DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251112002
引用格式: 陆倩楠, 汪弘康, 蒋栋华, 等. 人工智能赋能下的中外食品快速检测技术发展路径比较分析与展望[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8):57–67.
LU QN, WANG HK, JIANG DH, *et al*. Comparative analysis and prospective outlook on the development pathways of food rapid detection technology in China and abroad under the empowerment of artificial intelligence [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 57–67. (in Chinese with English abstract).

人工智能赋能下的中外食品快速检测技术发展路径比较分析与展望

陆倩楠[1], 汪弘康[1], 蒋栋华[1], 俞　奔[1], 黄祎雯[1], 占绣萍[2], 王　霞[1*]
(1. 上海市农产品质量安全中心, 上海　201708; 2. 上海市农业技术推广服务中心, 上海　201103)

摘　要: 食品安全问题日益受到全球关注, 发展快速、准确且适用于现场的检测技术成为迫切需求, 而智能化与快速检测技术的融合为此提供了重要发展方向。本文旨在系统梳理人工智能(artificial intelligence, AI)与食品快速检测技术融合的最新进展, 并以此为核心分析视角, 对比考察其在中国及主要发达国家技术发展路径中的不同角色、融合模式与驱动逻辑。对比国内外发展路径可知, 我国利用胶体金多联卡等技术建立起适合于基层监管使用的快速筛查体系, 而发达国家则着重于发展高精度生物传感技术, 并建立起覆盖整个产业链的精密检测网。快速检测技术在我国目前仍存在诸如核心材料制备工艺未完全成熟、基层检测人员的操作水平不符合智能化设备要求等问题。未来, 多元多源融合的方向将是重要的发展趋势之一, 主要体现在 AI 与生物传感器的深度融合, 例如拉曼光谱与深度学习的耦合, 不仅能实现复杂食品基质的快速准确检测, 更能推动检测系统从单一工具向智能决策系统的转变。此外, 本文提出为提升智能化食品快检技术发展脉络的把握和我国技术研发布局的优化水平需促进对检测标准的国际合作互认, 积极参与到食品检测国际技术联盟中来, 为推进全球食品安全治理体系协同发展做出更多的努力。

关键词: 食品快速检测技术; 胶体金免疫层析法; 手持式拉曼光谱; 纳米传感器; 人工智能

Comparative analysis and prospective outlook on the development pathways of food rapid detection technology in China and abroad under the empowerment of artificial intelligence

LU Qian-Nan[1], WANG Hong-Kang[1], JIANG Dong-Hua[1], YU Ben[1], HUANG Yi-Wen[1], ZHAN Xiu-Ping[2], WANG Xia[1*]
(1. *Shanghai Agricultural Products Quality and Safety Center*, *Shanghai* 201708, *China*;
2. *Shanghai Agricultural Technology Extension Service Center*, *Shanghai* 201103, *China*)

收稿日期: 2025-11-12
基金项目: 上海市农业科技创新项目(2024-02-08-00-12-F00034)
第一作者: 陆倩楠(1999—), 女, 硕士, 助理农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全监测。E-mail: Luqiannan1999@163.com
***通信作者:** 王霞(1985—), 女, 硕士, 高级畜牧师, 主要研究方向为农产品质量安全监测与风险评估。E-mail: wangxia1698@163.com

ABSTRACT: Food safety issues have garnered increasing global attention, creating an urgent need for the development of rapid, accurate and on-site detection technology, and the integration of intelligent and rapid detection methods provides a crucial direction for future development. This paper aimed to systematically review the latest advances in the integration of artificial intelligence (AI) and rapid food detection technology. Using this as the core analytical perspective, it compared and examined the different roles, integration modes and driving logics of such integration in the technological development paths of China and major developed countries. A comparison of development paths between China and other countries revealed that China had established a rapid screening system suitable for grassroots regulatory use through technologies like colloidal gold multi-test card. In contrast, developed countries had focused more on high-precision biosensing technologies and established comprehensive precision detection networks that cover the entire industry chain. Rapid detection technologies in China currently faced challenges, including incomplete maturation of core material preparation processes and the operational proficiency of grassroots testing personnel not meeting the requirements of intelligent equipment. In the future, the direction of multi-source and multi-element fusion would become one of the important development trends, which was mainly reflected in the in-depth integration of AI with biosensors. For instance, the coupling of Raman spectroscopy with deep learning could not only achieve rapid and accurate detection of complex food matrices, but also derived the evolution of detection systems from a single-purpose tool into intelligent decision-making systems. Furthermore, this paper proposed that to enhance the grasp of the development trajectory of intelligent food rapid detection technology and improve rove China's technology research and development layout, it was important to strengthen international cooperation and mutual recognition of detection standards. Active participation in the International Technical Alliance for Food Detection was essential to contribute greater efforts toward advancing the global food safety governance system.

KEY WORDS: food rapid detection technology; colloidal gold immunochromatography; handheld Raman spectroscopy; nanosensors; artificial intelligence

0 引 言

全球化食品安全及检测技术发展对智能化、高效率和高精度提出迫切需求。传统微生物培养、高效液相色谱技术及聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)等方法虽可靠性高，但存在耗时、操作复杂、多组分分析难等局限。与此同时，食品产业的高质量发展催生了新需求。生物制造、人工智能(artificial intelligence, AI)等技术推动食品加工向精准化演进，如细胞培养肉、合成生物学食品等新兴食品的出现对快速检测技术提出更高要求。因此，食品快速检测技术在保障食品安全方面显得越来越重要，在不断地研究和实践中可应用的范围也越来越广泛。食品快速检测技术是指对食品进行检测且能够在短时间内出具检测结果的技术，一般分为实验室快速检测方法和现场快速检测方法[1]。实验室快速检测方法特指在实验室内完成、相比传统方法需要数天已显著提速至数小时的技术。此类方法通常结果较为准确，但依然存在设备昂贵、操作复杂、需要专业人员及难以脱离实验室环境进行现场即时筛查等局限性。与之相对，现场快速检测技术因其便捷性，可助力食品安全监管部门实现日常机动检测，提升食品安全保障水平，有效预防重大安全事件[2]。

目前，胶体金免疫层析法是快速诊断领域发展最快的技术之一，其操作简单、稳定性高、特异性强的特点，非常适合现场检测的时候使用[3]。另外，胶体金免疫层析法可以用于检测多种类型的靶标，包括但不限于抗体、抗原、激素、毒素等，应用场景覆盖医学诊断、食品安全、环境监测等多个领域[4]。手持式拉曼快速检测仪与新型纳米传感器已在国内外食品检测中得到较广泛的应用。拉曼光谱技术通过分析散射光的频率变化，快速识别食品中的微量污染物和添加剂，适合液体和固体样品分析[5]。在拉曼光谱技术的发展进程中，国外相关研发与应用起步相对更早。但我国在拉曼光谱设备方面自主的研发能力也在逐步提升，尤其是检测灵敏度和便携性这 2 项重要指标。另外，在纳米传感器领域，国外主要是以欧美为代表的国家通过纳米材料的表面修饰、功能化，制备出高灵敏度的重金属检测传感器；生物纳米传感器的研究是我国近期的热点之一，例如基于纳米金标记技术可以实现沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、日本血吸虫等食源性传染病的可视化快速检测[6−9]。此外，AI 与检测技术相融合可以推动检测技术朝着智能化的方向不断发展，使食品安全检测逐步从单

