

粮食质量安全快速检测标准体系与技术研究进展

周升阳^{1,2}, 匡华^{1,2}, 刘丽强^{1,2}, 胥传来^{*1,2}

(1. 江南大学 食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 简述了我国粮食质量安全快速检测标准体系的现状、存在的问题和发展趋势, 以及检测技术的发展现状。未来的粮食质量安全快速检测技术将在高通量快速检测、视觉化定量检测和智能成套化检测方面高速发展, 这对于快速筛查病原与污染物、提高检测效率、降低检测成本、促进粮食产业发展和维护公共健康等具有重要作用。同时, 对于完善粮食质量安全快速检测标准体系而言, 快速检测技术必将给粮食质量安全的监测体系提供强有力的支撑, 不仅能够保障消费者的饮食健康, 还能提升我国粮食管理的整体水平, 促进粮食产业的发展并提高国际竞争力。

关键词: 粮食质量安全; 标准; 快速检测技术

中图分类号: TS 210.7 文章编号: 1673-1689(2024)05-0001-08 DOI: 10.12441/spyswjs.20220819003

Research Progress on Rapid Detection Standard System and Technology for Food Quality and Security

ZHOU Shengyang^{1,2}, KUANG Hua^{1,2}, LIU Liqiang^{1,2}, XU Chuanlai^{*1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: It briefly describes the current situation, problems and development trend of China's rapid food quality and safety testing standard system, as well as the development status of testing technology. In the future, rapid food quality and safety testing technology will develop at a high speed in high-throughput rapid testing, visual quantitative testing and intelligent set, and play an important role in rapid screening of pathogens and pollutants, improving testing efficiency, reducing testing costs, promoting the development of food industry, and maintaining public health. At the same time, to improve the food quality and safety rapid test standard system, rapid detection technology will certainly provide strong support to the food quality and safety monitoring system, which can not only protect the consumers' dietary health, but also improve the overall level of China's food management, promote the development of the food industry and enhance international competitiveness.

Keywords: food quality and security, standard, rapid detection technology

收稿日期: 2022-08-19 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1606804)。

* 通信作者: 胥传来(1965—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品安全快速检测研究。E-mail: xcl@jiangnan.edu.cn

粮食质量是影响人类生命健康和生活的因素之一。随着科技的发展,食品的种类越来越丰富,随之而来的问题是以粮食为源头的食品中引入的污染物也越来越复杂,粮食污染物会导致严重的疾病,例如引发急性胃肠炎和胃肠道癌症^[1-3]。根据世界卫生组织的报告,世界上每年约有 200 万人死于与食品污染有关的腹泻疾病,其中的污染物包括真菌毒素、农药和重金属等^[4-7]。在长期的实践中,我国坚持走中国特色粮食安全之路,特别是党的十八大以来,党中央确立了“以我为主、立足国内、确保产能、适度进口、科技支撑”的国家粮食安全战略。

我国粮食产量已从 1949 年的 102 900 kg/km² 增长到 2021 年的 580 500 kg/km²,人们对粮食的要求从“简单吃饱”到“吃好更健康”的变化体现出我国粮食生产由数量导向转变为质量导向这一根本改变。随着粮食产量不断增大,粮食及其制品质量安全这一话题的热度一直居高不下,在原料采集、加工包装和贮藏运输等环节都有受到污染的风险^[8-10]。近两年,国家食品安全监督抽检结果在粮食及其制品这一项上的合格率总体保持较高水平(98%以上),但从检出的不合格项目类别看,农药残留超标、真菌毒素和重金属等污染占比较高。农药残留主要包括有机磷类、氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类农药,特别是有机磷类农药在农业生产中仍占主导地位。粮食作物上残留的过量农药可经消化道、呼吸道和皮肤黏膜进入人体,造成机体不同程度的损伤。真菌毒素包括黄曲霉毒素(AFBs)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、赭曲霉毒素 A(OTA)和呕吐毒素(DON)等,尤其易污染贮藏运输中的谷物类等粮食作物^[11-14]。重金属污染则是因耕地受到汞(Hg)、镍(Ni)、铬(Cr)、镉(Cd)和铅(Pb)等元素不同程度的污染,进而污染粮食作物。农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对全国市场稻米进行安全性抽检时发现,Pb 超标最严重,超标率达 28.4%。重金属通过粮食经食物链进入人体并富集,干扰人体正常生理功能,危害人体健康^[15-17]。

