张一帆, 姜平, 叶金, 等. 谷物中真菌毒素快速检测技术的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 446−456. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040137
ZHANG Yifan, JIANG Ping, YE Jin, et al. Recent Advances in Rapid Detection Techniques for Mycotoxins in Cereals[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 446−456. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040137

· 专题综述 ·

谷物中真菌毒素快速检测技术的研究进展

张一帆[1,2], 姜　平[2], 叶　金[2], 马亦竹[2], 尹　鹏[2], 张维清[2], 徐思佳[2], 于国萍[1,*], 刘　明[2,*]
（1.黑龙江东方学院食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150066;
2.国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037）

摘　要: 谷物中真菌毒素污染是全球性公共卫生挑战，其长期暴露风险与急性毒性严重威胁粮食安全与公众健康。快速检测方法已成为预防性风险管控、满足监管合规要求的关键技术手段。本文系统综述了前沿真菌毒素检测技术的研究现状、技术优势及局限性。免疫分析方法虽具备操作简便、高通量筛查的显著优势，但检测过程常受样品基质干扰与交叉反应假象的影响。生物传感器技术通过纳米材料集成实现信号放大，灵敏度得以显著提升，然而适配体合成成本高昂及环境稳定性不足等问题，使其在大规模推广应用中面临瓶颈。光谱检测技术能够实现非破坏性实时分析，但其普及应用受制于仪器设备投入高、多变量数据解析计算复杂等现实因素。未来研究需聚焦多技术联用与材料创新，以突破复杂基质抗干扰能力不足与多毒素同步检测效率低下的性能瓶颈，同时推进便携式检测设备的研发，为粮食安全监管提供精准化、高效化的技术支撑。

关键词: 谷物真菌毒素, 快速检测, 免疫分析技术, 生物传感器技术, 光谱检测技术
中图分类号: TS207.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0446−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040137
本文网刊:

Recent Advances in Rapid Detection Techniques for Mycotoxins in Cereals

ZHANG Yifan[1,2], JIANG Ping[2], YE Jin[2], MA Yizhu[2], YIN Peng[2], ZHANG Weiqing[2], XU Sijia[2], YU Guoping[1,*], LIU Ming[2,*]
（1.School of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, China;
2.Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China）

Abstract: Mycotoxin contamination in cereal grains is regarded as a critical global challenge, jeopardizing food security and public health through chronic exposure and acute toxicity. Rapid detection methodologies are emerged as indispensable tools for preemptive risk mitigation and regulatory compliance. This review critically evaluates the current landscape, operational merits, and limitations of cutting-edge mycotoxin detection technologies. Immunoassays, characterized by procedural simplicity and high-throughput potential, are frequently hampered by matrix interference and cross-reactivity artifacts. Biosensors, augmented by nanomaterial integration for signal amplification, exhibit enhanced sensitivity but are faced with scalability constraints due to prohibitive aptamer synthesis costs and limited environmental stability. Spectroscopic detection techniques enable non-destructive, real-time analysis, yet their widespread adoption is restricted by capital-intensive instrumentation and computationally demanding multivariate data interpretation. In the future, the integration of multiple technologies and material innovation should be prioritized to address the performance limitations, including insufficient anti-interference capabilities in complex matrices and low efficiency in simultaneous multi-toxin detection. Furthermore, developing portable detection devices would provide reliable and efficient technical support for food safety regulation.

收稿日期: 2025−04−14
基金项目: “十四五”国家重点研发计划（2023YFF1104605）。
作者简介: 张一帆（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: zyf4617@126.com。
*** 通信作者:** 于国萍（1963−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: 838778516@qq.com。
刘明（1980−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能性方便食品研究与核心装备开发, E-mail: Lm@ags.ac.cn。

Key words: cereal mycotoxins; rapid detection; immunoassays; biosensors; spectroscopic detection

真菌毒素是由青霉属、曲霉属、链格孢属、镰刀菌属等不同属的丝状真菌产生的有毒次级代谢产物，广泛存在于全球农产品供应链中，其污染范围和危害程度已成为食品安全领域的重大挑战[1]。在已分离鉴定的 400 余种真菌次级代谢产物中，约 300 种被证实对人类健康具有显著毒性，如致癌性、生长和生殖毒性、致突变性和遗传毒性、免疫毒性和神经毒性等[2−3]。因此建立快速准确的真菌毒素检测技术对于保证食品安全至关重要。

目前真菌毒素的检测方法主要可分为色谱检测技术、免疫分析快速检测技术、生物传感器技术和光谱检测技术等[2]。气相色谱法在黄曲霉毒素（Aflatoxins, AFs）检测中应用有限，存在分离效率低、灵敏度不足、前处理复杂及热稳定性差等问题；液相色谱-串联质谱联用技术具备高效处理复杂基质、多种真菌毒素同步分析及痕量检测能力，目前被广泛采用，但存在仪器成本高昂、需专业人员操作、前处理流程繁琐、分析耗时长等弊端，不适用于现场检测人员开展大规模样品筛查[4]。因此，近些年来，免疫分析快速检测技术、生物传感器技术、光谱检测技术等快速检测技术得到了高速发展[5]。这些快检技术不仅在实验室分析中取得了良好的效果，还可以应用于现场快速检测，帮助实现真菌毒素污染的监测和早期预警。本文通过系统梳理当前真菌毒素快速检测技术的研究现状及进展，对比分析不同快速检测技术的优缺点，旨在为谷物真菌毒素的防控提供一定的理论依据与技术参考。

1　免疫分析快速检测技术

1.1　酶联免疫吸附法

酶联免疫吸附法（Enzyme-Linked Immunosorbent Assay, ELISA）是一种基于抗原与抗体特异性结合反应的免疫分析快速检测技术，通过酶标记物催化显色反应及信号放大完成痕量分析，实现目标物质的定量或定性检测[6]。ELISA 方法的优势体现在操作简便、检测快速、样本用量少及高通量检测等方面，尤其适用于基层实验室和大规模筛查场景[7]。酶联免疫吸附法在真菌毒素检测中的应用情况如表 1 所示。Ren 等[8] 通过制备高特异性单克隆抗体并建立超灵敏 ELISA，对赭曲霉毒素 A（Ochratoxin A, OTA）的检测限低至 1.5 pg/mL（IC_{50}=34.8 pg/mL），且与高效液相色谱-荧光检测法结果高度一致。Zhan 等[9] 将动态光散射信号与 H_2O_2-酪胺信号放大系统结合，开发出黄曲霉毒素 B_1（Aflatoxin B_1, AFB_1）超灵敏检测方法，检测限达 0.12 pg/mL，灵敏度较传统 ELISA 方法提升 385 倍。Yan 等[10] 利用生物素化纳米抗体构建 BA-ELISA，检测谷物中 AFB_1 的灵敏度（LOD=0.04 ng/mL）较常规 ELISA 提升 3.6 倍，抗体用量减少 95%。此外，Wei 等[11] 开发的动态伪均相 MBs-icELISA 通过优化抗体筛选策略，将 AFB_1 检测限降至 0.0013 ng/mL，检测时间缩短至 30 min。然而，ELISA 方法仍面临交叉反应率高[8,12]、基质效应干扰及方法验证不足等局限性[13]。