源指标检测发展到基于多源信息融合的主动性预警, 并依托大数据分析从多维度、多层次挖掘食品全链条信息, 构建全方位监管网络, 确保监管措施的科学性与精准性[10]。

为系统梳理 AI 赋能食品快速检测技术的发展路径并开展有效的跨国比较, 本文综合采用了文献综述与案例分析方法。文献检索主要基于中文知网(China National Knowledge Internet, CNKI)和英文 ScienceDirect、谷歌学术等学术数据库, 并辅以权威行业报告与政策文件, 聚焦近 10 年来的研究进展。在技术选择上, 本文以胶体金免疫层析法、手持式拉曼光谱及新型纳米传感器作为核心分析对象。这主要基于以下考量: 三者分别代表了当前快速检测领域中成熟的即时筛查工具、正在普及的现场精准检测平台以及最具前沿交叉潜力的传感技术, 且与 AI 算法的融合路径清晰、应用案例丰富。基于此技术框架, 本文构建了中外比较的视角, 重点考察中国与以美国、欧盟为代表的发达国家, 在产业基础、监管逻辑与应用场景差异下, 所形成的不同技术发展路径与融合模式, 旨在揭示其背后的驱动因素与适配逻辑。

综上所述, 随着全球食品安全治理体系趋于完善, 构建集智能化、集成化和现场化于一体的食品快速检测技术体系是食品全产业链全生命周期安全管理的基石。本文系统梳理了智能化食品快速检测技术的发展路径并对其进行了详尽比较分析, 阐释了现阶段制约我国快速检测技术落地和推广的关键短板, 并提出了跨学科协同、国际合作的双线发展建议, 以期为智能化食品快速检测技术领域的相关研究提供借鉴和参考价值。

1　国内外食品快速检测技术及 AI 联合应用进展

在食品安全问题日益受到关注的当下, 智能化食品检测技术凭借其高效、精准、便捷等优势, 成为保障食品安全的重要手段。目前, 胶体金免疫分析法、手持式拉曼快速检测仪、新型纳米传感器等技术已在国内外广泛应用, 并且通过与智能化、AI 算法相结合, 进一步拓展了应用场景, 在食品和药品安全、毒品检测、污染物预警等领域发挥着重要作用。

1.1　胶体金免疫层析法

胶体金免疫层析法又被称为胶体金免疫色谱技术, 是基于抗原抗体特异性结合, 借助胶体金进行信号放大, 实现可视化检测的一种方法[11]。它的原理是待测物借助毛细作用向前移动, 使胶体金标记试剂复溶并形成复合物, 该复合物继续迁移到固定的抗原或抗体区域时发生特异性免疫结合, 产生显色物质聚集在检测带上, 通过可目测的胶体金标记物得到直观的显色结果[12]。典型的胶体金免疫层析试纸条结构如图 1[11]所示, 主要包括加样区、结合区(含胶体金标记抗体)、检测线(T 线)、控制线(C 线)和吸水垫等部分。

胶体金免疫层析法因其操作简便、快速和成本低廉的优势, 在国外医学诊断和食品安全领域已形成较为成熟的应用体系, 更是保障食品供应链安全的重要工具。例如, 美国 Charm 公司开发的 Rosa 霉菌毒素定量检测系统, 用于检测饲料和谷物中的霉菌毒素(黄曲霉毒素、呕吐毒素/脱氧雪腐菌素、伏马菌素、赭曲霉毒素、T_2/HT_2 和玉米赤霉烯酮)以及牛奶中的黄曲霉毒素 M_1[13]。其检测结果与高效液相色谱法等标准方法无显著差异, 并被全球很多大型粮商采用。

国内对胶体金免疫层析法的应用也十分广泛。在基层农产品质量安全监管工作中, 基于该方法研制的胶体金多联卡是重要技术支撑, 可以帮助监管人员快速判断主体是否存在违法违规行为, 便于有效维护市场秩序和公共利益, 根据检测结果可以及时采取行政处罚或其他措施[14–15]。

目前胶体金免疫层析法与 AI 的融合, 正逐渐将其从定性筛查工具升级为智能定量分析系统。针对传统方法在弱阳性样本检测中灵敏度不足的瓶颈, 新型超长余辉纳米探针等材料被用于增强信号, 结合卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)对微弱光学信号进行智能增强与解析, 从而大幅提升了检测下限[16]。另外, 通过构建多色纳米颗粒阵列并借助主成分分析等机器学习方法对显色“指纹”模式进行识别, 系统能够发现未知病原变体, 实现了从“检测已知”到“预警未知”的能力跃升[17]。随着智能手机的普及, 以智能手机为载体的便携式平台将轻量化深度学习模型嵌入其中, 集成图像采集、实时分析与结果上报功能, 已在黄曲霉毒素等项目的现场检测中展现出高准确性与“端到端”的应用潜力。这些进展共同标志着该技术正朝着更智能、更灵敏、更适应复杂场景的新阶段快速发展[18]。

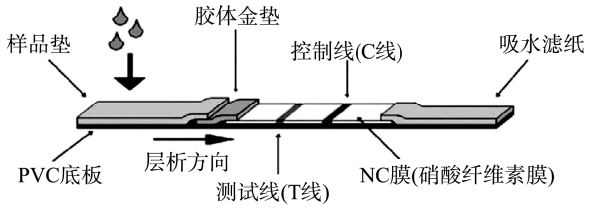


图 1　胶体金免疫层析试纸条结构

Fig.1　Structure of colloidal gold immunochromatographic test strip

1.2　手持式拉曼快速检测仪

拉曼光谱技术是一种基于光与物质分子发生非弹性散射的快速、无损分析技术。其物理基础是拉曼散射效应: 当极少部分光子与分子相互作用时, 会发生非弹性碰撞, 导致散射光子的能量发生改变, 这部分散射光即被称为拉曼散射。其能量变化值与分子的振动或转动能级差相对应, 因此直接反映了分子的特定结构信息。通过测定不同拉曼

频移处的散射光强度，便可获得能够表征物质分子“身份”的指纹光谱，从而实现对物质成分的精准鉴别与定性、定量分析[19]。整个拉曼光谱检测系统的信号产生与处理流程如图 2 所示。而手持式拉曼快速检测仪将拉曼光谱技术与便携化设计相结合，极大地提高了检测的灵活性和便捷性。

美国等发达国家在手持式拉曼快速检测仪上发展较为成熟，其技术领先性不仅体现在硬件与数据库，更在于将 AI 算法深度集成，实现了从光谱采集到智能分析的升级。目前，市面上已有几款性能较好的手持式拉曼快速检测仪产品，比较著名的厂商有安捷伦、赛默飞世尔科技和必达泰克公司等。例如，赛默飞世尔的 TruScan RM 手持式拉曼分析仪内置海量光谱库，并配备了名为 TruTools 的化学计量学软件包，允许用户在手持设备上直接运行基于主成分分析、偏最小二乘判别分析等算法构建的定制化模型，从而实现对高度相似物料或复杂混合物进行更精准的定性与定量分析。在食品进出口检验检疫环节能快速筛查未达标食品，有效保障食品安全与贸易秩序。