上述污染物的存在迫使我国在粮食质量上需要加强高标准和严要求的管控。我国粮食安全面临的挑战已经不仅局限于产品供给方面,为了保障粮食质量安全,除了要严格把控粮食采收的关键环节,还需加强对粮食后期加工环节的监督。国家

市场监督管理总局目前对粮食质量安全的检测仍以大型仪器检测这种常规手段为主,虽然这些分析方法有较高的敏感性和可靠性。但需要更长分析时间、烦琐的样品预处理过程、昂贵及复杂的仪器和训练有素的人员,因而限制了广泛应用,无法满足及时、快速的粮食质量安全检测需求,使监管存在一定的滞后性^[18-20]。

作者通过探讨粮食质量安全快速检测标准体系的现状与发展趋势,以及检测技术的发展现状,展望了粮食质量安全快速检测技术的发展趋势,以及应用的预期效益,旨在推动粮食及其制品中污染物的快速定量检测技术在粮食质量安全领域的发展及标准化进程,这对于完善粮食质量安全的监控体系,研判该领域技术的发展方向,以及促进我国粮食质量安全快速检测领域的高速、健康发展具有重要作用。

1 粮食质量安全快速检测标准体系现状及发展趋势

1.1 粮食质量安全快速检测标准体系概述

粮食质量标准化是保障国家粮食安全的基础性工作之一,目前由国家标准、行业标准、企业标准、地方标准和团体标准组成我国的粮食质量标准体系^[21-23]。截至 2021 年,国家粮食和物资储备局归口管理粮食标准 641 项,已建立了较为完整的粮食质量标准体系,在粮食采收、加工、运输和储藏方面均有覆盖。但在快速检测方面还未形成较为完善的标准体系,多数是应用较为成熟的方法建立筛查单一污染物的快速检测标准。相比我国粮食质量检测标准,欧盟在常规的技术标准方面发展较早,目前大部分标准中的检测方法主要以免疫亲和柱净化或固相萃取等前处理手段为主,进一步联用高效液相色谱(HPLC)进行检测。仪器分析的结果具有较高的可靠性,但在性质相近的同种物质之间难以做到精确分离,且需要烦琐的前处理步骤,包括对真菌毒素、重金属和农药等污染物的衍生化,才能实现较高的准确性,其中涉及的步骤越多对结果稳定性造成的干扰越大^[24-25]。

随着我国经济的快速发展,粮食产能突飞猛进。我国粮食质量标准体系中已有超过 60 项标准与国际标准或国外优秀标准等同或在此基础上进行了修改,并且逐步制定了出口花生、谷类及其制

品中T-2 和HT-2 毒素的测定标准。快速检测方法在粮食质量安全检测中的应用逐渐增多,粮食质量安全快速检测标准也陆续发布,如国家粮食和物资储备局颁布的《LS/T 6113—2015 粮油检验 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇测定 胶体金快速定量法》,国家市场监督管理总局颁布的《KJ 202106 玉米及其碾磨加工品中伏马毒素的快速检测 胶体金免疫层析法》《KJ 201913 食品中玉米赤霉烯酮的快速检测 胶体金

免疫层析法》《KJ 202101 食品中赭曲霉毒素 A 的快速检测 胶体金免疫层析法》,农业农村部颁布的《NY/T 3867—2021 粮油作物产品中黄曲霉毒素 B₁、环匹阿尼酸毒素、杂色曲霉毒素的快速检测胶体金法》等(见表 1)。这些快速检测标准的颁布体现了我国粮食质量监管体系和检测手段在不断进步和完善,并朝着更加符合市场需求的检测方向发展。

表 1 中国现行粮油质量安全快速检测标准中主要污染物的检测方法

Table 1 Detection methods for main contaminants in the current rapid testing standards for grain and oil quality and safety in China

