

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241212004

引用格式: 褚兰玲, 王云政, 戴宇琪, 等. 食品中黄曲霉毒素检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 1–8.
CHU LL, WANG YZ, DAI YQ, *et al.* Research progress on the detection of aflatoxins in foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 1–8. (in Chinese with English abstract).

食品中黄曲霉毒素检测研究进展

褚兰玲^{1,2}, 王云政^{2,3}, 戴宇琪², 王丹丹⁴, 贺红军⁴, 蒋小满¹, 姜倩倩^{1*}

(1. 烟台理工学院食品与生物工程学院, 烟台 264003; 2. 南京林业大学轻工与食品学院, 南京 210037;
3. 济南市天桥区市场监督管理局, 济南 250031; 4. 烟台大学生命科学学院, 烟台 264006)

摘要: 黄曲霉毒素是由黄曲霉和寄生曲霉等菌株产生的一类双呋喃环类毒素, 具有较好的化学稳定性和热稳定性, 对人体有极强的肝毒性、致癌性、致畸性等毒副作用。由于食品中黄曲霉毒素的含量较低且基质复杂, 其中含有大量的碳水化合物、脂肪、蛋白质、食品添加剂等, 对毒素的准确性定量检测产生很大的干扰, 因此探寻新型的样品前处理技术, 建立快速、实用的检测方法, 对于毒素检测具有重要意义。本文综述了黄曲霉毒素前处理提取技术(液相萃取、固相萃取、超声波微波辅助萃取、免疫亲和层析)和检测方法(薄层分析法、高效液相色谱-质谱法、酶联免疫吸附法、免疫层析法、核酸适配体传感技术)在食品黄曲霉毒素分析中的应用, 并对其相关的在线联用、新技术结合传统设备、易操作、低成本化等发展趋势进行了展望, 对真菌毒素的检测发展提供了可靠支持。

关键词: 黄曲霉毒素; 分析检测; 样品前处理

Research progress on the detection of aflatoxins in foods

CHU Lan-Ling^{1,2}, WANG Yun-Zheng^{2,3}, DAI Yu-Qi², WANG Dan-Dan⁴,
HE Hong-Jun⁴, JIANG Xiao-Man¹, JIANG Qian-Qian^{1*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Yantai Institute of Technology, Yantai 264003, China; 2. College of Light Industry and Food, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Tianqiao District Market Supervision and Administration Bureau of Ji'nan City, Ji'nan 250031, China; 4. School of Life Science, Yantai University, Yantai 264006, China)

ABSTRACT: Aflatoxins are of difuran cyclotoxins produced by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*, and own good chemical stability, thermal stability, strong hepatotoxicity, carcinogenicity, teratogenicity and other toxicity to human body. Due to the low content of aflatoxins in food and the complex food matrix, these food samples contain a large number of carbohydrates, fats, proteins, food additives, *etc.*, which have great interference to the accurate qualitative and quantitative detection of aflatoxins. Therefore, it is of great significance to explore new sample pretreatment techniques and establish rapid and practical detection methods for aflatoxins. This paper reviewed the application of aflatoxin pretreatment techniques (liquid phase extraction, solid phase extraction, ultrasonic microwave assisted extraction, immunoaffinity chromatography) and detection methods (thin-layer analysis, high performance

收稿日期: 2024-12-12

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2024MH183)

第一作者: 褚兰玲(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品有害物分析。E-mail: chu_lanling@126.com

*通信作者: 姜倩倩(1986—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全检测。E-mail: jiangqianqian@yitd.edu.cn

liquid chromatography-mass spectrometry, enzyme-linked immunosorbent assay, immunochromatography, nucleic acid aptamer sensing) in the analysis of aflatoxins in food, prospected the development trends towards online combination, the integration of new technologies with traditional equipment, ease of operation, and low cost, providing reliable support for the development of mycotoxin detection.

KEY WORDS: aflatoxins; analysis and detection; sample pretreatment

0 引言

黄曲霉毒素是食品中常见的一类真菌毒素^[1],是由黄曲霉和寄生曲霉等菌株产生的一类双呋喃环类毒素^[2],包括黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)、黄曲霉毒素 G₁ (aflatoxin G₁, AFG₁)、黄曲霉毒素 B₂ (aflatoxin B₂, AFB₂)、黄曲霉毒素 G₂ (aflatoxin G₂, AFG₂)以及黄曲霉毒素 M₁ (aflatoxin M₁, AFM₁)、黄曲霉毒素 M₂ (aflatoxin M₂, AFM₂)、毒醇等 20 多种衍生物。其中,食品中的主要存在形式占比及毒性从大到小依次为 AFB₁、AFM₁、AFG₁、AFB₂、AFG₂^[3],如图 1 所示,主要污染禾谷类作物、油料作物及其加工副产品,是在食品和动物饲料中发现的最普遍的天然毒素^[4],其中 AFB₁ 的污染范围最广、毒性最大、致癌性最强^[5],已被国际癌症研究机构列为 I 类致癌物^[6],因此发达国家、世界卫生组织及我国对食品中黄曲霉毒素含量都进行了严格限定。另有研究表明,哺乳类动物摄入被 AFB₁ 污染的饲料后,AFB₁ 会在动物的肝脏微粒体以及细胞色素 P-448 的作用下,呋喃环上的氢被羟基化形成 AFM₁^[7],相关数据表明有 0.5%~5.0% 的 AFB₁ 可在体内转换为 AFM₁^[8],则 AFM₁ 主要存在于牛奶、酸奶、奶酪、乳粉等乳及乳制品中。

由于黄曲霉毒素具有较好的化学稳定性和热稳定性,对人体有极强的肝毒性、致癌性、致畸性等毒副作用。食

品中黄曲霉毒素的含量较低且食品基质复杂,对毒素的准确性定量检测产生很大的干扰,因此探寻新型的样品前处理技术,建立快速、实用的检测方法,对于毒素检测具有重要意义。本文综述了黄曲霉毒素分析中的前处理提取技术(液相萃取、固相萃取、超声波微波辅助萃取、免疫亲和层析)和检测方法(薄层分析、高效液相色谱-质谱、酶联接免疫吸附、免疫层析、核酸适配体传感)在食品中黄曲霉毒素分析中的应用,并对其发展趋势进行了展望,为检测黄曲霉毒素技术的进一步发展提供参考。

