

新思路 · 新方法 · 新技术

NEW IDEA, NEW METHOD AND
NEW TECHNOLOGY

快速检测技术在食品及药物分析中的应用进展

张淼¹, 周亚楠², 王小芳^{3*}

(1. 石家庄市食品药品检验中心技术业务部, 河北 石家庄 050011; 2. 河北省药品医疗器械检验研究院业务管理部, 河北 石家庄 050200; 3. 石家庄市食品药品检验中心中药检验室, 河北 石家庄 050011)

【摘要】快速检测技术因高灵敏度、操作简便、便携性好和实时响应等优势, 在食品及药物分析领域发挥着日益重要的作用。近年来, 电化学传感器、纳米孔技术、成簇规律间隔短回文重复序列 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR) / CRISPR 相关蛋白 (CRISPR-associated protein, Cas) 系统等前沿检测技术发展迅速, 在食品农药残留、重金属及微生物污染检测, 以及药物活性成分分析与体内药物监测等场景中展现出广阔的应用前景。然而, 现有技术在灵敏度、特异度和多重检测能力等方面仍面临诸多挑战。综述了上述快速检测技术的原理、技术优势及典型应用案例, 分析其在食品及药物分析领域的重要作用, 并展望人工智能与大数据在推动检测方法创新与智能化发展方面的潜力, 以期对相关技术的进一步研发与应用提供参考。

【关键词】快速检测技术; 食品与药物分析; 电化学传感器; 纳米孔技术; 纳米酶; 表面等离子体共振

【中图分类号】R917; TS207.3

【文献标志码】A

【文章编号】1001-5094 (2026) 07-0608-13

DOI: 10.20053/j.issn1001-5094.202509110707

Application Progress of Rapid Detection Technologies
in Food and Drug AnalysisZHANG Miao¹, ZHOU Yanan², WANG Xiaofang³

(1. Department of Technical Business, Shijiazhuang Center for Food and Drug Control, Shijiazhuang 050011, China; 2. Department of Business Management, Hebei Institute for Drug and Medical Device Control, Shijiazhuang 050200, China; 3. Department of Traditional Chinese Medicine Testing, Shijiazhuang Center for Food and Drug Control, Shijiazhuang 050011, China)

【Abstract】 Rapid detection technologies, recognized for their high sensitivity, simple operation, portability, and real-time response capabilities, are playing an increasingly important role in food and drug analysis. In recent years, advanced detection technologies such as electrochemical sensors, nanopore technology, and clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR)/CRISPR-associated protein (Cas) systems have developed rapidly, demonstrating broad application prospects in the detection of pesticide residues, heavy metals, and microbial contamination in food, as well as in the analysis of active pharmaceutical ingredients and therapeutic drug monitoring. However, existing technologies still face multiple challenges in terms of sensitivity, specificity, and multiplex detection capability. This review systematically summarizes the principles, technical advantages, and representative application cases of these rapid detection technologies, analyzes their critical role in food and drug analysis, and discusses the potential of artificial intelligence and big data in driving innovation and intelligent development of detection methodologies. It aims to provide a reference for further research and application of related technologies.

【Key words】 rapid detection technology; food and drug analysis; electrochemical sensor; nanopore technology; nanozyme; surface plasmon resonance

快速检测技术因其实时响应、操作便捷和高灵敏度等优势, 正逐步成为保障食品质量与安全、支撑药物研发与质量控制的重要技术手段。传统检测方法流程复杂、耗时较长, 已难以满足日益增长的

快速检测需求。在此背景下, 发展高效、灵敏、便捷的快速检测技术已成为当前的研究热点, 其在食品及药物分析领域的应用正处于快速发展阶段。

尽管快速检测技术在食品及药物分析领域已取得显著进展, 但仍面临灵敏度、特异性、设备便捷性等方面的挑战。为此, 未来研究应致力于进一步提升这些关键性能, 以应对日益复杂的应用需求。本文综述了快速检测技术在食品及药物分析领域的

接受日期: 2026-02-09

*通信作者: 王小芳, 副主任中药师

研究方向: 中药检验及标准制修订

E-mail: wxf240@163.com

研究进展,旨在为相关技术的进一步优化与应用提供参考。

1 快速检测技术概述

食品药品基质的复杂性和检测的时效性要求,正驱动着检测技术从传统的实验室分析向快速、灵敏、便捷的方向变革。近年来,一系列新型快速检测技术应运而生,它们基于不同的传感原理和信号转导机制,为食品及药物分析提供了多样化的解决路径。这些技术涵盖电化学传感、纳米孔单分子分析、成簇规律间隔短回文重复序列(clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR)/CRISPR 相关蛋白(CRISPR-associated protein, Cas)分子诊断、纳米酶催化及表面等离子体共振等多个前沿方向,在农药残留、重金属污染、病原微生物及非法添加物等食品相关检测以及药物分析中展现出独特优势,共同构成了当前快速检测技术体系的核心支柱。

以人工纳米通道传感器为代表的一类快速检测技术,凭借其响应速度快、操作简单和高灵敏度等优势,被广泛应用于食品中多种危害因子的检测,覆盖生物危害(如细菌、毒素、病毒)和化学危害(如重金属、有机污染物、食品添加剂)等^[1]。该类传感器能够对不同食品危害进行全面评估,不仅为实时监测提供了可靠手段,还为未来便携式检测设备的研发奠定了理论基础。

电纺纳米纤维基电化学传感器是另一项备受关注的技术^[2-3]。该传感器具有高比表面积、优异的机械性能和高设计自由度,为食品安全检测构建了新型平台。近年研究表明,此类传感器在重金属、药物残留和食品添加剂检测中表现出卓越性能,显示出巨大的应用潜力^[4]。随着技术的持续优化,电纺纳米纤维基电化学传感器有望成为食品安全快速检测体系中的关键技术之一。在药品检验及临床治疗药物监测方面,该技术同样展现出重要价值。例如,基于功能化碳纳米纤维的电化学传感器已成功用于扑热息痛等常用药物的快速定量分析,检测限可达 $0.14 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,并可在无需复杂前处理的条件下直接分析药物制剂和人体尿液样本^[5]。

此外,单分子检测(single molecule detection, SMD)技术也在食品安全领域展现出广阔的应用前景。SMD 技术具备超高灵敏度和低样本消耗的优势,已成为食品污染物快速检测的重要工具。近年来,基于纳米孔的单分子分析方法逐步成熟,并在生物毒素、农药、重金属及非法添加物等检测中取

得了显著成效^[6]。在药学研究方面,纳米孔技术已被用于中药材活性成分的直接分析。Fan 等^[7]开发的苯硼酸修饰 MspA 纳米孔,可在无需复杂样品预处理的情况下,直接对丹参、迷迭香等草药中的 8 种丹酚酸成分进行区分和同时检测,结合机器学习(machine learning, ML)算法识别准确率达 99.0%,为中药质量评价提供了一种全新的单分子水平分析手段。尽管 SMD 技术的实际应用尚处于早期阶段,但其在实现食品及药物快速精准分析方面的潜力巨大。

功能化四氧化三铁纳米颗粒(Fe_3O_4 nanoparticle, Fe_3O_4 NP)与表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)技术同样在食品安全检测中显示出重要价值。 Fe_3O_4 NP 凭借其超顺磁性、与纳米尺度特性,已成为提升食品质量和安全检测效率的关键材料之一,有助于优化现有检测方案^[8]。SPR 技术以其高灵敏度和实时动态监测的优势,在食品污染物识别中发挥重要作用,成为该领域不可或缺的分析工具^[9-10]。

在药物分析领域,快速检测技术的需求同样迫切。传统药品质量控制方法主要依赖高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱及质谱(mass spectrometry, MS)联用等实验室技术,虽准确度高,但存在设备昂贵、操作复杂、检测周期长等局限,难以满足药品生产全流程在线监控、基层药监现场筛查及应急检验等多样化需求^[11]。近年来,以拉曼光谱、近红外光谱及高效薄层色谱为代表的光谱及色谱快检技术已逐步纳入各国药典体系,在原料药快速鉴别、多晶型药物筛查及制剂一致性评价中发挥重要作用^[12]。与此同时,电化学传感器、纳米孔单分子分析及 CRISPR/Cas 分子诊断等新兴技术正从实验室走向药品质量控制的实际应用,覆盖中药真伪鉴别、生物制品活性评价及治疗药物监测等多个方向,展现出从“经验主导”向“数据驱动”跨越的潜力。