ELISA 在单毒素快速筛查中具有操作便捷性，但在多毒素污染场景或高基质复杂性样品中，仍需结

表 1　酶联免疫吸附法在真菌毒素检测中的应用

Table 1　Applications of ELISA in mycotoxin detection

样本	检测对象	抗体类型	检测限	线性范围	回收率	检测时间	参考文献
谷物及其制品	AFs OTA ZEN DON	–	0.05 μg/L; 0.03 μg/L; 50 ng/L; 3.7 μg/L	0.05~4.05 μg/L; 0.03~3 μg/L; 50~4050 ng/L; 3.7~100 μg/L	–	AFs/OTA/ DON=1~2 h, ZEN=4~5 h	[6]
玉米、小麦、饲料	OTA OTB OTC	mAb	1.5 pg/mL	2~200 pg/mL	96.5%~110.8%, RSD: 5.2%~13.6%; 89.5%~94.4%, RSD: 8.2%~13.0%; 91.8%~113.3%, RSD: 7.7%~13.7%	4~5 h	[8]
玉米	AFB_1	mAb	0.12 pg/mL	0.01~1000 pg/mL	90.60%~100.75%; CV: 2.12%~14.56%	4~5 h	[9]
小麦、玉米	AFB_1	sdAb	0.05 ng/mL; 0.07 ng/mL	0.08~0.97 ng/mL; 0.10~0.80 ng/mL	87.35%~97.05%, CV: 5.57%~10.77%; 87.91%~98.53%, CV: 5.23%~8.19%	50 min	[10]
玉米、小麦	AFB_1	mAb	0.0013 ng/mL	0.004~10 ng/mL	–	1.5 h	[11]
小麦粉、玉米粉	AFB_1	mAb	18 pg/mL	0~1000 pg/mL	103.7%~115.5%, RSD: 1.49%~8.25%; 95.6%~106.5%, RSD: 1.61%~7.18%; 78.3%~101.5%, RSD: 4.88%~13.21%	4~5 h	[12]

注：“–”表示文献中未标注；ZEN：玉米赤霉烯酮；DON：脱氧雪腐镰刀菌烯醇；OTB：赭曲霉毒素B；OTC：赭曲霉毒素C；mAb：单克隆抗体；sdAb：单结构域抗体；RSD：相对标准偏差；CV：变异系数。

合免疫亲和净化或质谱确证技术以提升可靠性。因此，未来研究可聚焦以下方向：推动多技术联用策略，如通过免疫亲和层析与 ELISA 协同检测，可将 OTA 检测灵敏度提升 60 倍[14]，此类技术整合有望突破单一方法的性能瓶颈；开发纳米抗体或仿生材料体系，如基于纳米金的免疫传感器已被证实可降低检测限并增强信号稳定性[15]，通过材料创新可进一步优化检测的灵敏度与抗干扰能力；融合人工智能技术，通过机器学习算法优化抗体设计流程，构建智能化数据分析模型，推动 ELISA 向便携化、实时化检测方向发展。

1.2 免疫层析技术

免疫层析技术以微孔膜为固相载体，利用毛细管作用使样本在膜上迁移，目标分析物通过与固定于膜上的抗体或抗原发生特异性结合反应，结合标记物产生可检测信号，从而实现对目标物的检测。该技术具有成本低廉、特异性强、稳定性高、检测耗时短、无需专业人员操作、可现场检验且结果肉眼可见等显著优势，为快速检测领域提供了极大的便利[16]。根据抗原抗体结合方式的不同，免疫层析技术主要分为夹心法和竞争法两种模式；根据标记用纳米颗粒的来源不同，又可分为有色纳米颗粒、磁性纳米颗粒和荧光纳米颗粒三大类[17]。免疫层析技术在真菌毒素检测中的应用情况如表 2 所示。

在基于有色纳米颗粒的免疫层析中，常见为金标免疫层析，如 Ren 等[21] 以传统的球形胶体金作为抗体标记探针检测 FB_1，检测限仅为 20.0 ng/mL。然而，随着检测需求的提升，传统的胶体金的灵敏度逐渐难以满足检测的需要，磁性纳米颗粒和荧光纳米颗粒等新型标记材料逐渐成为研究焦点。孙亚宁等[23] 采用羧基修饰超顺磁颗粒与绿色荧光蛋白偶联，构建磁荧光免疫层析试纸检测 DON，灵敏度达 1.089 ng/mL，较胶体金试纸提升 10.96 倍。但磁性纳米颗粒需依赖磁性读数设备，且免疫磁分离时抗体用量较高，一定程度上限制了应用的便捷性[17]。荧光纳米颗粒因具备信号强度高、抗背景干扰强等优势备受关注。Li 等[18] 基于碳点/银纳米颗粒猝灭体系开发荧光免疫层析试纸，对 ZEN 的检测限低至 1 μg/kg，且无交叉反应。还有报道利用 $CdSe/SiO_2$ 量子点微珠（QBs）实现 AFB_1、ZEN 和 DON 的同时检测，检测限分别达 0.24、1.92 和 12 μg/kg，但量子点存在光稳定性差、需荧光读数仪等缺陷[19]。

综上，尽管免疫层析技术凭借操作简便、成本低、适合现场检测等优势，在真菌毒素快速筛查领域占据重要地位，但现阶段仍面临灵敏度有待提升、定量准确性不足、标记材料依赖专业设备以及多组分同步检测能力有限等挑战。因此，未来研究可聚焦于以下方向：一是开发多功能复合纳米标记材料，通过一次标记实现靶标分离与高灵敏检测，简化操作流程并提升检测效率；二是融合微流控技术与智能分析系统，实现检测流程的标准化与结果判读的智能化，突破传统肉眼判读的主观性局限；三是推动适配体或纳米酶等新型识别元件的应用，降低抗体依赖性并提升特异性。

表 2 免疫层析技术在真菌毒素检测中的应用

Table 2 Applications of immunochromatography in mycotoxin detection

样本类型	识别元件	检测靶标	标记材料	检测限	分析时间（min）	参考文献
谷物及其制品	抗体	ZEN	碳点+银纳米颗粒	1~2.5 μg/kg	20	[18]
饲料	抗体	AFB_1 ZEN DON	量子点微珠	0.24~12 μg/kg	15	[19]
谷物及其制品	抗体	AFB_1 ZEN DON T-2毒素 FB_1	金纳米颗粒； 时间分辨荧光微球	可见检测限：0.5~10 μg/kg； 定量检测限：0.04~0.75 μg/kg	–	[20]
小麦、玉米、大米	抗体	FB_1	金纳米颗粒	5 ng/mL	5	[21]
玉米、小麦、大麦、高粱、酒糟	抗体	DON	胶体金纳米颗粒	视觉检测限： 10~150 μg/kg； 计算检测限： 1.97~46.8 μg/kg	5	[22]
小麦	抗体	DON	磁荧光抗体探针； 胶体金纳米颗粒	1.089 ng/mL； 11.94 ng/mL	20；10	[23]
玉米	抗体	FB_1 FB_2 FB_3	时间分辨荧光微球	检出限：FB_1=121.48 μg/kg， FB_2=107.68 μg/kg，FB_3=168.28 μg/kg； 定量限：FB_1=316.48 μg/kg， FB_2=283.46 μg/kg，FB_3=444.63 μg/kg	16	[24]
小麦粉、玉米粉	抗体	DON ZEN	时间分辨荧光微球	单通道检测：DON=0.17 μg/L， ZEN=0.54 μg/L； 双通道检测：DON：0.24 μg/L， ZEN：0.69 μg/L	40	[25]
饲料	抗体	AFB_1 ZEN DON	荧光镧系元素	AFB_1：3 μg/kg ZEN：50 μg/kg DON：200 μg/kg	90	[26]

注：“–”表示文献中未标注；FB_1：伏马菌素B_1；FB_2：伏马菌素B_2；FB_3：伏马菌素B_3。

1.3　荧光免疫分析法

荧光免疫分析法（Fluorescence Immunoassay, FIA）结合了抗原-抗体特异性识别与荧光信号检测的优势，具有灵敏度高、选择性好、操作便捷等特点，已成为真菌毒素检测的重要技术。其核心原理是利用荧光物质标记抗体或抗原，通过免疫反应后检测荧光信号强度或特性变化来实现目标物的定量分析。基于检测原理中荧光信号产生、检测方式以及免疫反应形式的不同，可分为荧光免疫吸附法、荧光免疫层析法、荧光偏振免疫分析、荧光共振能量转移免疫分析、时间分辨荧光免疫分析、比率式免疫荧光测定法等[27]。近年来，随着纳米材料、微流控技术和智能设备的引入，荧光免疫分析快速检测技术不断革新，在检测通量、多组分联检及现场应用等方面展现出显著潜力。荧光免疫分析快速检测技术在真菌毒素检测中的应用情况如表 3 所示。