1 样品前处理

1.1 液相萃取法

经典的液相萃取是利用目标物在两种溶剂(一般是一种极性溶剂和另一种非极性溶剂)中的溶解度不同,将目标物从样品溶液中萃取到另一种溶剂中,进而实现目标物与样品基质的分离。其中,液-液萃取是最常用的液相萃取方法,具有操作简单、所需设备简单、价格低廉、广谱性好等优点^[9-11]。萃取黄曲霉毒素常用的有机溶剂有甲醇、丙酮、乙腈、氯仿等。SHEIJOONI-FUMANI 等^[12]在对大米和其他谷物样品中的 AFB₁ 进行提取时,发现当甲醇浓度为 60% (V:V) 时提取效果最佳。王东旭等^[13]建立了基于挥发性铵盐盐析辅助液相萃取结合超高效液相色谱-串联质谱法

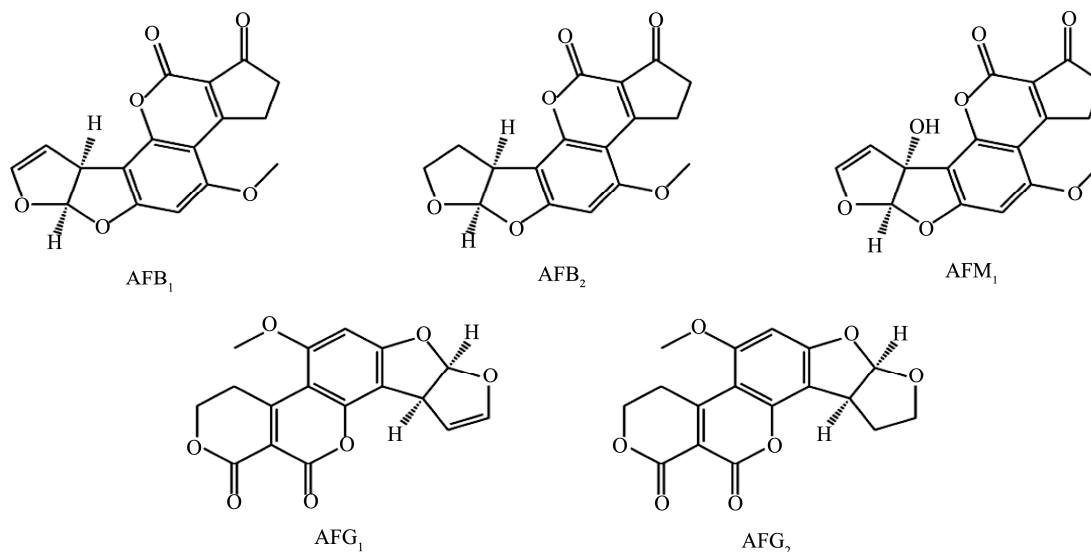


图1 5种黄曲霉毒素分子结构式

Fig.1 Molecular structural formulas of 5 kinds of aflatoxins

检测酱油中 4 种黄曲霉毒素含量的方法, 向样品溶液与萃取溶剂混合物中加入适当的无机盐, 促使萃取溶剂更好地从混合物中分离, 该方法的检出限为 0.01~0.04 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.03~0.12 $\mu\text{g}/\text{kg}$; SOLEIMANY 等^[14]以乙腈-乙酸-水混合溶液为萃取剂, 一步直接提取谷物中的黄曲霉毒素, 然后采用质谱进行定量分析, 方法检出限为 0.01~20.00 ng/g , 回收率为 76.8%~108.4%, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)小于 12.7%。该方法的优点是能够同时提取检测多种黄曲霉毒素, 并可用于玉米、大米等谷物实际样品分析, 但该方法有多次提取、复溶等步骤, 容易造成目标物损失。

分散液液微萃取也是一种液相萃取技术中应用比较广泛的萃取技术。JAHANI 等^[15]采用注射器内均相液-液萃取和基于离子液体的分散液-液微萃取相结合的方法萃取食用植物油中的 AFB₁。首先, 将含有目标物的油样与丙酮混合形成均质溶液, 然后加入去离子水, 目标物被萃取到丙酮液滴中。随后取丙酮相与 1-己基-3-甲基咪唑四氟硼酸磁性离子液体混合, 用玻璃注射器将混合物注入 5% (*m*:*V*) 氯化钠溶液中, 用外部磁铁收集液滴, 液相色谱法进行测定。在最佳条件下, 该方法的检出限为 13 ng/kg , 定量限为 44 ng/kg , 提取回收率为 69%, RSD 小于 4.0%。MASROURI 等^[16]使用乙腈、去离子水、正己烷作为提取剂, N, N-二乙醇氯化铵和甲基异丙基苯酚制备疏水深共晶溶剂作为分散剂, 建立了基于溶剂萃取和深共晶溶剂分散液液微萃取相结合的新方法, 用于提取奶酪样品中的 AFM₁。该方法的检出限和定量限分别为 0.74 ng/kg 和 2.56 ng/kg , 提取回收率为 94%, 日间、日内 RSD 均小于或等于 8.6%。该方法将萃取剂和分散剂快速注入样品水溶液中, 在分散剂的作用下, 形成水-分散剂-萃取剂乳液微珠, 增大萃取剂与样品液的接触面积, 有利于对目标物的提取。

1.2 固相萃取法

固相萃取技术是根据目标物性质, 选取合适的固相吸附材料作为萃取剂, 吸附样品中的目标物, 使其与样品基质分离, 再通过洗脱等操作步骤将目标物从固相吸附剂中解吸下来的一种方法。此方法具有富集效率高、专一性好以及净化、浓缩目标物^[17]的优点。目前常用的固相萃取材料主要有 C₁₈、活性炭、硅胶、大孔树脂等。CHEN 等^[18]开发了一种基于固相萃取的微流控芯片和质谱组成的快速自动化测定花生油中 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂ 的系统, 黄曲霉毒素在填充 C₁₈ 颗粒的微流控芯片上的固相萃取技术通道上富集, 然后将其洗脱并引入质谱中, 以多反应监测模式进行定性和定量分析。LI 等^[19]利用合成的大孔金属有机骨架作为固相萃取剂, 通过有序的大孔结构、 π - π 相互作用、配位相互作用和静电相互作用实现对毒素的吸附, 从奶制品中吸附提取 6 种黄曲霉毒素, 取得良好的应用效果。