标准编号	检测项目	检测方法	检测限
KJ 202103	食用植物油中天然辣椒素的快速检测	荧光免疫层析法	0.4 μg/kg
KJ 201910	食用油中苯并芘的快速检测	胶体金免疫层析法	10 μg/kg
KJ 201708	食用油中黄曲霉毒素 B ₁ 的快速检测	胶体金免疫层析法	20 μg/kg
KJ 201702	食品中呕吐毒素的快速检测	胶体金免疫层析法	1 mg/kg
KJ 202101	食品中赭曲霉毒素 A 的快速检测	胶体金免疫层析法	20 μg/kg
KJ 201913	食品中玉米赤霉烯酮快速检测	胶体金免疫层析法	60 μg/kg
KJ 202106	玉米及其碾磨加工品中伏马毒素的快速检测	胶体金免疫层析法	4 mg/kg
LS/T 6108—2014	粮油检验 谷物中黄曲霉毒素 B ₁ 的快速测定	免疫层析法	20 μg/kg
LS/T 6109—2014	粮油检验 谷物中玉米赤霉烯酮测定	胶体金快速测试卡法	50 μg/kg
LS/T 6110—2014	粮油检验 谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇测定	胶体金快速测试卡法	800 μg/kg
LS/T 6111—2015	粮油检验 粮食中黄曲霉毒素 B ₁ 测定	胶体金快速定量法	2 μg/kg
LS/T 6112—2015	粮食检验 粮食中玉米赤霉烯酮测定	胶体金快速定量法	5 μg/kg
LS/T 6113—2015	粮油检验 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇测定	胶体金快速定量法	120 μg/kg
LS/T 6114—2015	粮油检验 粮食中赭曲霉毒素 A 测定	胶体金快速定量法	3 μg/kg
LS/T 6125—2017	粮油检验 稻米中镉的快速检测	固体进样原子荧光法	2 μg/kg
LS/T 6134—2018	粮油检验 粮食中镉的快速测定	石墨炉原子吸收光谱法	0.002 1 μg/kg
LS/T 6135—2018	粮油检验 粮食中铅的快速测定	石墨炉原子吸收光谱法	0.016 mg/kg
LS/T 6139—2020	粮油检验粮食及其制品中有机磷类和氨基甲酸酯类农药残留的快速定性检测	酶抑制率法	—
DB43/T 2354—2022	稻米中镉快速检测	固体进样电热蒸发原子吸收光谱法	0.002 mg/kg
DB43/T 2347—2022	饲料中脱氧雪腐镰刀菌烯醇快速检测	超导量点免疫荧光法	50 μg/kg
NY/T 3867—2021	粮油作物产品中黄曲霉毒素 B ₁ 、环匹阿尼酸毒素、杂色曲霉毒素的快速检测	胶体金免疫层析法	AFB ₁ : 1.0 μg/kg; 环匹阿尼酸毒素: 50.0 μg/kg; 杂色曲霉毒素 200.0 μg/kg

1.2 我国粮食质量安全快速检测标准存在的问题及发展趋势

1.2.1 存在的问题 与国际食品法典委员会(CAC)、国际标准化组织(ISO) 等机构和美国等发达国家颁布的标准相比,我国粮食质量安全快速检测标准的

修订无论在时间、数量还是质量上都有明显差距,主要存在以下 3 方面的问题:

1)我国粮食质量安全快速检测标准体系分类还不明确,结构缺乏均衡性。主要表现在粮食基础研究较为薄弱;纯加工标准数量远超于配套设施、

运输和贮藏等标准数量;仪器检测的标准数量多,快速定量(定性)检测标准偏少;产品质量标准覆盖品类不够全面,对全面提高粮食质量安全存在制约性。

2)粮食质量安全快速检测标准体系更新效率较慢,与新时代的需求不匹配。标准发布实施后复审机制跟踪不到位,没有系统性、科学性和实用性的反馈,导致对标准后续的补充和修订断层,进而影响对标准的最终评价和对市场产生的实际效应。并且标准中很多检测方法已过时但没有及时修订相关的新技术,是导致标准时效性差的根本原因。

3)我国粮食质量安全快速检测标准在样品前处理方面需要进行优化。快速检测标准最大的优势在于“快”,摆脱了传统方法复杂的样品处理步骤,充分发挥免疫层析等检测技术易用性的优势,才能使粮食质量安全快速检测标准得到推广与应用。

1.2.2 发展趋势和特点

1)我国粮食质量安全快速检测标准化工作的任务目标越来越具体。在不同产品中,即使是同一污染物也会根据不同的检测基质颁布不同的快速检测标准,并在检测方法灵敏度方面不断提高。通过制定及实施相应的粮食质量安全快速检测标准,促使粮食产品质量不断提高,使粮食产业、贸易市场的发展形成良性循环。

2)粮食质量安全快速检测标准制定的要求越来越高,尤其是检测灵敏度方面。从传统的仪器检测标准发展到快速检测标准,也体现出标准体系的结构在不断完善,从而使粮食质量不断提高。并且标准涉及的检测范围也在不断拓宽,检测指标和技术手段更加贴合市场实际操作需求。