CRISPR/Cas 系统作为新兴的分子诊断工具,凭借其卓越的靶向识别与信号放大能力,在病原体 and 核酸标记物的快速检测中展现出独特优势,是当前快速检测领域的重要发展方向之一。此外,纳米酶技术及其与智能终端的集成应用,也为现场即时检测提供了低成本、高稳定性的新策略。

综上所述,各类快速检测技术原理各异、优势互补,共同推动了食品及药物分析能力的显著提升。为系统呈现这些技术的研究进展与应用现状,以下将分别从电化学传感器、纳米孔传感技术、

CRISPR/Cas 系统、智能终端集成纳米酶技术及其他新兴检测技术等维度展开分类详述。

2 电化学传感器

电化学传感器是一种基于电化学反应原理对目标物进行分析检测的设备。其核心工作机制依赖于待测物质在电极表面发生的电化学反应过程,通过检测由此产生的电流、电压或阻抗等信号变化,实现对目标物浓度或种类的定性分析与定量分析。

该传感器的关键组成部分是固定在电极表面的生物识别元件或敏感膜层。这些功能材料能够特异性识别并结合特定目标分子(如农药残留、病原体或食品添加剂),从而触发可测量的电信号响应,完成检测过程^[13]。

2.1 电化学传感器检测的基本操作流程

在食品药品安全的快速检测技术中,规范的操作流程是保证检测结果准确性与可靠性的关键。一般而言,快速检测流程可以分为4个主要步骤:样品前处理、传感器的准备与修饰、电化学检测以及信号处理与数据分析。

2.1.1 样品前处理 由于食品药品样本基质复杂,常含有多种干扰成分,无法直接用于检测,因此需进行适当的前处理,具体包括以下步骤。①提取:将固体样品粉碎、匀浆后,采用适当溶剂(如乙腈、缓冲溶液等)将目标分析物(如农药残留)提取至液相中。②净化:通过离心、过滤或固相萃取等手段去除样品中的油脂、蛋白质、色素等干扰物质,获得较为纯净的待测液。③稀释/定容:将待测液稀释至传感器的最佳检测范围,并使用缓冲溶液定容,以提供稳定的反应环境。

2.1.2 传感器的准备与修饰 该环节是电化学传感器实现高选择性与高灵敏度的核心,主要包括以下部分。①基底电极:常用玻碳电极、金电极或丝网印刷电极等,其中丝网印刷电极因成本低、可一次性使用而被广泛采用。②电极修饰:为提升传感器性能,常在电极表面修饰一层或多层功能材料,如石墨烯、碳纳米管、金纳米粒子等纳米材料,以增大比表面积、增强电子传输能力,从而提高检测灵敏度。③识别元件:是实现特异性识别的关键。常用识别元件包括酶、抗体、适配体和分子印迹聚合物(molecularly imprinted polymer, MIP)。目标物对酶活性产生抑制作用,从而降低酶催化生成产物的速率,导致电化学响应信号减弱。通过测量信号下降程度,并结合酶活性与电流信号之间的定量关系,可实现对目标物的间接检测,如利用有机磷农药对

乙酰胆碱酯酶的抑制作用来实现有机磷农药的检测。抗体可用于构建电化学免疫传感器,通过抗原-抗体特异性结合,并采用酶标记偶联方式或直接电化学信号进行检测。适配体作为一种人工合成的单链DNA/RNA分子,可高特异性结合目标物,具备稳定性好等优势,已成为研究热点。MIP具有与目标分子形状匹配的空穴,能够选择性识别并结合目标物。

2.1.3 电化学检测 将修饰完成的电极浸入处理好的样品溶液中,连接电化学工作站,施加特定的电信号并采集响应信号。常用检测技术包括以下几种。①循环伏安法:主要用于反应机理研究和电极修饰过程的表征。②差分脉冲伏安法:具备高灵敏度,可有效减少背景电流干扰,是食品药品检测中常用的定量分析方法。③交流阻抗法:用于监测电极界面修饰过程及分析物结合所引起的阻抗变化。目标物与识别元件结合后,会改变电极界面性质,引发电信号(电流、电压或阻抗)变化,该变化值与目标物浓度通常呈定量关系。

2.1.4 信号处理与数据分析 电化学工作站采集的信号传输至计算机后,通过专业软件进行处理与分析。通常先利用不同浓度的标准品溶液建立“信号强度-浓度”标准曲线,再将待测样品信号值代入曲线,计算得出目标物的准确浓度。

2.2 电化学传感技术在食品及药物分析中的具体应用实例

电化学传感技术因其成本低、操作简便、响应速度快,并兼具高灵敏度与良好选择性等优势,已在食品药品检测领域获得广泛应用。从文献实例可见,在食品安全领域,该技术通过金属有机框架传感器实现了重金属离子的高灵敏检测,而电纺纳米纤维基传感器则能同步检测重金属、药物残留、添加剂及微生物污染物,展现出良好的综合性能。在药物分析方面,该技术已成功应用于多柔比星、硝基咪唑妥因等药物的含量测定,以及生物标志物[抗坏血酸(ascorbic acid, AA)、多巴胺(dopamine, DA)、尿酸(uric acid, UA)]的检测,显示出优异的线性范围与检测灵敏度。

此外,基于单原子铁修饰碳纳米复合材料的电化学传感器可用于扑热息痛的精准检测,在 $0.5 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $100 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内呈现良好线性响应,检测限低至 $0.14 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,且在实际药物制剂和尿液中回收率可达 $96.98\% \sim 107.59\%$ ^[5]。基于生物炭修饰的纸质电化学装置同样实现了对劣质药品中扑热息痛的快速筛查,检测限为 $3.50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,回收率超过90%,为资源有限环

境下的药品质量控制提供了低成本方案^[14]。

然而, 针对药品检验的特殊要求, 当前研究在方法学验证方面仍需进一步完善。根据 2025 年版《中华人民共和国药典》四部 9101 分析方法指导原则及国际人用药品注册技术协调会 (International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use, ICH) 相关标准^[15], 药品检测方法除线性范围和灵敏度外, 还需系统验证其专属性、准确度、精密度等关键指标。特别是在有关物质检查、含量测定和血药浓度监测等具体应用场景中, 必须证明此方法能够特异性识别目标物并有效排除基质干扰。因此, 未来研究应在保持现有性能优势的基础上, 着重补充方法专属性考察及系统验证研究, 以推动电化学传感技术从实验室研究向药品质量控制实际应用的规范转化。具体实例见表 1。

MIP 电化学传感器是近年来药品检验领域的研

究热点之一。MIP 作为人工合成受体, 具有与天然抗体相当的识别特异性, 同时在化学稳定性、热稳定性、制备成本和重复使用性方面更具优势。MIP 能够通过与目标分子的三维形状、官能团及化学性质互补的结合位点, 实现选择性识别。将 MIP 与电化学传感器集成, 可直接在电极表面通过聚合或涂覆形成高选择性的识别层, 传感器不仅获得特异性识别能力, 耐用性和可重复使用性也显著提升。近年来, 这一技术在抗生素、心血管药物、抗肿瘤药、抗病毒药及神经活性化合物等多种药品的电化学分析中取得了重要进展^[16]。通过与 MXene 等二维纳米材料的复合, MIP 传感器的灵敏度和选择性进一步提升, 为复杂药品基质中痕量成分的精准分析提供了新工具^[17]。特别是对于含卤素的抗感染药物, MIP 电化学传感器已展现出优异的检测性能, 覆盖头孢类、喹诺酮类等多种抗生素^[18]。

表 1 电化学传感技术的具体应用举例

应用领域	检测目标	传感器类型	性能参数特点	参考文献
食品安全	痕量重金属离子	金属有机框架	线性检测范围大、检测限低、回收率高	[19]
	重金属、药物残留、添加剂、微生物	电纺纳米纤维基传感器	高灵敏度和选择性	[20]
药物分析	多柔比星	铁钒酸盐/硫掺杂碳纳米纤维	线性范围: $20\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1} \sim 542.5\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 灵敏度: $46.041\text{ }\mu\text{A}\cdot(\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	[21]
	硝基呋喃妥因	β -环糊精-碳纳米纤维	检测限: $1.8\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 线性范围: $0.004 \sim 308\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	[22]
	生物标志物 (AA/DA/UA)	钴掺杂 MoSe ₂ /聚吡咯碳纳米纤维	检测限: $6.32\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (AA), $0.45\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (DA), $0.81\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (UA); 线性范围: $30 \sim 3\text{ }212\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (AA), $1.2 \sim 536\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (DA), $10 \sim 1\text{ }071\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (UA)	[23]
	神经递质多巴胺	氢氧化钴/聚苯胺纳米纤维	检测限: $0.03\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 线性范围: $0.1 \sim 200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	[24]