磁性固相萃取技术近几年逐渐成为复杂基质样品前

处理的研究热点。其原理是将磁性吸附剂分散于样品提取液中, 使其与目标物充分接触, 目标物通过扩散从样品液中转移至吸附剂上, 再用强磁铁吸附磁性吸附剂, 弃去样品液, 最后将目标物从吸附剂上洗脱下来。目前应用于真菌毒素前处理方法的磁性固相萃取主要以羰基材料^[20-21](如石墨烯、碳纳米管、活性炭、石墨化炭黑等)作为表面功能修饰材料。吴静娜等^[22]在羰基化多壁碳纳米管的基础上采用共沉淀法制备磁性纳米颗粒, 利用多壁碳纳米管与目标物的 π - π 相互作用、氢键相互作用等作用力, 提高吸附剂对黄曲霉毒素的选择性, 为植物油中黄曲霉毒素的测定提供了一种新的前处理技术。YU 等^[23]采用单点溶热法合成了磁性石墨烯纳米复合材料, 提取植物油中的黄曲霉毒素, 在最佳条件下, 实现了良好的线性关系, 对 AFB₁ 和 AFB₂ 的检出限分别低至 0.02 mg/kg 和 0.01 mg/kg , 回收率为 80.4%~106.0%之间, RSD 小于 8.1%。该方法简单、快速、高效, 可用于常规测定脂质基质中的黄曲霉毒素。磁性固相萃取技术克服了传统固相萃取技术在过柱、离心或过滤操作中耗时、易损失的缺点, 提取效率高, 洗脱过程去除了提取液, 降低了基质、杂质的干扰。此外, 通过改变吸附剂的种类, 可以拓宽该技术在有毒有害物质检测前处理的应用范围。

1.3 超声波微波辅助萃取法

超声波微波辅助提取主要依据基质中目标物在波的作用下加快进入萃取剂中, 该技术在提取热不稳定活性物质方面具有广阔的应用前景, 具有快速高效、节约能源等优势。MANOOCHEHRI 等^[24]采用超声辅助基质固相分散法, 提取大米中的 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂, 在最佳条件下, 检出限为 0.09~0.14 ng/g , RSD 为 8.6%, 回收率为 78%~83%。JAYASINGHE 等^[25]开发了一种基于使用超声波进行目标分离, 配合分子印迹聚合物作为吸附剂的多孔膜保护微固相萃取技术, 作为一种高选择性的萃取和净化步骤, 用于提取鱼饲料中 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂, 该方法的回收率为 80%~100%, 检出限为 0.42~1.15 mg/kg 。KABOODI 等^[26]首次将基于深共晶溶剂的微波辅助萃取与基于离子液体的温控液相微萃取相结合, 用于萃取奶酪样品中的黄曲霉毒素。通过使用 60 s、180 W 的微波, 加速目标物的提取分离。此方法的检出限为 9~23 ng/kg , 定量限为 30~77 ng/kg , 萃取回收率为 66%~83%, RSD 小于 5.2%。超声波微波辅助萃取法的不足之处是若设备受损, 可能导致微波辐射泄露, 对操作者身体造成慢性损伤。

1.4 免疫亲和层析法

免疫亲和层析是利用抗原抗体特异性结合的原理捕获样品基质中的黄曲霉毒素, 然后用合适的溶剂进行目标洗脱。ROMERO-SANCHEZ 等^[27]采用免疫亲和柱结合高效液相色谱串联质谱检测大米中的黄曲霉毒素, 该方法的回收率为 86%~92%, 最低检出限为 0.09~0.32 mg/kg ,

RSDs 为 5%~11%。ALIAKARBARZADEH 等^[28]将免疫亲和纯化前处理与高效液相色谱法相结合,实现对花生仁样品中 4 种黄曲霉毒素的定性定量检测。方法的最低检出限为 0.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$,最低定量限为 0.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$,RSDs 为 4.99%~7.85%,回收率为 81.2%~83.4%。该方法的优点是对目标物的结合效果较好,具有特异性,不足之处是制备单克隆抗体复杂,难以保证修饰后抗体的活性,成本高等。

2 黄曲霉毒素检测方法

2.1 薄层分析法

薄层分析法(thin layer chromatography, TLC),是根据目标物性质选择合适的吸附物质,将此物质均匀地涂布在薄层板上,然后将含有目标物的样品液加在薄层板上进行分离,待分离完成后使用 365 nm 波长的紫外光进行照射,通过分析荧光强度判断是否存在毒素或者半定量分析毒素含量^[29]。TLC 的优点是所使用检测仪器体积小、价格低廉,特别适用于多批量样品中毒素的检测筛选,其缺点也比较明显,一是样品前处理过程复杂烦琐,实验结果与实验人员的操作水平相关,方法重复性较差;二是只能实现对毒素的定性或半定量检测,无法得到准确的毒素含量,因此不适用于对含量结果要求精准的检测。目前单独使用 TLC 的场景已经较少,常将其与其他检测方法相结合,提高检测的精确度。

2.2 高效液相色谱法

高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)是目前检测食品中黄曲霉毒素最常用的方法。此方法常用的色谱柱为 C_{18} 柱。方法的基本原理是:根据目标物的性质选择合适的溶剂作为流动相,样品进样后,流动相会携带样品液通过色谱柱,样品液中的物质根据分配系数不同从色谱柱中先后流出,流经检测器检测到相关信号,根据物质出峰时间以及峰面积大小实现对目标物的定性、定量分析。SOMSUBSIN 等^[30]建立了一种基于涡旋辅助低密度溶剂-微萃取结合高效液相色谱-荧光检测的方法,实现对大米样品中 AFB_1 、 AFB_2 、 AFG_1 、 AFG_2 的同时检测,在最佳条件下,最低检出限为 0.001~0.170 $\mu\text{g}/\text{kg}$,RSD 低于 6.2%,加标回收率为 70%~104%。

超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC)的基本原理与 HPLC 基本相同,其主要优势是检测时间、检测速度、仪器灵敏度、响应值等均要好于 HPLC。KIM 等^[31]使用 70%甲醇超声提取和免疫亲和柱从红辣椒和泡菜中分离出黄曲霉毒素。使用超高效液相色谱与荧光检测器对毒素进行定性、定量检测。该方法 RSDs 为 5.2%~11.9%,回收率为 86.7%~112.6%。

