

光学纳米传感器在农产品食源性致病菌检测中的应用进展

崔惟远

中国农业大学信息与电气工程学院, 北京

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

农产品质量安全关乎公众健康, 食源性致病菌污染是其重要威胁之一。光学纳米传感器凭借功能纳米材料独特的表面等离子体共振、荧光发射、表面增强拉曼散射等光学效应, 结合抗体、适配体、噬菌体等生物识别元件, 可实现致病菌的高灵敏、快速、便携检测。本文系统综述了用于农产品食源性致病菌检测的四类光学纳米传感器——荧光型、表面增强拉曼散射(SERS)型、表面等离子体共振(SPR)型及比色型, 阐述其光学信号产生机制、常用纳米材料、关键性能指标及优缺点。重点总结了上述传感器在谷物、果蔬、畜禽及水产品等农产品中对沙门氏菌、大肠杆菌O157:H7、金黄色葡萄球菌等主要食源性致病菌检测的应用研究进展。最后, 分析了当前技术从实验室走向实际应用面临的挑战, 以期为食品安全快速检测与风险预警提供理论参考。

关键词

光学纳米传感器, 食源性致病菌, 农产品, 应用

Research Progress on the Application of Optical Nanosensors in the Detection of Foodborne Pathogens in Agricultural Products

Weiyuan Cui

College of Information and Electrical Engineering of China Agricultural University, Beijing

Received: April 25, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

The safety of agricultural products is crucial to public health, and contamination by Foodborne

pathogens is one of the major threats. Optical nanosensors, which leverage the unique optical effects of functional nanomaterials—such as surface plasmon resonance, fluorescence emission, and surface-enhanced Raman scattering (SERS)—combined with biorecognition elements including antibodies, aptamers, and phages, enable highly sensitive, rapid, and portable detection of pathogenic bacteria. This review systematically summarizes four types of optical nanosensors for the detection of foodborne pathogens in agricultural products: fluorescence-based, SERS-based, surface plasmon resonance (SPR)-based, and colorimetric nanosensors. Their optical signal generation mechanisms, commonly used nanomaterials, key performance indicators, as well as advantages and limitations are elaborated. The review highlights recent advances in the application of these sensors for the detection of major foodborne pathogens (e.g., *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, and *Staphylococcus aureus*) in various agricultural products, including cereals, fruits and vegetables, livestock and poultry products, and aquatic products. Finally, the challenges associated with the transition of these technologies from laboratory settings to practical applications are discussed, aiming to provide a theoretical reference for rapid food safety detection and risk early warning.

Keywords

Optical Nanosensors, Foodborne Pathogens, Agricultural Products, Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农产品在人类日常饮食结构中居于核心地位，其质量安全直接关系到公众身体健康。食源性致病菌是导致农产品污染的主要因素之一，据世界卫生组织(WHO)报告，全球每年食源性疾病发病人数约6亿，死亡人数高达42万，其中，农产品污染是食源性疾病暴发的主要诱因之一[1]。常见且危害突出的食源性致病菌主要包括：沙门氏菌(*Salmonella spp.*)、致病性大肠杆菌(尤其是产志贺毒素大肠杆菌，例如 *Escherichia coli* O157:H7)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)、单核细胞增生李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)、志贺氏菌(*Shigella spp.*)、空肠弯曲菌(*Campylobacter jejuni*)、蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)以及产气荚膜梭菌(*Clostridium perfringens*)等[2]-[4]。食源性致病菌分布广泛，可在食品生产至消费的多个环节造成污染。人体摄入被致病菌污染的食品后，易引发食物中毒，轻症常表现为腹痛、腹泻、呕吐等消化道症状；重症则可诱发菌血症、败血症、感染性休克，严重时甚至导致死亡。由于致病菌感染初期通常无明显临床症状，因此，建立快速精准的致病菌检测方法，对食源性疾病的早期防控与风险阻断具有至关重要的作用[5]。

农产品中食源性致病菌的传统检测方法主要包括细菌培养、免疫学检测与分子生物学检测三大类，其代表性技术分别为标准平板计数法、酶联免疫吸附试验(ELISA)及聚合酶链式反应(PCR) [6]-[8]，如实时荧光定量PCR(qPCR)技术因其定量准确、灵敏度高，已在食品工业中得到广泛应用[9]。然而，上述方法在检测周期、灵敏度、检测成本与多重同步检测能力等方面存在不同程度的局限性，无法满足农产品全链条现场实时、快速、高频的监测需求。因此，开发高效灵敏、便携低成本的新型检测技术与自动化设备，已成为当前该领域的研究热点[7] [10]。近年来，一些功能纳米材料，凭借其纳米特性以及独特的光学性质，在食源性致病菌的高效检测方面表现出很好的优势[11]-[13]。通过将材料与抗体、适配体、噬菌体等生物识别元件相结合，并进一步整合信号检测与处理单元，可构建光学纳米传感器，在农产品

食源性致病菌检测领域已取得显著研究进展, 相关应用涵盖谷物、果蔬、畜禽及水产品等主要品类。本文结合国内外最新研究成果, 系统综述光学纳米传感器在农产品致病菌检测中的应用现状, 旨在为后续基础研究与产业化应用提供理论参考与技术支持。

2. 光学纳米传感器的特点及分类

光学纳米传感器通常具有如下特点: 1) 金纳米颗粒、量子点、碳纳米管等纳米材料具备大的比表面积与高表面反应活性, 能够高密度固载抗体、适体及噬菌体等生物识别元件, 显著提升目标致病菌的界面捕获能力与检测灵敏度[14][15]; 2) 纳米材料所特有的表面等离子体共振(SPR)、荧光发射及表面增强拉曼散射(SERS)等光学效应, 构建了高灵敏信号转导与放大体系, 可实现微弱生物相互作用的高效识别[16]-[18]; 3) 该类传感器通常支持无标记检测, 依托致病菌结合引发的光学信号直接完成识别, 省去复杂标记流程, 有效简化操作步骤、缩短检测周期[19][20]; 4) 光学检测本身抗电磁干扰能力强且可实现非接触测量, 易于与微流控、光纤技术集成封装, 便于研制微型化便携式检测设备, 更适配现场快速筛查与复杂实际样本检测场景[21]-[23]。

