major mycotoxins in medicinal and edible homologous substances

产毒菌属	代表毒素	易污染的类别	污染与风险特征
曲霉属(*Aspergillus*)	AFB_1, AFB_2, AFG_1, AFG_2	种子类(薏苡仁[4–5]、莲子[4]、桃仁等[4])、根茎类(黄芪[6])、动物类(阿胶[7])	污染最广、毒性最强, 尤其 AFB_1 为强致癌物, 在油脂含量高的品种中更易富集[8]
	OTA	皮类(陈皮[9])、种子类(莲子[10])、果实类(黑胡椒[11])、根茎类(姜黄[11]、甘草[12]、黄芪[6,13]、当归[14])	强肾毒性, 化学性质稳定, 难以在加工中去除[15], 常与黄曲霉毒素共现
	杂色曲霉素	种子类(莲子[10])、根茎类(黄芪[6])	AFB_1 的前体物质, 同样具有致癌性, 污染规律与 AFs 类似[6]
镰刀菌属 (*Fusarium*)	DON	种子类(薏苡仁[4])、全草类(蒲公英[15])、果实类(麦芽[16])、动物类(鸡内金[17])	又称呕吐毒素, 引起免疫抑制和肠道损伤, 污染普遍[18]
	伏马毒素 B_1, 伏马毒素 B_2, 伏马毒素 B_3	种子类(薏苡仁[4])、皮类(陈皮[9])、根茎类(甘草[12])、全草类(蒲公英[15])	水溶性毒素, 在富含淀粉的品种中污染突出, 伏马毒素具有神经毒性、肝毒性、肾毒性、免疫毒性等[15]
	ZEN	种子类(薏苡仁[4])、根茎类(黄芪、黄精等[13,19–20])、果实类(胡椒[21])	具有雌激素样作用、肝毒性、遗传毒性和免疫毒性干扰内分泌[21], 在薏苡仁、香料中检出率高
	T-2, HT-2 毒素	皮类(花椒[22])、花叶类(菊花[23])	细胞毒性极强, 可引起急性中毒, 引起造血和免疫系统功能障碍[24], 在部分香辛料和花类中需重点关注
青霉属 (*Penicillium*)	CIT	根茎类(甘草[12])	动物肾脏、肝脏、肠道和生殖系统毒性[25], 常在贮藏过程中由青霉产生
	PAT	动物类(蜂蜜[26])	主要污染水果制品, 在药食同源物质的深加工产品(如蜂蜜)中需关注, 具有遗传毒性、神经毒性、免疫毒性、肝肾毒性和生殖毒性[18, 26]
	MPA	根茎类(甘草[12]、当归[27])、种子类(莲子[12]、桃仁[27])、皮类(陈皮[12])	免疫抑制毒性[28]
链格孢属(*Alternaria*)	AOH, AME	根茎类(甘草[12])	具有急性毒性、遗传毒性和细胞毒性[29]

存在较大差距。因此, 现行标准体系的主要问题已从“有无标准”转向“标准能否覆盖复杂基质中的多毒素共污染”, 建立适配药食同源物质特性的多真菌毒素同步检测标准方法, 已成为法规完善与技术发展共同面临的重要任务。

4 前处理技术研究现状

4.1 前处理方法的演进

样品前处理是药食同源物质中真菌毒素准确定量分析的关键环节之一, 核心目标为降低基质干扰, 同时实现多种目标毒素的有效回收。药食同源物质基质组成复杂, 推动了前处理技术的持续研究与迭代; 技术体系由传统提取净化方法, 逐步发展至经多方优化的 QuEChERS 方法, 同时各类新型功能净化材料也得到开发与应用, 整体朝着高效、高选择性、高通量的方向发展[31]。

早期广泛采用的液液萃取(liquid-liquid extraction, LLE)利用目标物在不同溶剂中的分配差异实现分离, 但存在溶剂用量大、乳化层难分离、选择性差等问题, 对于成分复杂的药食同源基质共萃干扰严重[32]。固相萃取(solid-phase extraction, SPE)基于固定相的吸附-洗脱机制, 具有低溶剂消耗、富集能力高等优点, 较 LLE 更具选择性, 但传统 C_{18} 柱或亲水亲油平衡(hydrophile-lipophile balance, HLB)小柱对某些极性毒素保留较弱, 且淀粉-蛋白共沉淀

表 3　主要国家/地区药典及法规标准中有关真菌毒素的限量指标与覆盖范围

Table 3　Limit indicators and coverage scope of mycotoxins in pharmacopoeias and regulatory standards of major countries/regions

国家/地区	核心法规/药典标准	管控毒素类别	覆盖品种	关键限量指标
中国	《中国药典》2025 年版	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2、ZEN、OTA	决明子、麦芽、肉豆蔻、薏苡仁、大枣、陈皮、桃仁、酸枣仁、莲子、黄芪、党参、胖大海、柏子仁、槟榔、远志、使君子、地龙、蜈蚣、水蛭、全蝎、九香虫、土鳖虫、马钱子、延胡索、蜂房、僵蚕	AFB_1≤5 μg/kg; AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2合计≤10 μg/kg; ZEN≤500 μg/kg(薏苡仁); OTA≤20 μg/kg(黄芪)
	GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2、ZEN、DON	玉米、花生、稻谷、小麦、豆类等谷物及制品、水果制品	AFB_1: 玉米、花生及制品≤20 μg/kg; 稻谷、糙米、大米≤10 μg/kg; 小麦、大麦、燕麦及制品≤5 μg/kg; 豆类及制品≤5 μg/kg; DON: 小麦、大麦、燕麦及制品≤1000 μg/kg; 玉米及制品≤1000 μg/kg; ZEN: 玉米及制品≤60 μg/kg; 小麦及制品≤60 μg/kg; PAT: 水果制品≤50 μg/kg(含山楂)
欧盟	《欧洲药典》第十一版	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2	药用植物及其产品	AFB_1≤2 μg/kg; AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2合计≤4 μg/kg; OTA≤30 μg/kg(香料)
美国	《美国药典/国家处方集》	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2	植物药材及提取物	AFB_1≤5 μg/kg; AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2合计≤20 μg/kg
韩国	《韩国药典》第十二版	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2	苦杏仁、槟榔、决明子、巴豆、郁金、白花蛇舌草、甘草、莲子、肉豆蔻、桃仁、半夏、远志、红花、淡豆豉、瓜蒌子、酸枣仁	AFB_1≤10 μg/kg; AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2合计≤15 μg/kg
日本	《日本药典》第十八版	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2	中药及中药制剂	AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2合计≤10 μg/kg