荧光免疫吸附法（Fluorescence-Linked Immunosorbent Assay, FLISA）基于固相载体（如微孔板）上的抗原-抗体竞争结合反应，通过荧光标记探针的信号变化实现定量检测。例如，Zhou 等[28] 利用双色量子点标记抗体，建立多重 FLISA 法，可同时检测 ZEN 和 OTA，检测限分别低至 0.0239 ng/g 和 2.339 ng/g，且与高效液相色谱检测法结果高度一致。Li 等[29] 进一步开发双量子点纳米珠标记的 FLISA 法，灵敏度较传统方法提升 20 倍，适用于饲料中 AFB_1 和 ZEN 的联检。该技术虽灵敏度高，但需多次洗涤步骤，易受基质干扰，且通量有限。

荧光免疫层析法（Fluorescent Immunochromatographic Assay, FICA）以侧向层析试纸为载体，结合荧光标记物实现快速现场检测。Oh 等[38] 设计了基于荧光共振能量转移（Fluorescence Resonance Energy Transfer, FRET）的层析试纸，30 min 内完成样品中 OTA 检测（LOD=0.88 ng/mL），有效克服深色基质的干扰。Zheng 等[39] 开发基于智能手机的荧光试纸阅读器，可同时检测人绒毛膜促性腺激素和 AFB_1，检测限低至3.9 pg/mL，兼具便携性与准确性。然而，层析法检测限易受标记材料限制，且多组分联检时需优化膜上抗体布局以避免交叉反应。

荧光偏振免疫分析（Fluorescence Polarization Immunoassay, FPIA）通过检测荧光标记物偏振值变化反映小分子与抗体的结合状态，无需固相分离。Zhang 等[30] 开发双波长 FPIA 法，可同时检测玉米中 AFs 和 ZEN，检测限分别为 4.98 μg/kg 和 11.03 μg/kg，检测时间<30 min。Lippolis 等[31] 使用 FPIA 技术，实现了小麦中 T-2 毒素及其代谢物的高通量筛查，符合欧盟标准。该技术虽快速简便，但对仪器偏振检测模块要求较高，且复杂基质中荧光背景可能干扰结果。

表 3　荧光免疫分析法在真菌毒素检测中的应用

Table 3　Applications of FIA in mycotoxin detection

样本类型	检测对象	荧光标记物	激发/发射波长	检测限	回收率	检测时间（min）	参考文献
玉米	ZEN OTA	量子点	激发波长：450 nm； 发射波长：ZEN=520 nm， OTA=610 nm	0.00015 ng/mL； 0.049 ng/mL	93.15%~101.90%， CV=2.70%~8.86%， 95.29%~102.43%， CV= 3.51%~6.22%	150~180	[28]
玉米及其制品	AFB_1 ZEN	量子点 纳米珠	激发波长：305 nm； 发射波长：AFB_1=630 nm， ZEN=530 nm	9.3 pg/mL； 102.1 pg/mL	82.50%~116.21%， RSD<11.3%； 89.59%~115.33%， RSD<10.7%	90~120	[29]
玉米粉	AFs ZEN	荧光素类	激发波长：AFs=485 nm， ZEN=530 nm； 发射波长：AFs=540 nm， ZEN=580 nm；	4.98 μg/kg； 11.03 μg/kg	78.6%~103.6%， CV=4.7%~12.7% 86.1%~102.9%， CV= 13.2%~19.2%	30	[30]
小麦	T-2毒素 HT-2毒素	荧光素类	激发波长：485 nm； 发射波长：535 nm	LOD：10 μg/kg LOQ：15 μg/kg	有机提取法：92%~102%， CV≤13% 非有机提取法：89%~98%， CV≤7%	15	[31]
大米	OTA OTB	无外源性标记物	激发波长：280 nm； 发射波长：430 nm	0.06 ng/mL 0.12 ng/mL	100%~124%，CV=5%~10%； 83%~127%，CV=3%~11%	10	[32]
米粉	生物素	荧光蛋白	激发波长：434 nm； 发射波长：530 nm	0.12 nmol/L	93.9%；85.2%	15	[33]
玉米、小麦、糙米	AFB_1； ZEN； DON	时间分辨荧光微球	激发波长：365 nm； 发射波长：650 nm	0.003 ng/mL 0.05 ng/mL 1.09 ng/mL	92%~101%； 102%~105%； 103%~108%	10	[34]
玉米、饲料	AFB_1	时间分辨荧光微球	–	62.7 ng/kg 121 ng/kg	90%~98%； 90%~98%	6	[35]
玉米	ZEN	有机荧光探针	激发波长：360 nm； 发射波长：PTA-NH_2=426 nm， DAP=562 nm	0.014 ng/mL	101.10%~107.20%， CV=2.15%~7.65%	120	[36]
玉米	AFB_1	纳米团簇 有机荧光探针	激发波长：370 nm； 发射波长：PVP-CuNCs=430 nm， DAP=580 nm	26.79 pg/mL	84.66%~105.21%， CV=1.18%~4.88%；	43	[37]

注：“–”表示文献中未标注；LOD：检测限；LOQ：定量限；DAP：2,3-二氨基吩嗪；PTA-NH_2=426 nm：2-氨基对苯二甲酸；PVP-CuNCs：聚乙烯吡咯烷酮保护的铜纳米团簇。

荧光共振能量转移免疫分析(FRET-Based Immunoassay)技术通过供体-受体的能量转移效率变化来检测目标物。Tang 等[32] 基于纳米抗体构建非竞争性 FRET 体系,可同时检测 OTA 和 OTB(LOD=0.06 ng/mL),检测时间仅 10 min。Wu 等[33] 开发 FRET 生物传感器,利用 BirA 酶二聚化检测食品中生物素(LOD=0.12 nmol/L),支持高通量分析。此类技术灵敏度高,但供体/受体标记过程复杂,且 pH、离子强度等环境条件易影响能量的转移效率。

时间分辨荧光免疫分析(Time-Resolved Fluorescence Immunoassay, TRFIA)采用镧系稀土离子标记抗体、抗原,利用其长荧光寿命特性,通过延迟检测消除短寿命背景荧光的干扰。Wang 等[34] 结合微流控芯片开发 TRFIA 法,可现场检测谷物中 AFB_1、ZEN 和 DON,检测限低至 0.003 ng/mL。Han 等[35] 优化 TRFICA 法,21 min 内完成玉米中 AFB_1 的定量检测(LOD=62.7 ng/kg)。该技术抗干扰能力强,但需专用时间分辨荧光仪,成本较高。

比率式技术(Ratiometric Detection Technology, RDT)通过双信号比值校正背景干扰,提升检测可靠性。Wu 等[36] 基于碱性磷酸酶触发内滤效应,建立 ZEN 比率检测法(LOD=0.014 ng/mL),灵敏度较 ELISA 提升 2.7 倍。Sun 等[37] 利用 Ce^{4+} 氧化邻苯二胺与铜纳米簇构建比率体系,实现 AFB_1 高选择性检测(LOD=26.79 pg/mL)。此类技术虽准确性高,但体系设计复杂,需精确控制反应条件。

综上,未来荧光免疫分析快速检测技术将朝着多组分联检、智能化与现场化方向发展,研究可从以下方面展开:一是推动多色量子点、上转换纳米颗粒与微流控芯片等融合,实现多种毒素同步检测;二是通过智能手机集成光学模块与人工智能算法,推进便携检测设备普及;三是探索磁珠、DNA 适配体等新型标记材料,结合无标记检测策略,进一步提升检测灵敏度与操作便捷性。