手持式拉曼快速检测仪与 AI 的联合应用需要硬件平台、软件系统及相应算法的协同支持。国内目前还没有较为成熟的智能化手持式拉曼快速检测仪，主要难点在于整个仪器系统的小型化、关键智能化算法和定量分析算法的研究[20]。不过，近年来，众多科研机构和企业加大投入，不断攻克技术难题。一些国内企业生产的手持式拉曼快速检测仪，在性能上已有较大突破。

学术研究进一步验证了 AI 赋能的巨大潜力。该研究测试了包括 CNN 在内的 6 种算法，在分析从纯物质到四元混合物的复杂光谱数据时，CNN 展现了最优性能，不仅对纯物质的识别准确率达到 100%，而且在处理二元混合物时，其识别准确率(64%)远超便携式拉曼光谱仪自带算法的基准水平(19%)[21]。这种“智能硬件+AI 算法”的深度融合，使手持拉曼光谱仪在食品进出口检验检疫等现场场景中，不仅能快速筛查已知风险物质，更能通过高级模型来减少未知干扰，为保障食品安全与贸易秩序提供了强大的技术支撑。

1.3 新型纳米传感器

纳米材料是一种尺寸通常在 1~100 nm 之间的材料，因其具有高的比表面积、良好的导电性和催化活性、良好的生物相容性被广泛研究和应用[22–23]。由于具有独特的多物理化学性质，纳米材料在食品检验中具有广阔的潜在应用前景。通过引入新的纳米传感器结合并嵌入物理学、化学、生物学及信息工程等学科，并进一步与 AI 算法融合，在食品检验中具有明显的优点，目前应用的主要技术有碳纳米管传感器、金属纳米粒子传感器、电化学纳米传感器和智能的贴片型传感器等。典型的纳米传感器结构如图 3 所示，主要包括识别元件、纳米材料和信号转换器等关键部分。

国外的研究团队如欧盟、美国等一直占据着纳米科技研究的领先位置，提供高质量的纳米材料包括量子点、碳纳米管、金属纳米粒子等，并应用于食品安全监控中，提出这些新型材料的功能原理。例如利用碳纳米管制造传感器，因其具有卓越的导电性、超大比表面积，以及遇到重金属离子发生较显著的电性质转变，进而测定重金属离子含量[24–25]。另外。银纳米粒子(AgNPs)因其独特的局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)特性，成为构建高灵敏度纳米传感器的关键材料。其核心优势在于，分散态与聚集态之间可逆的显色变化为实现分析物的可视化检测提供了直接手段；同时，AgNPs 还能与其他材料复合，有效增强电化学传感器的信号响应与稳定性。这些卓越的光学与电学特性，使 AgNPs 基传感器在食品快速分析与检测领域展现出巨大的应用潜力[26–28]。

我国对于新型纳米传感器的开发工作受到广泛的关注，并且近年来相关的进展越来越多，尤其是在生物纳米传感器的研究方面。例如，江南大学食品科学与工程国家重点实验室成功研制了一种基于适配体-金纳米粒子比色

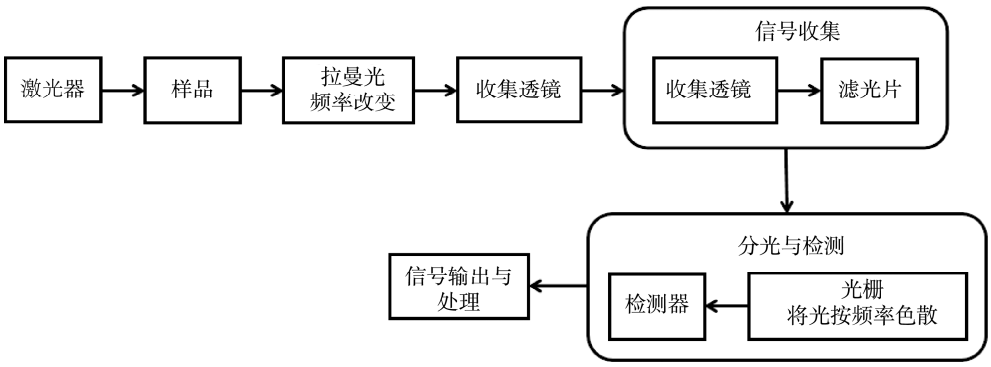


图 2 拉曼光谱检测原理与信号流程示意图

Fig.2 Schematic diagram of detection principle and signal process of Raman spectroscopy

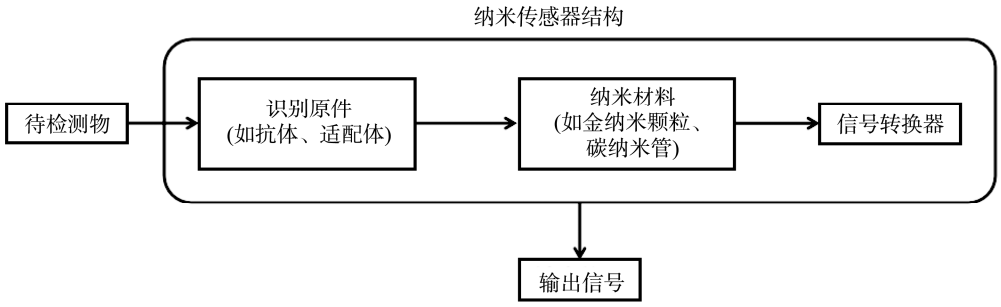


图 3　纳米传感器基本结构示意图
Fig.3　Schematic diagram of the basic structure of a nanosensor

传感器的装置, 可在 15 min 内鉴别牛奶或鸡蛋中是否含有沙门氏菌[29]。另外, 在以壳聚糖为交联剂制备金掺杂的二氧化钛复合纳米粒子修饰电化学传感器对有机磷农药对硫磷进行检测研究时发现, 金掺杂二氧化钛复合纳米粒子大的比表面积能增加对底液中对硫磷吸附量, 提高检测灵敏度, 检出限可达到 0.5 ng/mL[30]。更进一步的研究正致力于将传感器与便携式智能终端和算法分析相结合。例如, 有研究开发了用于检测沙门氏菌的微流体比色生物传感器, 该传感器最终利用智能手机对催化产生的颜色产物进行拍照, 并使用 ImageJ 软件分析图像饱和度以定量细菌浓度[31], 这体现了传感器信号处理向数字化、智能化发展的趋势。

由于纳米材料独到的优越的物理、化学特性, 使它在食品检测的应用领域具备广阔的发展空间和应用前景。当前, AI 与纳米传感的深度融合正成为重要发展方向。未来趋势是深度融合定制化纳米材料与专用轻量化 AI 模型, 开发出兼具超高灵敏度、多目标物筛查能力和现场智能决策功能的新一代快速检测工具。

1.4　智能化和 AI 算法的应用

智能化和 AI 算法与食品检测技术相融合可以显著提升其能力与应用价值。在食品安全领域, AI 算法不仅能精准检测污染物, 还能分析食品成分, 从而保障食品安全[32]。国内外在智能化食品污染物防控上的主要技术应用侧重点有所不同。从国外情况来看, 主要倾向于多源数据驱动的预警体系建设。例如在数据驱动的食品安全预警方面, 欧盟的实践建立在官方科学机构的系统性战略规划之上。欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)于 2021 年启动了“风险评估中 AI 用于证据管理的行动路线图”项目, 旨在到2027年, 通过将AI方法与专家知识深度结合, 以提升风险评估的证据广度和可信度, 这标志着其构建‘下一代’风险评估模型的明确战略。其理念并非简单收集数据, 而是系统性地整合多源信息进行前瞻预警。而美国更看重的是结合 AI 技术将一些先进检测仪器(如拉曼光谱仪和质谱仪等)的软硬件系统结合起来进行集成开发, 再结合深度学习的方法, 提高对于微量污染物的识别精度。