易堵塞筛板, 难以同时兼顾非极性黄曲霉毒素和强极性伏马毒素的同步回收[33]。固相微萃取简化了操作流程, 减少了有机溶剂消耗, 克服了传统 SPE 填料孔道堵塞的问题, 但由于吸附材料易损耗、选择性有限等缺点, 未得到广泛应用[34]。在此基础上, 分散微 SPE 和微 SPE 技术进一步改良, 吸附剂用量骤减, 操作程序更为简单, 技术的开发逐步走向简便、绿色的路线[35]。

酸化提取是提升极性毒素提取效率的常用优化手段, 但酸的种类与浓度对毒素稳定性具有显著影响, 浓度过低则极性毒素提取效率不足, 过高则易导致酸敏感毒素降解。尹航等[36]在枸杞和桑葚基质中发现, 当甲酸浓度超过 5%时部分化合物回收率反而下降; 许嘉等[37]在香辛料中采用2%甲酸体系, DON 回收率显著高于无酸体系; 方嘉豪等[38]在薏苡仁中基质进一步证实, 低浓度甲酸 0.1% (*V*:*V*)即可兼顾多数毒素的提取效率与稳定性。上述研究表明, 甲酸体积分数控制在 0.1%~2% (*V*:*V*)、提取时间控制在 15 min 以内, 可作为多数药食同源基质的初步安全参数。然而, 现有研究多集中于单一或少数几类基质, 对于富含有机酸的果实类或含多糖的根茎类等基质的通用安全酸度范围, 仍需通过系统的降解动力学研究进一步明确。

QuEChERS 凭借基质适配性强、操作简便的优势, 已成为多毒素分析的主流前处理方法。2020 年被《中国药典》收载用于药材及饮片(植物类)中禁用农药多残留测定。其核心优势在于通过分散 SPE 灵活组合不同功能吸附剂, 针对性去除特定基质干扰。传统组合如乙二胺-N-丙基硅烷(primary secondary amine, PSA)(除糖类、脂肪酸)、C_{18}(除脂质)和石墨化炭黑(graphitized carbon black, GCB)(除色素)已被广泛应用。但对于基质成分复杂的高脂肪样品, 单一组合仍难以完全消除 ME, 需针对药食同源物质的高脂、高色素、高多糖等特性进一步优化吸附剂配比[39]。

4.2 不同类别药食同源物质前处理优化策略

药食同源物质的基质极为复杂，其内源性成分对真菌毒素的提取与检测构成显著干扰。研究者们针对不同类别药材的基质特点，不断优化前处理策略，显著提升了多毒素分析的准确性与通量。核心策略包括：脂质去除：采用增强型脂质去除吸附剂(enhanced matrix removal-lipid, EMR-Lipid)、C_{18}或冷冻脱脂技术，适用于种子类、动物类；色素去除：采用 GCB、多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs)或 PSA，适用于花叶类、皮类；多糖/胶质处理：采用酸化提取、盐析或免疫亲和柱(immunoaffinity column, IAC)净化，适用于根茎类、菌藻类、动物类。具体应用案例与性能参数见表 4。

表 4 不同类别药食同源物质中真菌毒素分析的前处理优化策略与检测性能

Table 4 Optimization strategies of preparation and detection performance for mycotoxin analysis in different categories of medicinal and food homologous substances

类别	典型品种	基质关键干扰	优化后前处理方法	检测方法与关键性能	检测毒素种类/种
根茎类	黄芪[13]	黄酮、皂苷、多糖影响提取效率	乙腈-水-甲酸(84:15:1, *V:V:V*)提取, SLE-SPE 净化	LC-MS/MS; LODs 0.01~0.1 ng/mL; 回收率 54.6%~110.7%; RSDs 1.6%~11.2%	21
	铁皮石斛[40]	色素、有机酸、单宁、纤维素污染色谱/质谱系统	乙腈-水-甲酸(80:20:0.1, *V:V:V*)提取, QuEChERS ($MgSO_4$+C_{18})净化	UPLC-MS/MS; LODs 0.23~8.61 μg/kg; LOQs 0.77~28.7 μg/kg; 回收率 77.9%~98.5%; RSDs 2.26%~8.28%	10
	黄芪、党参[6]	需充分破壁以提升真菌毒素提取效率	80%乙腈(2%乙酸)提取, mPFC-QuEChERS 净化	UPLC-MS/MS; LODs 0.3~25 μg/kg; LOQs 0.5~50 μg/kg; 回收率 63.3%~110%; RSDs 0.20%~6.7%	16
种子类	薏苡仁[41]	高淀粉/多糖，共提取杂质多	乙腈-H_2O-甲酸(70:29:1, *V:V:V*)一步提取，免净化	UPLC-HRMS; LOQs 0.5~100 μg/kg; 回收率 74.2%~101.1%; RSDs 0.1%~5.8%	24
	薏苡仁、桃仁、决明子、肉豆蔻[42]	高油脂、高淀粉、高色素；油脂为主要质谱干扰源	新型绿色脱脂/脱色：冷冻脱附与 SPE 结合	LC-MS/MS; 回收率 79.5%~125.1%; RSDs<10%	31
	酸枣仁[43]	皂苷、黄酮、油脂等活性成分造成离子抑制，回收率低	自动 QuEChERS: 5%甲酸乙腈提取, $MgSO_4$+PSA+C_{18}净化	LC-Q-TOF MS; LOQs 0.5~20 μg/kg; 回收率 71.1%~120%; RSDs 1.0%~19%	15
果实类	枸杞、桑葚[36]	高糖、高果胶、色素含量高，易造成离子抑制与基质干扰	优化 QuEChERS 法: 5%甲酸乙腈提取, PSA+C_{18}+MWCNTs 净化	UPLC-Q-TOF MS; LOQs 5~50 μg/kg, 回收率 70.0%~119.0%, RSDs 0.7%~16.0%	11
皮类	花椒[22]	色素干扰大	1%甲酸乙腈提取, ENVI-Carb 与 PSA 混合吸附剂净化	LC-MS/MS; LOQs 0.4~2.2 μg/kg; 回收率 77.3%~109.2%; MEs 80%~120%	12
	陈皮[44]	色素、脂质共提；导致基线漂移与 ESI 抑制	70%甲醇提取, HLB 固相萃取柱	HPLC-MS/MS (MRM 模式); LODs 0.1~3.8 μg/kg; 回收率 81.6%~100.5%, RSDs 1.88%~7.2%	12
	化橘红[45]	色素与黄酮类抑制电离；果胶类物质导致提取不完全	2%乙酸甲醇溶液提取，免疫亲和柱净化	UPLC-MS/MS; LODs 0.1~12.5 μg/kg; 回收率 85.20%~116.99%, RSDs<5%	14
花叶类	菊花、金银花[23]	高色素，干扰色谱分离与检测	乙腈-甲醇-甲酸-水(60:20:1:19, *V:V:V:V*)提取, QuEChERS ($MgSO_4$+PSA+C_{18})净化	LC-MS/MS; LODs 0.1~0.8 μg/kg; 回收率 66.3%~91.8%; RSDs 2.8%~7.7%	13
菌藻类	昆布[46]	高盐、高黏度；抑制 ESI，难过滤	甲醇-乙腈-甲酸(49.5:49.5:1, *V:V:V*)提取，过 Bond Elut PLEXA 柱进一步纯化	LC-MS/MS; LODs<5.55 μg/kg; 回收率 72.59%~107.34%; RSDs<9.09%	7