这两种色谱法的优点是经过设置程序后可以自动运行,实现对多样品的不间断检测,效率高,灵敏度高,所得结果精确,同时通过色谱柱可以实现对多物质的分离和

检测。其不足一是使用该方法进行检测前的样品处理较为繁琐,要经过提取、净化、过膜等多步操作;二是检测所需时间长,不能快速得到结果,样品进样前的准备步骤如洗针、洗进样器、脱气、平衡等就需要较长时间;三是使用的流动相大多为有毒有机溶剂,可能对操作者身体产生不良影响;四是高效液相色谱仪器体积较大、价格昂贵,需要定期维护,维修价格高昂。

2.3 高效液相色谱-串联质谱法

高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)集合了色谱和质谱的优点,将色谱极佳的分离效果与质谱极好的多组分鉴定能力相结合,可对样品中的多种类型毒素如黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、伏马毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇等同时检测^[32-33]。RAUSCH 等^[34]开发了一种测定 38 种霉菌毒素的可靠且灵敏的方法。采用基于 QuEChERS 的萃取方法[乙腈/水/甲酸(75:20:5, V:V:V)],在不同条件下进行两次高效液相色谱串联质谱检测,分析了谷物中的相关霉菌毒素。该方法根据欧盟委员会相关要求对性能标准进行了验证。方法定量限为 0.05~150.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。大多数霉菌毒素都具有良好的线性($r^2>0.99$),回收率在 61%~120%范围内,日间、日内 RSD 分别低于 15%和 20%。该方法对样品前处理的要求与单纯使用 HPLC 相比更低,样品复杂基质对毒素的检出干扰较小,方法选择性好、灵敏度高。

2.4 酶联免疫吸附法

酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)是一种特异性较好的检测方法,其基本原理是:将已知的、有免疫活性的抗原或抗体固定在酶标板的孔洞内,然后将待测样品加入到酶标板中,样品中的目标物会与固定的抗原或抗体发生特异性结合,然后将与酶结合的抗体或抗原(酶标抗体或酶标抗原)加入到酶标板中,经过洗涤等步骤去除非特异性分子,留在酶标板中的酶量与待测目标物的量成正比。加入酶反应底物,触发酶的催化反应,生成可测量信号(一般为颜色变化),通过分析相关数据得到待测目标物的浓度^[35]。该方法在测量黄曲霉毒素时的显著优点是不需要对毒素进行衍生,操作更加方便快捷。在传统的 ELISA 检测 AFB_1 中,所使用的过氧化物酶成本高且环境稳定性差,GUO 等^[36]以 Fe-N-C 单原子纳米酶为基础,开发了一种直接竞争性免疫吸附法。所提出的方法具有灵敏度高、检测速度快、制作成本低等优点。在最佳条件下,新方法的检出限为 3.3 pg/mL ,在加标样品中的回收率为 84.50%~103.75%,RSD 低于 10%。陈文星等^[37]开发了一种快速检测谷物中 AFB_1 的生物发光 ELISA 法,系统测试了 3 种抗 AFB_1 特异性纳米抗体与纳米荧光素酶融合蛋白的可溶性表达、纯化情况及酶催化活性。综合考虑融合蛋白的可溶性表达量、稳定性及检测性能,选择最佳融合蛋白进行

实际样品的分析和验证, 结果表明, 方法回收率在 91.1%~104.1%之间, 与商业化酶联免疫试剂盒测定结果相比基本一致, 而检测的时间和试剂成本明显降低。

2.5 免疫层析法

免疫层析法的原理是利用抗原-抗体间的特异性免疫结合和色谱层析作用建立的一种固相免疫检测方法。免疫层析试纸条的基本构成主要有聚氯乙烯底板、样品垫、结合垫、NC 膜[上面喷涂检测线(T 线)和质控线(C 线)]以及吸水垫。目前免疫层析法根据所使用的标记物质不同细分为胶体金免疫层析法、上转发光免疫层析法、荧光微球免疫层析法等。童璐等^[38]从比色和荧光两种方法介绍了最新的侧流免疫层析技术在 AFB₁ 检测中的研究进展, 重点阐述不同信号标记材料及其对应方法学。

上转换发光免疫层析法使用的上转换纳米材料通常由稀土材料制备而来, 制备方法目前常用的有水热合成法、共沉淀法等^[39]。该方法的优点是反斯托克位移大, 本底干扰小, 检测速度较快, 可以通过改变使用的稀土材料类型改变发光颜色、强度等。CHEN 等^[40]研制的上转换免疫层析检测卡采用竞争结合的原理, 以上转化发光材料作为标记物, 结合免疫层析方法, 构建了一种适用于现场快速定量检测谷物中玉米赤霉烯酮的新技术, 最低检出限可达 0.5 μg/kg, 线性范围良好, 20 min 内即可完成对样品的检测。该方法特异性强、灵敏度高、稳定性好、储存期长, 可同时进行多重分析且不受检测环境影响。

荧光微球免疫层析法以荧光纳米球形颗粒作为示踪标记物, 通过对颗粒进行基团修饰等, 使其与特异性抗体结合形成荧光探针, 然后根据需要喷涂、组装成试纸条, 将样品液滴加到样品垫上, 通过扩散流经 T 线和 C 线, 使用试纸条荧光检测仪分析荧光信号, 对样品中所含的目标物进行定量分析^[41]。SHENG 等^[42]开发了一种基于荧光微球的免疫层析法检测玉米、大米、燕麦中的黄曲霉毒素 B₁、玉米赤霉烯酮、伏马毒素以及赭曲霉毒素四种真菌毒素。该方法中选用了发光性能好、稳定性强的单分散聚苯乙烯荧光微球作为标记物, 与 4 种毒素的抗体相偶联制备荧光探针。在最佳条件下, 在 10 min 内即可完成对样品的检测, 对 AFB₁、玉米赤霉烯酮、伏马菌素、赭曲霉毒素 A 的检出限分别为 0.093、0.072、0.320、0.190 μg/L。方法显示出良好的特异性, 与其他真菌毒素无交叉反应, 通过对实际样品进行检测, 所得结果与 HPLC-MS/MS 的结果高度一致。该方法使用的荧光微球由于有外壳的保护, 荧光不易被猝灭, 发光持久且稳定。

