

食品中农药残留快速检测技术的创新与发展趋势

钟小莉

博尔塔拉蒙古自治州食品药品检验所 新疆维吾尔自治区 833400

摘要: 全球人口增长与农业集约化使农药在保障粮食安全中不可或缺,但农药残留问题威胁食品安全、生态及公众健康。传统实验室检测方法灵敏准确,但设备贵、操作复杂、耗时长且需专业人员,难满足全链条实时监控需求。在此背景下,食品中农药残留快速检测技术成研究热点。本文系统梳理主流快速检测技术(免疫分析法、生物传感技术、光谱技术等)的基本原理、特点与应用现状;深入剖析纳米材料、微流控芯片等交叉领域的前沿创新成果;前瞻性探讨未来发展趋势,如多残留同步检测、智能化与网络化、绿色可持续性 & 标准化体系建设等。期望本研究能为推动快速检测技术升级、构建高效可靠的食品安全监管体系提供理论参考与实践指导。

关键词: 农药残留;快速检测;免疫分析;生物传感器;光谱技术;纳米材料

引言

“民以食为天,食以安为先”,食品安全是重大民生议题。现代农业生产中,化学农药有效控制病虫害,提升农产品产量品质,联合国粮农组织统计显示其可挽回约30%因病虫害造成的损失。但农药残留风险不容忽视,长期摄入可能损害人体多系统,还有致癌等风险,且会破坏生态平衡。为保障健康,各国制定严格农药最大残留限量标准,我国也明确要求监控。传统实验室确证方法虽是“金标准”,但成本高、流程复杂、周期长、依赖专业人员,难满足快速反馈场景需求。发展现场或近现场快速检测技术成为迫切需求,其可补充实验室方法,提高监管效率、降低成本,还能赋能农业生产者。近年来,多学科交叉融合让农药残留快速检测技术取得突破,本文将全面阐述其技术内涵、创新脉络与未来走向。

1 主流农药残留快速检测技术及其原理

1.1 免疫分析法

1.1.1 酶联免疫吸附测定(ELISA)

ELISA是一种经典的板式检测方法。其基本流程是将农药抗原或抗体固定在微孔板上,加入待测样品后,若样品中含有目标农药,则会与固定相竞争性地结合有限的标记抗体(通常为酶标抗体)。随后加入酶的底物,通过酶催化反应产生颜色变化,其强度与样品中农药浓度成反比(竞争法)。ELISA具有较高的灵敏度(可达ppb级别)和通量,适用于实验室或现场实验室对批量样品的半定量或定量分析。然而,其操作步骤相对繁琐,仍需一定的仪器(如酶标仪)读取结果。

1.1.2 免疫层析试纸条(LFIA)

LFIA是ELISA技术的简化与便携化版本,其结构通常由样品垫、结合垫(含标记抗体,如胶体金或荧光微

球)、硝酸纤维素膜(含检测线T线和质控线C线)及吸水垫组成。当样品溶液沿试纸条毛细作用流动时,若含有目标农药,会与结合垫上的标记抗体结合,从而阻止其在T线处被捕获抗体捕获,导致T线颜色变浅或消失(竞争法)^[1]。C线用于验证试纸条的有效性。LFIA的最大优势在于操作极其简便(“一步加样”)、结果肉眼可见、检测速度快(5-15分钟),是目前市场上最普及的农药残留快检产品。但其灵敏度和定量精度通常低于ELISA,且多为单目标检测。

1.2 生物传感技术

1.2.1 电化学生物传感器

这是应用最广泛的生物传感类型。许多农药(如有机磷和氨基甲酸酯类)是乙酰胆碱酯酶(AChE)的抑制剂。基于此原理,可以构建酶抑制型电化学生物传感器。当AChE活性未被抑制时,它能催化底物(如乙酰硫代胆碱)水解产生电活性物质(如硫代胆碱),在电极上产生电流信号。若样品中存在农药,AChE活性被抑制,电流信号减弱,信号的抑制率与农药浓度相关。此类传感器灵敏度高、响应快、易于微型化和集成化。此外,基于抗体或适配体的电化学阻抗谱(EIS)或伏安法传感器也得到了发展,通过检测生物结合事件引起的界面阻抗或电流变化来实现定量。

1.2.2 光学生物传感器

此类传感器利用光学信号的变化来指示目标物的存在。表面等离子体共振(SPR)技术通过监测金属薄膜表面折射率的变化来实时、无标记地检测生物分子间的相互作用,可用于农药-抗体结合动力学的研究及定量分析。光纤生物传感器则利用光纤作为传导和传感元件,将生物识别事件转化为光强、波长或相位的变化。量子点、上