2 生物传感器技术

2.1 电化学免疫传感器

电化学免疫传感器通过生物识别元件(如抗体、抗原)与目标分子的特异性结合,将相互作用转化为电化学信号(如电流、阻抗或电位变化),实现对目标物的高灵敏检测,其核心原理是将免疫反应与电化学换能技术相结合。例如抗原-抗体结合后引起电极表面电子转移效率的变化,从而输出可定量分析的信号[40]。近年来,纳米材料的引入显著提升了传感器的性能。Feng 等[41] 构建了基于二氧化锡量子点和钯改性氧化石墨烯的电化学发光免疫传感器,用于检测 ZEN。该传感器利用二氧化锡量子点修饰的钉状金银合金作为免疫探针,结合钯改性氧化石墨烯底物,实现了检测限低至 0.16 pg/mL、线性范围宽达 0.0005~500 ng/mL 的高性能,且在实际样品中回收率达 82.5%~96.3%。电化学免疫传感器的优势在于灵敏度高、检测速度快且易于集成小型化设备。Yaiwong 等[42] 开发的无标记电化学免疫传感器利用甲苯胺蓝-多孔有机聚合物-二维二硒化钼纳米复合材料,将 AFB_1 的检测限降至 0.40 μg/L。然而,其局限性亦不容忽视,包括生物识别元件易受环境干扰、复杂样品基质可能引发交叉反应等。例如,Hou 等[43] 开发了一种电化学适配体传感器,该传感器基于 Nafion 稳定的功能化多壁碳纳米管,在麦芽样品的 OTA 检测中实现了 1.0 pg/mL 的超灵敏检测,但其实际应用仍受限于复杂食品基质中的干扰物质。

综上可见,电化学免疫传感器凭借纳米材料在真菌毒素检测中展现出卓越性能,但其在复杂实际场景中的稳定性与抗干扰能力仍需突破,这既是当前技术的瓶颈,也是未来研究的攻坚方向。因此,未来应聚焦于提升传感器的稳定性和抗干扰能力。一方面,开发新型生物识别元件可增强稳定性;另一方面,多技术联用有望简化操作流程。以 Jahangiri 等[44] 研究为例,其构建的双工电化学适配体传感器结合两种氧化还原探针,实现了 OTA 和 AFB_1 的同时检测,检测限分别为 4.3×10^{-3} ng/mL 和 5.2×10^{-3} ng/mL,展现了多目标同步检测的应用价值。

2.2 适配体传感器

适配体传感器以适配体(通过指数富集的配体系统进化技术筛选的单链 DNA/RNA)为识别元件,通过与目标分子的高亲和力结合从而引发物理、化学或电化学信号的变化。Liu 等[45] 利用核酸外切酶 III 辅助链置换反应,构建了同时检测 AFB_1 和 OTA 的电化学适配体传感器,检测限分别为 0.229 pg/mL 和 0.564 pg/mL,且无需复杂电极修饰。适配体的优势在于稳定性高、易于合成修饰,并可通过多探针设计实现多毒素检测。Mousivand 等[46] 通过计算机模拟开发了基于适配体 F20 和 F20-T 的侧向流动适配体传感器,利用截断策略和计算模拟方法设计新型适配体,实现了对 AFB_1 的简单快速检测,检测限分别为 0.1 ng/mL 和 0.5 ng/mL,在玉米粉实际样本检测中展现出良好性能。

尽管适配体传感器性能优异,但适配体筛选过程复杂且成本较高,部分适配体在复杂基质中的结合效率可能下降[47]。例如,Wu 等[48] 开发的微流控适配体传感器虽实现了 AFB_1 和 DON 的快速双毒素检测(LOD 分别为 7.74 pg/mL 和 0.172 ng/mL),但其 DON 适配体因碱基对过多导致检测限偏高,且未验证高干扰基质中的性能,表明适配体筛选及复杂基质中的性能仍需优化。此外,信号放大技术的不足限制了部分传感器的灵敏度,研究者可开发具有酶特性的多种纳米材料替代天然酶,以克服天然酶的局限性,提高检测灵敏度,或引入新型材料作为信号增强剂,如导电纳米材料、纳米催化剂和纳米载体等功能纳米材料[49]。Hou 等[43] 通过制备 Nafion 稳定的功能化多壁碳纳米管(f-MWCNTs)作为信号增强剂构

建电化学适配体传感器，在 0.005~10 ng/mL 的范围内，电流变化与 OTA 浓度对数呈良好线性关系，但制备 f-MWCNTs 时需 MWCNTs 与硝酸在 140 ℃回流 8 h，该工艺对材料合成条件要求苛刻。

适配体传感器展现出高特异性与多毒素检测潜力，但其发展仍受制于适配体筛选的复杂性、成本及复杂基质中的性能波动，且信号放大技术瓶颈亟待突破。未来研究需优化适配体筛选技术，并探索新型信号放大策略，如将适配体与石墨烯、金属有机框架等纳米材料结合可增强信号响应；同时，由于适配体本身的信号输出较弱，抗干扰能力不足，需依赖纳米材料、酶标记等其他技术放大信号，以达到痕量检测要求，因此多技术联用是未来发展的重要趋势。此外，开发低成本、便携化的适配体传感器将加速其实际应用。

2.3　荧光生物传感器

荧光生物传感器通过荧光标记物与目标分子的特异性结合或相互作用，引起荧光强度、波长或寿命的变化，进而实现目标物的定性与定量分析。Chi 等[50] 开发的双模板分子印迹聚合物比率荧光传感器，基于三发射碳量子点的荧光信号变化，实现了玉米油、花生油等植物油中 AFB_1 和 ZEN 的肉眼可视化检测，检测限分别低至 3.2 pg/mL 和 18.0 pg/mL，回收率高达 96.3%~103.7%。该类传感器的优势在于灵敏度高、选择性好且可实现多分析物检测。基于自由互补 DNA 的竞争性荧光检测方法，通过 DNA 适配体与 OTA 的结合引发荧光信号释放，检测限可达 pg/mL 级别[51]。然而，荧光传感器的局限性亦显著，复杂样品中的背景荧光易干扰检测结果，且部分荧光标记物（如有机染料）存在光稳定性差的问题，并且高精度荧光检测通常依赖昂贵仪器，限制了现场应用。Huang 等[52] 开发的银扩增免疫传感器通过银纳米颗粒分解产生的荧光 Ag^+-咪唑聚集信号，将 AFB_1 的检测限降至 1.4 pg/mL，该技术可有效减少复杂基质中的背景荧光干扰，但抗体对不同黄曲霉毒素衍生物的亲和力不均，且聚集诱导发光分子水溶性有待提升。Li 等[53] 通过将铕荧光纳米球与羧基化四氧化三铁磁性微球结合，构建了一种竞争性荧光免疫传感器，检测限为 0.003 ng/m，样品中 AFB_1 回收率为 94%~106%，与高效液相色谱法测定结果一致，实现了 AFB_1 的高灵敏度检测，但其检测依赖荧光光谱仪等精密设备，限制了现场应用；此外，该技术未验证对 AFB_2、AFG_1 等其他黄曲霉毒素的广谱适用性，需通过多毒素竞争筛选抗体以提升检测兼容性。

综上可见，当前荧光生物传感器在真菌毒素检测中已展现出高灵敏度潜力，但受限于复杂基质背景干扰、标记物稳定性及检测兼容性不足等瓶颈。突破上述局限需依托材料科学与生物识别技术的交叉创新，如开发低背景干扰的量子点、荧光蛋白标记体系，优化多毒素广谱识别抗体，并通过纳米颗粒形态工程提升信号放大效率。未来，随着水溶性聚集诱导发光分子的设计优化及绿色检测工艺的普及，荧光传感器有望在现场快速检测与复杂食品基质分析中实现更精准、便捷的应用。