国内智能食品检测技术的发展应用具有明显的政策导向性, 从推广应用上看也是以部分地区大规模推进为主, 政府起着主导的作用, 牵头组建覆盖全国范围的食品安全风险监测网络, 把分散零碎的数据汇集起来, 通过 AI 算法, 建立预警模型, 建设 AI 预警平台, 目前已经在几个重点农产品产区进行了试点应用工作。例如, 根据国家市场监管总局公布浙江省绍兴市 2024 年全年农产品快速检测量已达 237 万批次, 历史累计数据更超过 1000 万批次, 高效筛查问题农产品以及杭州市西湖区已在全区所有农贸市场实现食用农产品胶体金快速检测技术 100%覆盖, 2025 年上半年累计检测超过 12.6 万批次。这种‘技术全覆盖’模式显著提升了筛查效率。另外, 河北省邯郸市构建的智慧监管平台, 集成地理信息系统(geographic information system, GIS)、大数据分析和 AI 决策引擎, 实现了风险的预测预警和执法监管的标准化[33]。

总之, 中外在食品快速检测技术的应用场景上因监管重心、产业基础不同而各有侧重。为更清晰、系统地呈现这一差异化发展路径, 特别是其在智能化融合方面的关键区别, 现将核心对比总结如下(表 1)。

综上所述, 胶体金免疫层析法、手持式拉曼快速检测仪、新型纳米传感器等智能食品快速检测技术在国内外均取得了显著的发展成果, 并且检测所得到的数据通过与智能化、AI 算法的深度融合, 在保障食品安全、提升食品质量等方面发挥着越来越重要的作用。

2　中外食品快速检测技术应用场景对比

在食品检测领域, 国内外因产业结构、技术发展水平、监管模式等因素不同, 呈现出各具特色的应用场景。本文主要对比了国内外2种应用较多的食品快速检测技术, 国内胶体金多联卡在基层农产品质量安全监管中发挥了重要作用, 国外多种生物传感器则成为现场检测食品污染的利器, 两者对比鲜明, 为食品检测技术发展提供了多元视角。

表 1 国内外主要食品快速检测技术侧重点与 AI 融合特点

Table 1 Focus areas and AI integration characteristics of major food rapid detection technologies in China and abroad

技术名称	核心性能优势	国内侧重	国外侧重	AI 融合的核心特点	参考文献
胶体金免疫层析法	速度快、成本低、操作极简	基层筛查的规模与效率	检测方法的准确性与合规性	与智能手机平台结合，通过图像识别和轻量模型实现结果的自动判读、定量与数据上报	[11–18]
手持式拉曼光谱	无损、快速、可定性定量	核心技术攻关与硬件性能提升	系统集成与 AI 系统结合的商业化产品	应用深度学习等算法，提升对复杂基质光谱的识别、解析与定量分析能力	[19–21]
新型纳米传感器	超高灵敏度、实时潜力	应用导向的开发与系统集成	原理驱动的基础材料与创新	将传感器信号与智能终端结合，实现信号的数字化读取与初步分析	[22–31]

2.1 国内胶体金多联卡在基层农产品质量安全监管中的应用

胶体金免疫层析法以胶体金作为示踪标记物，通过抗原-抗体特异性结合反应，实现对目标物质的快速检测。胶体金多联卡是在此基础上发出的集成化检测工具，可同时检测多种目标物，它在我国的应用已经标准化和体系化。以2025年11月市场监管总局最新发布的食品快速检测方法为例，在 18 项标准中，胶体金免疫层析法占了 15 项，覆盖从蔬菜水果到畜禽肉蛋奶的多种基质，充分证明了该技术在我国食品安全快速检测体系中的主流地位和应用深度。

我国作为农业大国，农产品生产主体分散，基层监管面临点多、面广、线长的难题。胶体金多联卡操作简便、检测快速的特点，使其在农产品质量安全监管领域具有广泛的应用范围，单张多联卡可实现 4~8 种目标物的同步检测[34–35]。在操作方式上，基层检测人员无需复杂的专业培训，只需将农产品样本处理后滴加到检测卡的加样孔，等待数分钟，即可通过观察检测线和控制线的显色情况判断检测结果。例如在果蔬种植产区，监管人员使用农药残留胶体金多联卡，可在田间地头快速检测果蔬中的有机磷、氨基甲酸酯等多种农药残留，及时发现农药残留超标的产品，避免流入市场。

从应用规模来看，胶体金多联卡检测已被我国多地纳入基层农产品质量安全例行监测体系。例如，根据《中国食品安全报》在 2024 年 5 月的报道，浙江嘉兴南湖区 2024 年下发胶体金速测试剂卡 3000 份，同步配备便携式检测仪器。另外，在生猪养殖环节，瘦肉精胶体金多联卡可同时检测克伦特罗、莱克多巴胺等多种违禁药物，基层动物检疫人员在养殖场抽检时，通过快速检测，能及时排查出问题生猪，有效保障了畜产品质量安全[36]。同时，我国持续优化该技术以提升检测灵敏度与准确性，当前部分产品检出限已达到国际先进水平。

2.2 国外-生物传感技术为主导的快速检测技术的应用

在欧美、日本等发达国家和地区，食品快速检测技术以高灵敏度、自动化、多靶标检测为核心发展方向，其中生物传感器技术占据重要地位。相较于国内广泛使用的胶体金免疫层析法，国外生物传感器在食品安全监测中的应用更加多样化，涵盖微生物污染、毒素残留、重金属检测等多个领域，其中有些技术在政府监管、企业自检和科研机构中得到应用。

生物传感器作为融合生物活性物质识别元件与物理或化学换能器组成的精密检测装置，能够实现对目标物质的快速、灵敏探测[37]。美国、日本等发达国家在此领域投入大量资源，深入开展基础研究，在酶传感器、免疫传感器、细胞传感器等细分方向成果斐然。例如，国际团队研发的双生物传感器可任意鉴定新型分泌信号肽和有效筛选精密发酵生产菌株[38]。一些企业还将先进研究成果转化为高精度产品，广泛应用于食品质量把控与安全检测等环节。

在食品安全监管严格的欧美国家，生物传感器技术因其快速、灵敏等优势，已成为适配进口食品检验要求的重要工具。例如，表面等离子共振(surface plasmon resonance，SPR)传感器被广泛用于检测食品中的过敏原、兽药残留和真菌毒素等。其高灵敏度和实时监测能力使其成为欧盟官方检测的核心技术之一，尤其是 SPR 与荧光标记结合的双模检测策略，可同时筛查多种有机磷农药[39]。

美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration，FDA)在 2021—2025 年食品安全现代化法案(Food Safety Modernization Act, FSMA)中强调，快速、精准的检测技术是预防食源性疾病的关键。其中，电化学生物传感器因其便携性和低成本已被应用于肉类、乳制品、饮用水等多种食品的微生物检测[40]。例如，美国农业部开发的电化学适配体传感器可在 3 h 内检测牛肉中的大肠杆菌 O157:H7，并通过智能手机应用程序(application，APP)实现现场数据上传。该技术不仅快速，更同时具备高灵敏度、良好的批间一致性与卓越的特异性。其检出限可达百万分之一至十亿分之一级别，关键参数的相对标准偏差可控制在 3%以内，并且能够显著区分目标物与干扰物的信号响应，统计检验的 P 小于 0.001，从而确保了检测结果的准确与可靠。此外，该技术已通过 FDA 的“快速通道”审核，被纳入 FSMA 推荐的检测方法库[41]。