表 4(续)

类别	典型品种	基质关键干扰	优化后前处理方法	检测方法与关键性能	检测毒素种类/种
动物类	蜂蜜[26]	高糖、高黏度; 糖-毒素缔合, 提取不完全	乙腈-水-乙酸(19:80:1, *V*:*V*:*V*)提取, 4 ℃低温高速离心去糖沉淀(免 SPE)	UPLC-MS/MS; LODs 0.01~50 μg/kg; LOQs 0.05~100 μg/kg; 回收率 69.6%~101%; RSDs 5%~14%	24
	阿胶[47]	高胶原蛋白、高黏度; 胶体难处理, 高盐抑制 ESI	水浴振荡过夜, 免疫亲和柱净化	UPLC-MS/MS; LOQs 0.5~0.8μg/kg; 回收率 77.3%~94.6%; RSDs 1.2%~4.1%	4
通用型	多类别药材(种子、根茎、皮类)[12]	长期贮藏代谢物多; ME 显著(>±20%)	优化 QuEChERS: 乙腈-水-醋酸提取, 无水柠檬酸钠盐析	LC-MS/MS; LODs 0.25~12.25 μg/kg; 回收率 61.6%~118.6%; RSDs<15%	73
	多类别药材(根茎、果实、种子、菌藻、皮类)[48]	色素、酸性杂质导致基质干扰强, 提取效率低	盐析剂组合初步净化 +新型 PANI@CS 固相分散提取剂净化	UPLC-MS/MS; LODs 0.1~6.0 μg/kg; 回收率 90.1%~105.8%; RSDs 1.3%~4.1%	16

注: 检出限(limit of detection); 定量限(limit of quantitation, LOQ); 固液萃取(solid-liquid extraction, SLE); 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD); 超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS); 快速滤过型净化柱(rapid multiple filtrate purification column, mPFC); 液相色谱-四极杆飞行时间质谱法(liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry, LC-Q-TOF MS); 高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS); 多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM); 电喷雾离子化(electrospray ionization, ESI); 液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS); 超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC); 高分辨质谱法(high resolution mass spectrometry, HRMS)。

综合表 4 中不同类别药食同源物质的前处理策略, 可归纳得到以下优化思路: (1)针对种子类、动物类等高脂样品, 可优先考虑冷冻脱脂、EMR-Lipid 或 C_{18} 净化手段, 缓解油脂带来的干扰, 该思路与此类基质易富集脂溶性黄曲霉毒素的污染特征相契合; (2)花叶类、皮类等高色素样品, 可选用 GCB、MWCNTs 或 PSA 去除叶绿素、花青素等色素组分, 减少色谱柱堵塞以及 ESI 基质抑制效应; (3)果实类、菌藻类、动物类等高糖、高胶质样品, 需要关注糖类与胶体引发的离子抑制现象, 可采用酸化提取、盐析沉淀或 IAC 实现目标物的特异性富集; (4)根茎类、种子类等高淀粉、高纤维样品, 可充分破碎样品基质, 并结合 PSA 缓解多糖带来的干扰。上述归纳, 可为不同类别药食同源物质的前处理方法开发提供参考。

4.3　新型净化材料的应用

传统 QuEChERS 吸附剂具备较好的通用性, 但面对复杂药食同源基质, 对痕量真菌毒素的选择性富集能力存在局限, 很难彻底去除多糖、色素、油脂等内源组分带来的较强基质干扰。针对上述不足, 新型功能化净化材料逐渐成为该领域的研究热点, 相关研究由常规吸附剂逐步向高选择性、良好富集效果的复合材料方向演进, 为复杂基质中多种真菌毒素的精准检测提供技术支撑。目前研究中应用较多的新型材料主要包含免疫亲和类、分子印迹类以及磁性纳米复合材料 3 大类。

4.3.1　免疫亲和类材料

IAC 基于抗原抗体特异性识别机制实现净化, 选择性显著优于常规吸附剂, 是早期真菌毒素特异性富集的主流技术。但该技术存在抗体制备难度大、成本高、有机溶剂耐受性差、对复杂基质敏感性强等局限, 在成分多样的药食同源基质中规模化应用受到限制。

近年来, 适配体亲和柱(aptamer affinity column, AAC)作为新型免疫亲和技术受到广泛关注。适配体被称为“化学抗体”, 兼具亲和力高、特异性强、易合成、性质稳定、成本可控的优势, 可有效弥补传统 IAC 的不足。现有研究显示, 交链孢酚 AAC 可重复使用 10 次, 加标回收率达 90.2%~105.7%, 已成功应用于中药类药食同源样品中交链孢酚的萃取纯化, 为复杂基质中痕量真菌毒素的特异性净化提供了可行的替代方案[49]。

4.3.2　分子印迹聚合物

分子印迹聚合物(molecularly imprinted polymers, MIPs)是通过模板分子定向合成的具有特异性识别位点的人工聚合物, 被誉为“人工抗体”。该材料具备制备简便、pH 与温度耐受性强、稳定性好的优势, 基于 MIPs 构建的分子印迹固相萃取(molecularly imprinted solid-phase extraction, MISPE)技术, 在真菌毒素选择性富集领域展现出较好的应用潜力。针对药食同源基质干扰强的特点, MIPs 可通过结构设计实现对特定高危毒素(如 AFB_1)的高效富集, 有效去除高淀粉、高多糖基质中的共萃杂质, 提升检测灵敏度与准确性, 尤其适合复杂基质中痕量目标物的高选择性前处理[50]。