2.6 核酸适配体传感器检测技术

核酸适配体是一段 DNA 或 RNA 序列, 能够与多种目标物高选择性、高特异性的结合。与传统 ELISA 法使用蛋白质作为探针相比, 适配体的体积更小, 经过指数富集适配体系统进化技术筛选富集后, 灵敏度会大大提高。目前, 核酸适配

体传感器检测技术应用于食品中黄曲霉毒素的检测主要有电化学法、比色法、荧光法、以及表面增强拉曼法^[43-44]。

电化学法是将目标物与适配体探针之间发生的反应转变成电信号实现对待测目标物的分析, 主要分为阻抗法和循环伏安法, 广泛应用于多种目标物的检测^[45]。KARCZMARCZYK 等^[46]使用与碱性磷酸酶结合的二抗作为标志物, 结合改进的金丝网印刷电极对红酒和牛奶中的赭曲霉毒素和 AFM₁ 进行伏安检测, 方法在 ng/mL 级别具有良好的应用效果。AN 等^[47]采用氧化石墨烯-壳聚糖修饰丝网印刷的工作电极, 以增加电极的电导率和表面积, 以固定更多的抗 AFM₁ 抗体。为了进一步提高电子转移效率, 还在该修饰电极上涂覆了氧化铈-壳聚糖, 该方法对 AFM₁ 的最低检出限为 9 pg/mL。该方法具有操作简便、灵敏度高、耗时短、所需设备(电化学工作站)简单等优点。

比色法中经典的 ELISA 法的比色信号仅限于单色反应, 不适合精确地肉眼检测, 为了解决这一问题, 金属纳米颗粒被引入免疫传感器。FANG 等^[48]开发了一种基于酶催化金纳米棒蚀刻检测牛奶样品中 AFM₁ 的比色法。在该方法中, 用葡萄糖氧化酶取代辣根过氧化物酶作为产生过氧化氢的酶标物, 金纳米棒被 I⁻与 H₂O₂ 氧化生成的 I₂ 蚀刻, 导致局域表面等离子体共振蓝移, 形成鲜明的颜色变化。采用该方法, 肉眼定性分析的最低检出限为 0.5 ng/mL, 定量分析的最低检出限为 110 pg/mL, 比基于 HRP 的 ELISA 法低 4.1 倍。该方法的主要优点是设备简单和操作简便, 但肉眼观察存在主观误差, 准确度较低。

荧光法利用目标物与适配体之间的作用导致荧光信号发生变化, 通过分析荧光强度实现对目标物的定量分析^[49]。WU 等^[50]利用背景荧光猝灭开发了一种横向流动免疫传感器用来检测牛奶中的 AFM₁。该方法将荧光染料喷涂在硝酸纤维素膜垫上作为背景荧光, 在没有 AFM₁ 的情况下, 抗 AFM₁ 抗体标记的金纳米棒结合到牛血清白蛋白标记的 AFM₁ 上。牛血清白蛋白偶联 AFM₁ 导致 T 线上的背景荧光猝灭和减少。根据荧光强度实现对牛奶中 AFM₁ 的检测, 方法的最低检出限为 0.9 pg/mL。研究表明, 荧光法比比色法的灵敏度高 1~2 个数量级, 检出限更低, 结果定量更准确。

基于表面增强拉曼散射(surface enhanced Raman scattering, SERS)的免疫传感器是一种结合了抗原-抗体相互作用和 SERS 标记的传感技术。随着纳米技术的发展和纳米材料的不断丰富, 为了放大拉曼信号, 研究者在 SERS 传感器中引入了贵金属纳米粒子, 如银纳米粒子、金纳米粒子和双金属纳米颗粒。WANG 等^[51]利用 Au(内核)/Ag(外壳)(Au@Ag)纳米颗粒作为拉曼增强剂, 开发了一种基于 SERS 的测试条用于 AFM₁ 检测。将 Au@Ag 纳米颗粒与抗 AFM₁ 抗体和拉曼分子 5,5-二硫双(2-硝基苯甲酸)偶联作为 SERS 信号探针, 将牛血清白蛋白偶联 AFM₁ 标记的 AuNP 喷涂在 T 线上作为捕获探针, 在没有 AFM₁ 的情况下, 在 T 线上捕获 SERS 探针, 产生较强的 SERS 信号; 有 AFM₁ 会减

弱了 T 线的信号, 根据信号变化检测 AFM₁, 检测水平低至 1.7 pg/mL。该方法对目标物敏感, 可实现检测快速, 在食品安全检测中具有广泛的应用。

3 电纺纳米纤维固相萃取技术

静电纺丝是一种简单、快捷制备亚微米、纳米级纤维的新技术。当纤维的直径由微米级下降至亚微米级甚至纳米级时, 就会呈现许多优异的性能, 如较大的比表面积、较强的韧性及优异的力学性能等。静电纺丝技术的原理是: 使高聚物溶液或熔体带电, 并置于针筒喷丝口与接收屏之间的高压电场中, 当电场强度增加时, 针筒尖端呈半球形的液滴变长从而形成泰勒锥, 当电场强度达到一定值时, 库仑力克服液体的表面张力, 带电的溶液射流便从泰勒锥的尖端喷射出去, 经过一段距离的飞行, 射流变细, 溶剂挥发或者熔体固化, 从而在收集装置上得到由亚微米或者纳米纤维构成的, 以随机或定向排列的形式存在的静电纺丝产品^[52-53]。静电纺丝的孔隙率、形貌、性能等受到多种因素的影响, 如所配制溶液的相对分子质量、黏度、电导率、挥发性, 制备过程施加电压、推进速度、接收距离, 以及制备环境的温度、湿度、气流速率等。