3　光谱检测技术

3.1　拉曼光谱

拉曼光谱是一种基于非弹性光散射的光谱技术，通过分析光子与分子相互作用后产生的振动模式特征光谱，实现对物质分子结构的定性与定量分析，其光谱指纹特性使其在复杂基质检测中具有独特优势[54]。与传统检测方法相比，拉曼光谱技术无需复杂样品前处理，具有快速、无损、灵敏度高及可现场检测等优势[55]。近年来，表面增强拉曼光谱（Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS）技术的突破进一步提升了其检测性能。例如，Weng 等[56] 将柠檬酸钠改性金纳米棒（Cit-AuNRs）作为 SERS 基底，结合液-液界面自萃取和完全卷积网络，实现了镰刀菌头枯病感染小麦中 DON 的快速检测，检测限低至 0.11 mg/L，模型预测均方根误差为 4.41 mg/L，决定系数（Coefficient of Determination, R^2）为 0.9827。Deng 等[57] 基于便携式拉曼系统，通过竞争性自适应重加权采样算法优化特征波长变量并建立支持向量机模型，实现了玉米中 AFB_1 的高精度定量检测，预测均方根误差为 3.54 μg/kg，剩余预测偏差为 5.83。Yin 等[58] 开发的 SERS 侧向层析免疫传感器可在 15 min 内完成玉米中 ZEN 的检测，检测限为 3.6 μg/kg，与高效液相色谱法检测结果的一致性达 86.06%~111.23%。此外，Yang 等[59] 利用三维银纳米多孔硅-SERS 衬底，结合蛋白质微阵列技术，实现了多种真菌毒素的高通量检测，增强因子达 2.3×10^7，检测限达 pg/mL 级别，显著提升了检测灵敏度。

然而，拉曼光谱技术仍面临挑战：其一，谷物中复杂基质可能干扰信号解析，影响低浓度毒素检测的准确性；其二，如金纳米棒、银纳米立方体等 SERS 基底，其制备工艺复杂，稳定性与重复性需进一步优化；其三，数据分析依赖专业算法，非技术人员难以快速解读[54−56]。针对上述挑战，未来技术可聚焦以下方向：一是深入开发仿生物膜结构的纳米界面，通过仿生识别基团提升毒素捕获特异性，利用光场、电场调控纳米间隙的热点分布，增强信号稳定性，未来可进一步结合 DNA 折纸技术构建可编程的纳米反应器；二是推动多技术联用[59]，将微流控液滴操控、免疫富集与拉曼检测集成，实现检测过程一体化[58]；三是构建智能化光谱数据库与自适应分析模型，降低数据处理门槛等[60]（光谱检测技术在真菌毒素检测中的应用情况如表 4 所示）。

3.2　近红外光谱

近红外光谱（Near-Infrared Spectroscopy, NIR）检测技术利用物质中不同成分对近红外光的特征吸收特性，通过光谱差异实现目标成分检测。传统检测

方法如高效液相色谱或超高效液相色谱-质谱联用虽灵敏度高，但存在耗时久、成本高、需使用有毒试剂等缺点，相比之下，NIR 技术具有方便快捷、无损检测、绿色环保等优势[61]。Levasseur-Garcia 等[62]通过 NIR 结合判别分析玉米中伏马菌素污染风险，在扫描波长 400~2498 nm 范围内，其校准集 96% 的玉米样品分类正确，独立验证集 82% 分类正确，误报率较低。Li 等[63]进一步优化了 NIR 技术的检测性能，通过杂草优化算法筛选特征变量并结合支持向量机（Support Vector Machine, SVM）建模，将样品中 AFB_1 的预测均方根误差降至 24.63 μg/kg，相关系数（R^2）达 0.976，显著提升了定量分析的精度。Shen 等[64]开发的可见/近红外系统（Visible/Near-Infrared, Vis/NIR）成功实现了小麦真菌污染的在线实时监测，其偏最小二乘回归模型对菌落数的预测均方根误差仅为 0.369 lg CFU/g，且线性判别分析模型对感染样本的分类正确率高达 91.7%，验证了 NIR 技术在动态生产场景中的应用潜力。

未来近红外光谱技术将呈现多维融合与智能化发展趋势。其一，大数据与人工智能的深度融合将优化模型泛化能力。随着光谱数据库的扩充，研究者基于机器学习算法和集成建模方法可进一步提升检测

表 4 光谱检测技术在真菌毒素中的应用

Table 4 Applications of spectral detection techniques in mycotoxin detection

检测技术	检测样本	检测项目	检测限	光谱范围	模型准确度	参考文献
拉曼光谱法	小麦	DON	0.11 mg/L	拉曼光谱: 300~2000 cm^{-1}; 激发波长: 785 nm; 分辨率: 2 cm^{-1}	最佳模型: 预测集 RMSEP=4.41 mg/L, R_P^2=0.9827, 验证集 RMSEV=4.04 mg/L, R_V^2=0.9826	[56]
	玉米	AFB_1	–	拉曼光谱: 200~3100 cm^{-1}; 激发波长: 785 nm	最佳模型: 预测集: RMSEP=3.5377 μg/kg, R_P^2=0.9715, RPD=5.8258, 校准集: RMSEC=3.9619 μg/kg, R_C^2=0.9639	[57]
	玉米	ZEN	3.6 μg/kg	拉曼光谱: 400~2000 cm^{-1}; 激发波长: 785 nm; 分辨率: 1 cm^{-1}	线性范围: 10~1000 μg/kg; 回收率: 84.60%~90.50% （加标样本, RSD 8.45%~11.37%）	[58]
	小麦	T-2毒素 DON	异丙醇提取: 70 ng/mL; 乙腈提取: 750 μg谷物/探针	拉曼光谱: 200~2000 cm^{-1}; 激发波长: 532 nm	可检测0.17%真菌污染的小麦谷物	[75]
	玉米	AFB_1 ZEN OTA	10 ng/g; 20 ng/g; 100 ng/g	550~2000 cm^{-1}; 激发波长: 785 nm	R^2: AFB_1= 0.74; ZEN=0.89; OTA=0.72	[76]
近红外光谱法	玉米	FB_1 FB_2	0.1 μg/g; 0.2 μg/g	400~2498 nm	校准集准确率96%; 独立验证集准确率82%	[62]
	玉米	FB_1 FB_2 ZEN	10 μg/kg 20 μg/kg 20 μg/kg	400~2500 nm	FB_1+FB_2: R=0.809, R^2=0.899, RMSEP=659 μg/kg, RPD=3.33; ZEN: R=0.991, R^2=0.984, RMSEP=69.7 μg/kg, RPD=2.71	[77]
	小麦	菌落计数	LOD=1.31 lg CFU/g; LOQ=3.94 lg CFU/g	600~1600 nm	LDA: 菌种识别为91.7%正确分类率; 感染水平识别88.3%正确分类率; PLSR: R^2=0.890, RMSEP=0.369 lg CFU/g, RPD=3.03	[64]
	小麦	DON	–	400~1650 nm	回归模型: R^2=0.94, RMSEP=3.42 mg/kg; 分类模型: 准确率为89.5%	[65]
	小麦	DON 麦角甾醇	50 μg/kg; 0.5 mg/kg	900~1700 nm	DON预测模型: R^2=0.61, RMSEP=501.36 μg/kg, SEP=501.36 μg/kg; DON分类模型: 准确率为85.4%; 麦角甾醇预测模型: R^2=0.89, RMSEP=1.17 mg/kg, SEP=1.17 mg/kg	[66]
高光谱成像	小麦粒; 小麦粉	DON	20 μg/kg（小麦粉）	Vis-NIR: 400~1000 nm SWIR: 1000~2500 nm	小麦粒: MSC-GA-SAE模型, 训练/测试准确率均为 100%; 小麦粉: SNV-GA-SAE模型, 测试准确率96%	[71]
	玉米	AFB_1	10~100 μg/kg	近红外高光谱成像: 1100~2000 nm; 波长间隔: 6.32 nm	校准集准确率=98.22%; 预测集准确率=95.56%; 独立验证样本准确率= 88.67%	[72]
	玉米	产毒镰刀菌	–	有效波长: 1000~2100 nm; 波长间隔: 6.25 nm	分类准确率=100%; 像素级正确分类率=97.3%; 外部验证集分类准确率=100%	[68]
	大麦	DON	0.19 mg/kg	38~1030 nm	定量分析: R_P^2=0.680~0.728, RMSEP=3.802~4.213; 分类分析: PLS-DA, 马修斯相关系数最高0.931	[73]
	稻米	正常及不同程度霉变稻米	–	400~1100 nm	正常/发芽/发霉稻米判别: 最佳模型Baseline-RF, 预测准确率=100%; 不同霉变程度判别: 全波段模型SNV-RF, 预测准确率=100%, 特征波长模型CARS: 预测准确率=97.5%	[78]