根据光学信号产生机制的不同, 用于食源性致病菌检测的光学纳米传感器主要可以分为以下几类: 荧光型传感器、SERS型传感器、SPR型传感器以及比色型传感器等, 这四类光学纳米传感器主要特点见表1。这种多样化的分类体系为针对不同应用场景和检测需求选择合适的传感器技术提供了丰富的选择。评价光学纳米传感器在食源性致病菌检测中的性能通常关注以下几个关键指标: 检测限(LOD)、线性范围、特异性、响应时间、重现性以及稳定性。研究者往往通过优化纳米材料合成、表面修饰以及信号放大策略, 不断提升这些关键性能指标, 以满足实际应用的高标准要求[14][24][25]。

Table 1. Comparison of four types of optical nanosensors

表 1. 四类光学纳米传感器对比

对比指标	荧光型传感器	SERS型传感器	SPR型传感器	比色型传感器
光学信号产生机制	荧光纳米材料或荧光染料受激发光照射后发射荧光, 通过荧光强度变化、猝灭或光谱位移指示目标物存在	利用粗糙贵金属表面或纳米结构极大增强吸附分子的拉曼信号, 获得具有分子“指纹”特征的光谱	入射光在金属与介质界面激发等离子体波, 目标物结合引起界面折射率微小变化, 导致共振角或共振波长偏移	利用金纳米颗粒的局域表面等离子体共振或酶催化反应, 目标物存在时引发溶液颜色变化, 通过肉眼即可判断
常用纳米材料	量子点、碳点、金属有机框架、上转换纳米颗粒	贵金属纳米颗粒、金属有机框架、聚合物、半导体	金纳米薄膜、金纳米颗粒、等离子体纳米结构	金纳米颗粒
检测模式	荧光强度变化、荧光猝灭、比率荧光、荧光共振能量转移	拉曼信号增强、“指纹”光谱识别	共振角偏移、共振波长偏移、实时动态监测	肉眼可视化颜色变化、RGB/HSV颜色分析
灵敏度	极高, 适用于痕量分析	极高, 可实现单细胞水平检测	高, 可实时定量检测	中等, 用于定性或半定量筛查
检测限	可低至 nM 级别	可低至 1CFU/mL 左右	复杂食品基质中实现定量检测	约 10 ² CFU/mL 级别
优势	灵敏度高、信号放大能力强、检测速度快、稳定性好	提供分子指纹特异性、抗干扰能力强、可实现无标记检测	无标记实时监测、可定量分析、可多通道同时检测	直观可视化、操作简单、成本低、适合现场快速筛查
局限性	可能存在光漂白、背景干扰、需激发光源	基底制备要求高、信号重现受基底均匀性影响	仪器成本较高、对样品基质有一定要求	灵敏度相对较低、定量能力有限
便携化潜力	较高	较高	中等	极高
参考文献	[15][27]	[17]	[19][20]	[26]

3. 光学纳米传感器在农产品食源性致病菌检测中的应用

3.1. 荧光型纳米传感器

荧光型纳米传感器利用荧光信号的变化来检测致病菌，具有高灵敏度和多通道检测的优势[15] [27]。近年来，随着新型荧光纳米材料的开发，该领域取得了显著进展。其中，全无机卤化物钙钛矿量子点，特别是溴化铅铋量子点，因其优异的光学性能而备受关注。CsPbBr₃ PQDs 具有高量子产额和窄发射光谱，能够通过荧光共振能量转移、光诱导电子转移和聚集诱导猝灭等机制，实现对沙门氏菌、弧菌等食源性致病菌的多路复用检测，检测限低至 10 CFU/mL [28]。此外，研究人员通过热注射、配体辅助再沉淀和微流控等先进合成方法，以及分子印迹聚合物、金属有机框架和二氧化硅包覆等表面修饰技术，显著提高了 CsPbBr₃ PQDs 的稳定性和特异性，并解决了铅毒性问题，使其在食品安全监测中具有广阔前景[20] [28]。除了量子点，碳点作为一种通过富碳原材料碳化制备的新型碳纳米材料，也因其卓越且可调的光致发光特性、易于通过表面修饰获得特异性识别能力，以及良好的生物相容性、低毒性和高水稳定性，被广泛应用于致病菌传感系统[15] [16]。研究表明，CDs 基荧光探针在致病菌检测中发挥着关键作用，已成功应用于大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌等多种食源性病原菌的传感检测[16]。

在检测机制上，基于核酸适配体和 DNAzyme 的荧光传感器展现出极高的特异性[24]。Li 等[25]开发了一种基于 DNAzyme 的自保护双响应纳米探针，该探针利用纳米结构实现逻辑信号输入和输出：目标病原体存在时，与拱形探针结合并释放激活链，进而激活链置换反应和 DNAzyme 进行信号放大，产生不同的输出信号。该平台能够同时检测大肠杆菌和鼠伤寒沙门氏菌，检测限分别低至 3.7 CFU/mL 和 3.2 CFU/mL，响应时间仅 2 h，实现了超灵敏、特异性的多病原体同步检测，且适用于实际生物样本中食源性病原体的鉴定[25]。研究者基于伴刀豆球蛋白 A 修饰的磁性纳米颗粒和 CdTe 量子点的比色和荧光双模式三明治生物传感器，也实现了对多种食源性致病菌的视觉化检测，该方法在奶茶、牛奶等实际样品中回收率为 93.5%~106%，为食品安全监测提供了低成本、高灵敏的新策略[18] [26]。

