

生物检测技术在食品检测中的应用

张涛, 刘琛琛

青岛市华测检测技术有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ETQM.2025110013

摘 要 : 食品安全是全球瞩目的重大公共卫生事项。传统检测途径在灵敏度、及时性和多指标检测能力上存在局限。生物检测技术借助其高特异性、快速响应以及多参数分析的能力, 成为食品检测行业的核心技术。本文对 CRISPR-Cas 系统、生物传感器、免疫分析、近红外光谱等生物检测技术的原理与应用进行了系统梳理, 结合当下最新的研究进展, 探索其在食源性病原菌、农药残留、转基因成分等检测中的优势, 最后对生物检测技术在食品检测中技术瓶颈和发展方向进行总结, 以期为相关人士提供参考。

关 键 词 : 生物检测技术; CRISPR 技术; 生物传感器; 免疫分析

Application of Biological Detection Technology in Food Testing

Zhang Tao, Liu Chenchen

Qingdao Centech Testing Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract : Food safety is a major public health issue of global concern. Traditional detection methods have limitations in terms of sensitivity, timeliness, and multi-index detection capabilities. Biological detection technology has become a core technology in the food testing industry due to its high specificity, rapid response, and multi-parameter analysis capabilities. This article systematically combs through the principles and applications of biological detection technologies such as the CRISPR-Cas system, biosensors, immunoassays, and near-infrared spectroscopy. Combined with the latest research progress, it explores their advantages in the detection of foodborne pathogens, pesticide residues, genetically modified components, etc. Finally, it summarizes the technical bottlenecks and development directions of biological detection technologies in food testing, aiming to provide reference for relevant personnel.

Keywords : biological detection technology; CRISPR technology; biosensors; immunoassays

引言

食品安全关乎人类健康、社会稳定。全球每年受食源性疾病影响, 数亿人患病, 经济损失高达数千亿美元。诸如色谱法、质谱法之类的传统检测方法, 虽精度较高, 但存在操作繁杂、周期久、成本大等弊端, 满足新时代对食品检测流程中快速筛查的需求。生物检测技术凭借生物分子识别原理, 与纳米材料、微流控等技术相联合, 实现对食品中有害物质的高灵敏度、高通量检测。CRISPR-Cas 系统、生物传感器、免疫层析等技术的突破, 助力食品检测向精准化、智能化方向前行。

一、核心生物检测技术及其应用

(一) CRISPR-Cas 系统结构: 下一个阶段的分子诊断技术

CRISPR-Cas 体系凭借其强大的可编辑性, 已逐渐成为当前的研究热点。东北农业大学课题组总结了 CRISPR-Cas 与恒温放大技术的联合研究成果, 例如 Cas12a 可通过剪切单链 DNA 实现信号放大, 检出限能达到 0.1 CFU/mL; 彭汉勇等人开发的 RNA 活化 CRISPR-Cas12a 基因工程技术, 借助在金纳米粒表面的自组装, 实现了对活细胞中微小 RNA 的实时动态成像, 检测灵敏度达 200 pM; 山东大学研究人员则在不依赖 PCR 的情况下, 将 CRISPR-Cas10 与石墨烯结合, 实现了 aM 级别的核酸检测, 并

成功应用于乳腺癌标记物 miRNA-155 的筛选^[1]。

(二) 生物传感器: 从实验室过渡到现场的跨越

生物传感器通过将生物识别单元与传感单元有机结合, 能够实现对被测物质的快速探测。其中, 采用核酸适体构建的电化学传感技术, 可对黄曲霉毒素 B1 进行快速、灵敏的分析。以 Bruker MATRIX-F 光谱仪为例, 采用透光模式对 32 个样品进行扫描, 并结合 PDMS (聚二甲基硅氧烷), 可实现对肉品新鲜度的实时检测, 新鲜度预报准确率达 95%^[2]。

(三) 免疫分析技术: 多重检测达成新突破

因具有高特异性, 免疫分析技术目前已被广泛应用于食品检验领域。北检研究院采用 ELISA 法的测定结果显示, 该方法检

出限为0.1ng/mL，交叉反应率低于 5%，适用于检测牛奶中的抗生素残留。NELISA 是西华大学研发的一种基于纳米通道的新型 ELISA 方法，其灵敏度可达0.03fg/mL，能够同时测定6种肿瘤标记物，且准确性达到100%^[3]。

（四）宏基因组测序：病原检测借助“卫星扫描”

宏基因组测序不需要预先确定靶标，可同时检测20000余种病原体，在混合侵染及不明病原体识别方面具有显著优势。例如，一名重症监护室患者通过宏基因组测序技术，仅用一天就明确了肺炎克雷伯菌与 CMV 的复合感染，诊断速度较常规培养快6天。此外，相较于 PCR 方法，该技术在检测猴痘突变体时的有效性提升了3倍，为疾病的预防与控制奠定了重要基础。