AA: 抗坏血酸; DA: 多巴胺; UA: 尿酸

扑热息痛作为全球用量最大的解热镇痛药之一, 其电化学检测方法的开发具有重要的公共卫生意义。药物过量使用可能导致严重肝损伤, 同时环境中残留的扑热息痛及其代谢产物也构成生态风险^[25]。近年来, 基于碳纳米材料、金属纳米粒子及导电聚合物修饰的电化学传感器已实现对扑热息痛在药品制剂、生物体液及环境水样中的灵敏检测, 检测限可达纳摩尔级别。这些研究不仅为药品质量控制提供了高效工具, 也为临床治疗药物监测和环境安全评估奠定了基础。

2.3 现存问题与未来展望

尽管电化学传感技术在食品药品检测中展现出广阔的应用前景, 其实际应用仍面临诸多挑战, 其中选择性是核心问题之一。在成分复杂的食品或药品基质中, 如何排除共存物质的干扰, 实现对特定

目标物的高选择性、高精度检测, 是当前该领域亟待突破的关键难点。

为应对这一挑战, 未来的研究可聚焦于以下方向: 通过设计新型功能化纳米材料与复合材料, 提升识别元件的特异性与稳定性; 进一步优化传感器的界面修饰策略与微纳制造工艺, 以增强其抗干扰能力和批次一致性。这些努力将共同推动电化学传感器在复杂实际样本检测中的可靠性与实用性迈向新的高度。

3 纳米孔传感技术

纳米孔传感技术是一种新型的单分子检测方法, 其基本原理是通过测量单个分子通过纳米孔时引起的离子电流变化来实现检测。当待测分子在电场驱动下穿过纳米孔时, 会特异性地调制孔道内的离子

流,产生特征性的电流阻塞信号,从而实现对目标分子的识别与定量。

该技术具备高灵敏度、快速响应及无需标记等优势,在食品及药物分析领域展现出广阔的应用潜力。根据构成材料的不同,纳米孔传感器主要分为生物纳米孔与固态纳米孔两类:生物纳米孔多由蛋白质构成,具有天然的分子识别能力;固态纳米孔则基于氮化硅等材料通过纳米加工技术制备,其孔径可调、机械稳定性强,能够适应不同尺寸分子的检测需求。

研究表明,纳米孔技术已成功应用于食品中重金属离子、兽药残留及其他有害物质的检测,逐步发展成为食品安全监测体系中一种高效的新型分析工具^[26-27]。此外,纳米孔技术的应用场景从食品领域向药学领域延伸。其中,基于 α -溶血素蛋白纳米孔的传感器已被用于定量检测药物处理后的细胞信使RNA(mRNA)水平变化,例如在评估广谱抗生素卡里霉素对肝癌细胞SMMC-7721的抗癌效果时,该传感器成功检测到P2RX7 mRNA水平显著降低,结果与实时荧光定量聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)高度一致,为药物疗效评估提供了新型分子检测工具^[28]。此外,工程化MspA纳米孔结合ML算法,已实现对丹参、迷迭香等中药材中8种丹酚酸成分的同时区分与定量分析,为中药复杂体系的质量控制开辟了新路径^[7]。

3.1 纳米孔传感技术的基本操作流程

纳米孔传感技术的典型操作流程主要包括以下4个步骤。①样品前处理:由于食品药品样本基质复杂,需先通过离心、过滤或稀释等方法去除大分子干扰物(如脂肪、蛋白质等),获得适用于纳米孔分析的澄清溶液。②纳米孔设置:将处理后的样品溶液加至集成有纳米孔的检测芯片中。常用的纳米孔类型包括蛋白质生物纳米孔(如 α -溶血素)与固态纳米孔。随后连接检测设备(如便携式纳米孔测序仪或定制电生理系统),施加恒定电压以驱动离子及分子迁移。③分子通过检测:在电场作用下,目标分子逐个通过纳米孔道,瞬时改变孔内的离子流,产生特征性的电流阻断信号。设备实时记录这些信号的幅度、持续时间与频率等参数,并通过内置算法对信号进行初步识别与筛选。④数据解读与结果输出:系统依据已知浓度的标准品建立的校准曲线,或借助预先训练的ML模型,对采集到的电流信号进行定性与定量分析。整个检测过程通常在数分钟至数十分钟内完成,最终输出目标物的种类与浓度信息。

3.2 技术优势及应用案例

纳米孔技术在食品污染物检测中展现出高灵敏度、实时监测和操作简便的显著优势,然而其在复杂食品基质中的应用仍面临干扰物影响的挑战。为此,研究者开发了多种有效的功能化解决方案:首先,适配体功能化生物纳米孔通过特异性分子识别,在赭曲霉毒素A检测中实现了 $0.01\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的检测限,并在红酒、咖啡等复杂基质中保持92%~106%的回收率,特异性识别系数大于100^[29]。其次,固态纳米孔的界面工程借助表面修饰与孔径调控,将信噪比提升约5倍,在血清基质中仍保持90%以上检测效率,可直接检测1 nm级别的药物分子^[30]。此外,酶辅助信号放大系统利用TtAgo核酸内切酶(TtAgo endonuclease, TtAgo)与纳米孔的协同作用,实现了5种霉菌毒素的同步检测,灵敏度提升至传统方法的50倍以上,在谷物样品中准确度达95.2%。最后,纳米材料增强型探针通过金纳米颗粒标记使信号放大10倍以上,磁性纳米颗粒更实现了一体化前处理与检测^[31]。

近年来纳米孔传感技术的增强策略已取得系统性进展。Liu等^[32]首次全面综述了纳米孔传感的进化策略,包括生物纳米孔的定点突变与功能化、固态纳米孔的精密制造与修饰、混合纳米孔系统,以及信号转导与互补检测方法联用的协同策略。这些策略有效解决了纳米孔检测中面临的捕获效率低、分辨率有限及复杂信号难以区分等挑战,为纳米孔技术在药物分析和疾病标志物识别领域的性能提升提供了系统性指导。此外,纳米孔生物传感平台在疾病相关生物标志物的检测中同样显示出独特优势,通过DNA载体、适配体功能化及表面化学修饰等策略,已在癌症、心血管疾病、神经系统疾病及感染性疾病的生物标志物检测中获得广泛应用,为药物靶点相关标志物的单分子水平检测开辟了新路径^[33]。

在药效学研究方面,纳米孔技术通过蛋白酶水解驱动策略,成功解决了mRNA相对分子质量高、背景复杂等检测难题,实现了对药物处理后细胞mRNA水平的精准定量,为药物作用机制研究和疗效评估提供了有力工具^[34]。

这些策略分别从特异性识别、信噪比提升、信号放大和流程优化等不同层面有效提升了纳米孔技术的抗干扰能力,为其在复杂食品药品基质中的实际应用提供了可靠的技术支持。未来研究可进一步探索多种策略的协同整合,以在保持操作便捷性的同时,获得更优的综合性能。

3.3 挑战与发展趋势

尽管纳米孔技术在食品及药物分析中展现出显著潜力,其进一步发展仍面临多重挑战,包括检测灵敏度的进一步提升、设备便携性的改善以及制造成本的降低。目前,纳米孔传感器的构建与应用大多依赖实验室环境,限制了其在实际现场快速检测场景中的推广。

因此,未来研究应着重提升纳米孔传感器的便携性与操作便捷性,并通过开发新型功能材料以增强其在复杂食品药品基质中的检测灵敏度与选择性。此外,将纳米孔技术与人工智能(artificial intelligence, AI)及 ML 方法相结合,有望为复杂样品中的目标物识别与数据分析提供新策略,从而推动更快速、精准的食品及药物分析体系的建立与发展^[34-35]。

4 CRISPR/Cas 系统及核酸信号扩增技术

4.1 CRISPR/Cas 技术的检测原理及系统分类

CRISPR/Cas 系统源于细菌的适应性免疫机制,现已开发为一种高效的分子检测工具。该系统利用向导 RNA (guide RNA, gRNA) 介导 Cas 蛋白特异性识别并切割目标核酸序列,具有高度的特异性和灵敏度。在食品安全检测领域,该技术已成功应用于食品中多种病原体(如细菌、病毒)及毒素等污染物的快速鉴定^[36]。