CsPbBr₃钙钛矿量子点、碳点、核酸适配体/DNAzyme 及复合双模式荧光纳米传感技术，均具备高灵敏度、低检测限与多致病菌同步检测优势，适配农产品中食源性致病菌筛查。各类技术仍存在共性不足，如农产品复杂基质易引发荧光猝灭与非特异性干扰，导致检测误差；纳米材料耐酸碱、抗光漂白能力有限，现场环境稳定性不足；部分材料存在生物安全隐患，且核酸探针、复合传感体系制备复杂、成本偏高等。

3.2. 表面增强拉曼散射型传感器的应用

表面增强拉曼散射(SERS)技术是一种灵敏且无标记的检测技术，它利用粗糙表面或纳米制造金属表面对吸附分子的拉曼散射进行巨大增强[29]-[31]。自 20 世纪 70 年代发现以来，SERS 已被用于检测包括药物和生物分子在内的各种分子。SERS 技术在致病菌检测中的应用主要基于两个方面：一是利用 SERS 获取细菌自身的“指纹”光谱；二是利用标记了拉曼信号分子的 SERS 探针进行特异性识别[17] [20]。细菌在营养缺乏条件下会发生应激反应，伴随 RNA 的快速降解，释放出嘌呤类代谢物。这些代谢物可作为检测靶标，通过表面增强拉曼光谱实现高灵敏度识别。不同菌种所呈现的 SERS 光谱具有独特的谱图特征，表明该方法具备细菌“光谱指纹”识别的潜力。基于这一特性，研究者通过设计具有等离子体增强效应的 SERS 基底(如纳米手指结构)并结合喷墨分配(inkjet dispenser)技术，实现了对营养缺乏细菌释放代谢物的时间动态监测[32]。为了提高检测的特异性和灵敏度，研究人员开发了基于特异性识别元件的 SERS 探针。例如，Pang 等[33]利用万古霉素修饰的 SERS 标签与适配体修饰的 Fe₃O₄@Au 磁性纳米颗粒，构建了一种双重识别 SERS 生物传感器。该传感器通过适配体实现目标细菌的特异性捕获，再利用万古霉

素对革兰氏阳性菌的广谱结合能力进行标记,结合双 SERS 增强效应,可在 50 min 内实现低至 3 cells/mL 的检测限,且无其他非目标细菌干扰[33]。此外, Yang 等[34]提出了一种基于三维 DNA 步行器的新型 SERS 检测策略,利用 DNA 纳米机器的信号放大能力,实现了对细菌的超灵敏检测[34]。SERS 技术的另一个显著优势是能够进行单细胞水平的检测。Zhou 等[35]通过在细菌表面原位合成银纳米颗粒,构建了细菌@AgNPs 复合结构,并结合微阵列平台与抗体介导的特异性捕获,实现了对大肠杆菌的单细胞水平鉴定与定量分析[35]。该方法获得的拉曼信号较传统混合法增强约 10 倍,在 633 nm 激光激发下可获得最优 SERS 增强效果。

SERS 技术灵敏度高、可无标记检测,利用金属表面增强拉曼散射,在致病菌检测中可通过“指纹”光谱或 SERS 探针实现识别。研究者开发适配体、万古霉素修饰的双重识别传感器,结合 DNA 步行器策略提升灵敏度,还可实现单细胞水平检测。对比传统方法, SERS 优势显著。然而, SERS 技术在应用中也面临挑战,如基底的均一性、重现性以及复杂食品基质中的抗干扰能力[29] [30]。尽管如此, SERS 凭借其无需培养、低成本、高灵敏度且不受水干扰的突出优势,已成为食源性致病菌检测领域的重要技术方向[17] [20]。

3.3. 表面等离子体共振(SPR)型传感器的应用

表面等离子体共振(SPR)及局域表面等离子体共振(LSPR)型纳米传感器凭借无标记实时检测、高灵敏度、响应快速、易微型化集成等优势,成为农产品食源性致病菌快速检测的前沿技术[36]-[38]。其核心原理是依托金、银等贵金属纳米材料的表面等离子体特性:当入射光激发金属纳米结构表面自由电子产生集体振荡时,会形成特定 SPR 吸收峰[39]。农产品中的靶标致病菌与传感器表面修饰的抗体、适体、噬菌体等识别元件结合后,引发传感界面折射率变化,导致 SPR/LSPR 吸收峰发生位移或强度改变,通过光学信号变化即可实现致病菌的定性定量检测[19] [40]。纳米尺度的贵金属材料(如金纳米粒子、金纳米棒、银纳米簇)具备大比表面积、强等离子体信号与高生物偶联效率,能显著提升致病菌捕获能力与检测灵敏度,有效克服农产品基质复杂、致病菌浓度低的检测难题[6] [14] [41]。便携式 SPR 传感器的研发也取得了很多进展,如 Dubois 等[42]报道的可用于即时检测的便携式 SPR 设备,为现场应用提供了新工具。非贵金属及二维材料如铝氮-石墨烯杂化结构也被用于构建高性能 SPR 传感器,可显著提升折射率检测灵敏度[43]。此外,结合钛酸钡-石墨烯亲和层的 SPR 传感器也被用于假单胞菌的检测,展示了较好的效果[44]。