注: “–”表示文献中未标注; PLSR: 偏最小二乘回归; RF: 随机森林; RMSEP: 预测集均方根误差; R_V^2: 验证集决定系数; R_P^2: 预测集决定系数; CARS: 竞争自适应重加权采样; R_C^2: 校准集决定系数; RMSEC: 校准集均方根误差; RPD: 相对预测偏差; MSC: 多元散射校正; R: 相关系数; LDA: 线性判别分析; SEP: 预测标准误差; SAE: 稀疏自编码器; SNV: 标准正态变量; GA: 遗传算法。

精度，如 Almoujiahed 等[65] 通过递归特征消除技术，将小麦中 DON 污染的预测 R^2 提升至 0.94，验证了数据驱动模型的潜力。其二，在线检测与物联网技术的集成将推动实时质量控制系统的广泛应用。例如，高光谱成像（Hyperspectral Imaging-Near Infrared，HSI-NIR）技术实现了小麦中麦角甾醇和 DON 的同步定量检测，其预测均方根误差分别为 1.17 mg/kg 和 501 μg/kg，为生产线在线实时监测奠定了技术基础[66]。其三，多模态联用技术将突破单一光谱技术的局限性，如 NIR 与拉曼光谱或质谱的协同分析，可兼顾快速筛查与高灵敏度验证需求。

3.3　高光谱成像

高光谱成像技术通过采集连续窄波段的光谱信息，结合空间维度构建三维“超立方体”数据集（x，y，λ），从而同步获取样品的化学成分及其空间分布特征，为复杂基质中真菌毒素的检测提供多维信息支持[67−68]。相较于传统检测方法，该技术兼具快速、无损、高通量检测优势，且能直观呈现毒素分布，在农产品质量评估中展现出显著潜力[69−70]。

近年来，基于高光谱成像的检测技术在多场景应用中取得突破。Liang 等[71] 利用 Vis-NIR 和短波红外高光谱成像技术，结合遗传算法与稀疏自动编码器网络，实现小麦籽粒和面粉中 DON 的分类检测，小麦籽粒样本最佳分类准确率达 100%，面粉样本最佳准确率为 96%，检测限为 20 μg/kg。Zhou 等[72] 利用 1100~2000 nm 近红外高光谱成像技术，结合方差与平均光谱强度顺序法筛选关键波长，建立了玉米单粒 AFB_1 浓度分类模型，总体准确率与 Kappa 值分别为 95.56% 和 0.9444，检测限低至 0.01 μg/mL。Conceição 等[68] 基于 1000~2500 nm 高光谱成像与偏最小二乘判别分析算法，实现了玉米相关镰刀菌的快速鉴别，模型分类准确率达 100%，并确定了 1140、1418 和 1895 nm 等特征波长。Su 等[73] 通过竞争性自适应重加权采样-集成样本集选择偏最小二乘优化局部加权偏最小二乘回归模型，结合高光谱成像技术对大麦籽粒中 DON 进行定量分析，预测集均方根误差为 4.213 mg/kg，相关系数达 0.680，同时采用偏最小二乘判别分析模型对 DON 污染等级进行判别，交叉验证的 Matthews 相关系数达 0.931，验证了该技术在真菌毒素快速检测领域的应用潜力。

然而，高光谱成像技术仍面临以下挑战：其一，仪器成本高且数据冗余度大，限制了其在生产线的普及应用；其二，复杂数据处理流程依赖专业算法，实时分析能力不足；其三，对均匀样品及深层成分的检测精度有待提升[67−69]。因此，该技术未来发展可从技术瓶颈出发，针对性地展开系统优化：首先，开发低成本多光谱成像系统，通过特征波长筛选降低数据维度，以适配大规模应用场景；其次，深度结合卷积神经网络等深度学习算法，优化模型效率与鲁棒性；最后，着力推动硬件集成化与便携化，满足仓储与田间场景的在线检测需求等[67−68,74]。

4　结论与展望

本文系统综述了谷物中真菌毒素快速检测技术的研究进展，重点剖析了免疫分析、生物传感及光谱检测三大快速检测技术体系的原理、应用及优缺点。免疫分析快速检测技术以酶联免疫吸附法、免疫层析技术和荧光免疫分析法为代表，凭借抗原抗体特异性结合优势，在高通量筛查中优势显著，具有操作简便、检测通量高的特点，但存在交叉反应与基质干扰问题；生物传感器技术，如电化学传感器、适配体传感器和荧光生物传感器，通过纳米材料与分子识别元件的结合，实现了痕量检测，但适配体制备复杂、成本较高且环境稳定性待优化；光谱检测技术，如拉曼光谱、近红外光谱、高光谱成像技术，依托快速、无损的特点，在多组分检测中展现潜力，但存在仪器成本高或数据处理复杂等缺陷。

未来，真菌毒素的快速检测技术应注重技术融合与性能提升，如免疫分析快速检测技术应重点突破抗体稳定性与多毒素联检瓶颈，开发纳米抗体、仿生材料等新型识别元件，结合微流控芯片实现高通量检测，以降低交叉反应和基质干扰影响；生物传感器领域需优化适配体筛选技术，探索纳米材料与电化学、荧光信号的协同放大机制，提升复杂基质中的抗干扰能力与环境稳定性，同时降低适配体制备成本；光谱技术则需加强高光谱成像与深度学习算法的深度融合，开发轻量化模型与便携式设备，突破仪器成本高、数据冗余的限制。综上，通过多技术协同创新，为保障全球粮食安全、推动食品安全监管模式革新提供关键技术支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李嘉豪，王田林，蔡宇铮，等. 纳米材料在真菌毒素脱除中的应用研究进展[J]. 食品科学，2025，46(6)：344−353. [LI Jiahao，WANG Tianlin，CAI Yuzheng，et al. Recent progress in the application of nanomaterials in mycotoxin detoxification[J]. Food Science，2025，46(6)：344−353.]

[2] 刘以晴，黄亚伟，王小庆，等. 粮食中真菌毒素快速检测方法研究进展[J]. 粮食与饲料工业，2023(2)：66−71. [LIU Yiqing，HUANG Yawei，WANG Xiaoqing，et al. Research progress on rapid detection methods of mycotoxins in grain[J]. Cereal & Feed Industry，2023(2)：66−71.]

[3] LUO S J，DU H L，KEBEDE H，et al. Contamination status of major mycotoxins in agricultural product and food stuff in Europe[J]. Food Control，2021，127：108120.

[4] ZHANG K，BANERJEE K，ZHANG K，et al. A review：Sample preparation and chromatographic technologies for detection of aflatoxins in foods[J]. Toxins，2020，12(9)：539.

[5] 黄晴雯. 真菌毒素的分析方法及风险评估研究[D]. 杭州：浙江大学，2021. [HUANG Qingwen. Study on determination method