随着纳米技术和纳米材料的发展, 通过静电纺丝技术制造的电纺纳米纤维与固相萃取技术相结合, 作为一种新兴的萃取技术, 已经成功应用于食品添加剂和农兽药残留的检测, 临床样品中特定目标物的分析, 以及环境样品中污染物的检测等。CHU 等^[54]采用静电纺丝法制备了聚苯乙烯-四氯乙烯复合纳米纤维材料, 并建立了基于填充纳米纤维固相萃取-UPLC-MS/MS 提取检测猪肉组织中的 6 种 β 激动剂。该方法在最佳条件下, 各目标物之间分离良好, 回收率为 79.3%~110.1%, 日间 RSDs 为 4.7%~11.8%, 日内 RSDs 为 1.5%~10.5%。US 等^[55]以聚苯乙烯和聚乙二醇聚合物作为纸基衬底, 通过静电纺丝形成无珠状静电纺纳米纤维, 制备纸基诊断平台并通过智能手机比色分析法实现了对胶质母细胞瘤细胞的监测。WANG 等^[56]采用静电纺丝法制备了聚苯乙烯-聚乙炔吡咯烷酮-蒙脱土复合纳米纤维材料, 并将其填充于自制的固相萃取器件, 建立了基于纳米纤维固相萃取技术的食品中黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁ 和 G₂ 同时检测的分析方法, 方法回收率为 60.1%~98.4%, 日内 RSD 为 1.9%~5.8%, 日间 RSD 为 1.3%~8.0%, 检出限为 0.07~0.17 ng/g, 该方法具有适用于多种样品基质、操作简单省时、成本低等优点。HAN 等^[57]通过静电纺丝法制备聚苯乙烯纳米纤维, 再用 FeCl₃ 氧化引发吡咯聚合, 在 PS 纤维骨架上沉积聚吡咯涂层, 得到聚苯乙烯-聚吡咯纤维, 并以此建立了纳米纤维固相萃取-高效液相色谱法, 测定食品中 7 种人工合成色素的简便分析方法。在提取过程中, 净化、浓缩、解吸可一步完成。所建立的方法对休闲零食(果脯、风味酸奶、果味硬糖)中的人工合成色素具有较好的灵敏度、选择性、重现性。

由于电纺纳米纤维具有比表面积大、孔隙率高和孔深小等优点, 作为固相萃取剂用于样品预处理, 具有较高的吸附效率、较好的解吸能力、杂质净化效果好、浓缩目标物等优点^[58-59], 与其他传统的固相吸附剂(如大孔树脂)相比, 基于纳米纤维的大比表面积有利于其与目标物质相互作用的假设, 在样品溶液中吸附相同数量的目标物质只需要较小体积的固相萃取材料, 同时也减少了用于洗脱的有机溶剂的体积^[60]。具有经济、有机有毒溶剂用量少等优点。

4 结束语

黄曲霉毒素是食品中常见的一类污染广、毒性强的真菌毒素, 快速、准确分析检测食品中黄曲霉毒素的含量是降低其危害性的重要手段。由于食品基质复杂且黄曲霉毒素含量低, 分离系数小, 基质背景会干扰对黄曲霉毒素的检测, 降低分析方法的灵敏度和准确性^[61], 因此针对不同的样品选用合适的预处理方法, 对于毒素分析过程中浓缩目标物、降低杂质干扰^[62]是瓶颈问题及研究热点。随着新材料技术的发展, 制备专属性好新材料用以更新萃取介质, 发展高效、可行的样品前处理方法, 再与传统的检测设备在线联用, 是目前实验室检测毒素方法研究的重点; 另外, 随着抗体、适配体、识别肽等专一性强的基因片段筛选技术的发展, 将此用于快速检测技术并提高检测专属性和定量性, 是食品中黄曲霉毒素检测的又一研究重点。本文综述了黄曲霉毒素前处理提取技术和检测方法在食品中黄曲霉毒素分析中的应用, 并对其发展趋势进行了展望, 为食品毒素分析的发展提供参考。

参考文献

- [1] SHANAKHAT H, SORRENTINO A, RAIOLA A, *et al.* Current methods for mycotoxins analysis and innovative strategies for their reduction in cereals: An overview [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(11): 4003-4013.
- [2] PICKOVA D, OSTRY V, TOMAN J, *et al.* Aflatoxins: History, significant milestones, recent data on their toxicity and ways to mitigation [J]. *Toxins*, 2021, 13(6): 399.
- [3] CHAIN EPOCITF, SCHRENK D, BIGNAMI M, *et al.* Risk assessment of aflatoxins in food [J]. *EFSA Journal*, 2020, 18(3): e06040.
- [4] KABAK B. Aflatoxins in foodstuffs: Occurrence and risk assessment in Turkey [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 96: 103734.
- [5] KOBUCHI-NAKAI V, DE OLIVEIRA-ROCHA L, GONCALEZ E, *et al.* Distribution of fungi and aflatoxins in a stored peanut variety [J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(1): 285-290.
- [6] HAMERS-CASTERMAN C, ATARHOUCHE T, MUYLDERMANS S, *et al.* Naturally occurring antibodies devoid of light chains [J]. *Nature (London)*, 1993, 363(6428): 446-448.
- [7] NEAGU D, PERRINO S, MICHELI L, *et al.* Aflatoxin M₁ determination and stability study in milk samples using a screen-printed 96-well electrochemical microplate [J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(12): 753-758.
- [8] TAHERIMASLAK Z, AMOLI-DIVA M, ALLAHYARY M, *et al.*