3)粮食质量安全快速检测标准的时效性更加突出。与时俱进的标准一方面服务于社会需求,一方面也体现了技术的进步。从不断更新的标准立项编号即可看出,每年会有大量新标准颁布。不断更新的标准体现出当今检测手段的不断优化,特别是当快速检测技术已成为主流方法,有利于弥补当今丰富的加工手段可能导致的粮食质量安全漏洞。

4)粮食质量安全快速检测标准中方法的检测速度不断加快,检测目标的选择性不断提高,并且涉及的检测设备趋向小型化、便携式,使动态、实时和快捷的现场检测逐渐成为主流。目前的快速检测设备已能覆盖大多数食品检测项目,除了具有检测

时间短这一优势,对于某些污染物的检测灵敏度已基本接近常规仪器检测方法。

2 粮食质量安全快速检测技术发展现状

2.1 高通量快速检测

在人们的日常生活中,粮食及其制品属于必需品,对粮食产品质量进行严格把控,对于保障人民健康、生活稳定具有重要作用。相比质谱、色谱等大型高端精密仪器,免疫层析分析技术因造价低、稳定、无需专业操作人员等优势已成为食品安全检测领域的重要方法,是对粮食产品质量进行安全、快速检测的可靠技术^[26-27]。保证免疫层析技术灵敏度的关键是其核心试剂抗体的制备与筛选。多年来,我国免疫层析快速检测产品的市场一直被美国 Santa、Charm Scientific 和英国 Abcam 等公司垄断。近年来,我国才开始在食品安全快速检测领域高速发展。例如,国家粮食质量安全生物快速检测技术创新中心在该领域不断突破,开发了污染物构象抗原表位设计方法,以食品基质提取液为培养基成分“驯化”杂交瘤细胞的基质耐受性,创建了“基质增强”的单克隆抗体筛选技术体系,建成了世界上规模最大的食品安全抗体资源库;创新研发了快速定量免疫检测产品与装备,实现了具有自主知识产权的重金属、农药等检测产品的工程化制备和应用。免疫层析技术的原理是将识别抗原和捕获抗体两元件喷涂在硝酸纤维素膜上,采用胶体金(GNPs)、磁珠、荧光微球等不同信号标记物标记抗体。在检测时,试纸条中的目标物会在毛细管作用下迁移至检测线(T线)和控制线(C线)产生颜色、荧光等信号变化,继而筛查出目标物。目前,市场对免疫层析检测产品的需求不断增加,使其商业化程度不断提高。2018年,免疫层析检测产品的全球市场已达到60亿美元^[28]。

目前大规模普及的免疫层析试纸条检测原理是含一条T线和一条C线的单一试纸条检测单一的危害因子,而同时检测多危害因子的高通量检测模式也已经广泛应用。例如,市场上已有将盐酸克伦特罗、齐帕特罗和西马特罗3种药物的单一试纸条拼装在同一卡槽中形成三联卡,或将其他 β -受体激动剂组成五联卡达到同时检测多种药物的效果。在此基础上发展的另外一种免疫层析法是具备多条T线的多重检测试纸条,该方法是将目标物的多

种抗体混合固定在试纸条的结合区,由不同目标物的包被抗原形成的多线作为检测区,极大扩展了检测目标的范围。Chen 等开发出含有 3 个 T 线的测试条,可在 15 min 内对 OTA、ZEN 和 AFB₁ 进行检测^[29]。玉米中 OTA、ZEA 和 AFB₁ 的视觉阈值分别为 15、50、10 $\mu\text{g/kg}$ 。计算出 OTA、ZEA 和 AFB₁ 的检测限在玉米中分别为 0.19、0.42、0.10 $\mu\text{g/kg}$,在水稻中分别为 0.21、0.43、0.12 $\mu\text{g/kg}$,而在花生中分别为 0.24、0.46、0.13 $\mu\text{g/kg}$ 。Han 等研发了一种具有 8 个 T 线的试纸条,可在 20 min 内完成对链霉素(STR)、磺胺类药物(SAs)、氯霉素(CAP)、 β -内酰胺类药物(BLs)、四环素(TCs)、三聚氰胺(MEL)、黄曲霉毒素 M₁(AFM₁)、喹诺酮类药物(QNs)的多重检测^[30]。