目前常用的 CRISPR/Cas 系统主要包括 CRISPR/Cas9、CRISPR/Cas12 与 CRISPR/Cas13 等类型。其中, Cas12 与 Cas13 蛋白在识别目标序列后其非特异性切割活性(即“转切割”活性)被激活,可高效切割体系中的报告核酸分子,从而在检测过程中实现信号放大,这一特性使其特别适用于构建高灵敏生物传感器^[37]。为进一步提升检测性能,这些 CRISPR 系统常与重组酶聚合酶扩增(recombinase polymerase amplification, RPA)等恒温核酸扩增技术联用,显著提高了检测的灵敏度与准确性^[38-39]。在药学领域,CRISPR/Cas 系统的应用正在从病原体检测拓展到药物相关基因分析。例如,CRISPR/Cas13a 系统已被用于抗病毒药物筛选,通过检测 RNA 依赖性 RNA 聚合酶活性来评估药物对 SARS-CoV-2 的抑制效果,半数抑制浓度(IC₅₀)测定仅需 5 min,显著快于传统终点法^[40]。此外,CRISPR 诊断技术还被用于检测抗生素、抗癌药物等的耐药基因,为临床个体化用药和耐药性监测提供了快速、精准的工具^[41]。

CRISPR 分子诊断系统能够高特异性识别靶标

DNA 或 RNA 序列,一旦识别靶标,即可激活 Cas12a 或 Cas13a 等效应蛋白的反式切割活性。经平台优化后,该系统检测限可达阿摩尔级别,为临床个体化用药指导和耐药性监测提供了快速、精准的工具。Demirayak 等^[41]首次系统整合了耐药基因的分子基础与 CRISPR 检测策略,其涵盖多重耐药、肿瘤抑制因子功能丧失及 ATP 结合盒转运蛋白过表达等耐药机制。该研究团队指出了 CRISPR 诊断系统在现场快速检测中的转化潜力。

4.2 CRISPR/Cas 技术的基本操作流程

基于 CRISPR/Cas12a 系统的典型检测流程主要包括以下 4 个步骤。①样品预处理:从待测的食品或药品样本中提取核酸(DNA 或 RNA),作为后续检测的模板。②核酸扩增(可选但常用):为提高检测灵敏度,通常采用 RPA 或环介导等温扩增(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)等恒温扩增技术,对目标核酸序列进行预扩增。③CRISPR/Cas 检测:将核酸扩增产物与预先混合的反应体系共孵育,该体系包含 Cas12a 蛋白、针对目标序列设计的 gRNA 以及荧光标记-淬灭基团双标记的报告分子。若样品中存在目标序列,gRNA 将引导 Cas12a 蛋白特异性结合并激活其反式切割活性,非特异性切割报告分子,导致荧光信号释放。④结果判读:可根据实际条件采用以下方式读取结果,即荧光检测仪,定量检测荧光强度,实现精准定量分析;采用侧向流动试纸条,将反应产物滴加至试纸条,通过检测线是否显色进行快速定性判断;肉眼观察,在较高目标物浓度下,可直接在强光下观察反应管是否发出可见荧光,适用于现场快速筛查。

4.3 CRISPR/Cas 基因传感器在食品药品检测中的应用

CRISPR/Cas 基因传感器在食品及药物分析领域展现出重要的应用潜力。研究表明,该系统能够高效识别食品中的致病微生物,如沙门菌和李斯特菌等,检测灵敏度可达每毫升样品中数个细菌的级别^[42-43]。

除病原微生物外,CRISPR/Cas 系统还被拓展用于食品中化学污染物的检测。例如,有研究采用 CRISPR/Cas12a 系统结合特异性分子探针,实现了对农药残留的快速检测,检测限低至 300 fmol·L⁻¹,且无需预先核酸扩增,显著简化了操作流程^[44]。此外,将 CRISPR/Cas 技术与 LAMP 等恒温扩增方法联用,可进一步提升对目标核酸的检测灵敏度与特异性^[45]。

在药品质量控制领域,基于 RPA-CRISPR/

Cas12a 的支原体检测技术已成功应用于生物制药全流程监控,可在 CHO 细胞培养早期实现污染预警,并能在下游纯化步骤中进行半定量分析,为抗体药物等生物制品的安全性保障提供了高效解决方案^[46]。中药材的真伪鉴别是药品质量控制的难点,传统形态和显微鉴别难以区分加工后的饮片或粉末。基于 CRISPR/Cas12a 的核酸检测平台已被成功用于人参与西洋参的快速区分,荧光检测灵敏度达 $10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并在市售中成药样品中完成验证^[47]。此外,该系统还可用于天花粉、茯苓、葛根等易混淆中药材的同步鉴别,有效解决了传统 DNA 条形码技术在混合或降解样品中检测能力不足的问题。

同时,CRISPR/Cas 系统与报告基因细胞系结合,被广泛用于生物制品(如单抗、细胞因子)的生物活性评价,在药物效价测定中发挥关键作用^[48]。

这些应用不仅提升了食品及药物分析的准确度与效率,也为早期发现与控制食品污染风险提供了有力工具,有助于更好地保障公众健康。随着 CRISPR-Cas9 基因治疗产品获批上市,CRISPR 系统组分(gRNA、Cas 蛋白、核糖核蛋白复合物)的质量控制已成为药品检验的新方向,相关色谱与电泳分析方法正在逐步建立^[49]。

4.4 应用挑战与未来方向

尽管 CRISPR/Cas 系统与核酸信号扩增技术在食品及药物分析中展现出广阔前景,但其实际应用仍面临多重挑战。一方面,食品药品样本基质复杂多样,食品中富含脂肪、蛋白质、色素等干扰物质,中药材及生物制品中亦存在多糖、鞣质等 PCR 抑制物,这些成分均可影响 Cas 蛋白的识别效率与扩增反应的稳定性,导致检测灵敏度下降或产生假阴性结果。另一方面,现有系统在特异性方面仍存在一定的脱靶风险与背景干扰^[50],且在现场快速检测场景下,系统的操作便捷性、设备便携性及结果稳定性仍有待提升。

为应对上述挑战,未来研究可从以下方向展开:①优化 CRISPR/Cas 系统的元件设计,提升其识别精度与信号响应强度;②开发新型信号输出与放大策略,增强其在复杂样本中的抗干扰能力;③推动系统与微型化、便携式检测平台的深度融合^[51-52]。研究表明,Zhang 等^[53]开发了一种基于精英遗传算法的 gRNA 阵列优化工具。该工具通过智能设计低自由能 gRNA 阵列,在维持高靶向效率的同时有效降低了脱靶效应,显著提升了 CRISPR 系统的编辑效率与运行稳定性。

随着相关技术的持续完善,CRISPR/Cas 系统有

望在食品及药物分析领域实现更广泛的应用,为构建高效、可靠的食品药品质量保障体系提供有力支持。

5 智能终端集成纳米酶技术与人工智能辅助检测

5.1 纳米酶的生物模拟催化特性及检测优势

纳米酶是一类具有类酶催化活性的新型纳米材料,能够模拟天然酶的催化功能,并在不同环境条件下保持优异的催化性能^[54-55]。常见的纳米酶由金属氧化物、金属有机框架(metal organic framework, MOF)及其他功能纳米材料构成,其催化机制与天然酶相似,可广泛应用于多种生物化学反应中。例如,部分金属氧化物基纳米酶在氧化还原反应中表现出突出的催化效率,不仅能有效促进底物转化,还具备良好的稳定性和可重复使用性^[56]。此外,通过表面修饰与功能化改造,纳米酶的选择性与催化活性可被进一步调控,为其在生物传感领域的应用拓展提供了重要基础^[57]。

在食品及药物分析方面,纳米酶展现出显著优势。其一,纳米酶合成工艺相对简单,具有较高的稳定性与可重复使用性,且制备成本较低,易于满足现场快速检测对试剂材料的实际需求。其二,即使在复杂的食品或生物样本基质中,纳米酶仍能维持较高的催化活性与特异性。例如,适配体功能化的仿生超分子纳米酶在河鲀毒素(tetrodotoxin, TTX)检测中表现出优异的传感性能,体现了纳米酶在复杂基质中的抗干扰能力与选择性^[58]。此外,基于 MOF 的纳米酶,如钒基 MOF 凭借其类过氧化物酶催化活性,已成功应用于有机磷农药的直接比色检测,为开发快速、可靠的现场检测方法提供了有力支持^[59]。