- Magnetically assisted solid phase extraction using Fe_3O_4 nanoparticles combined with enhanced spectrofluorimetric detection for aflatoxin M_1 determination in milk samples [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2014, 842: 63–69.
- [9] NJAPAU H, MUZUNGAILE EM, CHANGA RC. The effect of village processing techniques on the content of aflatoxins in corn and peanuts in Zambia [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1998, 76(3): 450–456.
- [10] KAMIKA I, TAKOY LL. Natural occurrence of aflatoxin B_1 in peanut collected from Kinshasa, Democratic Republic of Congo [J]. *Food Control*, 2011, 22(11): 1760–1764.
- [11] 戴宇琪, 褚兰玲, 王云政, 等. 检测黄曲霉毒素样品前处理的最新研究进展[J]. *分析科学学报*, 2024, 40(4): 467–474.
- DAI YQ, CHU LL, WANG YZ, *et al.* Advances in sample pretreatment of aflatoxin analysis [J]. *Journal of Analytical Science*, 2024, 40(4): 467–474.
- [12] SHEIJOONI-FUMANI N, HASSAN J, YOUSEFI SR. Determination of aflatoxin B_1 in cereals by homogeneous liquid-liquid extraction coupled to high performance liquid chromatography-fluorescence detection [J]. *Journal of Separation Science*, 2011, 34(11): 1333–1337.
- [13] 王东旭, 王新财, 王凤丽, 等. 挥发性铵盐盐析辅助液液萃取结合超高效液相色谱-串联质谱法测定酱油中 4 种黄曲霉毒素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(14): 4634–4640.
- WANG DX, WANG XC, WANG FL, *et al.* Determination of 4 kinds of aflatoxins in soy sauce by volatile salting-out assisted liquid-liquid extraction combined with ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(14): 4634–4640.
- [14] SOLEIMANY F, JINAP S, FARIDAH A, *et al.* A UPLC-MS/MS for simultaneous determination of aflatoxins, ochratoxin A, zearalenone, DON, fumonisins, T_2 toxin and HT_2 toxin, in cereals [J]. *Food Control*, 2012, 25(2): 647–653.
- [15] 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 B_1 from edible vegetable oil samples prior to HPLC-FLD analysis [J]. *Microchemical Journal*, 2024, 197: 109690.
- [16] MASROURI M, MOGADDAM MRA, FARAJZADEH MA, *et al.* Combination of solvent extraction with deep eutectic solvent based dispersive liquid-liquid microextraction for the analysis of aflatoxin M_1 in cheese samples using response surface methodology optimization [J]. *Journal of Separation Science*, 2021, 44(7): 1501–1509.
- [17] AGUILERA-LUIZ MM, PLAZA-BOLANOS P, ROMERO-GONZALEZ R, *et al.* Comparison of the efficiency of different extraction methods for the simultaneous determination of mycotoxins and pesticides in milk samples by ultra high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 399(8): 2863–2875.
- [18] CHEN J, LIU F, LI Z, *et al.* Solid phase extraction based microfluidic chip coupled with mass spectrometry for rapid determination of aflatoxins in peanut oil [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 167: 106298.
- [19] LI X, ZHANG L, YANG M, *et al.* Synthesis of an ordered macroporous metal-organic framework for efficient solid-phase extraction of aflatoxins from milk products [J]. *Journal of Chromatography A*, 2024, 1713: 464520.
- [20] 葛正法, 汪学德, 纪俊敏. 磁性氧化石墨烯固相萃取酶联免疫吸附法测定芝麻油中黄曲霉毒素 B_1 含量[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(3): 76–79.
- GE ZF, WANG XD, JI JM. Determination of aflatoxin B_1 in sesame oil by solid-phase extraction with magnetic graphene oxide and enzyme-linked immunosorbent assay [J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(3): 76–79.
- [21] 李清, 楚楚, 魏蒙蒙, 等. 功能化磁性纳米颗粒用于生脉饮(党参方)中黄曲霉毒素 B_1 的含量测定[J]. *药物分析杂志*, 2017, 37(10): 1890–1896.
- LI Q, CHU C, WEI MM, *et al.* Application of functional magnetic nanoparticles in determination of aflatoxin B_1 in Shengmai decoction (Dangshen prescription) [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2017, 37(10): 1890–1896.
- [22] 吴静娜, 杨秀娟, 韦璐阳, 等. 磁性固相萃取液质联用法测定植物油中的黄曲霉毒素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(4): 1487–1494.
- WU JN, YANG XJ, WEI LY, *et al.* Determination of aflatoxins in vegetable oil by liquid chromatography-mass spectrometry with magnetic solid phase extraction [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(4): 1487–1494.
- [23] YU L, MA F, ZHANG L, *et al.* Determination of aflatoxin B_1 and B_2 in vegetable oils using $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ magnetic solid phase extraction coupled with high-performance liquid chromatography fluorescence with post-column photochemical derivatization [J]. *Toxins*, 2019, 11(11): 621.
- [24] MANOOCHEHRI M, ASGHARINEZHAD A, SAFAEI M. Determination of aflatoxins in rice samples by ultrasound-assisted matrix solid-phase dispersion [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2015, 53(1): 189–195.
- [25] JAYASINGHE G, DOMÍNGUEZ-GONZÁLEZ R, BERMEJO-BARRERA P, *et al.* Ultrasound assisted combined molecularly imprinted polymer for the selective micro-solid phase extraction and determination of aflatoxins in fish feed using liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2020, 1609: 460431.
- [26] KABOODI A, MIRZAEI H, KATIRAEI F, *et al.* Development of deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction combined with temperature controlled ionic liquid-based liquid phase microextraction for extraction of aflatoxins from cheese samples [J]. *Journal of Separation Science*, 2023, 46(16): 2300068.
- [27] ROMERO-SANCHEZ I, RAMIREZ-GARCIA L, GRACIA-LOR E, *et al.* Simultaneous determination of aflatoxins B_1 , B_2 , G_1 and G_2 in commercial rices using immunoaffinity column clean-up and HPLC-MS/MS [J]. *Food Chemistry*, 2022, 395: 133611.
- [28] ALIAKBARZADEH G, MAHMOUDI-MEYMAND M, MAZAHERI M. Verification of a standard method based on immunoaffinity column cleanup and HPLC-FLD analysis for determination of aflatoxins in peanut kernels [J]. *Food Control*, 2023, 152: 109820.
- [29] RADOIČIĆ A, RISTIVOJEVIĆ P, RADOSAVLJEVIĆ-STEANOVIĆ N. Recent applications of high-performance thin-layer chromatography (HPTLC) in forensic drug analysis [J]. *Journal of Planar Chromatography*, 2024, 37: 407–414.
- [30] SOMSUBSIN S, SEEBUNRUENG K, BOONCHIANGMA S, *et al.* A simple solvent based microextraction for high performance liquid chromatographic analysis of aflatoxins in rice samples [J]. *Talanta*, 2018, 176: 172–177.
- [31] KIM J, CHEON SH, KIM SH, *et al.* Determination of aflatoxins in red pepper and kimchi by ultra-high-performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. *Analytical Letters*, 2020, 53(7): 1087–1096.
- [32] SARKAR R, SHINDE R, DHANSHETTY M, *et al.* Multi-mycotoxin analysis method using liquid chromatography with tandem mass spectrometry and fluorescence detection in Indian medicinal herbs: Development and validation [J]. *Journal of Chromatography A*, 2022, 1677: 463310.