在蔬菜类农产品检测中,金纳米颗粒局域表面等离子体共振比色传感器因可视化信号输出、操作简便等优势而得到应用。该技术通过抗体等识别元件修饰金纳米颗粒,结合免疫磁珠预富集等前处理策略,可有效降低生菜、菠菜等复杂基质的干扰,实现对大肠杆菌 O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌的特异性识别,显著提升检测灵敏度与时效性[14] [18]。Kim 等[45]结合免疫磁分离与纳米颗粒增强 SPR 技术,实现了对沙门氏菌的快速高灵敏检测。针对多重同步检测需求, Zhang 等[46]报道了一种基于定制多通道 SPR 生物传感器与同步增菌肉汤(SEB)相结合的方法,用于同时检测鸡肉中极低水平的三种食源性病原体-大肠杆菌 O157:H7、肠炎沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌。将三种病原体分别以 14、6 和 28 CFU/25 g 的剂量接种于 SEB 中,37°C 富集培养 24 h 后,利用固定有相应多克隆抗体的传感器芯片对同步富集样品进行分析,成功实现了三种目标菌的同时检出,表明多通道 SPR 生物传感器联合 SEB 富集策略能够快速、同步检测食品中低水平的多种病原菌[46]。在复杂食品基质适用性方面, Eser 等[47]构建了一种基于 SPR 的生物传感器用于检测大肠杆菌 O157:H7。该研究采用 3-氨丙基三乙氧基硅烷对传感器金膜表面进行功能化修饰,并通过共价键合固定多克隆抗体以特异性捕获目标菌。细菌与抗体结合后引起共振角偏移,该传感器可区分 10^3 - 10^7 CFU/mL 范围内的细胞浓度,并在人工污染的月桂叶样品中成功实现了低水平大肠

杆菌 O157:H7 的快速检测, 展现了其在复杂食品基质中的应用潜力。此外, Bajaj 等[48]开发了一种基于 SPR 的高特异性检测方法, 用于监测收获后农产品中的胶孢炭疽菌。该方法以病原菌的坏死营养型 DNA 生物标志物为识别元件, 采用棱镜耦合 SPR 构型, 将互补 DNA 探针固定在传感器表面。传感器对目标 DNA 序列的响应浓度范围为 pM- μ M, 检出限低至 7pM, 室温下响应时间小于 30 min。其检测性能得益于优化的光谱 SPR 双金属基底及亚像素分辨率, 且具备小型化便携潜力, 适用于农产品分拣现场及包装厂对真实样品的高通量筛选[48]。

SPR 与电化学、拉曼光谱等技术的联用, 已成为高性能多模式传感平台的重要发展方向。Wang 等[49]将电化学与 SPR 集成于单根光纤, 金修饰光纤同时作为 SPR 传感探头与电化学微电极, 利用苯硼酸特异性识别脂多糖, 实现光学信号与电化学信号的同步输出, 二者检测限分别低至 0.08 ng/mL 和 0.05 ng/mL。Song 等[50]构建了基于银纳米棒包覆银纳米孔阵列的 SERS/SPR 双模式传感器, 结合四面体 DNA 探针与 DNA 串联体信号放大, 通过双模态协同增强实现核酸的高灵敏检测。Panghal 等[51]借助银纳米枝晶的等离子体增强效应, 同步获取大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的表面增强拉曼信号及等离子体增强自发荧光信号, 在 100 CFU/mL 水平下即可实现无标记定性鉴别与定量分析。上述多模式传感策略通过双信号或多信号相互印证与互补, 有效抑制了单模式检测中存在的背景噪声与非特异性交叉干扰, 显著提高了对农产品中低丰度致病菌及关键毒力因子的检测特异性、准确性与可靠性[6][7]。此外, 便携式 SPR 传感器的开发也取得了实质性进展, 如 Dubois 等[42]报道的可用于即时检测的便携式 SPR 设备, 为现场应用提供了新工具。

总体而言, SPR、LSPR 及多模式联用传感器各有优势, LSPR 比色传感器操作简便、可视化强, 适用于现场快速筛查; 多通道 SPR 可实现多重检测, 提升检测效率; 联用技术则通过信号互补提高检测准确性。但三者应用于农产品检测时也有不足, 如贵金属材料成本高、稳定性不足, 复杂基质易引发非特异性干扰, 便携式设备检测性能与大型仪器存在差距, 且前处理流程仍较繁琐。未来研究应聚焦低成本非贵金属及二维材料的改性应用, 优化识别元件的特异性与稳定性, 推动便携式设备的性能升级与规模化生产, 实现农产品现场高通量、高灵敏快速检测等。

3.4. 比色型传感器的应用

比色型传感器因结果直观、无需复杂仪器, 已成为现场检测的理想选择。其核心原理主要分为两类: 一是利用纳米材料(尤其是金纳米颗粒, AuNPs)的局域表面等离子体共振(LSPR)特性, 通过颗粒的分散或聚集状态引起颜色变化[18]; 二是基于酶或纳米酶催化的底物显色反应。以金纳米颗粒为例, 分散态 AuNPs 呈红色, 聚集后因程度不同而呈现紫色至蓝色, 这一特性被广泛用于构建可视化传感器[6][14]。

在食源性致病菌检测中, 为提高比色法的灵敏度, 研究者引入了多种信号放大策略和识别元件[7]。例如, Li 等[52]开发了一种基于 PCN-Mo 金属有机框架纳米酶过氧化物酶样活性的灵敏比色适配体传感器, 利用适配体增强 PCN-Mo 的催化活性, 实现对 TMB 底物的高效显色反应, 从而对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌进行特异性定量分析, 检测限分别低至 0.578、0.439 和 0.643 CFU/mL, 线性范围宽达 10^1 ~ 10^5 CFU/mL, 且在真实食品样品中回收率良好(90.1%~104.1%) [52]。此外, 铜硒纳米颗粒传感器结合磁分离技术, 可在 80 min 内检测大肠杆菌 O157:H7 (检测限 0.35×10^2 CFU/mL), 并具备激光杀菌功能[53]。进一步地, 将比色法与 PCR 技术相结合也取得了进展。Batule 等[54]开发了一种集成 HRPzyme 的 PCR 平台, 通过对传统 PCR 引物进行功能化修饰, 使其在扩增目标序列的同时产生可观测的颜色信号, 并利用 PC 端 ImageJ 软件采集与分析比色图像数据, 为食源性致病菌检测提供了一种简便、超灵敏的方法, 其性能与商用 UV-Vis 分光光度计相当[54]。