5.2 智能终端集成技术实现现场实时检测

智能终端与纳米酶技术的融合为现场快速检测开辟了创新路径。通过将高催化活性的纳米酶与智能终端的便携性、图像处理及计算能力相结合,可构建低成本、易操作的实时检测平台。

一种典型应用是基于纳米酶催化反应产生的颜色变化,利用智能终端摄像头捕获信号,再通过内置算法实现定量分析。例如,在纸基微流控传感器中,纳米酶催化底物后发生由无色至蓝色的显色反应,用户仅需用智能终端拍摄并借助专用应用程序分析图像色彩强度,即可判定目标物浓度^[60]。该方法在提升检测灵敏度与准确性的同时,极大简化了操作流程,使非专业人员也能在现场完成可靠检测。

此外,智能终端的强大计算能力为引入 ML 与深度学习算法提供了可能。通过训练专用模型,终端应用程序能够自动识别复杂的信号模式,优化数据解析过程,从而进一步提高检测结果的准确性与可靠性。这种智能化的集成策略,正推动现场检测技术向更精准、更便捷的方向发展。

5.3 人工智能、机器学习在数据分析中的应用

AI 与 ML 的引入,显著增强了纳米酶技术在数据分析方面的能力。通过处理海量检测数据,AI 能够从复杂信号中提取有效信息,并完成高精度的模式识别。这一特点在食品及药物分析中尤为重要,因为实际样本常含有多种干扰成分,传统分析方法往往难以实现准确识别与解析。

例如,利用深度学习算法,研究人员能够对智能终端捕获的纳米酶反应图像进行分析,实现对目标物浓度的精准预测。通过训练有效的识别模型,AI 系统可捕捉样品中微弱的信号变化并做出实时判断,使检测过程更具智能化与自动化特征^[61]。此外,AI 技术还能协助优化检测流程,有效减少假阳性与假阴性结果的出现,从而提升整体检测的可靠性。

在实际应用中,AI 与纳米酶结合的传感器系统已能够支持多通道检测模式,实现多种污染物同步分析。例如,已有研究通过 AI 解析纳米酶催化反应动力学数据,建立了对重金属、药物残留等多种目标物的快速检测方法,显著提升了食品及药物分析的综合效率与适用性。

5.4 关键挑战与发展展望

尽管智能终端集成纳米酶技术与 AI 辅助检测展现出良好的应用前景,其实用化进程仍面临若干关键挑战:第一,纳米酶在不同环境条件下的稳定性与催化活性可能存在波动,直接影响检测结果的准确性与重现性;第二,智能终端的成像性能、传感器一致性及内置算法的处理能力也会对检测精度造成影响,需通过软硬件的协同优化以提升系统整体可靠性。

数据安全与用户隐私保护是另一项重要议题。随着智能终端与云计算在检测系统中的深度融合,如何确保数据传输、存储与分析过程的安全合规,已成为推广应用中必须解决的问题。基于此,未来发展中,建立透明、可信的数据处理机制是实现技术落地的基本要求。

展望未来,该技术有望通过与物联网(internet of things, IoT)等新型技术结合,构建智能化的食品及药物分析网络。此类系统能够实现检测数据的实时采集、云端分析与动态预警,为风险管控提供

自动化决策支持,从而显著提升安全监管的效能与水平。随着关键技术的持续突破,更加高效、精准且用户友好的检测方案有望在不久的未来实现规模化应用。

6 其他新兴检测技术及多技术融合

6.1 表面等离子体共振技术及其增强策略

SPR 技术凭借其高灵敏与实时响应的特性,已成为生物传感、食品及药物分析等领域的重要工具。该技术基于金属薄膜表面等离子体与入射光之间的相互作用,通过实时监测反射光强度或角度的变化,能够精确反映分子结合事件的发生与动力学过程。

SPR 技术之所以成为分子互作研究的“金标准”,得益于其长期形成的标准化体系。借鉴 SPR 数据库的构建经验,可为快速检测技术的标准化提供清晰路径:建立可量化的性能评价指标体系,推动数据格式与元数据的标准化,并通过跨平台、跨实验室的验证规程确保结果的可靠性与可比性。这种标准化框架对于将实验室技术转化为可靠的实际应用具有重要指导意义。

在技术发展方面,近年来为进一步提升 SPR 传感器的性能,多种增强策略被广泛研究与应用。其中包括引入金纳米颗粒等纳米材料以增强局域电磁场,从而放大检测信号,实现对低浓度目标物的高灵敏识别^[62]。通过对传感器表面进行功能化修饰,提高其对目标分子的捕获能力与选择性;以及优化光学结构以提升信噪比。此外,将 SPR 与表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)及电化学传感等技术联用,不仅拓宽了其应用场景,还显著增强了在复杂基质中的检测可靠性^[63]。

在快速检测技术谱系中,SPR 呈现出独特的性能特征:在灵敏度和特异性方面表现优异,但其设备成本较高,便携性相对不足,这使其在实验室精准分析领域保持着不可替代的地位。展望未来,随着微型化光学元件与集成化芯片技术的发展,SPR 设备正朝着小型化、低成本方向演进。同时,通过与其他检测原理的深度融合及标准化数据接口的建设,SPR 技术有望在保持其高精度优势的基础上,拓展在现场检测中的应用边界,为构建多层次、全覆盖的食品及药物分析体系提供关键技术支撑。

6.2 光子晶体材料与分子印迹技术

光子晶体材料因其具有的周期性介电结构及由此形成的光子带隙,能够有效调控光传播行为,在传感器与生物检测领域展现出重要价值。将光子晶

体与分子印迹技术相结合,可构建兼具高灵敏度与高选择性的传感平台。MIP在合成过程中以目标分子为模板,形成在形状、尺寸和功能基团上与之互补的三维空穴,从而实现目标物的特异性识别。

光子晶体与MIP的复合策略不仅显著提升了传感器的响应性能,也拓宽了其在食品安全、环境监测及医学诊断等领域的应用潜力^[64]。例如,研究表明,基于光子晶体-MIP的传感系统在农药残留和食品添加剂检测中表现出优异的灵敏度和识别特异性,显示出良好的应用前景^[65]。

6.3 表面增强拉曼光谱技术在微生物及化学污染检测中的应用

SERS技术凭借其超高灵敏度、非破坏性检测及分子指纹识别能力,已成为微生物与化学污染物检测领域的重要分析工具。该技术基于金属纳米结构产生的局域表面等离子体共振效应,能够将吸附分子的拉曼信号增强数个数量级,甚至实现单分子水平的检测灵敏度。

在食品安全领域,SERS技术被广泛应用于致病微生物、农药残留及其他有害化学物质的定性与定量分析。例如,通过设计具有高增强因子和均匀性的SERS基底(如金/银纳米结构及其复合材料),可显著提升对细菌、生物毒素和药物残留等目标的检测灵敏度与特异性^[66]。此外,SERS技术还展现出在实时、原位监测方面的突出潜力,能够适应快速响应和现场检测等日益增长的应用需求,为食品安全监管提供强有力的技术支撑^[67]。

在药学研究领域,SERS技术同样展现出广阔的应用前景,已覆盖成分鉴定、质量控制、作用机制研究和药效评价等多个层面^[68]。

在药品成分分析与质量控制方面,SERS可实现复杂混合物中活性成分的快速鉴定。有研究采用QuEChERS-SERS联用技术,建立了兽药注射液中非法添加对乙酰氨基酚的快速检测方法,在2~125 mg·L⁻¹范围内线性关系良好,为兽药质量监管提供了有力工具^[69]。此外,基于纳米银溶胶的液体SERS技术已被用于抗人类免疫缺陷病毒(human immunodeficiency virus, HIV)药物拉米夫定的定量检测,检测限可达1.12 mg·L⁻¹,与HPLC-UV等传统方法结果相当,为药品质量控制提供了低成本、快速的光学检测新方案^[70]。

在中药分析与质量控制方面,SERS技术凭借其高灵敏度和“指纹”识别能力,可有效应对中药化学成分复杂、基质干扰严重的分析难题。例如,以纳米银溶胶为增强基底,SERS技术已被用于黄

连中异喹啉类生物碱的快速定位与含量分析,单个样品检测仅需30s^[71],实现了对不同产地、不同药用部位黄连样品的快速质量评价。此外,SERS与深度学习联用的“等离子体人工药材检验系统”,可对35种外观相似或同属易混淆药材实现约95%的分类准确率,在中药材真伪鉴别和快速筛查方面展现出巨大潜力^[72]。