胶体金多联卡与生物传感器在食品检测领域使用上

偏重有所不同。胶体金多联卡的价格便宜、方便快捷, 适合在基层用于大范围的快速筛查; 而生物传感器灵敏度高、集成性强, 适用于食品贸易以及公共卫生等众多领域的检测, 不同国家产业发展程度及监管侧重点不同, 在各自国家运用领域也不尽相同, 我国强调源头治理, 关注的点多在基层, 而有些国家已经比较成熟, 会更加注重智能化的检测技术, 并且更多考虑检测的功能化和集成化, 从而体现不同的技术发展路径。

3　我国智能化食品检测技术发展的核心挑战

在智能化食品检测技术领域, 国内外发展呈现出显著差异, 面临诸多核心挑战。国外在生物传感器、纳米材料、分子印迹技术等前沿基础研究上优势明显, 而国内在产业化进程中, 受核心材料国产化率低与基层操作人员技术培训不足等因素制约, 发展步伐受阻。这些问题亟待解决, 以推动我国智能化食品检测技术迈向新高度。

3.1　核心材料国产化率低, 依赖进口

在智能化食品检测技术产业化进程中, 核心材料供应至关重要。国内在纳米传感材料、胶体金/抗体等关键材料的自主研发方面仍存在瓶颈, 一定程度上依赖进口。例如在胶体金制备中, 由于对反应条件的控制尚不完善, 容易出现颗粒聚集或粒径分布不均, 影响检测的一致性和准确性。相比之下, 部分国际企业通过优化制备与纯化工艺, 已实现稳定的规模化生产, 有效保障了材料质量和检测可靠性。尽管国内也有相关研究和企业致力于改进, 但在材料稳定性、批量生产能力及成本控制方面仍与国外存在差距, 这制约了国内检测设备厂商的应用, 进而影响整体产品的性能与竞争力。

然而, 核心材料的瓶颈不只是胶体金方面。在关键纳米传感材料方面, 尽管国内基础研究越来越多, 但在应用于高性能传感器时, 国产材料在批次间的性能一致性、长期稳定性等方面与国际顶尖产品存在差距。这使得国内高端检测设备的研发与生产, 仍倾向于采购国外公司提供的成熟、可靠的专用纳米材料, 形成了上游供给依赖。其次, 国内在高亲和力抗体等核心生物识别元件的规模化生产能力依然薄弱, 导致对进口产品的持续依赖。目前, 国内高端诊断抗体市场大部分份额仍被罗氏、雅培等国际巨头占据。因此, 材料国产化率低实质是反映了我国在从实验室创新到稳定、可靠的工业化商品转化能力上的短板。

3.2　基层操作人员技术培训不足, 智能化设备落地困难

智能化食品检测设备涉及多种技术互相融合, 对操作人员专业知识与技能要求较高。但在我国基层食品检测机构和企业中, 操作人员技术培训普遍不足。一方面, 虽然国家近年来不断加大对食品安全基础设施的投入, 但基层特别是县乡一级检测机构的技术装备水平仍相对滞后, 许多地区尚未配备必要的数字化设备[42]; 另一方面, 基层检测人员接受系统性技术培训的机会较少, 对新型检测设备的操作原理、数据处理方法掌握不足, 难以适应技术升级需求[43]。例如, 使用手持式拉曼快速检测仪时, 可能存在部分人员因不熟悉设备参数设置与数据处理软件, 导致检测结果不准或无法有效利用数据发现问题。这使得许多智能化检测设备在基层难以有效应用, 阻碍了我国智能化食品检测技术在基层的推广普及。

国内外在智能化食品检测技术发展上差距显著, 我国面临技术基础研究薄弱与产业化瓶颈的双重挑战。为缩小差距, 我国需加大前沿领域基础研究投入, 提高核心材料国产化水平, 同时, 食品企业和检测机构应加强对在职人员的培训, 通过开展技术讲座、培训课程等方式, 提高员工的智能化检测技术水平[44]。

4　智能化食品检测技术创新研究方向与战略建议

在全球对食品安全高度关注的背景下, 智能化食品检测技术的发展至关重要。基于前文对技术进展、中外对比及面临挑战的分析, 本章旨在提出推动智能化食品检测技术发展的创新方向与系统性战略。其核心目标是构建一个多源信息融合、AI 驱动、决策支持闭环的未来快速检测体系。该体系的理想架构可概括为以下三层模型(图 4)。

如图 4 所示, 多源信号采集层是感知基础, AI 智能分析核心层是系统大脑, 智能决策与应用输出层是价值终点。以下将围绕这一架构, 首先探讨实现其更高智能化水平的关键技术融合方向, 继而提出促进该体系落地与协同发展的国际合作与标准共建路径。

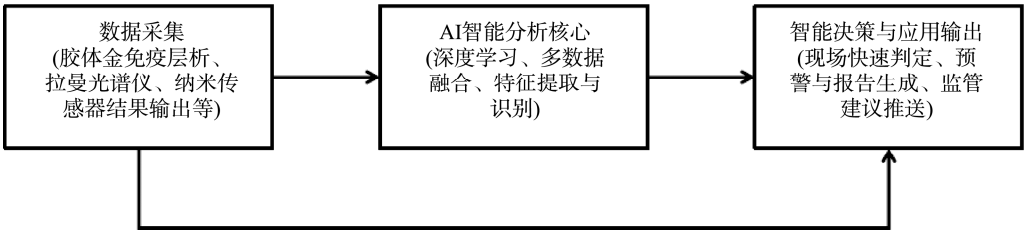


图 4　基于 AI 的快速食品检测系统的核心架构

Fig.4　Core architecture of AI-based rapid food inspection system

4.1 未来技术发展方向—多技术联用，迈向更高智能化

4.1.1 AI 与生物传感器的联合应用

生物传感器与 AI、机器学习算法的深度融合，为数据解读和预测分析开辟了全新可能，为实现精准诊断铺平了道路[45–46]。当前，智能手机兼具生物传感器载体与移动终端的双重属性，其在医疗、生物安全、环境监测及食品安全领域的应用已被广泛报道。相较于专业试纸条读卡仪，智能手机不仅更经济、便携，还普遍配备高分辨率相机，这使其能够替代传统读卡仪，实现对试纸条检测结果的定性与定量判读，在现场快速检测分析领域具备显著优势与巨大应用潜力[47]。另外，AI 驱动的图像识别、深度学习等技术，大幅提升复杂基质下检测的准确性与鲁棒性，强化智能化水平；新型功能材料与创新传感策略的应用，实现更高灵敏度检测。例如，XU 等[48]利用机器学习技术，开发出一款便携式双输出生物传感器。该传感器通过将 β-乳球蛋白(beta-lactoglobulin, β-LG)的特异性响应信号，校准并映射为手机 APP 中易于读取的血糖浓度单位，成功实现了对目标物的实时、定量检测，为便携式生物传感技术的发展提供了新范式。此外，多源信息融合与智能预警系统的发展，推动了食品安全监管从被动检测向主动预警转型。例如，一些地方构建的智慧监管平台，通过整合生产、检测与环境数据，并运用机器学习模型进行风险预测，显著提升了监管的预见性与响应速度[28]。这些进步意味着，未来人们有望通过智能手机，随时随地、快速准确地完成食品品质、安全与真伪的全面评估，重塑食品安全管控的便捷性与全面性。