横向流动免疫层析试纸条(LFA)是比色型传感器的典型代表, 作为一种高效的即时检测工具, 已成为

现场检测食源性致病菌最常用的快速检测技术[21] [55] [56]。近期研究进展主要集中在 LFA 的三个关键方面：用于识别食源性致病菌的识别试剂(如抗体、单链抗体、肽、纳米抗体、噬菌体)；用于增强检测信号的纳米材料标签(如比色纳米颗粒、发光纳米材料、光热纳米材料、磁性纳米材料)；以及实现协同效率提升的多技术集成[55]。例如，基于纳米体的免疫层析生物传感器实现了食源性致病菌的比色和光热双模式检测，提高了检测的准确性和可靠性[57]。为适应特定环境(如冷链系统)的需求，研究者还开发了耐霜冻水凝胶比色传感阵列，用于在冷链系统中准确检测食源性致病菌[58]。此外，随着机器视觉和机器学习技术的发展，基于机器学习的比色传感器系统也被应用于食品领域，通过智能算法分析颜色变化，进一步提高了检测的客观性和准确度[22] [59]。上述进展表明，比色型传感器在实现低成本、可视化、高通量的食源性致病菌筛查方面具有巨大的应用潜力。除了试纸条形式，离心式微流控平台结合比色检测也是食源性致病菌的多重快速筛查的手段[60]。

综上，LFA 试纸条操作最简便但灵敏度偏低，纳米酶/纳米颗粒基传感器灵敏度较高但成本偏高，PCR-比色联用技术灵敏度最优但操作较复杂。应用于农产品检测时，一些不足表现为，农产品基质复杂易干扰显色、现场检测稳定性不足、多重检测能力有限等。未来研究应聚焦于优化识别元件特异性以抗基质干扰，开发低成本、高稳定性的纳米标签材料，结合微流控技术实现多致病菌同步检测等。

4. 实验室到农产品现场检测的实际应用

将实验室研发的高灵敏度传感技术直接应用于农产品现场检测，仍面临基质干扰、前处理技术、传感器稳定性以及成本与商业化壁垒等多重挑战。

4.1. 农产品基质的复杂性对传感器产生显著干扰

比色传感器易受果蔬天然色素(如花青素、叶绿素)的光学干扰，导致肉眼判读或吸光度测量出现假阳性/阴性[52] [53]；如 Li 等(2024)研发的基于 PCN-Mo 过氧化物酶活性的比色适体传感器，在农产品检测中明确观察到天然色素引发的判读偏差[52]。荧光传感器则面临叶绿素等自体荧光物质的背景噪声，严重降低信噪比[15] [16]，Song 等(2024)在纳米材料基荧光检测研究中指出，叶绿素的自体荧光会显著干扰目标病原体的荧光信号识别[15]。

SPR 传感器受基质中脂肪、蛋白质的非特异性吸附影响最大，这些分子会堵塞传感膜表面、改变折射率，从而引发信号漂移[38] [40]。SERS 传感器同样遭遇非特异性吸附问题，农产品表面的农药、腐殖酸等有机物会产生竞争性拉曼峰，掩盖病原体的特征指纹[29] [30]，Akanny 等(2020)在 SERS 细菌分析中指出，农产品基质中的有机物会产生干扰峰，影响病原体特征指纹识别[29]。

4.2. 样品前处理技术与传感器的集成策略

微流控芯片通过内置的混合、裂解及洗涤腔室，可实现“样品进 - 结果出”的自动化检测，例如将离心式微流控平台与比色检测单元直接集成[56] [60]；如 Weng 等(2021)在微流控纳米生物传感器研究中，证实微流控芯片与检测单元的集成可实现农产品样品的自动化前处理与检测[56]。而免疫磁分离(IMS)利用功能化磁珠从大体积样品中高效捕获目标细菌，随后可无缝注入 SPR 流通池或与 SERS 基底结合，通过外加磁场实现快速富集与纯化[33] [45]。

4.3. 传感器自身的稳定性与保质期

基于抗体或酶的生物识别元件在脱离冷链后易失活，而纳米材料(如金纳米粒子、量子点)在复杂保存液中可能发生聚集或荧光猝灭，导致试纸条或芯片的货架期通常仅数月[14] [18] [55]。如 Zhao 等(2025)的双模式生物传感器研究也证实，量子点的荧光猝灭是影响传感器保质期的关键因素[18]，Hou 等(2025)

在侧向层析试纸条分析中指出,多数纳米颗粒基试纸条货架期仅为3~6个月[55]。采用冻干技术、纳米抗体或人工适配体可部分提升耐受性,但多数离原型产品仍有距离[7] [24] [57]。

4.4. 成本效益与商业化路径

实验室级 SPR 和 SERS 仪器昂贵(数万至数十万美元)且需专人操作,难以推广至田间或中小型企业[38] [40]。如 Špringer 等(2021)指出,实验室级 SPR 仪器成本高达数万至数十万美元,操作门槛高,无法适配田间现场检测[38]。相比之下,基于侧向层析或普通比色法的传感器,其单次检测成本可降至数美元以下,具有明显的成本优势[52] [55],如比色适体传感器,单次检测成本控制在1~3美元[52],侧向层析试纸条的单次检测成本可低至0.5~2美元[55]。商业化需经历从“实验室验证”到“应用稳定性”再到“监管认证”的漫长过程,当前仅有少数便携式比色或侧向层析产品(如基于智能手机读卡的试纸条)成功实现商业化,多数前沿传感技术仍停留在实验室原型阶段,急需在低成本一次性芯片、室温稳定试剂及简易读数设备上取得突破[7] [55] [56]。