2.2 视觉化定量检测

在常规的免疫分析中,信号增强通常需要分子标记物,这决定了免疫层析方法的灵敏度和检测效率。GNPs 是最常用的一种标记物,但为了避免在检测过程中出现假阳性或假阴性情况和提高定量分析能力,其他光电性能优异的可视化材料伴随着纳米技术的蓬勃发展也得到了开发,包括量子点颗粒(quantum dots, QDs)、敏感的光学或电子元件、磁性化合物和荧光化合物等^[31]。

QDs 是一种半导体纳米颗粒,由于其尺寸依赖的光学特性,表现出许多独特的性质,包括光化学稳定性和具有广泛的激发光谱,在生物医学诊断、化学及治疗标记、成像及免疫分析方面显示出巨大的应用潜力^[32]。在多种真菌毒素检测方法的比较研究中,对比 GNPs 和 QDs 标记发现,两种免疫层析方法都是快速、经济、方便的定性技术,可以同时检测小麦中的 DON、ZEN 和 HT-2/T-2,而不需要特殊的仪器^[33]。并且,基于 QDs 的免疫层析技术可消耗更少的免疫反应物,具备更高的灵敏度。碳纳米材料(CNPs)是一种发展非常迅速的纳米颗粒,由于其低成本、高机械强度和高热导率的特性,在现代免疫分析中处于领先地位。研究表明,作为免疫分析的标记物, CNPs 比 GNPs 或乳胶珠更敏感,这是由于其具有较深的颜色且可与光背景形成高对比度。即使在目视检查的情况下, CNPs 的灵敏度也在 10~500 pg/mL ^[34]。除此之外,荧光微球作为一种聚苯乙烯材料,在珠子的内外表面都含有具有稳定构象和高荧光强度的染料,包含了各种大小的球和颜色,并表现出较宽的荧光信号范围。荧光免疫层析

是一种荧光微球标记和免疫层析相结合的快速分析方法^[35]。荧光免疫层析试纸与荧光分析仪相结合,可以定量读取和分析荧光信号,避免了目视观察中存在的误差,通过建立拟合曲线,可以计算出分析物的浓度。Zhou 等使用聚苯乙烯微球作为标签,检测谷物产品中的 DON,其检测限达到 0.29 ng/mL ^[36]。定量化检测是定性化检测发展的最终方向,例如美国 Charm Scientific 公司研发的真菌毒素快速检测装置包含最全套的定量检测方案,获得了 USDA-GIPSA(美国农业部-谷物检验、批发及畜牧场管理局)的支持,并得到 FGIS(联邦谷物检验局)的认证^[37]。我国维德维康和迪腾敏等公司生产的快速定量检测卡已经成功应用于市场,并取得了不错的效益。目前市场上的免疫层析试纸条产品及检测性能见表 2。

2.3 智能成套化检测

随着科技的不断进步,诸多领域都在实现数字化转型,提供实时决策,提高生产力、灵活性和敏捷性。检测领域也不例外,依托计算机网络、大数据、物联网和人工智能等技术的仪器生产、实验室升级和数字化平台建设,使快速检测也将迈入智能化时代。智能手机已经是人们使用最熟练的智能化设备,在全球范围内的潜在用户人数超过 70 亿^[38]。凭借手机内置的高清摄像头可作为试纸条定性和定量判读的检测设备。基于软件客户端研发配合 5G 高速数据传输便可实现免疫快速检测数据的即时读取与共享,以及数据的集成与统一管理,备份云端和即时下载可做到追根溯源,为粮食安全快速检测提供有利的技术支撑。Liu 等已开发出一种基于智能手机的双检测模式设备,采用了谷物中多重真菌毒素的两种横向流免疫分析法^[39],具有通用数据分析的优势并且将可见光和荧光检测模式集成在一个设备中,检测设备的高通用性方便用户根据需要进行选择(见图 1)。在智能化的加持下,粮食安全快速检测将朝着规模成套化发展,将检测目标的种类进行高度整合,并且检测装置的成套化大规模生产也是保证免疫快速检测产品品质的有力支撑。基于我国粮食安全检测需求和市场发展特点,粮食安全快速检测的发展重点将围绕真菌毒素、重金属及农药残留的免疫检测试剂盒、试纸条及与智能设备连通的成套化产品方面进行,这将为快速检测行业发展注入活力,带来行业的巨大变革。同时,政策扶持也可能是检测行业智能化发展的先发优势。