4.1.2 典型融合案例：拉曼光谱与深度学习的结合

作为 AI 与生物传感技术融合的典型代表，拉曼光谱技术与 AI 的结合，尤其表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)和深度学习模型的结合，使得对食品中微量成分的检测有极大的革新意义，可快速、无损地识别出食品内的各种微量化学物质，再由 AI 从海量的光谱数据中挖掘更多信息，达到更智能、更准确、更灵敏的检测效果，适用于复杂食品基质及多组分共存的体系内微量成分的定性、定量检测分析。在具体应用研究中，佛山大学 WANG 等[49]将 SERS 与深度学习模型相结合，实现了花生油中黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, AFB_1)的快速、无标记且高灵敏度检测，该研究中采用银包覆金纳米颗粒(Au@AgNPs)作为 SERS 基底材料以增强检测效果。研究显示，该方法与国家标准检测方法高效液相色谱-串联质谱法的比对结果无显著差异，并且其检出限可达 0.31 μg/kg，低于中国与欧盟规定的最大残留限量，证实该方法的准确性与可靠性。另外，有研究基于多种神经网络模型得到拉曼光谱的表示后，提出一种基于神经网络集成学习模型来对不同模型建模的结果进行融合[50–51]。集成学习模型通过融合不同模型的结果，能够有效提升拉曼光谱定量分析的性能。实验表明，该集成方法相较于传统支持向量回归模型，平均绝对误差(mean absolute error, MAE)可降低 44%至 53%；即便与单一的 CNN 模型相比，MAE 也进一步降低了 12%至 32%。此外，为了更充分地挖掘 SERS 光谱中的深层特征，胡珊等[52]的研究还开创了全新的光谱数据分析方法，即将一维的拉曼光谱数据转换为二维数据[51]。这种数据形态的转变，为使用更为强大的二维深度学习模型(如图像识别领域常用的卷积神经网络)进行处理奠定了基础，从而能够更有效地识别出病原真菌等目标物的独特“光谱指纹”。未来，随着多模态数据融合与自驱动 AI 模型的发展，拉曼光谱技术将不再局限于单一的检测工具，而是演进为能够自主进行实验设计、实时优化检测流程、并给出全面质量评估报告的智能决策系统，最终在食品工业中实现从“事后分析”到“事前预警”的范式革命。

4.2 国际合作与标准共建—促进全球食品安全检测协同发展

4.2.1 推动检测标准互认

不同国家检测标准存在差异，同时农产品质量安全监管方式存在差异，导致了食品农产品绿色通道不通畅，给食品农产品贸易带来了阻碍[53]。另外，有些国家或地区为了保护本国利益，将农药残留作为农产品国际贸易的技术壁垒，尤其是发达国家会制定更为严格的农药残留限量标准[54]。推动食品贸易自由化，保障全球食品安全，应加快推进各国检测标准互认进程。有关国家政府、国际组织及行业组织要加强沟通，联合建立国际检测标准协调机构，开展双边或多方比对试验，比较分析各标准的科学性和合理性，以保证食品安全的前提下，逐步统一检测指标及方法。例如，在国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)下由各国一起制定食品检测国际标准，协调各国标准制定工作，使各国标准向国际标准靠近，便于检测结果的互认，减少贸易摩擦，促进全球食品产业链的协调发展等，但是这些需要各国付出努力才能取得成果，是需要一个长期，逐步实施并不断积累的过程。

4.2.2 参与国际技术联盟

国际技术联盟集结了世界各地的精英人士和尖端科技，我国可以参与到国际食品检测技术联盟中，在这一平台上同国内的科研机构、企业一起与世界各国的研究者、企业通力合作研究智能化食品检测关键技术(如新式传感器研发[55]、高效数据处理算法等)。同时在我国的研发过程中，学习国外先进研发的经验和技术管理的方法，使得我国的相关技术水平得到提高，创新能力得到增强。我国还可以把自己的优势技术以及科研成果与世界共享，提高我

国在国际食品检测技术领域的话语权, 增强影响力, 为“一带一路”国家食品检测能力验证计划出谋划策, 让实验室检验数据更加统一和等效, 在食品安全部门检验结果之间相互参照的基础上增加食品安全部门间的贸易互信度, 增强消费者质量安全的信心。参与国际技术联盟有利于开展技术交流与培养人才[56], 利用国际技术联盟平台开展人员互访、参加国际技术交流等活动来培养拥有国际视野的食品检测技术人员, 为我国后续的智能化食品检测技术研究持续发展提供技术支撑。

综上所述, 明确未来技术发展方向, 加强国际合作与标准共建, 对于推动智能化食品检测技术进步, 保障全球食品安全具有重要意义。我国应积极行动, 在技术创新和国际合作中发挥更大作用, 为全球食品安全事业贡献力量。

5　结束语

在新兴食品不断涌现、全球化供应链日趋复杂的当下, 智能化快速检测技术已成为守护食品安全的关键支撑。不过, 不同国家的产业基础、监管重点和技术积累存在明显差异, 这也让各国在快速检测技术的发展路径与落地实践中, 走出了不同的道路。

通过跨国对比发现, 技术路线的选择, 本质上是对本土监管需求的精准适配, 而非简单的技术优劣比拼。从现实情况来看, 欧美国家凭借成熟的精密制造产业和深厚的生物技术积淀, 更倾向于构建覆盖全产业链的高精度传感监测网络, 追求检测数据的极致精准; 而中国则立足“源头治理”的监管实际——基层检测场景分散、检测需求量大、操作人员专业背景不一, 因此成功探索出以胶体金多联卡为代表的技术体系, 以契合基层大范围快速筛查的核心需求。对中国而言, 当前的核心任务不在于盲目对标他国的技术路径, 而在于走出一条具有自身特色的协同发展之路: 依托庞大的基层筛查网络积累实践经验, 再以海量应用数据为驱动力, 通过 AI 的赋能价值, 反哺高精尖技术的迭代升级。比如, 推动 AI 与拉曼光谱、生物传感器等技术深度融合, 不仅能实现从单一指标检测到多维度风险图谱解析的检测思路转变, 更能将快速检测过程中产生的海量数据, 转化为食品安全风险预警的宝贵资源。

展望未来, 智能化食品快速检测技术的发展将更依赖于跨学科的创新。其核心在于, 将纳米材料、生物工程等提供的精确检测能力, 与 AI 提供的强大分析能力的结合。因此, 我国可以在巩固现有规模化筛查优势的基础上, 着力加强对核心传感材料、专用 AI 芯片与算法的研发投入, 并积极参与 AI 判读标准与国际数据协议的构建。在即将到来的智能感知时代里构建起一个可以兼具广度、速度与深度的国家食品安全智能防护体系。

参考文献

[1] 王辉. 食品快速检测技术的应用概况[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2767–2774.
WANG H. Application overview of food rapid detection technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(11): 2767–2774.

[2] 李若良. 基于快速检测的食品安全在线智能化检测技术研究[J]. 食品安全导刊, 2022(34): 144–147.
LI RL. Research on online intelligent detection technology for food safety based on rapid detection [J]. China Food Safety Magazine, 2022(34): 144–147.