在治疗药物监测方面,SERS技术的便携化发展为临床个性化用药提供了新工具。研究者已开发出基于银纳米棒的便携式SERS平台,用于尿液中抗癌药物阿培利司的快速筛查与定量分析,检测限达2.28 μmol·L⁻¹,并与液相色谱(liquid chromatography, LC)-MS验证结果无显著差异^[73]。在抗感染药物的药物监测中,SERS已被用于多种抗菌药物(如β-内酰胺类、氨基糖苷类等)的定量检测,通过优化纳米增强基底和ML数据处理方法,可在复杂生物基质(血清、血浆)中实现痕量药物浓度的精准测定,为抗感染治疗方案的个体化调整和耐药性防控提供了新策略^[74]。

综上所述,SERS技术已从单纯的食物安全检测工具,拓展为覆盖药品成分分析、质量控制、中药鉴定及治疗药物监测的全链条分析技术。随着新型SERS基底、定量分析策略及人工智能算法的持续发展,该技术有望在食品及药物分析体系中发挥更加重要的作用。

6.4 大数据与“组学”技术助力食品及药物分析

随着大数据与组学技术的迅猛发展,食品及药物分析领域正迎来重要的技术变革。基因组学、转录组学、蛋白质组学、代谢组学等多组学方法能够系统解析食品中微生物群落结构、污染物种类及其相互作用机制,亦能从分子层面揭示中药药效物质基础、毒性作用机制及品质形成规律,为全面评估食品药品的质量与安全性提供多维度信息。通过整合多组学数据,研究人员能够更准确地识别潜在危害因子,并据此制定有针对性的监测与控制策略。

在食品安全领域,基于代谢组学的高通量分析技术,可快速筛查和鉴定食品中的化学污染物及微生物代谢产物,显著提升检测的覆盖范围与识别效率^[75]。与此同时,AI与ML方法的引入,为处理海量、高维度的组学数据提供了强大工具,能够深入挖掘数据中隐藏的风险信号,加速新型检测技术的研发进程^[76]。

在药品检验与药学研究领域,大数据与多组学技术同样展现出重要价值。在中药质量控制方面,多组学策略正推动质量评价从“体外化学成分检测”

向“体内药效物质群关联”转变,通过整合药理活性筛选与多组学分析,识别与功能主治相关的质量标志物,建立生物学效价联控体系;AI与网络药理学结合,亦为中药体内成分预测与质量标志物发现提供了新路径^[77]。在药物安全性评价方面,单细胞转录组学、蛋白质组学等前沿技术已从多尺度实现中药毒性效应的机制解析,有助于发现特征性生物标志物^[78]。在创新药研发方面,全基因组关联分析标准化流程及多组学分析体系的建立,为基于遗传关联的药物靶点发现提供了方法学基础,产业界亦已启动AI赋能的中药新药开发平台建设,推动研发模式从“经验导向”向“数据导向”转型^[79]。

综上所述,大数据与多组学技术正在构建从食品污染物监测到药品质量控制、从药物安全性评价到创新药研发的全链条技术支撑体系。随着数据标准化进程的推进和AI算法的持续迭代,该技术有望在食品及药物分析中发挥更加核心的作用。

6.5 用于药物监测的可穿戴电化学传感器

可穿戴式电化学传感器作为一类快速发展的数字健康技术,能够实现对体液中生物标志物的无创、连续监测,正逐步满足日益增长的个性化医疗需求。以连续葡萄糖监测(continuous glucose monitoring, CGM)系统为代表的药物感应型可穿戴设备,已在治疗药物监测方面展现出重要潜力。该技术通过实时获取体液中的药物浓度数据,使临床医生与患者能够将药代动力学特征与个体临床反应相关联,从而推动患者特异性给药方案的实施与药物代谢行为的动态追踪。

这一能力不仅有助于提升患者的用药依从性,也为减少药物不良反应、优化治疗效果并降低医疗成本提供了技术支撑。展望未来,可穿戴式药物监测设备的进一步发展目标在于构建实时、精准的个体化药物管理平台,并逐步实现与给药系统的闭环整合,为精准剂量调节与治疗效能最大化奠定基础^[80]。

6.6 多技术融合与检测体系优化

多技术融合是检测技术发展的重要趋势。通过将SPR、SERS、光子晶体等不同原理的检测技术有机结合,可在复杂食品药品基质中实现对多种污染物的快速、高灵敏与高选择性检测。例如,SERS与SPR的联用可充分发挥二者在信号增强与实时响应方面的互补优势,从而有效提升对痕量目标物的识别能力。在药学研究领域,SPR与MS的联用技术已在药物靶点发现与活性成分筛选中发挥重要作用。该技术可将靶蛋白固定于芯片,从中药提取物

或化合物库中“垂钓”与靶点结合的活性分子,再通过MS进行结构鉴定,已在葛根素抗SARS-CoV-2活性成分筛选、安宫牛黄丸质量标志物分析等研究中得到应用^[81-82]。

随着智能传感与物联网技术的进步,食品及药物分析体系正朝着实时化、在线化与数据驱动决策的方向发展,这将显著提升监管效率和风险响应能力。面对日益复杂的食品药品安全挑战,开发新材料、新方法与新平台仍是未来的研究重点,旨在构建持续、可靠的分析技术保障体系。

在食品及药物分析领域,各类新型技术呈现出不同的经济性特征。电化学传感器因硬件成本低、易于规模化生产,在常规监测中具备显著成本优势。纳米酶凭借其合成简便、稳定性高及制备成本低的特点,在即时检测场景中展现出良好应用潜力。CRISPR/Cas系统虽灵敏度极高,但其依赖核酸提取与扩增步骤,整体流程较为复杂,经济性相对较低。纳米孔传感器尽管设备成本较高,却在无需标记、可直接获取序列信息的应用场景中具有不可替代的价值。

未来技术竞争的重点将从单一性能的比较,转向多技术协同的系统性赋能。AI作为关键赋能工具,正逐步融入实验设计优化、光谱与图像等复杂数据的智能解析,以及检测结果自动判读的全流程。通过提升检测通量与准确性,AI技术有望显著降低系统对人力的依赖与综合运行成本。这种深度融合不仅能突破单一技术的性能瓶颈,更将通过系统优化与规模化应用,推动形成更加精准、普惠、高效的食品及药物分析新范式。

7 结语

快速检测技术在食品及药物分析领域展现出广阔的应用前景,然而其全面推广仍面临灵敏度、抗干扰能力及标准化等多重挑战。当前研究虽取得显著进展,但不同技术路径的性能差异较大,相关实验结论亦不尽一致,亟需系统整合与综合评价。

灵敏度是快速检测技术的核心指标,但目前尚难完全满足日益严格的应用需求。尽管纳米材料等新型功能材料的引入在一定程度上提升了响应性能,其稳定性与成本控制仍是制约规模化应用的瓶颈。因此,未来研究应在追求高灵敏度的同时,兼顾技术的经济性与适用性,以推动从实验室向实际应用场景的转化。

在复杂样本体系中,抗干扰能力是直接决定检测结果准确性与可靠性的关键因素。食品与药品样

本基质多样,共存物质易对检测信号造成干扰。尽管已有表面修饰、选择性识别元件等多种抗干扰策略被提出,但相关方法尚未形成统一的技术规范。推动检测流程、信号判定与性能验证的标准化,将成为提升技术可比性与可重复性的重要基础,也将为标准化应用提供科学的评价依据。

多学科融合是推动技术创新的重要动力。生物技术、新材料与信息科学的深度交叉,正不断拓展快速检测的技术边界。例如,ML与大数据分析的应用,使检测信号的智能解析与实时处理成为可能,

显著提升检测效率与准确性。便携式设备与物联网技术的结合,则进一步推动了现场检测与远程监控的协同发展。

展望未来,快速检测技术将在食品及药物分析体系中扮演更为重要的角色。随着技术的持续演进与应用场景的不断拓展,其在提升公众健康水平、支持科学决策方面潜力巨大。唯有在灵敏度、抗干扰能力与标准化等关键环节实现系统性突破,快速检测技术才能充分发挥其应有价值,为构建更完善的食品与药物分析技术支撑体系提供坚实保障。