表 2 粮食中主要污染物及免疫层析试纸条的检测性能

Table 2 Main contaminants in grains and detection performance of immunochromatographic test strips

检测目标	样本种类	检测类型	检测范围
黄曲霉毒素 B ₁	稻米、小麦和食用油等	定量检测	1~100 μg/kg
玉米赤霉烯酮	玉米及其碾磨加工品等	定量检测	5~500 μg/kg
呕吐毒素	小麦、玉米和面粉等	定量检测	20~2 500 μg/kg
赭曲霉毒素 A	稻米、小麦和食用油等	定量检测	10~100 μg/kg
伏马毒素 B ₁	稻米、小麦和玉米等	定量检测	10~200 μg/kg
铅	稻米、大豆和食用油等	定量检测	50~1 000 μg/kg
镉	稻米、大豆和食用油等	定量检测	50~1 000 g/kg
汞	稻米、大豆和食用油等	定量检测	2.5~100.0 μg/kg
铬	稻米、大豆和食用油等	定量检测	100~2 000 μg/kg
有机磷类农药	菜籽油和油茶籽油等	定性检测	0.1~1.0 mg/kg
有机氯类农药	菜籽油和油茶籽油等	定性检测	0.1~1.0 mg/kg
拟除虫菊酯类物质	菜籽油和油茶籽油等	定性检测	0.1~1.0 mg/kg
三嗪类物质	菜籽油和油茶籽油等	定性检测	0.05~0.50 mg/kg
棉酚	棉籽油	定量检测	0.1~10.0 mg/kg
苯并芘	热榨油	定量检测	5~1 000 μg/kg
辣椒碱	植物油	定量检测	0.1~10.0 μg/kg
3-氯丙醇酯	精炼油	定量检测	0.5~250.0 mg/kg

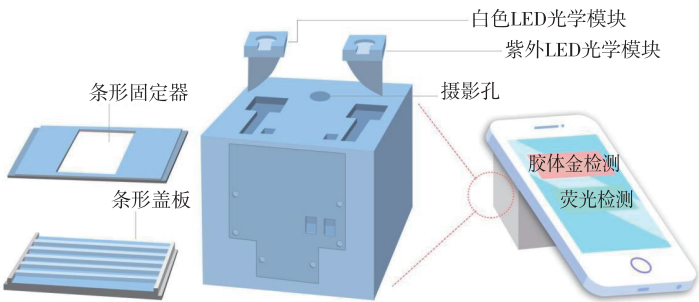


图 1 基于智能手机的胶体金和荧光双检测模式集成装置

Fig. 1 Smartphone-based integrated device with colloidal gold and fluorescence dual detection mode

3 展望

粮食质量安全与每一位国民的健康息息相关。随着我国粮食产量逐年增长，一些存在于粮食加工、运输和贮存方面的安全问题逐渐凸显。应建立起完善的粮食质量安全快速检测标准体系，向国际先进的标准学习，取其精华，不断对现有粮食快速检测标准体系进行更新和完善。坚持以市场为导向，加强粮食快速检测标准统筹规划，建立标准评价机制，对新实施的标准要有后续的复审，通过动

态调整标准的结构，使其向稳定、持续和符合科学发展的方向前进。免疫快速检测技术凭借其自身的优势，已在粮食质量安全快速检测方面占据重要地位，从实验室验证成功并市场化的免疫快速检测产品越来越丰富，但在未来的发展方向上应更加符合粮食安全检测的要求，快速检测产品的竞争应有序进行，在批次间稳定性、精密度等方面稳步提升。总之，粮食质量安全快速检测技术的发展有助于社会、经济、生态效益的提升，对完善粮食质量安全的监测体系贡献着不可忽视的力量。

参考文献:

- [1] 崔明明, 聂常虹. 基于指标评价体系的我国粮食安全演变研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(8): 910-919.
CUI M M, NIE C H. Study on food security in China based on evaluation index system[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(8): 910-919. (in Chinese)
- [2] ZHOU Z Y. Achieving food security in China: past three decades and beyond[J]. *China Agricultural Economic Review*, 2010, 2(3): 251-275.
- [3] 王冉冉, 姚丽, 姚帮本, 等. 基于胶体金侧向层析原理的大米中痕量镉现场快速检测方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 60-65.
WANG R R, YAO L, YAO B B, et al. A method for on-site and rapid detection of trace cadmium in rice based on colloidal gold lateral chromatography[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(8): 60-65. (in Chinese)
- [4] 张伟, 马青青, 张二鹏, 等. 粮食及其制品中真菌毒素检测及风险评估技术的研究进展[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(5): 636-640.
ZHANG W, MA Q Q, ZHANG E P, et al. Research progress on detection and risk assessment technology of mycotoxins in grain and its products[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2022, 32(5): 636-640. (in Chinese)
- [5] SAVARY S, WADDINGTON S, AKTER S, et al. Revisiting food security in 2021: an overview of the past year[J]. *Food Security*, 2022, 14(1): 1-7.
- [6] MAGAN N. Mycotoxin contamination of food in Europe: early detection and prevention strategies[J]. *Mycopathologia*, 2006, 162(3): 245-253.
- [7] ZHANG N, LIU B S, CUI X L, et al. Recent advances in aptasensors for mycotoxin detection: on the surface and in the colloid[J]. *Talanta*, 2021, 223(1): 121729.
- [8] LI R X, WEN Y, WANG F L, et al. Recent advances in immunoassays and biosensors for mycotoxins detection in feedstuffs and foods[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(1): 108.
- [9] LIN X F, YU W Y, TONG X Y, et al. Application of nanomaterials for coping with mycotoxin contamination in food safety: from detection to control[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2024, 54(2): 355-388.
- [10] GUO L L, XU X X, ZHAO J, et al. Multiple detection of 15 triazine herbicides by gold nanoparticle based-paper sensor[J]. *Nano Research*, 2022, 15(6): 5483-5491.
- [11] 牛灿杰, 叶素丹, 胡玉霞, 等. 谷物及制品中真菌毒素前处理及检测技术研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 203-210.
NIU C J, YE S D, HU Y X, et al. Research progress in detection technologies of mycotoxins in cereals and cereal-based products[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(5): 203-210. (in Chinese)
- [12] CHAVEZ R A, CHENG X B, STASIEWICZ M J. A review of the methodology of analyzing aflatoxin and fumonisin in single corn kernels and the potential impacts of these methods on food security[J]. *Foods*, 2020, 9(3): 297.
- [13] WU Z H, PU H B, SUN D W. Fingerprinting and tagging detection of mycotoxins in agri-food products by surface-enhanced Raman spectroscopy: principles and recent applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 393-404.
- [14] LI P, DENG S L, XU Z Z. Toxicant substitutes in immunological assays for mycotoxins detection: a mini review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128589.
- [15] YAO J J, WANG Z X, GUO L L, et al. Advances in immunoassays for organophosphorus and pyrethroid pesticides[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 131: 116022.
- [16] XU L W, XU X X, WU X L, et al. Sex-dependent environmental health risk analysis of flupyradifurone[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(3): 1841-1853.
- [17] XU L W, GUO L L, WANG Z X, et al. Profiling and identification of biocatalyzed transformation of sulfoxaflor *in vivo* [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(37): 16218-16224.
- [18] KONG D Z, LIU L Q, SONG S S, et al. A gold nanoparticle-based semi-quantitative and quantitative ultrasensitive paper sensor for the detection of twenty mycotoxins[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(9): 5245-5253.
- [19] WANG Z X, ZHAO J, XU X X, et al. An overview for the nanoparticles-based quantitative lateral flow assay[J]. *Small Methods*, 2022, 6(1): e2101143.
- [20] XU X X, GUO X, SONG S S, et al. Gold-based strip sensor for the rapid and sensitive detection of butralin in tomatoes and peppers[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2022, 39(7): 1255-1264.
- [21] 徐广超, 尚艳娥. 国内外粮食标准体系的对比分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(12): 177-182.
XU G C, SHANG Y E. Comparative analysis of grain standard system at home and abroad[J]. *Journal of the Chinese Cereals*