[3] 李晓婷. 荧光免疫试条定量检测仪的设计与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
LI XT. Design and development of a quantitative fluorescent immunoassay strip reader [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[4] 张吉. 胶体金免疫层析技术在农产品质量安全检测中的应用研究[J]. 现代化农业, 2025(9): 78–81.
ZHANG J. Application research of colloidal gold immunochromatography technology in quality and safety detection of agricultural products [J]. Modernizing Agriculture, 2025(9): 78–81.

[5] 覃浩, 鲍蕾. 食品安全快速检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测报, 2024, 15(24): 3–9.
QIN H, BAO L. Research progress in rapid detection methods for food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(24): 3–9.

[6] 马小媛, 赵晨琛, 刘颖, 等. 金纳米材料在沙门氏菌 SERS 检测中的应用[C]. 中国: 中国食品科学技术学会, 2014.
MA XY, ZHAO CC, LIU Y, *et al*. Application of gold nanomaterials in SERS detection of Salmonella [C]. China: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014.

[7] 袁京磊, 俞晔, 李灿, 等. 基于纳米金标记的金黄色葡萄球菌可视化检测方法研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(4): 1100–1108.
YYAN JL, YU Y, LI C, *et al*. Research on visual detection method of staphylococcus aureus based on gold nanoparticle labeling [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 4(4): 1100–1108.

[8] 曹颖, 李家萌, 赵媛, 等. 纳米金标记技术应用于病原生物检测的研究[J]. 中国病原生物学杂志, 2016, 11(3): 272–275.
CAO Y, LI JM, ZHAO Y, *et al*. Research on the application of gold nanoparticle labeling technology in pathogen detection [J]. Journal of Pathogen Biology, 2016, 11(3): 272–275.

[9] 廉晓丽, 杨毅梅. 纳米金标记技术在常见食源性传染病检测中的研究现状[J]. 中国病原生物学杂志, 2018, 13(7): 800–803.
LIAN XL, YANG YM. Research status of gold nanoparticle labeling technology in detection of common foodborne infectious diseases [J]. Journal of Pathogen Biology, 2018, 13(7): 800–803.

[10] 刘春楠. 食品安全智能监管的挑战与应对[J]. 食品安全导刊, 2025(14): 34–37.
LIU CN. Challenges and countermeasures of intelligent supervision for food safety [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(14): 34–37.

[11] 谢桂芳, 赖飞, 王艺蓉, 等. 胶体金免疫层析法在食品快速检测中的应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2023(32): 181–185.
XIE GF, LAI F, WANG YR, *et al*. Research progress on the application of colloidal gold immunochromatography in food rapid detection [J]. Journal of Food Safety Guide, 2023(32): 181–185.

[12] 田飞焱, 欧阳敏, 刘荭, 等. 免疫胶体金技术及其在水生动物疫病诊断上的应用[J]. 江西水产科技, 2009(3): 6–9.
TIAN FY, OUYANG M, LIU H, *et al*. Immunocolloidal gold technology and its application in diagnosis of aquatic animal diseases [J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2009(3): 6–9.

[13] HARM SCIENCES. Rosa lateral flow [EB/OL]. (2023-09-28) [2024-06-20]. https://www.charm.com/products/test-and-kits/mycotoxin-tests/rosa-lateral-flow/

[14] 秦丽, 张凤娣, 高素珍, 等. 胶体金多联卡在基层农产品质量安全监管中的应用——以余杭区为例[J]. 农业与技术, 2024, 44(15): 169–172.
QIN L, ZHANG FD, GAO SZ, *et al*. Application of colloidal gold multi-test card in grassroots agricultural product quality and safety supervision: A case study of Yuhang district [J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(15): 169–172.

[15] 郭磊. 农残速测技术在基层农产品质量安全检测中的应用[J]. 广东蚕业, 2024, 58(2): 62–64.
GUO L. Application of pesticide residue rapid detection technology in grassroots agricultural product quality and safety detection [J]. Guangdong Sericulture, 2024, 58(2): 62–64.

[16] SUN Q, FENG S, XU H, *et al*. A smartphone-integrated deep learning strategy-assisted rapid detection system for monitoring dual-modal immunochromatographic assay [J]. Talanta, 2025, 282: 127043.

[17] ZHANG Y, FANG Z, FU Y, *et al*. Long-afterglow image enhancement using deep learning in rapid and sensitive lateral flow immunoassay [Z]. Elsevier BV, 2024.

[18] MATA-CALIDONIO J, MADDOX AI, HAMAD-SCHIFFERLI K. A novel immunoassay technique using principal component analysis for enhanced detection of emerging viral variants [J]. Lab on a Chip, 2024, 24(16): 3985–3995.

[19] 徐晓锋, 吉雯雯. 基于拉曼光谱的食品农药残留快检技术应用难点与改进策略研究[J]. 食品安全导刊, 2025, 19(23): 177–179.
XU XF, JI WW. Research on the application challenges and improvement strategies of rapid detection technology for food pesticide residues based on Raman spectroscopy [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025, 19(23): 177–179.

[20] 倪立腾. 手持式拉曼快检仪关键技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
NI LT. Research on key technologies of handheld Raman rapid detector [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.

[21] COOMAN T, TREJOS T, ROMERO AH, *et al*. Implementing machine learning for the identification and classification of compound and mixtures in portable Raman instruments [J]. Chemical Physics Letters, 2022, 787: 139283.

[22] 吴鸿敏, 傅骏青, 王文特, 等. 纳米材料电化学传感器在食品检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(14): 4708–4713.
WU HM, FU JQ, WANG WT, *et al*. Application of nanomaterial electrochemical sensors in food detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(14): 4708–4713.

[23] 丁贝贝, 李传宝, 霍燕芳. 纳米材料增强型电化学生物传感器在农药残留检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 84–93.
DING BB, LI CB, HUO YF. Research progress on application of nanomaterial-enhanced electrochemical biosensors in pesticide residue detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 84–93.

[24] RAWAT S, PHOGAT P, SHREYA, *et al*. Advances in nanomaterial-based biosensors: Innovations, challenges, and emerging applications [J]. Materials Today Communications, 2025, 48: 113334.

[25] MEHROTRA P. Biosensors and their applications–A review [J]. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research, 2016, 6(2): 153–159.

[26] BEREDA G. Emerging technologies and strategies for food contaminant detection and control: A global narrative review [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148: 108303.

[27] CARVALHO F, GEORGE J, SHEIKH HMA, *et al*. Advances in screening, detection and enumeration of *Escherichia coli* using nanotechnology-based methods: A review [J]. Journal of Biomedical Nanotechnology, 2018, 14(5): 829–846.

[28] CASTAING-CORDIER T, LADROUE V, BESACIER F, *et al*. High-field and benchtop NMR spectroscopy for the characterization of new psychoactive substances [J]. Forensic Science International, 2021, 321: 110718.

[29] HE Y, YUAN J, KHAN IM, *et al*. Research progress of aptasensor technology in the detection of foodborne pathogens [J]. Food Control, 2023, 153: 109891.

[30] 鲁丁强, 庞广昌. 电化学纳米免疫传感器在食品安全检测中的应用展望[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 6–10.
LU DQ, PANG GC. Application prospects of electrochemical nanoimmunosensors in food safety detection [J]. Food Science, 2014, 35(8): 6–10.