5. 展望

尽管光学纳米传感器在农产品食源性致病菌检测领域已取得显著进展,但其实际应用与产业化推广仍面临若干关键科学与技术问题亟待突破。

实验室优异性能与实际复杂场景应用存在显著差距。现有研究多在缓冲液体系中实现极低检测限(低至1 CFU/mL 及以下),但在富含脂肪、蛋白质、色素等组分的真实农产品基质中,基质干扰会显著降低传感器灵敏度与稳定性。如何通过优化集成化样品前处理单元、开展纳米传感界面抗污修饰等策略,提升实际体系下的抗干扰能力,是未来要解决的核心问题之一。

面向场景实现不同光学传感技术精准选型。荧光传感器灵敏度突出,但部分传统荧光探针存在生物毒性,且检测设备成本较高;SERS 技术具备分子指纹特异性与单细胞检测潜力,但其信号稳定性高度依赖基底均一性,高性能基底制备成本偏高;SPR 传感可无标记实时监测分子动力学,但仪器精密昂贵,普及难度较大,便携式 SPR 器件则常面临灵敏度折损问题;比色传感成本低、操作简便,适于现场快速筛查,但其灵敏度有限且易受样品色泽与环境光干扰。

识别元件研发及其性能提升。抗体作为主流识别元件,存在制备周期长、批次差异大、热稳定性不佳等局限。未来研究将重点聚焦新型识别元件与光学纳米材料的高效偶联,构建高特异性、高稳定性的生物传感界面。

多模式联用与集成化检测。单一模式难以满足复杂样品中多靶标同步精准检测需求,多模态传感(如比色-荧光-SPR-电化学-SERS-SPR 等)通过多信号相互验证可显著提升结果可靠性。同时,耦合微流控与纳米电子器件,开发集样品进样、前处理、生化反应与信号输出于一体的自动化集成系统,是实现标准化、现场化快速检测的重要途径。

综上,光学纳米传感器在农产品食源性致病菌监控中具有重要应用价值。未来研究需重点解决纳米材料生物相容性与安全性问题,提升复杂基质下的检测鲁棒性,降低器件制备与检测成本;并进一步融合人工智能与物联网技术,推动传感系统向微型化、便携化、智能化、网络化发展,最终构建高效、全覆盖的食品安全快速检测与风险预警体系。

参考文献

- [1] World Health Organization (2015) WHO Estimates of the Global Burden of Foodborne Diseases: Foodborne Disease Burden Epidemiology Reference Group 2007-2015. World Health Organization.
- [2] Atasever, M. (2026) Foodborne Microbial Diseases: Pathogens, Epidemiology, and Prevention Strategies. *Asian-*