4.3.3　磁性纳米复合材料

磁性纳米复合材料兼具优异的吸附性能与磁分离特性, 可通过外加磁场快速实现固液分离, 无需离心、过柱

等烦琐操作, 能大幅简化前处理流程、提升检测通量, 是当前药食同源基质前处理领域的研究热点。目前应用较多的体系包括金属有机框架(metal-organic framework, MOF)基磁性材料、碳基磁性材料与磁性共价有机框架(magnetic covalent organic frameworks, MCOFs)等。

MOF 基磁性材料兼具 MOF 的高比表面积与磁性材料的快速分离优势。Guo 等[51]首次建立了基于 MIL-101(Cr)@Fe_3O_4 纳米材料的磁性固相萃取(magnetic solid-phase extraction, MSPE)方法, 用于小麦、玉米、西瓜、甜瓜等农产品中 9 种真菌毒素的净化富集, 可有效消除复杂基质带来的干扰, 回收率 83.5%~108.5% (RSDs 1.6%~10.4%), 仅通过纯溶剂校准曲线即可实现准确定量, 为药食同源农产品基质的多毒素净化提供了新思路。

MWCNTs 作为典型碳基材料, 对色素、脂溶性杂质具有优异的吸附效果, 适配花叶类、皮类等高色素药食同源基质的脱色净化需求, 可有效降低色谱基线漂移与质谱离子抑制效应。

MCOFs 是一类新型多孔晶体材料, 兼具高选择性、高比表面积与良好的稳定性。Li 等[52]制备的由 1,2,4,5-四(4-甲酰基苯基)苯[1,2,4,5-tetrakis-(4-formylphenyl)benzene, TFPB]和对苯二胺(p-phenylenediamine, PPD)为单体构建的 TFPB-PPD 型 MCOFs 充分体现了上述优势: 其高比表面积赋予材料对黄曲霉毒素高达 69.5~92.2 mg/g 的吸附容量; 凭借高选择性, 可从牛奶、食用油及大米等复杂基质中有效萃取 AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2, 加标回收率达 76.4%~112.5%; 而良好的稳定性使其可重复使用 8 次以上。该方法萃取时间仅 5 min, 有机溶剂用量仅 2 mL, 操作简便高效。

整体而言, 3 类新型净化材料各有侧重: 免疫亲和类材料特异性最强, 适用于超低含量毒素的精准富集; 分子印迹材料兼顾特异性与稳定性, 适配复杂基质的定向净化; 磁性纳米材料操作简便、通量高, 适合大批量样品快速前处理。目前新型材料的研究仍针对少数特定毒素与单一基质, 能够同时适配多类别药食同源基质、覆盖多种真菌毒素的通用型功能复合材料, 仍是未来该领域的重点研发方向。

5 检测方法研究现状

根据检测目的和应用场景, 真菌毒素的检测技术体系可大致分为 3 个层级: 以薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)为代表的传统检测技术, 适用于单毒素或少毒素的定性定量分析; 以 LC-MS/MS 和 HRMS 为代表的色谱-质谱联用技术, 是当前多毒素同步筛查和确证的主流方法; 以酶联免疫吸附测定(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)和胶体金免疫色谱法(colloidal gold immunochromatography assay, GICA)为代表的快速检测技术, 适用于现场初筛与大批量样本排查。不同层级的技术在灵敏度、特异性、通量及成本方面各有侧重, 实际应用中需根据检测目的合理选择。

5.1 传统检测技术

TLC 是最早应用于真菌毒素检测的定性方法, 凭借设备简单、成本低廉的优势, 可实现毒素的初步筛查, 满足“有无毒素”的基础判断需求。但 TLC 灵敏度较低、定量准确性差, 且易受基质杂质干扰, 难以满足药食同源物质中痕量多毒素的检测要求。随着定量分析需求的发展, HPLC 逐步取代 TLC 成为实验室常规方法。HPLC 结合紫外或荧光检测器, 可实现多种常见真菌毒素的系统定量分析, 弥补了 TLC 的定量缺陷[53–54]; 但对于部分弱荧光或紫外吸收较弱的毒素, 仍需衍生化处理, 增加了操作步骤与成本。总体而言, TLC 和 HPLC 在设备普及度与操作成熟度方面具有优势, 但受限于检测通量与抗干扰能力, 目前多用于单类毒素的常规检测或基层实验室的初步分析。

5.2 色谱-质谱联用技术

近年来, 色谱-质谱联用技术已成为药食同源物质中多类别真菌毒素确证与定量的主流方法。其中, LC-MS/MS 凭借其高灵敏度、高特异性及高通量的监测能力, 是当前多毒素常规定量和确证的主流方法。通过 UPLC 实现快速分离, 结合 ESI 正负离子快速切换与动态多反应监测(dynamic multiple reaction monitoring, d-MRM)技术, 可在单次进样中同时监测数十对以上的特征离子对, 有效避免复杂基质中色素、糖类、皂苷等成分的干扰, 确保定量准确性。

HRMS 与 LC-MS/MS 的靶向目标监测模式不同, HRMS 通过精确质量数测定与碎片离子信息匹配, 可实现非靶标筛查、可疑物鉴定及未知毒素的结构解析, 在发现新型真菌毒素、修饰型毒素及隐蔽性毒素方面具有独特优势[55]。但是 HRMS 在定量准确性与方法稳健性方面目前没有 LC-MS/MS 成熟, 两者并非替代关系, 而是形成“LC-MS/MS 靶标定量+HRMS 广谱筛查”互补的形式。

5.3 快速筛查技术

面对大批量样品或资源有限的现场场景, 快速筛查技术具有重要的应用价值。ELISA 和 GICA 基于抗原-抗体反应, 具有操作简便、检测速度快、无需大型仪器等优点, 适用于真菌毒素的现场初筛和大批量样本快速排查。但两类方法均存在一定的假阳性与假阴性概率, 定量准确性有限, 且抗体/适配体的交叉反应可能导致结果偏差, 因此阳性结果需经色谱-质谱法确证。

为进一步提升快速检测的灵敏度, 研究者们开发了多种信号放大策略。例如, 基于金纳米簇的荧光适配体传感器结合 DNA 纳米结构与杂交链式反应, 可实现 OTA 和 AFB_1 的超灵敏检测[56]; 基于铜基导电 MOF 与靶标响应性