[31] YUAN J, WANG L, DUAN H, *et al*. A press-actuated slidable microfluidic colorimetric biosensor for *Salmonella* detection utilizing nickel mesh sheet and MIL-88@Pd/Pt nanoparticles [J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142343.

[32] BALTA I, LEMON J, POPESCU CA, *et al*. Food safety–the transition to artificial intelligence (AI) modus operandi [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105278.

[33] 王慎强, 赵春辉. 数“智”赋能 构建立体化数字安全屏障[N]. 中国市场监管报. 2025-08-16 (A2).
WANG SQ, ZHAO CH. Digital “intelligence” empowerment: Building a three-dimensional digital security barrier [N]. China Market Regulatory News, 2025-08-16 (A2).

[34] 定翔雁, 魏梓玉, 谢迪佳, 等. 基于胶体金多联卡的农产品质量安全监管研究[J]. 食品安全导刊, 2025(1): 21–23.
DING XY, WEI ZY, XIE DJ, *et al*. Research on agricultural product quality and safety supervision based on colloidal gold multi-test card [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(1): 21–23.

[35] 金雅慧, 宋文明, 陈科宇, 等. 果蔬中农药残留快速检测规范化操作初探——以胶体金快速检测法为例[J]. 农业与技术, 2024, 44(4): 37–39.
JIN YH, SONG WM, CHEN KY, *et al*. Preliminary study on standardized operation of rapid detection of pesticide residues in fruits and vegetables: Taking colloidal gold rapid detection method as an example [J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(4): 37–39.

[36] 柳海燕, 侯景, 曾学斌. 瘦肉精胶体金快速检测二联卡的研制[J]. 现代食品, 2019(7): 133–136, 142.
LIU HY, HOU J, ZENG XB. Development of a colloidal gold rapid detection dual-test card for clenbuterol [J]. Modern Food, 2019(7): 133–136, 142.

[37] 王丽江. 结合纳米技术的细菌检测分子生物传感器的研究[D]. 杭州:

浙江大学, 2007.
WANG LJ. Research on molecular biosensors for bacterial detection combining nanotechnology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[38] HARTLEY CJ, KARIMIAN P, JOHNSTON E, *et al*. Use of a dual biosensor for identification of novel secretion signal peptides and efficient screening of precision fermentation production strains [J]. Elsevier BV, 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5119688

[39] GAREFALAKI V, INSTITUTE of BIOCHEMISTRY and CELL BIOLOGY-NATIONAL RESEARCH COUNCIL (IBBC-CNR), ITALY, MANCO G, *et al*. Use of biosensors for rapid and sensitive detection of pesticides in food samples for food safety chemical risk assessment [J]. EFSA Journal, 2022, 20. DOI: 10.2903/j.efsa.2022.e200922

[40] 马学龙, 解金鑫, 姜楠. 食品安全快速检测智能化系统的设计及应用[J]. 质量与认证, 2024(6): 45–48.
MA XL, XIE JX, JIANG N. Design and application of intelligent system for food safety rapid detection [J]. China Quality Certification, 2024(6): 45–48.

[41] DIAZ-AMAYA S, LIN LK, DININO RE, *et al*. Inkjet printed electrochemical aptasensor for detection of Hg^{2+} in organic solvents [J]. Electrochimica Acta, 2019, 316: 33–42.

[42] 肖常国, 陈菊. 信息化技术提升食品检验检测时效性的困境与对策研究[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 159–161.
XIAO CG, CHEN J. Research on dilemmas and countermeasures of information technology in improving the timeliness of food inspection and detection [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(13): 159–161.

[43] 韩宇. 食品检验检测技术在基层应用中的挑战与对策[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 121–123.
HAN Y. Challenges and countermeasures of food inspection and detection technology in grassroots application [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(13): 121–123.

[44] 裴锋, 王焕芹, 黄平, 等. 食品检测智能化发展对食品质量提升的研究[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 180–182.
PEI F, WANG HQ, HUANG P, *et al*. Research on the impact of intelligent development of food detection on food quality improvement [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(13): 180–182.

[45] UDHANI R, KOTHARI C, KUMAR S. Biosensors and lateral flow immunoassays: Current state and future prospects [J]. Clinica Chimica Acta, 2025, 574: 120272.

[46] NARESH V, LEE N. A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1109.

[47] 李辉, 盈盈, 曹振, 等. 基于智能手机拍照判读的侧流免疫层析快速检测技术研究进展[J]. 分析化学, 2022, 50(1): 1–11.
LI H, YING Y, CAO Z, *et al*. Research progress in lateral flow immunochromatographic rapid detection technology based on smartphone photo interpretation [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(1): 1–11.

[48] XU J, LUO X, DUAN M, *et al*. Machine learning-assisted portable dual-readout biosensor for visual detection of milk allergen [Z]. 2025.

[49] WANG D, AHMAD T, KHALID AS, *et al*. Rapid and label-free detection of aflatoxin B_1 in peanut oil using surface-enhanced Raman spectroscopy combined with deep learning models [J]. LWT, 2025, 223: 117738.

[50] 范广明. 结合集成学习的拉曼光谱定量分析[J]. 福建电脑, 2022, 38(4): 1–6.
FAN GM. Raman spectroscopy quantitative analysis combined with ensemble learning [J]. Journal of Fujian Computer, 2022, 38(4): 1–6.

[51] 张旭, 于明鑫, 祝连庆, 等. 基于全光衍射深度神经网络的矿物拉曼光谱识别方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 168–175.
ZHANG X, YU MX, ZHU LQ, *et al*. Mineral Raman spectroscopy identification method based on all-optical diffractive deep neural network [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 168–175.

[52] 胡珊, 马天一, 顾锋, 等. 基于人工智能分析白念珠菌的表面增强拉曼光谱[J]. 徐州医科大学学报, 2023, 43(10): 739–743.
HU S, MA TY, GU F, *et al*. Analysis of Candida albicans using surface-enhanced Raman spectroscopy based on artificial intelligence [J]. Journal of Xuzhou Medical University, 2023, 43(10): 739–743.

[53] 王远东, 华从伶, 刘善民, 等. 中国与“一带一路”沿线国家食品农产品贸易现状及对策研究[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(6): 87–90.
WANG YD, HUA CL, LIU SM, *et al*. Research on the current situation and countermeasures of food and agricultural trade between China and “belt and road” countries [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2019, 55(6): 87–90.

[54] 张艳梅, 李晓贝, 鄂恒超, 等. 中国食用菌出口现状及国内外食用菌中农药残留限量标准对比分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 145–163.
ZHANG YM, LI XB, E HC, *et al*. Current situation of Chinese edible fungus export and comparative analysis of pesticide residue limit standards for edible fungi at home and abroad [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 145–163.

[55] 刁鹏, 高立兵. 无人机遥感在作物病虫害监测中的应用方法与研究进展[J]. 南方农机, 2022, 53(16): 8–13.
DIAO P, GAO LB. Application methods and research progress of UAV remote sensing in crop pest and disease monitoring [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(16): 8–13.

[56] 夏玉荣, 陆涓. 优势学科与国际化人才培养路径[J]. 高等农业教育, 2015(7): 26–29.
XIA YR, LU J. Advantageous disciplines and cultivation path of international talents [J]. Higher Agricultural Education, 2015(7): 26–29.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)