- and Oils Association, 2020, 35(12):177-182. (in Chinese)
- [22] 吴晓娟, 吴伟. 米糠油安全生产标准方法的研究与实践[J]. 食品与机械, 2021, 37(5):89-94.
WU X J, WU W. The study and practice on the standardized methods for rice bran oil safety and production[J]. **Food & Machinery**, 2021, 37(5):89-94. (in Chinese)
- [23] 黄小林, 李倩影, 吴雨豪, 等. 多重免疫层析试纸辅助食品安全快速检测的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11):12-21.
HUANG X L, LI Q Y, WU Y H, et al. Research progress of multiplex immunochromatographic test strips for rapid food safety detection[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2021, 40(11):12-21. (in Chinese)
- [24] OKPALA C O R, KORZENIOWSKA M. Understanding the relevance of quality management in agro-food product industry: from ethical considerations to assuring food hygiene quality safety standards and its associated processes[J]. **Food Reviews International**, 2023, 39(4):1879-1952.
- [25] 郭玲玲, 徐慧, 匡华. 食品安全检测基体标准物质研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(7):71-83.
GUO L L, XU H, KUANG H. Research progress in matrix reference materials for food safety detection[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2022, 41(7):71-83. (in Chinese)
- [26] 王忠兴, 郭玲玲, 匡华. 食品安全免疫层析检测技术研发及应用进展[J]. 生物产业技术, 2019(4):75-81.
WANG Z X, GUO L L, KUANG H. Development and application of immunochromatographic biotechnology in food safety detection[J]. **Biotechnology & Business**, 2019(4):75-81. (in Chinese)
- [27] ZHANG J, XU L W, XU X X, et al. Profiles of sterigmatocystin and its metabolites during traditional Chinese rice wine processing[J]. **Biosensors**, 2022, 12(4):212.
- [28] ZENG L, XU X X, SONG S S, et al. Synthesis of haptens and gold-based immunochromatographic paper sensor for vitamin B₆ in energy drinks and dietary supplements[J]. **Nano Research**, 2022, 15(3):2479-2488.
- [29] CHEN Y Q, CHEN Q, HAN M M, et al. Development and optimization of a multiplex lateral flow immunoassay for the simultaneous determination of three mycotoxins in corn, rice and peanut[J]. **Food Chemistry**, 2016, 213:478-484.
- [30] HAN M M, GONG L, WANG J Y, et al. An octuplex lateral flow immunoassay for rapid detection of antibiotic residues, aflatoxin M₁ and melamine in milk[J]. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 2019, 292:94-104.
- [31] ZHOU S, GUO L, KUANG H, et al. Ultrasensitive paper sensor for simultaneous detection of alpha-amanitin and beta-amanitin by the production of monoclonal antibodies[J]. **Food Chemistry**, 2022, 396:1-10.
- [32] YANG Y N, LIU W, CAO J, et al. On-site, rapid and visual determination of Hg²⁺ and Cu²⁺ in red wine by ratiometric fluorescence sensor of metal-organic frameworks and CdTe QDs[J]. **Food Chemistry**, 2020, 328:127119.
- [33] ZHENG N Y, YAN J H, QIAN W, et al. Comparison of developmental toxicity of different surface modified CdSe/ZnS QDs in zebrafish embryos[J]. **Journal of Environmental Sciences**, 2021, 100:240-249.
- [34] SILVANA A, RAQUEL C A, SANTOS S G, et al. Advances in carbon nanomaterials for immunotherapy[J]. **Applied Materials Today**, 2022, 27:1-26.
- [35] ZHOU S Y, XU X X, WANG L, et al. Rapid, on-site quantitative determination of higenamine in functional food using a time-resolved fluorescence microsphere test strip[J]. **Food Chemistry**, 2022, 387:132859.
- [36] ZHOU S Y, XU L G, KUANG H, et al. Fluorescent microsphere immunochromatographic sensor for ultrasensitive monitoring deoxynivalenol in agricultural products[J]. **Microchemical Journal**, 2021, 164:106024.
- [37] 王忠兴, 雷威禄, 郭玲玲, 等. 食用油安全危害因子快速定量检测技术现状及前景[J]. 中国油脂, 2021, 46(8):105-109.
WANG Z X, LEI X L, GUO L L, et al. Current situation and prospect of rapid quantitative detection technology for edible oils safety hazard factors[J]. **China Oils and Fats**, 2021, 46(8):105-109. (in Chinese)
- [38] KHANAL B, POKHREL P, KHANAL B, et al. Machine-learning-assisted analysis of colorimetric assays on paper analytical devices[J]. **ACS Omega**, 2021, 6(49):33837-33845.
- [39] LIU Z W, HUA Q C, WANG J, et al. A smartphone-based dual detection mode device integrated with two lateral flow immunoassays for multiplex mycotoxins in cereals[J]. **Biosensors & Bioelectronics**, 2020, 158:112178.

(责任编辑:史润东东)