二、技术对比与优势分析

（一）传统方法与生物检测技术的性能差异（见表1）

表1 传统方法与生物检测技术的性能差异对比表

指标	传统方法（培养法 / PCR）	生物检测技术（CRISPR/宏基因组）
检测周期	3天 -8周	24小时内
覆盖范围	已知可培养病原（<1%）	全病原扫描（细菌 / 病毒 / 真菌）
灵敏度	10 ³ -10 ⁴ CFU/mL	单分子级别
成本	高（设备 / 试剂）	中（高通量降低单样成本）

（二）方法学创新：从单一检测步入多模态集成

生物检测技术借助多学科之间交叉实现性能突破。CRISPR-Cas12a 纳米机器把金纳米颗粒的信号放大效应和 Mg²⁺ 离子局部富集技术整合起来，在活细胞的低 Mg²⁺ 环境里依然维持高切割活性；山东大学团队把 CRISPR 的分子识别能力与石墨烯场效应晶体管高灵敏度融合在一起，实现无标记、非扩增的核酸检测，检测限跟传统 PCR 的检测限比，降低1000倍^[4]。

三、典型应用案例与数据支持

（一）肉类掺假检测

在肉类市场里，掺假行为损害的不只是消费者权益，更大概率引发食品安全方面的问题。近红外光谱技术借由其快速、无破坏作用的特性，变成肉类掺假检测的关键手段，该技术核心原理是借助分析肉类中 C-H、O-H 等特征基团的振动频率差异，构造物质成分的光谱指纹图谱。要是猪肉中掺入了牛肉或植物蛋白时，这些基团的振动模式会出现按规律的变化，依托偏最小二乘回归模型对光谱数据进行解析，能精确识别出掺假成分。实验得出的数据说明，一旦掺假比例 ≥ 5% 的时候，该技术的识别精准率稳定在98% 以上，完全符合市场监管的要求。

某大型屠宰场的应用事例充分凸显了技术革新的价值。以往的肉品掺假检验依赖化学方法，步骤十分复杂，每日抽检量通常在 150 个以内；而引进金标免疫色谱与光谱联合法后，这家屠宰厂的检验方法实现了质的飞跃。该方法借助抗原与抗体的亲和作用产生的显色反应，完成对目标物的初步筛选和准确定量测定，

二者协同构建起“初步筛选 - 确认”的快速检测系统^[5]。在此基础上，每日可检验 2000 个样品，工作效率提升 15 倍，检验费用节省 30%，为我国市场环境的保护提供了新的思路。

（二）乳制品抗生素残留筛查

乳品作为高附加值产品，其安全性与公共卫生问题密切相关，而抗生素残留是其中亟需解决的重大风险。长期摄入含抗生素的乳制品，会导致人体肠道微生态失衡并产生抗药性，8通道离子色谱技术为解决这一问题奠定了基础。

8通道离子色谱技术借助离子交换原理来分离样品里的抗生素成分，跟紫外或质谱检测器结合以达成精准定量，其突出的创新点为8通道并行检测设计，可同时对四环素类、磺胺类、喹诺酮类等32种平常多见的抗生素进行分析，检测的最低限度降至0.001mg/kg，大幅低于欧盟 EC/657 标准规定的极限值。某家乳制品企业采用该技术后，构筑了原料奶全流程检测体系，能够在原料检验环节精准拦截不合格产品^[6]。某企业利用这项技术，已成功拦截 12 吨含抗生素的原料奶，避免了不合格原料进入生产环节引发批量性质量问题，直接减少经济损失超 2000 万元，同时也稳固了品牌的市场信誉。

（三）农产品毒素检测

农产品在储存与加工期间易遭真菌毒素污染，其中黄曲霉毒素 B1 具备强致癌性及高毒性，对花生、玉米等作物的安全构成极大威胁。DNA 适配体的电化学传感器为黄曲霉毒素 B1 检测带来了极具革命性的突破，该传感器借助适配体和黄曲霉毒素的特异性结合，依靠电化学信号变化实现超灵敏检测，检测限实现了0.804fg/mL，比传统高效液相色谱（HPLC）法的灵敏度提高了10⁶倍，单个样本检测可在10分钟内完成^[6]。

基于 Nb-C 复合结构的新型双模态传感器，为实现在线检测提供了一种全新方法。该传感器通过特异性分子与有毒物质的结合，可产生变色和信号增强的双响应：无需借助任何仪器时，仅凭肉眼观察颜色变化就能实现定性判断；若配合便携式荧光探测器，则可得出定量结果，且测量误差能控制在 5% 以内。这种“可视化 + 高准确性”的监测模式，尤其适用于花生仓库、玉米加工车间等场所的现场监测，显著提升了对有毒物质的监测与预警能力^[7]。