【参考文献】

- [1] Marimuthu M, Xu K, Song W, *et al.* Safeguarding food safety: nanomaterials-based fluorescent sensors for pesticide tracing [J]. *Food Chem*, 2025, 463(Pt 3): 141288.
- [2] Zhang J, Yu M, Tao S. Advanced electrospinning nanomaterials: from spinning fabrication techniques to electrochemical applications[J]. *Nano Res*, 2024, 17(8): 7077–7116.
- [3] Guo F, Ren Z, Wang S, *et al.* Recent progress of electrospun nanofiber-based composite materials for monitoring physical, physiological, and body fluid signals[J]. *Nanomicro Lett*, 2025, 17(1): 302.
- [4] Rui X Y, Jia B Z, Wen P, *et al.* Applications of electrospun nanofibers in food safety and quality analysis: a review[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2024, 152: 104686.
- [5] Wang M Y, Xu Y, Chen S, *et al.* Accurate electrochemical paracetamol sensor for drug control through catalytic roles of single Fe atoms[J]. *Rare Met*, 2025, 44(9): 6292–6302.
- [6] Su Z, Li T, Wu D, *et al.* Recent progress on single-molecule detection technologies for food safety[J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(2): 458–469.
- [7] Fan P, Zhang S, Wang Y, *et al.* Nanopore analysis of salvianolic acids in herbal medicines[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 1970.
- [8] Wang L, Huang X, Wang C, *et al.* Applications of surface functionalized Fe₃O₄ NPs-based detection methods in food safety[J]. *Food Chem*, 2021, 342: 128343.
- [9] Liang M, Zhang G, Song J, *et al.* Paper-based microfluidic chips for food hazard factor detection: fabrication, modification, and application[J]. *Foods*, 2023, 12(22): 4107.
- [10] Tian X, Wang Q, Jian J, *et al.* Small molecular organic fluorescent probes (SMOFs) applied in food safety inspection from 2015 to 2025[J]. *J Agric Food Chem*, 2025, 73(31): 19174–19203.
- [11] 秦晨, 朱东亮. 快检技术在药品质量监督中的创新应用与发展趋势[J]. *药学前沿*, 2025, 29(6): 1057–1064.
- [12] 伍洲游, 于洋, 赵倩, 等. 光谱技术在中药快速检测领域的研究进展及应用[J]. *天津中医药大学学报*, 2025, 44(12): 1119–1126.
- [13] Sang W, Zhang R, Shi X, *et al.* Advanced metallized nanofibers for biomedical applications[J]. *Adv Sci*, 2023, 10(27): 2302044.
- [14] Silva M K L D, Barreto F C, Sousa G D S, *et al.* Development of an electrochemical paper-based device modified with functionalized biochar for the screening of paracetamol in substandard medicines[J]. *Molecules*, 2024, 29(22): 5468.
- [15] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2025年版·四部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 479.
- [16] Altıntaş Ö, Denizli A. Molecular imprinting technologies in electroanalysis of pharmaceuticals[J]. *Electrochim Acta*, 2025, 535: 146597.
- [17] Masekela D, Dlamini L N. Molecularly imprinted and MXene-based electrochemical sensors for detecting pharmaceuticals and toxic compounds: a concise review[J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(6): 114569.
- [18] Faysal A A, Dorreh S, Kaya B S, *et al.* Molecularly imprinted electrochemical sensors for halogenated anti-infective agent detection: a review of current developments and prospects[J]. *ACS Omega*, 2025, 10(32): 35327–35351.
- [19] Huang R, Lv J, Chen J, *et al.* Corrigendum to “Three-dimensional porous high boron-nitrogen-doped carbon for the ultrasensitive electrochemical detection of trace heavy metals in food samples” [J Hazard Mater (2023) 442 130020] [J]. *J Hazard Mater*, 2023, 456: 131638.
- [20] Xu C, Tan J, Li Y. Application of electrospun nanofiber-based electrochemical sensors in food safety[J]. *Molecules*, 2024, 29(18): 4412.
- [21] Rajaji U, Yogesh Kumar K, Chen S M, *et al.* Deep eutectic solvent synthesis of iron vanadate-decorated sulfur-doped carbon nanofiber nanocomposite: electrochemical sensing tool for doxorubicin[J]. *Mikrochim Acta*, 2021, 188(9): 303.
- [22] Balasubramanian P, Annalakshmi M, Chen S M, *et al.* Ultrasonic energy-assisted preparation of β -cyclodextrin-carbon nanofiber composite: application for electrochemical sensing of nitrofurantoin[J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 52: 391–400.
- [23] Celik Cogal G, Cogal S, Machata P, *et al.* Electrospun cobalt-doped 2D-MoSe₂/polypyrrole hybrid-based carbon nanofibers as electrochemical sensing platforms[J]. *Microchim Acta*, 2024, 191(1): 75.
- [24] Li Z, Qian W, Guo H, *et al.* Sensitive electrochemical sensing

- platform for selective determination of dopamine based on amorphous cobalt hydroxide/polyaniline nanofibers composites [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(27): 275501.
- [25] Lochab A, Baxi S, Tiwari P, *et al.* Electrochemical sensors for the determination of antipyretic and antibiotic drugs in environmental and biological samples[J]. *Microchem J*, 2024, 199: 109923.
- [26] Tan X, Lv C, Chen H. Advances of nanopore-based sensing techniques for contaminants evaluation of food and agricultural products[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(31): 10866–10879.
- [27] Tian W, Wang X, Zhang Y, *et al.* Pioneering role of nanopore single-molecule sensing in environmental and food surveillance [J]. *Biosensors*, 2025, 15(1): 41.
- [28] Zheng L, Lin J, Tian W, *et al.* Protease-hydrolysis-driven approach towards the quantification of cellular mRNA after drug treatment in protein nanopores[J]. *Anal Chim Acta*, 2025, 1353: 343955.
- [29] Li T, Su Z, Li Y, *et al.* An aptamer-assisted biological nanopore biosensor for ultra-sensitive detection of ochratoxin A with a portable single-molecule measuring instrument[J]. *Talanta*, 2022, 248: 123619.
- [30] Xue L, Yamazaki H, Ren R, *et al.* Solid-state nanopore sensors [J]. *Nat Rev Mater*, 2020, 5(12): 931–951.
- [31] Chen J, Su Z, Liu J, *et al.* *Thermus thermophilus* argonaute-assisted nanopore-encoding strategy for multiplexed mycotoxin detection[J]. *Anal Chem*, 2025, 97(18): 9809–9818.
- [32] Liu J, Miao P, Chen J, *et al.* The evolutionary strategies for enhanced nanopore sensing[J]. *Trac Trends Anal Chem*, 2026, 201: 118837.
- [33] Shrikishna N S, Gandhi S. Nanopore-based sensing for biomarker detection: from fundamental principles to translational diagnostics[J]. *J Nanobiotechnology*, 2025, 23(1): 663.
- [34] Ábrahám Á, Islam M N, Gazdag Z, *et al.* Bacterial metabarcoding of raw palm sap samples from Bangladesh with nanopore sequencing[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 1285.
- [35] Zhang X, Lin M, Dai Y, *et al.* Stochastic sensing of dynamic interactions and chemical reactions with nanopores/nano-channels[J]. *Anal Chem*, 2023, 95(28): 10465–10475.
- [36] Sun Y, Wen T, Zhang P, *et al.* Recent advances in the CRISPR/cas-based nucleic acid biosensor for food analysis: a review[J]. *Foods*, 2024, 13(20): 3222.
- [37] Zhou J, Li Z, Seun Olajide J, *et al.* CRISPR/Cas-based nucleic acid detection strategies: trends and challenges[J]. *Heliyon*, 2024, 10(4): e26179.
- [38] Qiao J, Zhao Z, Li Y, *et al.* Recent advances of food safety detection by nucleic acid isothermal amplification integrated with CRISPR/Cas[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2024, 64(32): 12061–12082.
- [39] Li Y, Zhao Z, Liu Y, *et al.* CRISPR/cas system: the accelerator for the development of non-nucleic acid target detection in food safety[J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(37): 13577–13594.
- [40] Yi S, Guk K, Kim H, *et al.* RdRp activity test using CRISPR/Cas13a enzyme (RACE) for screening of SARS-CoV-2 inhibitors[J]. *Sens Actuat B Chem*, 2024, 399: 134748.
- [41] Demirayak P S, Akay Sazaklioglu S. CRISPR for detection of drug resistance genes[J]. *Clin Chim Acta*, 2026, 579: 120626.
- [42] Ye Y, Li L, Chen Y, *et al.* Molecular methods for rapid detection and identification of foodborne pathogenic bacteria [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2025, 41(5): 175.
- [43] Zhang L, Liu J, Huang S, *et al.* A high-throughput DNA analysis method based on isothermal amplification on a suspension microarray for detecting mpox virus and viruses with comparable symptoms[J]. *Anal Chim Acta*, 2024, 1299: 342416.
- [44] Tian Y, Chen J, Chen F, *et al.* Multiple gRNAs-assisted CRISPR/Cas12a-based portable aptasensor enabling glucometer readout for amplification-free and quantitative detection of malathion[J]. *Anal Chim Acta*, 2025, 1341: 343662.
- [45] Yi B, Zhou B, Zhou D, *et al.* CRISPR/Cas-powered nucleic acid amplification and amplification-free biosensors for public safety detection: principles, advances and prospects[J]. *Biotechnol Adv*, 2025, 83: 108609.
- [46] 高天宇, 郭清城, 潘志远, 等. 基于RPA-CRISPR/Cas12a的支原体检测技术在生物药生产中的应用探索[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(3): 447–456, 474.
- [47] Yang Y, Yang D, Shi M, *et al.* Development of a MIRA-CRISPR/Cas12a-based nucleic acid detection system for the discrimination of *Panax ginseng* and *Panax quinquefolium*[J]. *J Ginseng Res*, 2026, 50(2): 100923.
- [48] Yi K, Wang C, Lu H. Advancements in the application of reporter gene cell lines in bioactivity evaluation of biological products[J]. *Bioresour Bioprocess*, 2025, 12(1): 103.
- [49] Goyon A. Keeping up with a quickly diversifying pharmaceutical landscape[J]. *ACS Meas Sci Au*, 2024, 4(6): 615–619.
- [50] Son H. Harnessing CRISPR/cas systems for DNA and RNA detection: principles, techniques, and challenges[J]. *Biosensors*, 2024, 14(10): 460.
- [51] Liu J, Wu D, Chen J, *et al.* CRISPR-Cas systems mediated biosensing and applications in food safety detection[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2024, 64(10): 2960–2985.
- [52] Xin X, Su J, Cui H, *et al.* Recent advances in clustered regularly interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated proteins system-based biosensors[J]. *Biosensors*, 2025, 15(3): 155.
- [53] Zhang Y, Chen G, Liang C, *et al.* MultiCRISPR-EGA: optimizing guide RNA array design for multiplexed CRISPR using the elitist genetic algorithm[J]. *ACS Synth Biol*, 2025, 14(3): 919–930.
- [54] Zhang R, Yan X, Gao L, *et al.* Nanozymes expanding the boundaries of biocatalysis[J]. *Nat Commun*, 2025, 16: 6817.
- [55] Liu M, Xu W, Tang Y, *et al.* Tuning atomically dispersed metal sites in nanozymes for sensing applications[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64(13): e202424070.
- [56] Şen M, Yüzer E, Doğan V, *et al.* Colorimetric detection of