DNA 水凝胶的双信号检测平台, 可通过比色和温度双模式读数实现 T-2 的快速筛查[57]。

此外, 以量子点、上转换纳米粒子、MOFs 等纳米材料为识别元件或信号标签的新型传感器, 通过与光学、电化学换能器结合, 展现出高灵敏、便携化的发展潜力[58–59]。然而, 上述新型传感技术目前多处于实验室研究阶段, 其稳定性、重现性及在复杂药食同源基质中的实际应用效果仍有待系统验证[58]。

5.4　检测关键难点

尽管通过优化前处理净化可显著降低基质干扰, 但药食同源样品中残余的多糖、皂苷及次级代谢产物在 ESI 过程中仍可能与真菌毒素竞争电离位点, 导致信号抑制或增强, 产生 ME。ME 评价通常采用提取后添加法, 当基质效应因子(matrix factor, MF)超出 80%~120%范围时, 认为存在显著基质干扰, 需采取校正措施。

目前, “优化前处理净化+基质匹配校准”是平衡效率与成本的常规选择。尹航等[36]在枸杞和桑葚基质中采用 5%甲酸乙腈提取, 结合 PSA+C_{18}+MWCNTs 净化, 使多数真菌毒素处于弱至中等 ME 范围, 回收率 70.0%~119.0%, 实现了无须同位素内标的准确定量。许嘉等[37]在香辛料基质中采用 Z-Sep+吸附剂净化结合基质匹配外标法, 21 种真菌毒素平均回收率 78.5%~100.5%。上述研究表明, 通过深度净化从源头降低基质干扰后, 基质匹配外标法可满足多数药食同源样品的定量需求。但对于阿胶等强胶质基质, ME 极强(MF 超出±50%), 同位素内标法是目前强基质中准确定量的可靠方案。

综上所述, 不同检测技术在适用场景、性能优势及固有局限方面存在明显差异。TLC 和 HPLC 作为传统技术, 设备成本低、操作成熟, 但通量有限、抗干扰能力不足, 适用于单类毒素的常规检测; LC-MS/MS 灵敏度高、特异性强, 是当前多毒素同步确证与定量的首选平台; HRMS 在广谱筛查和未知物鉴定方面具有优势, 可作为 LC-MS/MS 的补充手段; ELISA 和 GICA 操作简便、成本更低, 适合现场初筛和大批量排查, 但阳性结果需经过色谱-质谱法确证; 新型传感器技术灵敏度高、响应快速, 但目前稳定性与实际应用仍有待提高。实际工作中, 建议根据检测目的(确证/筛查/初筛)、样品通量、设备条件及成本预算, 建立“快速筛查-靶向定量-广谱确证”的分级检测体系, 以实现效率与准确性的平衡。

6　现有方法的性能与不足

近年来, 色谱-质谱联用技术显著提升了真菌毒素的同步检测能力, 但其广泛应用仍面临一些现实局限。

在毒素覆盖范围方面, 目前多数已发表方法的目标物数量仍在 20 种以下, 且研究对象以粮油、果蔬等普通食品基质为主, 专门针对药食同源物质的系统研究相对有限。2025 年版《中国药典》9305 指导原则已提出对 33 种真菌毒素进行高通量筛查的需求, 但现有文献报道的检测谱系与该目标之间尚有差距。此外, 已有研究多集中于黄曲霉毒素、OTA 等常见毒素, 对链格孢霉毒素、MPA 等关注度较低的毒素涉及较少, 风险监测的覆盖面有待拓展。

在基质适配性方面, 现有方法通常仅在少数几种代表性基质中完成验证, 而药食同源物质按药用部位可分为果实、种子、根茎、花叶、全草、皮类、菌藻、动物类共 8 大类别, 各类别的内源性干扰成分差异显著。同一套色谱条件和质谱参数在不同基质中可能面临分离度下降、离子化效率波动或背景干扰增强等问题, 但现有研究较少对不同类别基质进行平行对比考察, 方法迁移的可行性缺乏充分数据支撑。同时, ME 的评价多停留在个别案例的回收率验证层面, 系统性的 ME 数据库尚未建立, 这在一定程度上制约了通用型检测方法的开发。

在标准体系建设方面, 现行真菌毒素检测标准在食品与药品领域相对独立, 缺乏专门针对药食同源物质这一特殊类别的统一技术规范。食品标准(如 GB 5009 系列)与药品标准(如《中国药典》通则)在前处理流程、仪器条件、判定阈值等方面存在差异, 导致同一品种在不同监管场景下可能面临方法不衔接的问题。此外, 现有标准方法多以单一或少数几种毒素为目标, 尚未形成覆盖多类别毒素、适配多类别基质的“前处理-检测”一体化标准操作流程, 难以满足高通量筛查的实际监管需求。

7　结束语

药食同源理念根植于我国悠久的中医药文化, 其涵盖的物质范围随着产业的发展与研究深入持续扩充, 截至目前我国国家卫生健康委员会官方公布的药食同源物质目录已涵盖 106 个品种。这些品种“空腹食之为食物, 患者食之为药物”, 在长期实践中形成了复杂而灵活的应用体系, 其基质特性差异显著。本文以国家公布的 106 种药食同源物质为对象, 按药用部位分类梳理了不同类别基质的真菌毒素污染特征, 系统总结了前处理优化策略与检测技术进展, 并分析了当前研究在毒素覆盖范围、基质适配性及标准体系建设方面存在的不足。

从技术发展来看, 多真菌毒素同步检测已逐步从单一靶标分析转向高通量筛查, 但距离实际监管需求仍有距离。一方面, 现有方法的目标物覆盖范围多在 20 种以下, 与《中国药典》2025 年版提出的 33 种真菌毒素筛查目标存在差距; 另一方面, 多数方法仅在少数几类基质中完成验证, 针对不同药用部位(如果实、根茎、花叶等)的系统对比研究仍然不足, 方法迁移的可行性缺乏充分数据支撑。此外, 食品与药品领域现行检测标准在技术路线和判定阈值

上的差异，也给药食同源物质的统一监管带来实际困难。

后续研究可重点关注以下方向：(1)开发适配多类别药食同源基质、针对 30 种以上毒素的通用型前处理操作流程；(2)建立高分辨质谱筛查数据库，完善该类基质中真菌毒素及隐蔽型、修饰型代谢产物的质谱信息库，为未知风险物质的识别提供数据基础。上述工作的推进，有赖于分析化学、毒理学与监管部门的协同，以期为药食同源产品的质量安全控制提供更为坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 艾芸, 黄洁, 吴婷婷. 药食同源实用解析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2024: 1–3.
Ai Yun, Huang Jie, Wu Tingting. Practical analysis of homology of medicine and food [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2024: 1–3.