转换纳米粒子等新型荧光材料的应用,也极大地提升了光学传感器的灵敏度和信噪比。

1.3 光谱技术

1.3.1 表面增强拉曼光谱 (SERS)

拉曼光谱能提供分子的“指纹”信息,但其信号极其微弱。SERS利用纳米结构金属(如金、银)表面的局域表面等离子体共振效应,可将吸附在其表面的分子拉曼信号增强 $10^6\sim 10^{14}$ 倍,从而实现痕量农药的直接、快速检测。通过设计具有高密度“热点”的SERS基底,并结合便携式拉曼光谱仪,SERS技术在农药残留现场检测中展现出巨大潜力。

1.3.2 近红外光谱 (NIR) 与高光谱成像 (HSI)

NIR主要反映分子中C-H、N-H、O-H等基团的倍频和合频振动信息,虽然对农药本身的特征峰不明显,但可通过化学计量学方法建立农药残留与农产品整体光谱特征之间的间接关联模型,适用于大批量农产品的无损、在线筛查。HSI则将光谱技术与成像技术相结合,不仅能获取每个像素点的光谱信息,还能直观显示农药在样品表面的空间分布,为评估清洗效果或污染范围提供了新手段。

2 快速检测技术的前沿创新

2.1 纳米材料的赋能作用

纳米材料因其独特的物理化学性质(如大比表面积、优异的导电/导热性、可调的光学特性、良好的生物相容性等),已成为提升快速检测性能的关键驱动力。(1)信号放大:金纳米粒子、磁性纳米粒子、介孔二氧化硅纳米粒子等常被用作载体,负载大量的信号分子(如酶、荧光染料、电活性物质),从而显著放大检测信号,提高灵敏度。例如,在LFIA中,用荧光编码的纳米微球替代传统的胶体金,可将检测限降低1-2个数量级^[2]。(2)分离富集:磁性纳米粒子(MNPs)表面可修饰特异性识别分子(如抗体、适配体),在外加磁场作用下,能高效地从复杂基质(如果蔬提取液)中捕获并富集目标农药,有效去除干扰物,简化前处理步骤,提升检测准确性。(3)构建新型传感界面:石墨烯、碳纳米管、金属有机框架(MOFs)等二维或三维纳米材料被广泛用于构建高性能的电极或SERS基底。它们不仅能提供丰富的活性位点以固定生物识别元件,还能促进电子传递或产生强烈的电磁场增强效应。

2.2 微流控芯片技术 (Lab-on-a-Chip)

微流控技术通过在微米尺度的通道网络中精确操控微量流体,将样品前处理(过滤、萃取、富集)、反应、分离和检测等多个步骤集成于一块小小的芯片上,被誉为

“芯片上的实验室”。(1)自动化与集成化:微流控芯片能够自动完成从原始样品到最终结果的全过程,极大减少了人为操作误差,提高了检测的重现性和可靠性。这对于处理复杂基质的食品样品尤为重要。(2)微量分析与高通量:芯片内反应体积仅为纳升至微升级,大大节省了昂贵的试剂和样品消耗。同时,通过设计多通道或多腔室结构,可实现对多个目标物或多个样品的并行、高通量检测。(3)便携性与即时检测(POCT):微流控芯片体积小、重量轻,易于与便携式检测器(如小型光谱仪、电化学工作站)集成,是实现真正意义上POCT的理想平台。例如,集成了免疫反应和电化学检测单元的微流控芯片,可在15分钟内完成对多种农药的定量分析。

2.3 新型生物识别元件的开发

除了传统的抗体,一些新型的生物识别元件因其独特的优势而备受关注。(1)核酸适配体(Aptamers):适配体是通过指数富集的配体系统进化技术(SELEX)筛选得到的单链DNA或RNA寡核苷酸。它们能像抗体一样高亲和力、高特异性地结合目标物,但具有化学合成方便、批次间差异小、热稳定性好、易于修饰等优点。基于适配体的生物传感器(Aptasensor)在农药检测中展现出广阔前景。(2)分子印迹聚合物(MIPs):MIPs是通过在模板分子(目标农药)存在下聚合功能单体,然后洗脱模板而形成的具有特定识别空腔的高分子材料,被称为“塑料抗体”。MIPs具有制备简单、成本低廉、物理化学稳定性极佳(耐高温、强酸强碱)等优势,特别适用于恶劣环境下的检测。