and risk assessment of mycotoxins[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
[6] BOSHRA M H, EL-HOUSSEINY G S, FARAG M M S, et al. Evaluation of ELISA and immunoaffinity fluorometric analytical tools of four mycotoxins in various food categories[J]. AMB Express, 2023, 13(1): 123.
[7] ABDOLMALEKI K, KHEDRI S, ALIZADEH L, et al. The mycotoxins in edible oils: An overview of prevalence, concentration, toxicity, detection and decontamination techniques[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 500−511.
[8] REN Yexuan, TIAN Ruwen, WANG Ting, et al. An extremely highly sensitive ELISA in pg mL−1 level based on a newly produced monoclonal antibody for the detection of ochratoxin a in food samples[J]. Molecules, 2023, 28(15): 5743.
[9] ZHAN Shengnan, HU Jiaqi, LI Yu, et al. Direct competitive ELISA enhanced by dynamic light scattering for the ultrasensitive detection of aflatoxin B1 in corn samples[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128327.
[10] YAN Tingting, ZHU Jiang, LI Ying, et al. Development of a biotinylated nanobody for sensitive detection of aflatoxin B1 in cereal *via* ELISA[J]. Talanta, 2022, 239: 123125.
[11] WEI Lin, XU Deyan, YUAN Bei, et al. A dynamic and pseudo-homogeneous MBs-icELISA for the early detection of aflatoxin B1 in food and feed[J]. Toxins, 2023, 15(11): 660.
[12] CAO Junlin, WANG Ting, WU Kang, et al. A highly sensitive and group-specific enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) for the detection of AFB1 in agriculture and aquiculture products[J]. Molecules, 2024, 29(10): 2280.
[13] BOSHRA M H, EL-HOUSSEINY G S, FARAG M M S, et al. Innovative approaches for mycotoxin detection in various food categories[J]. AMB Express, 2024, 14(1): 7.
[14] 张蕴哲, 张先舟, 袁耀武, 等. 免疫亲和层析技术协同酶联免疫吸附法检测赭曲霉毒素 A[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 257−264. [ZHANG Yunzhe, ZHANG Xianzhou, YUAN Yaowu, et al. Detection of ochratoxin a using immunoaffinity chromatography combined with enzyme-linked immunosorbent assay[J]. Food Science, 2024, 45(10): 257−264.]
[15] KHAN R, ANWAR F, GHAZALI F M. A comprehensive review of mycotoxins: Toxicology, detection, and effective mitigation approaches[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e28361.
[16] 马兰, 王淑娟, 曾海娟, 等. 侧流层析技术研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 333−342. [MA Lan, WANG Shujuan, ZENG Haijuan, et al. Progress in lateral flow chromatography[J]. Food Science, 2018, 39(15): 333−342.]
[17] XING Keyu, SHAN Shan, LIU Daofeng, et al. Recent advances of lateral flow immunoassay for mycotoxins detection[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2020, 133: 116087.
[18] LI Shijie, WANG Junping, SHENG Wei, et al. Fluorometric lateral flow immunochromatographic Zearalenone assay by exploiting a quencher system composed of carbon dots and silver nanoparticles[J]. Microchimica Acta, 2018, 185(8): 388.
[19] LI Runxian, MENG Chengzhen, WEN Yang, et al. Fluorometric lateral flow immunoassay for simultaneous determination of three mycotoxins (aflatoxin B1, Zearalenone and deoxynivalenol) using quantum dot microbeads[J]. Microchimica Acta, 2019, 186(12): 748.
[20] LIU Zhiwei, HUA Qicheng, WANG Jin, et al. A smartphone-based dual detection mode device integrated with two lateral flow immunoassays for multiplex mycotoxins in cereals[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 158: 112178.
[21] REN Wenjie, HUANG Zhibing, XU Yang, et al. Urchin-like gold nanoparticle-based immunochromatographic strip test for rapid detection of fumonisin B1 in grains[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, 407(24): 7341−7348.
[22] KONG Dezhao, WU Xiaoling, LI Yue, et al. Ultrasensitive and eco-friendly immunoassays based monoclonal antibody for detection of deoxynivalenol in cereal and feed samples[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 130−137.
[23] 孙亚宁, 杨苏珍, 杨继飞, 等. 高灵敏度磁荧光免疫层析试纸模式构建及在呕吐毒素检测中的应用[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 310−317. [SUN Yaning, YANG Suzhen, YANG Jifei, et al. Development and application of high-sensitivity magnetic fluorescence immunochromatographic test strip for detection of deoxynivalenol[J]. Food Science, 2022, 43(18): 310−317.]
[24] 张佳林, 马立才, 侯璐, 等. 利用时间分辨荧光免疫层析法同时定量检测玉米中的伏马毒素 B1、B2 和 B3[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 265−271. [ZHANG Jialin, MA Licai, HOU Lu, et al. Application of time-resolved fluorescence immunoassay to concurrently quantify fumonisin B_1, B_2 and B_3 in corn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 265−271.]
[25] SUN Jiadi, WANG Liangzhe, SHAO Jingdong, et al. One-step time-resolved fluorescence microsphere immunochromatographic test strip for quantitative and simultaneous detection of DON and ZEN[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2021, 413(26): 6489−6502.
[26] ZHU Fenghua, ZHANG Beibei, ZHU Lianqin. An up-converting phosphor technology-based lateral flow assay for rapid detection of major mycotoxins in feed: Comparison with enzyme-linked immunosorbent assay and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. PLoS One, 2021, 16(4): e0250250.
[27] 杨楚琴. 基于磁分离技术的真菌毒素新型免疫分析技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. [YANG Chuqin. Novel immunoassays for mycotoxins based on magnetic separation technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.]
[28] ZHOU Jingming, LIU Zhanxiang, YANG Qingbao, et al. Multiple fluorescence immunoassay for the simultaneous detection of Zearalenone and Ochratoxin A[J]. Analytical Biochemistry, 2021, 628: 114288.
[29] LI Runxian, WEN Yang, YANG Luqing, et al. Dual quantum dot nanobeads-based fluorescence-linked immunosorbent assay for simultaneous detection of aflatoxin B1 and Zearalenone in feedstuffs[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130527.
[30] ZHANG Xiya, TANG Qianqian, MI Tiejun, et al. Dual-wavelength fluorescence polarization immunoassay to increase information content per screen: Applications for simultaneous detection of total aflatoxins and family Zearalenones in maize[J]. Food Control, 2018, 87: 100−108.
[31] LIPPOLIS V, PORRICELLI A C R, MANCINI E, et al. Fluorescence polarization immunoassay for the determination of T-2 and HT-2 toxins and their glucosides in wheat[J]. Toxins, 2019, 11(7): 380.
[32] TANG Zongwen, LIU Xing, WANG Yuanyuan, et al. Nanobody-based fluorescence resonance energy transfer immunoassay for noncompetitive and simultaneous detection of ochratoxin a and ochratoxin B[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 238−245.
[33] WU L L, LI Y, WU Y H. Development of a high-throughput fluorescence resonance energy transfer assay for biotin in food[J].