[2] Wang Yue, Su Buda, Yan Xingxu, et al. Studies of mycotoxins in medicinal plants conducted worldwide over the last decade: a systematic review, meta-analysis, and exposure risk assessment [J]. Phytomedicine, 2024, 128: 155367.

[3] Yang Zhimin, Xue Huali, Han Ye, et al. Research progress and management strategies for the common mycotoxin contamination of traditional Chinese medicines [J]. Journal of Fungi, 2025, 11(6): 411.

[4] 张晓芹, 方蓓倩, 毛佳乐, 等. 25 种常用中药饮片常见真菌毒素污染分布比较研究[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(9): 1214–1218.
Zhang Xiaoqin, Fang Beiqian, Mao Jiale, et al. Comparative study on the distribution of mycotoxins contamination in 25 kinds of common herbal decoction pieces [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2023, 40(9): 1214–1218.

[5] Lv Jianxin, Zhang Huiru, Wang Xuwen, et al. Occurrence, transfer rule, and dietary risk assessment of aflatoxins in medicinal and edible seeds [J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105830.

[6] 谢思敏, 古锶巧, 顾利红, 等. mPFC-QuEChERS 净化联合 UPLC-MS/MS 法快速测定 3 种根茎类中药材中 16 种真菌毒素[J]. 分析测试学报, 2024, 43(7): 1003–1010.
Xie Simin, Gu Siqiao, Gu Lihong, et al. Determination of 16 mycotoxins in three *Radix* and rhizome Chi-nese herbal medicines by mPFC-QuEChERS with UPLC-MS/MS [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(7): 1003–1010.

[7] 陈俊妃, 栗建明, 谢思敏, 等. UPLC-MS/MS 法同时测定中成药妇康片中 11 种真菌毒素[J]. 今日药学, 2025, 35(8): 593–597.
Chen Junfei, Li Jianming, Xie Simin, et al. Simultaneous determination of 11 mycotoxins in Fukang tablets by UPLC-MS/MS [J]. Pharmacy Today, 2025, 35(8): 593–597.

[8] 秦晋钰, 魏嘉波. HPLC 法测定 22 种中药材中的黄曲霉毒素[J]. 广州化工, 2021, 49(9): 113–115.
Qin Jinyu, Wei Jiabo. Detection of aflatoxins in 22 kinds of traditional Chinese medicine by HPLC [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(9): 113–115.

[9] 彭晓俊, 曾丽珠, 伍长春, 等. 基于 QuEChERS 法提取液相色谱-串联质谱法测定新会陈皮中的 9 种真菌毒素和农药残留[J]. 分析测试学报, 2017, 36(6): 738–743.
Peng Xiaojun, Zeng Lizhu, Wu Changchun, et al. Determination of nine mycotoxins and pesticide residues in Xinhui dried orange peel by liquid chromatography-tandem mass spectrometry with Qu ECh ERS clean-up [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, 36(6): 738–743.

[10] 占丽琴, 彭玲娜, 马杰, 等. UHPLC-MS/MS 测定莲子中 10 种真菌毒素[J]. 药品评价, 2022, 19(17): 1031–1035.
Zhan Liqin, Peng Lingna, Ma Jie, et al. Determination of 10 mycotoxins in nelumbinis semen by UHPLC-MS/MS [J]. Drug Evaluation, 2022, 19(17): 1031–1035.

[11] Demirhan B, Demirhan B E. Analysis of multi-mycotoxins in commonly consumed spices using the LC-MS/MS method for assessing food safety risks [J]. Microorganisms, 2023, 11(7): 1786.

[12] Huang Xiaojing, Feng Rui, Hu Qing, et al. Contamination status and health risk assessment of 73 mycotoxins in four edible and medicinal plants using an optimized QuEChERS pretreatment coupled with LC-MS/MS [J]. Toxins, 2025, 17(2): 52.

[13] Wang Yudan, Zhang Cheng, Zhang Lei, et al. A comprehensive strategy for screening and exploring multi-class mycotoxins contamination status in *Astragali Radix* [J]. Microchemical Journal, 2020, 158: 105294.

[14] Bai Ruobin, Chang Qiaoying, Zhang Hongyan, et al. Simultaneous determination of pesticides, mycotoxins and ferulic acid in *Angelica sinensis* by GC/LC-Q-TOF/MS [J]. Journal of Chromatography A, 2024, 1737: 465437.

[15] 焦明月. 中药材中真菌污染风险及蒲公英中真菌毒素检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2024: 63–64.
Jiao Mingyue. Study on the risk of fungal contamination in herbal medicines and the detection method of mycotoxin in *Taraxacum* [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024: 63–64.

[16] 李凤华, 李作华, 杨丽, 等. 药食同源中药材中 16 种真菌毒素的测定与分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 268–275.
Li Fenghua, Li Zuohua, Yang Li, et al. Determination and analysis of 16 mycotoxins in medicinal and edible traditional Chinese medicine [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 268–275.

[17] 张欣欣, 李凤华, 王晓琳, 等. 药食两用药材中真菌毒素污染状况分析与暴露风险评估[J]. 预防医学论坛, 2025, 31(6): 414–418, 437.
Zhang Xinxin, Li Fenghua, Wang Xiaolin, et al. Analysis on mycotoxin contamination and risk assessment exposure in medicinal and edible herbs [J]. Preventive Medicine Tribune, 2025, 31(6): 414–418, 437.

[18] 张新中, 丁辉, 彭涛, 等. 真菌毒素检测与限量标准的现状与问题分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6149–6156.
Zhang Xinzhong, Ding Hui, Peng Tao, et al. Current situation and problems of mycotoxin detection and limitation standards [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(18): 6149–6156.

[19] 沈立, 汤燕, 陈铁柱, 等. 固相萃取液质联用测定川产道地药材黄精、麦冬中 10 种真菌毒素[J]. 药物分析杂志, 2023, 43(8): 1369–1380.
Shen Li, Tang Yan, Chen Tiezhu, et al. Determination of 10 mycotoxins in *Polygonati rhizoma* and *Ophiopogonis radix* as a genuine regional drug of Sichuan by solid-phase extraction coupled with LC-MS/MS [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2023, 43(8): 1369–1380.