- H₂O₂ with Fe₃O₄@Chi nanozyme modified μ PADs using artificial intelligence[J]. *Mikrochim Acta*, 2022, 189(10): 373.
- [57] Zhu C, Wang K, Lv Y, *et al.* Immobilization protocols of nanozyme with different morphologies in microfluidic chips for biosensing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17(42): 57967–57975.
- [58] Ma H, Ma X, Dong T, *et al.* Aptamer-functionalized biomimetic supramolecular nanozyme constructed by dipeptide, glutaraldehyde and hemin and its excellent sensing performances for tetrodotoxin[J]. *Biosens Bioelectron*, 2025, 283: 117524.
- [59] Du N, Weng W, Xu Y, *et al.* Vanadium-based metal-organic frameworks with peroxidase-like activity as a colorimetric sensing platform for direct detection of organophosphorus pesticides[J]. *Inorg Chem*, 2024, 63(35): 16442–16450.
- [60] Narware J, Chakma J, Singh S P, *et al.* Nanomaterial-based biosensors: a new frontier in plant pathogen detection and plant disease management[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2025, 13: 1570318.
- [61] Liang Z, Qin Y, Zhong X, *et al.* A smartphone-integrated paper-based colorimetric sensor array: real-time detection and classification of flavonoids[J]. *Talanta*, 2025, 293: 128030.
- [62] Tiwari P B, Bencheqroun C, Lemus M, *et al.* SPRD: a surface plasmon resonance database of common factors for better experimental planning[J]. *BMC Mol Cell Biol*, 2021, 22(1): 17.
- [63] Zhang M, Yu Q, Guo J, *et al.* Review of thin-layer chromatography tandem with surface-enhanced Raman spectroscopy for detection of analytes in mixture samples[J]. *Biosensors*, 2022, 12(11): 937.
- [64] Han J A, Kim C, Sung J H, *et al.* Trends in the recognition system and safety assessments of novel foods in Korea[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2025, 34(12): 2685–2695.
- [65] Babaeipour V, Jabbari F. Pre-polymerization process simulation, synthesis and investigation the properties of dipicolinic acid molecularly imprinted polymers[J]. *Polym Bull*, 2024, 81(2): 1495–1512.
- [66] Bi X, Lin L, Chen Z, *et al.* Artificial intelligence for surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Small Meth*, 2024, 8: 2301243.
- [67] 全美淋, 李飞, 刘金燕, 等. 抗体技术在食源性致病菌快速检测中的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2024, 40(11): 3985–4005.
- [68] Xia L, Qi X, Yu H, *et al.* Surface-enhanced Raman spectroscopy in pharmaceutical analysis: from component determination to mechanism research[J]. *Mikrochim Acta*, 2025, 192(4): 211.
- [69] 杨欣羽, 张若愚, 赵晓婵, 等. QuEChERS-表面增强拉曼光谱法快速测定中兽药中非法添加药物对乙酰氨基酚[J]. *分析测试学报*, 2025, 44(2): 349–355.
- [70] Thobakgale L, Thwala L N, Mthunzi-Kufa P. Detection of lamivudine using liquid-surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *RSC Adv*, 2025, 15(28): 22789–22798.
- [71] Xie M, Lu W, Gu S, *et al.* A rapid localization and analysis method for isoquinoline alkaloids with fluorescence in *Coptis chinensis* Franch. By fabricating the nano-silver sol as a substrate for surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Anal Chim Acta*, 2024, 1287: 342067.
- [72] Kim H, Lee J, Kim S W, *et al.* Plasmonic artificial inspector for herbal medicines via surface-enhanced Raman spectroscopy and deep learning[J]. *Sci Rep*, 2026, 16(1): 7425.
- [73] López-Sánchez C, Zougagh M, Ríos Á, *et al.* Screening–confirmation approach for urinary alpelisib by silver-nanorod enabled portable SERS platform and LC-MS validation[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2026, 418: 4455–4468.
- [74] Wang Q, Wei Y, Lan J, *et al.* A new perspective on antimicrobial therapeutic drug monitoring: surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Talanta*, 2025, 292: 128017.
- [75] Wang L, Liu L, Chen R, *et al.* Carbonized polymer dots-based molecular imprinting: an adsorbent with enhanced selectivity for highly efficient recognition and removal of ceftiofur sodium from complex samples[J]. *J Hazard Mater*, 2024, 473: 134637.
- [76] 王念, 俞成诚, 杨虎, 等. 面向中医药高维小样本的多组学数据融合方法初探[J]. *中国中药杂志*, 2025, 50(1): 278–284.
- [77] 刘雪, 李遇伯, 刘雪珂, 等. 从体外到体内: 人工智能驱动的中药质量标志物发现与质量控制研究进展[J]. *分析测试学报*, 2026, 45(6): 1188–1195.
- [78] 李丁, 王婉莹, 孙璐, 等. 组学新技术在中药毒性研究中的应用进展[J]. *中草药*, 2025, 56(2): 731–741.
- [79] 许喆, 石延枫, 张杰, 等. 全基因组关联分析标准化流程的构建与扩展应用[J]. *中国卒中杂志*, 2025, 20(6): 664–674.
- [80] Teymourian H, Parrilla M, Sempionatto J R, *et al.* Wearable electrochemical sensors for the monitoring and screening of drugs[J]. *ACS Sens*, 2020, 5(9): 2679–2700.
- [81] Chen L, Lv D, Wang S, *et al.* Surface plasmon resonance-based membrane protein-targeted active ingredients recognition strategy: construction and implementation in ligand screening from herbal medicines[J]. *Anal Chem*, 2020, 92(5): 3972–3980.
- [82] Yuan H J, Chen X Y, Chen P Z, *et al.* Prediction of quality markers of Angong Niuhuang Pills based on LC-MS and pull-down with SPR chips[J]. *China J Chin Mater Med*, 2024, 49(7): 1848–1864.

(责任编辑:杨臻峥)