LWT, 2023, 189: 115531.
[34] WANG Xu, LU Disha, HUANG Qingfeng, et al. Microfluidics-based time-resolved fluorescence immunoassay for the on-site detection of aflatoxins B1 Zearalenone and deoxynivalenol in cereals[J]. Foods, 2022, 11(9): 1319.
[35] HAN Shiyun, YANG Yalin, CHEN Ting, et al. Quantitative determination of aflatoxin B1 in maize and feed by ELISA and time-resolved fluorescent immunoassay based on monoclonal antibodies [J]. Foods, 2024, 13(2): 319.
[36] WU Shixiang, ZHANG Xingping, CHEN Wang, et al. Alkaline phosphatase triggered ratiometric fluorescence immunoassay for detection of Zearalenone[J]. Food Control, 2023, 146: 109541.
[37] SUN Linlin, ZHENG Xiaolong, YANG Hualin, et al. A ratiometric fluorescence immunoassay based on Ce^{4+} oxidized o-phthalylenediamine and polyvinylpyrrolidone protected copper nanoclusters for the detection of aflatoxin B1[J]. Microchemical Journal, 2024, 206: 111427.
[38] OH H K, JOUNG H A, JUNG M, et al. Rapid and simple detection of ochratoxin a using fluorescence resonance energy transfer on lateral flow immunoassay (FRET-LFI)[J]. Toxins, 2019, 11(5): 292.
[39] ZHENG Qi, WU Huihuang, JIANG Haiyan, et al. Development of a smartphone-based fluorescent immunochromatographic assay strip reader[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4521.
[40] CURULLI A, CURULLI A. Electrochemical biosensors in food safety: Challenges and perspectives[J]. Molecules, 2021, 26(10): 2940.
[41] FENG Yuze, CHENG Gaobiao, WANG Zhe, et al. Electrochemiluminescence immunosensor based on tin dioxide quantum dots and palladium-modified graphene oxide for the detection of Zearalenone[J]. Talanta, 2024, 271: 125740.
[42] YAIWONG P, IAMSAWAT K, WIRATCHAN S, et al. A toluidine blue/porous organic polymer/2D $MoSe_2$ nanocomposite as an electrochemical signaling platform for a sensitive label-free aflatoxin B1 bioassay in some crops[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138147.
[43] HOU Yujiao, XU Qingbin, LI Ying, et al. Ultrasensitive electrochemical aptasensor with Nafion-stabilized f-MWCNTs as signal enhancers for OTA detection[J]. Bioelectrochemistry, 2023, 151: 108399.
[44] JAHANGIRI D F, ZARE H R, SHEKARI Z. Simultaneous measurement of ochratoxin A and aflatoxin B1 using a duplexed-electrochemical aptasensor based on carbon nanodots decorated with gold nanoparticles and two redox probes hemin@HKUST-1 and ferrocene@HKUST-1[J]. Talanta, 2024, 266: 124947.
[45] LIU Xiaoran, ZHANG Yunzhe, WANG Yu, et al. Exonuclease III assisted electrochemical aptasensor simultaneous detection of aflatoxin B1 and ochratoxin a in grains[J]. LWT, 2024, 201: 116211.
[46] MOUSIVAND M, JAVAN-NIKKHAH M, ANFOSSI L, et al. High performance aptasensing platform development through in silico aptamer engineering for aflatoxin B1 monitoring[J]. Food Control, 2023, 145: 109418.
[47] FAN Y T, LI J X, AMIN K, et al. Advances in aptamers, and application of mycotoxins detection: A review[J]. Food Research International, 2023, 170: 113022.
[48] WU Jinlei, YUAN Haojun, YANG Yunhua, et al. A comb-shaped microfluidic aptasensor for rapid and sensitive on-site simultaneous detection of aflatoxin B1 and deoxynivalenol[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143072.
[49] HAN Tingting, CUI Chen, XING Yujun, et al. Advances of signal amplification strategies and sensing formats in electrochemiluminescence sensors for mycotoxins[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2024, 180: 117961.
[50] CHI Hai, LIU Guoqin. A novel dual-template molecularly imprinted polymer ratiometric fluorescence sensor based on three-emission carbon quantum dots for accurate naked-eye detection of aflatoxin B1 and Zearalenone in vegetable oil[J]. Microchemical Journal, 2023, 192: 108961.
[51] MEIRA D I, BARBOSA A I, BORGES J, et al. Recent advances in nanomaterial-based optical biosensors for food safety applications: Ochratoxin-a detection, as case study[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(18): 6318−6360.
[52] HUANG Xufang, XING Xiaorui, ZHANG Pixian, et al. Silver amplified immunosensor *via* effective fluorogenic Ag^{+}-imidazole aggregation for detection of AFB1[J]. Analytica Chimica Acta, 2024, 1330: 343297.
[53] LI Hui, SHANG Qingyu, ZHANG Liangxiao, et al. Europium nanospheres based ultrasensitive fluorescence immunosensor for aflatoxin B1 determination in feed[J]. Talanta, 2024, 270: 125569.
[54] ZHAI Wenlei, YOU Tianyan, OUYANG Xihui, et al. Recent progress in mycotoxins detection based on surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1887−1909.
[55] MARTINEZ L, HE L L. Detection of mycotoxins in food using surface-enhanced Raman spectroscopy: A review[J]. ACS Applied Bio Materials, 2021, 4(1): 295−310.
[56] WENG Shizhuang, HU Xujin, ZHU Wenxiu, et al. Surface-enhanced Raman spectroscopywith gold nanorods modified by sodium citrate and liquid–liquid interface self-extraction for detection of deoxynivalenol in *Fusarium head* blight-infected wheat kernels coupled with a fully convolution network[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129847.
[57] DENG Jihong, JIANG Hui, CHEN Quansheng. Determination of aflatoxin B1 (AFB1) in maize based on a portable Raman spectroscopy system and multivariate analysis[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 275: 121148.
[58] YIN L M, YOU T Y, EL-SEEDI H R, et al. Rapid and sensitive detection of Zearalenone in corn using SERS-based lateral flow immunosensor[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133707.
[59] YANG Jing, LI Wei, LI Hao, et al. Highly sensitive microarray immunoassay for multiple mycotoxins on engineered 3D porous silicon SERS substrate with silver nanoparticle magnetron sputtering[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(6): 2425−2434.
[60] CEBI N, BEKIROGLU H, ERARSLAN A, et al. Nondestructive metabolomic fingerprinting: FTIR, NIR and Raman spectroscopy in food screening[J]. Molecules, 2023, 28(23): 7933.
[61] CARAMÊS E T D S, PIACENTINI K C, ALVES L T, et al. NIR spectroscopy and chemometric tools to identify high content of deoxynivalenol in barley[J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2020, 37(9): 1542−1552.
[62] LEVASSEUR-GARCIA C, BAILLY S, KLEIBER D, et al. Assessing risk of fumonisin contamination in maize using near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015: 485864.
[63] LI Jian, DENG Jihong, BAI Xue, et al. Quantitative analysis of aflatoxin B1 of peanut by optimized support vector machine models based on near-infrared spectral features[J]. Spectrochimica

Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 303: 123208.
[64] SHEN Fei, ZHAO Tianxia, JIANG Xuesong, et al. On-line detection of toxigenic fungal infection in wheat by visible/near infrared spectroscopy[J]. LWT, 2019, 109: 216−224.
[65] ALMOUJAHED M B, APOLO-APOLO O E, ALHUSSEIN M, et al. Prediction of Deoxynivalenol contamination in wheat kernels and flour based on visible near-infrared spectroscopy, feature selection and machine learning modelling[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 330: 125718.
[66] FEMENIAS A, GATIUS F, RAMOS A J, et al. Near-infrared hyperspectral imaging for deoxynivalenol and ergosterol estimation in wheat samples[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128206.
[67] HE Hongju, SUN Dawen. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(1): 99−109.
[68] CONCEIÇÃO D R R P, SIMEONE M L F, QUEIROZ V A V, et al. Application of near-infrared hyperspectral (NIR) images combined with multivariate image analysis in the differentiation of two mycotoxicogenic *Fusarium* species associated with maize[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128615.
[69] SICHE R, VEJARANO R, AREDO V, et al. Evaluation of food quality and safety with hyperspectral imaging (HSI)[J]. Food Engineering Reviews, 2016, 8(3): 306−322.
[70] WANG W, HEITSCHMIDT G W, NI X Z, et al. Identification of aflatoxin B1 on maize kernel surfaces using hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2014, 42: 78−86.
[71] LIANG Kun, HUANG Jiani, HE Ruiyin, et al. Comparison of Vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging for the non-destructive detection of DON levels in *Fusarium head* blight wheat kernels and wheat flour[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 106: 103281.
[72] ZHOU Quan, HUANG Wenqian, LIANG Dong, et al. Classification of aflatoxin B1 concentration of single maize kernel based on near-infrared hyperspectral imaging and feature selection[J]. Sensors, 2021, 21(13): 4257.
[73] SU Wenhao, YANG Ce, DONG Yanhong, et al. Hyperspectral imaging and improved feature variable selection for automated determination of deoxynivalenol in various genetic lines of barley kernels for resistance screening[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128507.
[74] ZHAO Yifan, LIU Hang, ZHAI Xuetong, et al. Multilayer spatial-spectral segmentation network for detecting AFB1[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106790.
[75] ALIEVA R, SOKOLOVA S, ZHEMCHUZHINA N, et al. A surface-enhanced Raman spectroscopy-based aptasensor for the detection of deoxynivalenol and T-2 mycotoxins[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(17): 9534.
[76] GABBITAS A, AHLBORN G, ALLEN K, et al. Advancing mycotoxin detection: Multivariate rapid analysis on corn using surface enhanced Raman spectroscopy (SERS)[J]. Toxins, 2023, 15(10): 610.
[77] TYSKA D, MALLMANN A O, VIDAL J K, et al. Multivariate method for prediction of fumonisins B1 and B2 and Zearalenone in Brazilian maize using Near Infrared Spectroscopy (NIR)[J]. PLoS One, 2021, 16(1): e0244957.
[78] 李斌, 苏成涛, 殷海, 等. 高光谱成像技术结合机器学习的稻米霉变检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2391−2396.
[LI Bin, SU Chengtao, YIN Hai, et al. Hyperspectral imaging technology combined with machine learning for detection of moldy rice[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(8): 2391−2396.]