- [33] GEARY PA, CHEN G, KIMANYA ME, *et al.* Determination of multi-mycotoxin occurrence in maize based porridges from selected regions of Tanzania by liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), a longitudinal study [J]. *Food Control*, 2016, 68: 337–343.
- [34] 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.
- [35] LIU S, JIANG S, YAO Z, *et al.* Aflatoxin detection technologies: Recent advances and future prospects [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(33): 79627–79653.
- [36] GUO Q, HUANG X, HUANG Y, *et al.* Fe-NC single-atom nanozyme-linked immunosorbent assay for quantitative detection of aflatoxin B₁ [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 125: 105795.
- [37] 陈文星, 王凤华, 谭晓亮, 等. 基于纳米抗体-荧光素酶的黄曲霉毒素 B₁ 检测方法构建[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(4): 349–360.
CHEN WX, WANG FH, TAN XL, *et al.* Development of the detection method for aflatoxin b1 based on nanobody-nano luciferase fusion proteins [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(4): 349–360.
- [38] 童璐, 李大权, 汪晶. 侧流免疫层析技术在黄曲霉毒素 B₁ 检测中的研究进展[J]. *分析科学学报*, 2023, 39(3): 367–371.
TONG L, LI DQ, WANG J. Research progress on the detection of aflatoxin B₁ by lateral flow immunoassay [J]. *Journal of Analytical Science*, 2023, 39(3): 367–371.
- [39] XIA S, YU Z, LIU D, *et al.* Developing a novel immunochromatographic test strip with gold magnetic bifunctional nanobeads (GMBN) for efficient detection of *Salmonella choleraesuis* in milk [J]. *Food Control*, 2016, 59: 507–512.
- [40] CHEN Y, SHEN Y, ZHAO Y, *et al.* Rapid detection of zearalenone in cereals using La³⁺-doped upconversion nanoparticles-based immunochromatographic assay [J]. *Food Control*, 2023, 153: 109904.
- [41] SI S, KANEKO T, XU L, *et al.* Microsphere amplified fluorescence and its application in sensing [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 218: 114791.
- [42] SHENG W, GUO J, LIU C, *et al.* Quantitative determination of four mycotoxins in cereal by fluorescent microsphere based immunochromatographic assay [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(8): 4017–4024.
- [43] CHEN Q, MENG M, LI W, *et al.* Emerging biosensors to detect aflatoxin M₁ in milk and dairy products [J]. *Food Chemistry*, 2023, 398: 133848.
- [44] LIU D, LI W, ZHU C, *et al.* Recent progress on electrochemical biosensing of aflatoxins: A review [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 133: 115966.
- [45] KONDORI T, TAJIK S, AKBARZADEH TN, *et al.* Synthesis and characterization of bipyridine cobalt (II) complex modified graphite screen printed electrode: An electrochemical sensor for simultaneous detection of acetaminophen and naproxen [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(5): 3049–3057.
- [46] KARCZMARCZYK A, BAEUMNER AJ, FELLER KH. Rapid and sensitive inhibition-based assay for the electrochemical detection of ochratoxin A and aflatoxin M₁ in red wine and milk [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 243: 82–89.
- [47] AN X, SHI X, ZHANG H, *et al.* An electrochemical immunosensor based on a combined amplification strategy with the GO-CS/CeO₂-CS nanocomposite for the detection of aflatoxin M₁ [J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(4): 1362–1370.
- [48] FANG B, XU S, HUANG Y, *et al.* Gold nanorods etching-based plasmonic immunoassay for qualitative and quantitative detection of aflatoxin M₁ in milk [J]. *Food Chemistry*, 2020, 329: 127160.
- [49] LI S, WANG F, ZHAO B, *et al.* MnO₂ nanoflowers based colorimetric and fluorescent dual-mode aptasensor for sensitive detection of aflatoxin B₁ in milk [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1279: 341844.
- [50] WU X, TIAN X, XU L, *et al.* Determination of aflatoxin M₁ and chloramphenicol in milk based on background fluorescence quenching immunochromatographic assay [J]. *BioMed Research International*, 2017, 1: 8649314.
- [51] WANG J, CHEN Q, JIN Y, *et al.* Surface enhanced Raman scattering-based lateral flow immunosensor for sensitive detection of aflatoxin M₁ in urine [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1128: 184–192.
- [52] LI D, XIA Y. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? [J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(14): 1151–1170.
- [53] JI D, LIN Y, GUO X, *et al.* Electrospinning of nanofibres [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2024, 4(1): 1.
- [54] CHU L, ZHENG S, QU B, *et al.* Detection of β -agonists in pork tissue with novel electrospun nanofibers-based solid-phase extraction followed ultra-high performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry [J]. *Food Chemistry*, 2017, 227: 315–321.
- [55] US AE, KIRBAY FO, GULDU OK, *et al.* Optical detection based spot test on electrospun nanofibers for glioblastoma cells [J]. *Talanta*, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127303>
- [56] WANG Y, CHU L, QU J, *et al.* A novel sample pretreatment of nanofiber-packed solid-phase extraction of aflatoxin B₁, B₂, G₁ and G₂ in foods and simultaneous determination with HPLC [J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137699.
- [57] HAN Q, SUN Y, SHEN K, *et al.* Rapid determination of seven synthetic dyes in casual snacks based on packed-fibers solid-phase extraction coupled with HPLC-DAD [J]. *Food Chemistry*, 2021, 347: 129026.
- [58] ASADOLLAHI-BABOLI M, AGHAKHANI A, BIKDELOO V. Application of polyamide nanofibers, SPME/GC-MS, and chemometrics for comprehensive analysis of volatiles in *Thymus vulgaris* L. and *Thymus serpyllum* L. [J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(2): 528–536.
- [59] AMINI S, EBRAHIMZADEH H, SEIDI S, *et al.* Application of electrospun polyacrylonitrile/Zn-MOF-74@GO nanocomposite as the sorbent for online micro solid-phase extraction of chlorobenzenes in water, soil, and food samples prior to liquid chromatography analysis [J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130330.
- [60] CHIGOME S, TORTO N. Electrospun nanofiber-based solid-phase extraction [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 38: 21–31.
- [61] ZHANG K, BANERJEE K. A review: Sample preparation and chromatographic technologies for detection of aflatoxins in foods [J]. *Toxins*, 2020, 12(9): 539.
- [62] JARVAS G, GUTTMAN A, MIEKUS N, *et al.* Practical sample pretreatment techniques coupled with capillary electrophoresis for real samples in complex matrices [J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 122: 115702.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)