四、挑战与未来趋势

（一）技术瓶颈

食品检测技术发展依旧面临多种技术瓶颈，在一定程度上制约了其在复杂场景中的应用效能。首先面临的问题是基体扰动。在复杂的食物基体中，高脂、高蛋白成分会对分析结果产生显著影响。例如，在肉类分析过程中，油脂的存在可能会封装待测物质中的酶类，从而降低其催化活性；蛋白质样本则可能与待测物质发生非特异性相互作用，进而导致虚假结果。因此，亟需开发更有效的方法来抑制或消除这些干扰。

标准化问题也亟待处理，由于不同检测手段的工作机理存在差异，其检测数据的可比性较弱。例如，对同一批次乳制品分别

采用免疫层析法与 HPLC 法测定时,误差可能超过 20%。这一问题对我国食品安全构成了较大影响,因此亟需建立一套涵盖样品前处理、仪器操作及数据分析的完整标准体系,并研发能确保检验结果可追溯性与一致性的标准品^[8]。

成本把控是技术产业化的关键阻碍,以 CRISPR 技术为例,其相关尖端检测仪器因主要原料依赖进口、生产流程繁琐,单机价格动辄数十万元,难以在中小型食品企业推广应用。因此,需要通过改进微纳工艺来降低生产成本,推动该技术实现更高层次的应用。

（二）发展方向

智能化集成是食品检测技术的关键发展方向,它的核心是借助技术融合达成全流程的自动化。微流控芯片跟 AI 算法的联合,正重塑检测范式,芯片集成了样品预处理、反应、检测等功能模块,结合 AI 算法对检测信号进行实时分析,能实现“样本进-结果出”的闭环式流程操作。风途科技研发的 FT-KSS 检测仪堪称典型案例,该设备借助轨道式传输系统达成样本自动加载,内置的机器学习算法可自主识别异常信号然后校准,10 分钟内即可达成从采样到检测报告生成的全流程数字化管理,与传统方法对比,检测效率提升 8 倍,人力成本降低达 60%^[9]。

多技术联合运用将进一步冲破检测性能的极限,CRISPR-Cas 系统跟等温扩增技术的融合,能在常温条件下达成目标核酸的指数式扩增与特异性识别,检测灵敏度提升至单个分子水平;纳

米材料引入后赋予系统更强的信号放大能力,像金纳米颗粒的局域表面等离子体共振效应能把荧光信号增强至 100 倍以上,这种多技术协同的模式对低丰度污染物的超灵敏检测尤为适用,为食品安全风险的早期预警给予技术支持^[10]。

便携化及家用化趋势正让食品检测步入日常生活,石墨烯传感器凭借自身超高的电子传导性与表面吸附能力,可实现对微量毒素的迅速反应,制得的检测试纸条成本仅需几块钱,检测时间缩短到 3 分钟时长;免疫层析技术的小型化催生出了家用食品检测试剂盒产品,消费者只需滴下样品,依靠显色条带就能判断是否存在超标污染物,此“随手可检”的模式会推动食品安全监管从被动处理往主动预防转变,创建全民参与的食品安全防护架构。

五、结束语

综上所述,生物检测技术在食品检测领域的应用中,分子识别与信号放大技术的结合发挥了重要作用,使其在快速、高灵敏、高精度检测等方面得到广泛应用。其中,CRISPR-Cas 体系的可编辑性、生物传感器的实时监测能力以及免疫分析的高通量特点,共同为食品安全提供了多重保护支持。随着纳米技术和人工智能在生物检验领域的深入应用,食品检验将朝着“精准、快速、普惠”的方向发展,为我国粮食安全管理提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 宋芳. 生物检测技术在食品检测中的应用问题及改进建议 [J]. 食品安全导刊, 2025(14): 160-162.
[2] 邓茂. 微生物检测技术在食品检测中的应用研究 [J]. 现代食品, 2024, 30(4): 15-17.
[3] 杨情学. 探讨生物检测技术在食品检测中的应用 [J]. 中外食品工业, 2024(8): 58-60.
[4] 公民. 生物检测技术在食品检测中的应用研究 [J]. 食品安全导刊, 2023(29): 186-188192.
[5] 高庚渠. 基于 PCR 技术的食品微生物安全检测方法研究 [J]. 食品安全导刊, 2025(16): 130-132.
[6] 张蕾. 微生物检测技术在食品安全管理中的应用 [J]. 中国食品工业, 2025(3): 75-77.
[7] 孙宏娟. 生物检测技术在食品检测中的应用 [J]. 现代食品, 2025, 31(1): 101-103110.
[8] 王佳慧, 陈丽萍, 郑海伟, 李杨. 食品微生物检测技术在餐饮行业中的应用 [J]. 食品安全导刊, 2025(6): 132-134.
[9] 李广珍. 微生物检测技术在食品安全检验中的运用研究 [J]. 食品安全导刊, 2025(6): 103-105.
[10] 李毅. 生物传感技术在食品农药残留检测中的应用分析 [J]. 食品安全导刊, 2025(7): 147-149.