[20] Wang Wenting, Rui Yan, Yuan Yuan, et al. Determination and exposure assessment of mycotoxins in *Polygonati Rhizoma* (Liliaceae)–an edible plant [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 140: 107269.

[21] 孟春杨, 张斌, 杨玉春, 等. UPLC-MS 检测香辛料中的 6 种玉米赤霉醇类真菌毒素[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(9): 156–162.

Meng Chunyang, Zhang Bin, Yang Yuchun, et al. Simultaneous determination of six zearalanol-group mycotoxins in spices using UPLC-MS [J]. China Food Additives, 2025, 36(9): 156–162.

[22] Zhou Fenglan, Zhou Chunjie, Zhang Wenhua, et al. Determination of twelve mycotoxins in red and green Sichuan peppers using QuEChERS method with LC-MS/MS [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141822.

[23] 刘瑜, 于丽, 姜玲玲, 等. 液质联用法筛查药食同源中药中多种真菌毒素[J]. 食品工业, 2022, 43(5): 322–325.
Liu Yu, Yu Li, Jiang Lingling, et al. Screening of mycotoxins in traditional Chinese medicine and food by LC-MS/MS [J]. The Food Industry, 2022, 43(5): 322–325.

[24] 李惠婧, 刘秋, 于一芒, 等. 免疫亲和柱-高效液相色谱法同时检测谷物中 T-2 毒素和 HT-2 毒素含量[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(8): 190–193.
Li Huijing, Liu Qiu, Yu Yimang, et al. Simultaneous determination of T-2 toxin and HT-2 toxin in grains by HPLC with immunoaffinity column clean-up [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(8): 190–193.

[25] 毛妍, 杨梦然, 梁曾恩妮, 等. 桔青霉素的研究现状[J]. 动物医学进展, 2021, 42(11): 121–124.
Mao Yan, Yang Mengran, Liang Zengenni, et al. Current status of citrinin research [J]. Progress in Veterinary Medicine, 2021, 42(11): 121–124.

[26] 关利娟. 蜂蜜中 24 种霉菌毒素液相色谱串联质谱检测方法的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019: 11–13.
Guan Lijuan. Research on 24 mycotoxins in honey by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [D]. Yantai: Yantai University, 2019: 11–13.

[27] Han Zheng, Ren Yiping, Zhu Junfeng, et al. Multianalysis of 35 mycotoxins in traditional Chinese medicines by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry coupled with accelerated solvent extraction [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(33): 8233–8247.

[28] 戈钰. 运用机器学习建立青贮饲料中霉酚酸电化学传感新方法[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023: 7.
Ge Yu. Electrochemical sensing of mycophenolic acid in silage with machine learning assistance [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023: 7.

[29] 白彤彤, 连莹莹, 方彦飞, 等. 邯郸地区玉米和小麦及其制品中交链孢霉毒素的污染状况及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(24): 177–183.
Bai Tongtong, Lian Yingying, Fang Yanfei, et al. Contamination status and dietary exposure risk assessment of *Alternaria* toxins in corn, wheat and their products in Handan area [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(24): 177–183.

[30] 焦明月, 车国静, 史建荣, 等. 植物源药材及饮片中病原真菌及真菌毒素污染研究进展[J]. 山东中医药大学学报, 2025, 49(3): 391–398.
Jiao Mingyue, Che Guojing, Shi Jianrong, et al. Research progress on pathogenic fungi and mycotoxin contamination in plant-based medicinal materials and decoction pieces [J]. Journal of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2025, 49(3): 391–398.

[31] 严倩茹, 邬伟魁, 宋伟. QuEChERS 技术在中药安全检测中的应用进展[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2025, 34(3): 318–325.
Yan Qianru, Wu Weikui, Song Wei. The application progress of quechers technology in the safety testing of traditional Chinese medicine [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2025, 34(3): 318–325.

[32] Bian Yu, Zhang Yuan, Zhou Yu, et al. Recent insights into sample pretreatment methods for mycotoxins in different food matrices: a critical review on novel materials [J]. Toxins, 2023, 15(3): 215.

[33] 霍炳帆, 马骉, 厉佳丽, 等. 基于荧光纳米颗粒的免疫层析技术同步快速检测药食同源药材中的3种真菌毒素[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 227–235.
Huo Bingfan, Ma Biao, Li Jiali, et al. Simultaneous and rapid detection of three mycotoxins in food and medicine homologous materials by fluorescent nanoparticle-based immunochromatography [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 227–235.

[34] Hu Qinghai, Wang Yuxin, Su Erzheng, et al. Functionalized nanofiber-based efficient sorbent for simultaneous extraction of multiple mycotoxins and its molecular dynamics simulation [J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146490.

[35] Wang Yu, Wang Lianxing, Li Xue, et al. Integration of QuEChERS pretreatment and advanced liquid chromatography/mass spectrometry analysis for the broad-spectrum screening and simultaneous quantification of 15 mycotoxins in *Citrus reticulata* peel [J]. Food Chemistry, 2026, 502: 147597.

[36] 尹航, 谢瑜杰, 史孟杰, 等. QuEChERS-液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法同时筛查干枸杞和桑葚中的农药和真菌毒素[J]. 色谱, 2025, 43(12): 1327–1341.
Yin Hang, Xie Yujie, Shi Mengjie, et al. Simultaneous screening of pesticides and mycotoxins in dried Goji berries and mulberries by QuEChERS-liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2025, 43(12): 1327–1341.

[37] 许嘉, 王银会, 王硕. 固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法快速测定香辛料中 21 种新兴真菌毒素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 244–253.
Xu Jia, Wang Yinhui, Wang Shuo. Rapid determination of the content of 21 kinds of emerging mycotoxins in spices by solid-phase extraction combined with ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 244–253.

[38] 方嘉豪, 潘项捷, 尹峰, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定薏苡仁中8种真菌毒素含量[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 254–262.
Fang Jiahao, Pan Xiangjie, Yin Feng, et al. Simultaneous determination of eight fungal toxins in *Coix* seeds by QuEChERS ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 254–262.

[39] 宋月, 杨丽君, 吴平谷, 等. 复合柱净化-超高效液相色谱-串联质谱法测定粮油中黄曲霉毒素和玉米赤霉烯酮类毒素[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(1): 39–44.
Song Yue, Yang Lijun, Wu Pinggu, et al. Determination of aflatoxins and Zearalenone in vegetable oil and cereal products by solid phase extraction column purification coupled with ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, 32(1): 39–44.