- Australasian Journal of Food Safety and Security*, **10**, 20-42. <https://doi.org/10.3329/aajfss.v10i1.86150>
- [3] Cancino-Padilla, N., Fellenberg, M.A., Franco, W., Ibáñez, R.A. and Vargas-Bello-Pérez, E. (2017) Foodborne Bacteria in Dairy Products: Detection by Molecular Techniques. *Ciencia e investigación agraria*, **44**, 215-229. <https://doi.org/10.7764/rcia.v44i3.1811>
- [4] 刘秀梅. 我国食品卫生微生物学 30 年来的热点研究及主要进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2009, 21(4): 289-295.
- [5] Biswas, D. and Micallef, S.A. (2017) Diversity of Foodborne Bacterial Pathogens and Parasites in Produce and Animal Products and Limitations of Current Detection Practices. In: Singh, O.V., Ed., *Foodborne Pathogens and Antibiotic Resistance*, Wiley, 5-20.
- [6] Mansouri, S. (2024) Detection of Pathogenic Bacteria with Nanozymes-Based Colorimetric Biosensors: Advances, Challenges and Future Prospects. *Microchemical Journal*, **205**, Article ID: 111392. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111392>
- [7] Quintela, I.A., Vasse, T., Lin, C. and Wu, V.C.H. (2022) Advances, Applications, and Limitations of Portable and Rapid Detection Technologies for Routinely Encountered Foodborne Pathogens. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article 1054782. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1054782>
- [8] Ye, Y., Li, L., Chen, Y., Li, B. and Xu, Z. (2025) Molecular Methods for Rapid Detection and Identification of Foodborne Pathogenic Bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **41**, Article No. 175. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04396-6>
- [9] Chapela, M., Garrido-Maestu, A. and Cabado, A.G. (2015) Detection of Foodborne Pathogens by QPCR: A Practical Approach for Food Industry Applications. *Cogent Food & Agriculture*, **1**, Article ID: 1013771. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1013771>
- [10] Yordanova, R., Stoeva, D., Gencheva, D., Andonova, A. and Beev, G. (2024) Accelerated Detection of Foodborne Pathogens and Toxins: Techniques and Applications—A Review. *Acta Microbiologica Bulgarica*, **40**, 297-307. <https://doi.org/10.59393/amb24400303>
- [11] Bruce-Tagoe, T.A. and Danquah, M.K. (2023) Bioaffinity Nanoprobes for Foodborne Pathogen Sensing. *Micromachines*, **14**, Article 1122. <https://doi.org/10.3390/mi14061122>
- [12] Cui, Z., Nie, C., Luo, S., Chen, P., Li, Y., Li, B., et al. (2026) Harnessing Phage-Based Nanosensors for Advancing Ultrasensitive Point-Of-Care Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **74**, 7385-7400. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c16201>
- [13] Manoswini, M., Majumdar, A.G., Pany, B., Sahu, B.R. and Mohanty, P.S. (2023) Rapid Detections of Food Pathogens Using Metal, Semiconducting Nanoparticles, and Their Hybrids: A Review. *Emergent Materials*, **6**, 15-30. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00441-4>
- [14] Park, S. and You, Y. (2024) Gold Nanoparticle-Based Colorimetric Biosensing for Foodborne Pathogen Detection. *Foods*, **13**, Article 95. <https://doi.org/10.3390/foods13010095>
- [15] Song, S., Han, L., Chen, M., Pan, L. and Tu, K. (2024) Recent Progress in Nanomaterial-Based Fluorescence Assays for the Detection of Food-Borne Pathogens. *Sensors*, **24**, Article 7715. <https://doi.org/10.3390/s24237715>
- [16] Ma, G., Li, X., Cai, J. and Wang, X. (2024) Carbon Dots-Based Fluorescent Probe for Detection of Foodborne Pathogens and Its Potential with Microfluidics. *Food Chemistry*, **451**, Article ID: 139385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139385>
- [17] Peng, W., Liu, Y., Lu, M., Li, X., Liang, Y., Wang, R., et al. (2024) Advances in Surface-Enhanced Raman Scattering Detection of Foodborne Pathogens: From Recognition-Based Fingerprint to Molecular Diagnosis. *Coordination Chemistry Reviews*, **518**, Article ID: 216083. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216083>
- [18] Zhao, W., Liang, X., Zhong, Z., Li, J., Mei, D., Yang, J., et al. (2025) Colorimetric and Fluorescence Dual-Mode Sandwich Biosensor for Visual Detection of Multiple Foodborne Pathogens with Concanavalin A Modified Magnetic Nanoparticles and CdTe Quantum Dots. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **444**, Article ID: 138415. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138415>
- [19] Hu, Y., Yang, J., Chen, J., Sun, X., Hu, W. and Liu, X. (2025) The Development of Foodborne Pathogen Detection and Biosensor Design for Surface Plasmon Resonance Technology. *Biosensors*, **15**, Article 774. <https://doi.org/10.3390/bios15120774>
- [20] Wang, Y., Jia, K. and Lin, J. (2024) Optical Biosensors for the Detection of Foodborne Pathogens: Recent Development and Future Prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **177**, Article ID: 117785. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117785>
- [21] Han, X., Fang, R., Liang, Y., Hu, P., Pang, J., Shen, Y., et al. (2025) Breakthrough of the Lateral Flow Assay Technology for On-Site Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria: Resonance among the Recognition Reagents, Nanomaterial Labels, and Multi-Technological Integration. *Food Chemistry*, **493**, Article ID: 145832.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145832>
- [22] Hussain, M., Zou, J., Zhang, H., Zhang, R., Chen, Z. and Tang, Y. (2022) Recent Progress in Spectroscopic Methods for the Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria. *Biosensors*, **12**, Article 869. <https://doi.org/10.3390/bios12100869>
- [23] Luo, W., Chen, Y. and Xu, F. (2021) Recent Progress in Microfiber-Optic Sensors. *Photonic Sensors*, **11**, 45-68. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0614-9>
- [24] Guo, X. (2024) Research Progress on the Detection of Foodborne Pathogens Based on Aptamer Recognition. *Microchimica Acta*, **191**, Article No. 318. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06375-4>
- [25] Li, B., Ren, X., Xiao, Y., Sun, W., Yang, M., Pang, T., et al. (2025) Self-Protective Dnazyme-Based Dual-Responsive Three-Way Y-Probe for Simultaneous Determination of Multiple Pathogenic Bacteria. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **417**, 1779-1790. <https://doi.org/10.1007/s00216-025-05782-7>
- [26] Saleh, R.O., almajidi, Y.Q., Mansouri, S., Hammoud, A., Rodrigues, P., Mezan, S.O., et al. (2024) Dual-Mode Colorimetric and Fluorescence Biosensors for the Detection of Foodborne Bacteria. *Clinica Chimica Acta*, **553**, Article ID: 117741. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2023.117741>
- [27] Zhang, Y., Wu, Y., Guo, A., Liu, Y., Sun, Q., Zou, X., et al. (2025) Fluorescent Biosensors for the Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria in Food: A Comprehensive Review. *Analytical Methods*, **17**, 8298-8316. <https://doi.org/10.1039/d5ay01025j>
- [28] Mohammad, S.I., Jabbar, H.S., Vasudevan, A., Sapaev, I.B., Rekha, M.M., Gayathri, S., et al. (2026) Comprehensive Advances in CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dots for Ultrasensitive Fluorescent Nanosensors in Food Safety Monitoring. *Nanoscale Advances*, **8**, 422-457. <https://doi.org/10.1039/d5na00809c>
- [29] Akanny, E., Bonhommé, A., Bessueille, F., Bourgeois, S. and Bordes, C. (2020) Surface Enhanced Raman Spectroscopy for Bacteria Analysis: A Review. *Applied Spectroscopy Reviews*, **56**, 380-422. <https://doi.org/10.1080/05704928.2020.1796698>
- [30] Hassan, M., Zhao, Y. and Zughair, S.M. (2024) Recent Advances in Bacterial Detection Using Surface-Enhanced Raman Scattering. *Biosensors*, **14**, Article 375. <https://doi.org/10.3390/bios14080375>
- [31] 王艳, 李辉, 崔大付. 纳米结构敏化表面增强拉曼传感在食品安全中的研究进展[J]. 分析化学, 2026, 44(3): 456-468.
- [32] Sengupta, R.N., D'Apuzzo, F. and Barcelo, S. (2020) Bacterial Detection via Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS). *The FASEB Journal*, **34**, 1. <https://doi.org/10.1096/fasebj.2020.34.s1.09280>
- [33] Pang, Y., Wan, N., Shi, L., Wang, C., Sun, Z., Xiao, R., et al. (2019) Dual-Recognition Surface-Enhanced Raman Scattering(SERS)biosensor for Pathogenic Bacteria Detection by Using Vancomycin-Sers Tags and Aptamer-Fe₃O₄@Au. *Analytica Chimica Acta*, **1077**, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.059>
- [34] Yang, E., Li, D., Yin, P., Xie, Q., Li, Y., Lin, Q., et al. (2021) A Novel Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) Strategy for Ultrasensitive Detection of Bacteria Based on Three-Dimensional (3D) DNA Walker. *Biosensors and Bioelectronics*, **172**, Article ID: 112758. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112758>
- [35] Zhou, H., Yang, D., Mircescu, N.E., Ivleva, N.P., Schwarzmeier, K., Wieser, A., et al. (2015) Surface-Enhanced Raman Scattering Detection of Bacteria on Microarrays at Single Cell Levels Using Silver Nanoparticles. *Microchimica Acta*, **182**, 2259-2266. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1570-0>
- [36] Homola, J. (2008) Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species. *Chemical Reviews*, **108**, 462-493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
- [37] Hojjat Jodaylami, M., Masson, J. and Badia, A. (2025) Surface Plasmon Resonance Sensing. *Nature Reviews Methods Primers*, **5**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1038/s43586-025-00417-8>
- [38] Špringer, T., Ermini, M.L., Škvor, J., Vaisocherová-Lísalová, H. and Homola, J. (2021) Recent Advances in Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensors for Food Analysis: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **61**, 3063-3082.
- [39] Butt, M.A. (2024) Surface Plasmon Resonance-Based Biodetection Systems: Principles, Progress and Applications. *Biosensors*, **15**, Article 35.
- [40] Vaisocherová-Lísalová, H., Vášová, I., Ermini, M.L., Špringer, T., Song, X.C., Mrázek, J., et al. (2016) Low-Fouling Surface Plasmon Resonance Biosensor for Multi-Step Detection of Foodborne Bacterial Pathogens in Complex Food Samples. *Biosensors and Bioelectronics*, **80**, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.01.040>
- [41] Park, J., Cho, Y. and Kim, T. (2022) Recent Advances in Surface Plasmon Resonance Sensors for Sensitive Optical Detection of Pathogens. *Biosensors*, **12**, Article 180. <https://doi.org/10.3390/bios12030180>
- [42] Dubois, C., Ducas, É., Laforce-Lavoie, A., Robidoux, J., Delorme, A., Live, L.S., et al. (2024) A Portable Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensor for the Detection of Immunoglobulin a in Plasma. *Transfusion*, **64**, 881-892. <https://doi.org/10.1111/trf.17818>