2.4 人工智能与大数据的融合

随着物联网(IoT)和移动互联网的发展,快速检测设备正逐步融入智能化生态系统。(1)智能图像识别:对于LFIA等依赖视觉判读的试纸条,利用智能手机摄像头拍摄结果,并通过深度学习算法(如卷积神经网络CNN)自动分析T/C线的灰度或颜色强度,可以实现客观、精准的定量,避免人眼判读的主观误差。(2)数据管理与追溯:检测结果可通过无线网络(如蓝牙、Wi-Fi)实时上传至云端数据库,实现数据的集中管理、统计分析和可视化^[3]。这不仅便于监管部门进行风险预警和趋势研判,也能为消费者提供透明的溯源信息,增强消费信心。(3)模型优化与预测:利用机器学习算法处理海量的光谱或传感器阵列数据,可以构建更稳健、更准确的多元校正模型,有效克服单一传感器选择性不足的问题,并有望实现对未知农药的初步筛查。

3 未来发展趋势与挑战

3.1 多残留、高通量同步检测

现实世界中的农药污染往往是多种农药的混合残留。现有的多数快检产品仅能针对单一或少数几种农药,难以满足全面风险评估的需求。未来的发展方向是构建多通道、多靶标的检测平台。这可以通过以下途径实现:(1)多重免疫分析:在同一试纸条或微孔板上固定多种不同的抗体,利用不同颜色的标记物或空间分辨技术区分信号。(2)生物传感阵列:构建由多种不同生物识别元件(如不同适配体、MIPs)组成的传感器阵列,结合模式识别算法解析复杂的响应图谱。(3)高分辨质谱快筛:开发小型化、简化的高分辨质谱(如便携式Orbitrap)与快速前处理技术联用,实现对数百种农药的广谱筛查。

3.2 智能化、网络化与便携化深度融合

未来的快检设备将不再是孤立的工具,而是智能物联网的一个终端节点。(1)“傻瓜式”操作:通过高度集成的微流控系统和自动化的软件控制,用户只需放入样品,设备即可自动完成所有后续步骤并直接显示结果,真正实现“一键式”检测。(2)云平台联动:检测数据实时上传,与国家或地区的食品安全数据库对接,形成动态的风险地图。监管部门可根据数据流进行精准执法,生产企业可据此优化用药方案^[4]。(3)可穿戴/植入式传感器:长远来看,开发可集成于包装材料或甚至可食用的微型传感器,实现对食品在储运过程中农药残留变化的连续、实时监测,将是终极目标之一。

3.3 绿色、可持续与低成本化

快检技术的大规模推广必须考虑其环境影响和经济可行性。(1)绿色试剂与工艺:减少或替代检测过程中有毒有害试剂的使用,开发生物可降解的芯片材料和试纸条基底。(2)降低制造成本:利用成熟的微纳加工技术(如喷墨打印、激光刻蚀)大规模生产微流控芯片和传感器,或采用纸基微流控等超低成本材料,使快检产品价格亲民,惠及广大中小农户和基层市场。(3)延长使用寿命:开发可再生、可重复使用的生物传感器,减少一次性耗材的浪费。

3.4 标准化与法规认可

技术的成熟最终需要通过标准化来体现。目前,许多快检方法尚未建立统一的性能评价标准(如灵敏度、特异性、假阳性/假阴性率、基质效应等),也未获得官方机构的正式认证,限制了其在执法和贸易中的法律效力。未来亟需:(1)建立完善的评价体系:由权威机构牵头,制定针对不同类型快检产品的性能验证指南和标准操作规程(SOP)。(2)推动法规衔接:加快速检方法与国家标准、国际标准(如CAC标准)的对接,明确其在初筛、过程控制等不同应用场景中的法律地位,为其广泛应用扫清制度障碍。

4 结语

食品中农药残留快速检测技术是守护“舌尖安全”的首道防线,重要性不言而喻。从早期免疫层析试纸条到如今融合纳米科技等的智能传感系统,该领域变革深刻。技术创新聚焦提升检测的灵敏性、特异性和便捷性,朝着多残留、智能化、绿色化、标准化方向发展。展望未来,多学科交叉研究深入、技术瓶颈突破,更精准高效的检测方案将不断涌现。这些技术既能赋能政府监管部门,提升其风险预警与应急处置能力;又能下沉到田间与家庭,让生产者和消费者都成为食品安全参与者与受益者。最终,覆盖“从农田到餐桌”全链条、全天候、智能化的食品安全快速检测网络将成现实,为健康可持续的食品未来筑牢技术根基。

参考文献

- [1]叶楚.食品检验检测中的农药残留快速检测方法实践与研究[J].中外食品工业,2025,(22):130-132.
- [2]余璇.食品中农药残留快速检测方法探究[J].中国食品工业,2025,(12):104-106.
- [3]谢胜男.食品检测中农药残留快速检测方法的应用[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(二).庄河市检验检测认证技术服务中心,2025:140-141.
- [4]黄梦静,赵一浔.食品检测中农药残留快速检测技术分析[J].中国食品工业,2025,(02):92-94.