[40] Wang Zejun, Wang Qingcheng, Xu Fei, et al. Reliable and cost-effective QuEChERS-UHPLC-MS/MS method for the simultaneous analysis of ten

mycotoxins in *Dendrobium officinale*: a study on food-medicine homology quality control [J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2025, 2025: 8995925.

[41] Wu Yu, Ye Jin, Xuan Zhihong, et al. Development and validation of a rapid and efficient method for simultaneous determination of mycotoxins in *Coix* seed using one-step extraction and UHPLC-HRMS [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(1): 148–159.

[42] Lu Qian, Ruan Haonan, Sun Xinqi, et al. Contamination status and health risk assessment of 31 mycotoxins in six edible and medicinal plants using a novel green defatting and depigmenting pretreatment coupled with LC-MS/MS [J]. LWT, 2022, 161: 113401.

[43] 成蕊, 谢瑜杰, 常巧英, 等. 一步式自动 QuEChERS 结合液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法同时检测酸枣仁中 151 种农药和 15 种真菌毒素[J]. 分析测试学报, 2025, 44(9): 1912–1923.
Cheng Rui, Xie Yujie, Chang Qiaoying, et al. Simultaneous determination of 151 pesticides and 15 mycotoxins in ziziphi spinosae semen by one-step automated QuEChERS combined with LC-Q-TOF MS [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(9): 1912–1923.

[44] Wang Wenting, Yuan Yuan, Ma Yingjie, et al. Risk assessment of exposure to 12 kinds of mycotoxins through consumption of *Pericarpium citri* Reticulatae collected from Three Gorges Reservoir area of China [J]. Toxicon, 2024, 243: 107745.

[45] 谢思敏, 陈俊妃, 毕福钧, 等. 免疫亲和柱结合 UPLC-MS/MS 测定化橘红、广佛手和广陈皮中 14 种真菌毒素[J]. 中南药学, 2026, 24(8): 173–179.
Xie Simin, Chen Junfei, Bi Fujun, et al. Determination of 14 mycotoxins in citri grandis exocarpium, citri sarcodactylis fructus and citri reticulatae pericarpium by immunoaffinity column with UPLC-MS/MS [J]. Central South Pharmacy, 2026, 24(8): 173-179.

[46] Li Yanshen, Sun Mingxue, Mao Xin, et al. Mycotoxins contaminant in kelp: a neglected dietary exposure pathway [J]. Toxins, 2018, 10(11): 481.

[47] 励炯, 王姣斐, 江海, 等. 免疫亲和柱净化-高效液相色谱质谱联用测定胶类中药中的黄曲霉毒素残留量[J]. 中国药学杂志, 2017, 52(17): 1542–1546.
Li Jiong, Wang Jiaofei, Jiang Hai, et al. Detection of four aflatoxins in gelatin drugs by immunoaffinity column clean-up and HPLC-MS/MS [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2017, 52(17): 1542–1546.

[48] Guo Xinying, Chen Feng, Zhang Weibing. Analysis of 16 mycotoxins in genuine traditional Chinese medicine for five medicinal parts: classification of analytical method based on PANI@CS extraction-UPLC-MS/MS [J]. Heliyon, 2023, 9(6): e17027.

[49] Fang Mengqi, Wang Nan, Jia Wenhao, et al. An aptamer affinity column for extraction and purification of alternariol from traditional Chinese medicine prior to high performance liquid chromatography with fluorometric detection [J]. Food & Medicine Homology, 2026, 3(1): 9420101.

[50] Xu Xiaotian, Chen Yixin, Xu Jianling, et al. Development of antibody-engineered molecularly imprinted polymers for selective capture of aflatoxin B_1 from starchy food and medicinal materials [J]. Microchemical Journal, 2024, 198: 110165.

[51] Guo Dakai, Huang Qingwen, Zhao Rui, et al. MIL-101(Cr)@Fe_3O_4 nanocomposites as magnetic solid-phase extraction adsorbent for the determination of multiple mycotoxins in agricultural products by ultra-high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Food Control, 2023, 146: 109540.

[52] Li Jie, Xu Xiuli, Guo Wei, et al. Synthesis of a magnetic covalent organic framework as sorbents for solid-phase extraction of aflatoxins in food prior to quantification by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132821.

[53] 邵亮亮, 杜京霖, 盛林霞, 等. 全自动免疫磁珠净化高效液相色谱法快速测定小麦中的呕吐毒素[J]. 分析仪器, 2021(1): 146–151.
Shao Liangliang, Du Jinglin, Sheng Linxia, et al. Rapid determination of vomitoxin in wheat by HPLC with automatic immunomagnetic bead purification [J]. Analytical Instrumentation, 2021(1): 146–151.

[54] 何攀, 闫冬阁, 陈渠玲, 等. 免疫亲和高效液相色谱法测定小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的方法改进[J]. 现代食品科技, 2018, 34(1): 227–232.
He Pan, Yan Dongge, Chen Quling, et al. Improved method for determination of deoxynivalenol in wheat flour by immunoaffinity-high performance liquid chromatography [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(1): 227–232.

[55] 许婧, 潘惠勤, 谭琰南, 等. LC-MS/MS 在中药真菌毒素检测中的应用进展[J]. 分析测试学报, 2025, 44(9): 1856–1870.
Xu Jing, Pan Huiqin, Tan Yannan, et al. Advances in LC-MS/MS for mycotoxins analysis in traditional Chinese medicines [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(9): 1856–1870.

[56] Wang Menghui, Xiao Chengui, Zhao Fengjuan, et al. Dual-ratiometric fluorescent aptasensor based on gold nanoclusters and dual-amplification strategy for simultaneous detection of ochratoxin A and aflatoxin B_1 [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 427: 137164.

[57] Lin Jiarong, Deng Ye, Lin Yue, et al. Advanced dual-signal point-of-care testing platform for sensitive T-2 toxin detection: integrating copper-based conductive MOF with target-responsive DNA hydrogel [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 438: 137802.

[58] Murugesan A, Li Huanhuan, Shoaib M. Recent advances in functionalized carbon quantum dots integrated with metal-organic frameworks: emerging platforms for sensing and food safety applications [J]. Foods, 2025, 14(12): 2060.

[59] Chuai Qingxin, Zhu Xuecheng, An Yilin, et al. Advances in optical sensor visualization: enabling rapid mycotoxin detection [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 160: 105003.

(责任编辑: 安香玉 范彩旭)