- [43] Jena, R., Dhar, P., Panda, A., Wu, F. and Daher, M.G. (2025) An Investigation on Hybrid ALN-Graphene Surface Plasmon Resonance Sensor for Refractive Index-Based Pathogen Detection. *Microchimica Acta*, **192**, Article No. 351. <https://doi.org/10.1007/s00604-025-07226-6>
- [44] Mudgal, N., Yupapin, P., Ali, J. and Singh, G. (2020) BaTiO₃-Graphene-Affinity Layer-Based Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensor for Pseudomonas Bacterial Detection. *Plasmonics*, **15**, 1221-1229. <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01146-2>
- [45] Liang, F., Li, Y., Cui, Y. and Zhang, J. (2025) Rapid and Sensitive Detection of Salmonella via Immunomagnetic Separation and Nanoparticle-Enhanced SPR. *Microorganisms*, **13**, Article 1914. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13081914>
- [46] Zhang, X., Tsuji, S., Kitaoka, H., Kobayashi, H., Tamai, M., Honjoh, K., *et al.* (2017) Simultaneous Detection of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enteritidis*, and *Listeria monocytogenes* at a Very Low Level Using Simultaneous Enrichment Broth and Multichannel SPR Biosensor. *Journal of Food Science*, **82**, 2357-2363. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13843>
- [47] Eser, E., Ekiz, O.Ö. and Ekiz, H.İ. (2023) *E. coli* O157:H7 Detection Using Surface Plasmon Resonance Based Biosensor. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, **51**, 359-372. <https://doi.org/10.15671/hjbc.1271685>
- [48] Bajaj, A., Shrivastav, A.M., Eltzov, E., Alkan, N. and Abdulhalim, I. (2021) Detection of Necrotrophic DNA Marker of Anthracnose Causing Colletotrichum Gloeosporioides Fungi in Harvested Produce Using Surface Plasmon Resonance. *Talanta*, **235**, Article ID: 122776. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122776>
- [49] Wang, Y., Qian, S., Zhao, D., Jiang, S., Wang, X., Zhang, J., *et al.* (2025) Dual-Mode Electrochemical Fiber Optic Surface Plasmon Resonance Sensor (EC-FO-SPR) for Real-Time and Sensitive Detection of Lipopolysaccharide. *Biosensors and Bioelectronics*, **287**, Article ID: 117680. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2025.117680>
- [50] Song, C., Jiang, X., Yang, Y., Zhang, J., Larson, S., Zhao, Y., *et al.* (2020) High-Sensitive Assay of Nucleic Acid Using Tetrahedral DNA Probes and DNA Concatamers with a Surface-Enhanced Raman Scattering/Surface Plasmon Resonance Dual-Mode Biosensor Based on a Silver Nanorod-Covered Silver Nanohole Array. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 31242-31254. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c08453>
- [51] Panghal, A., Das, S., Thapa, P., Arya, S.K., Kaushik, S. and Rawat, B. (2024) Surface Plasmon Enhanced Au-To-Fluorescence and Raman Spectroscopy for Low-Level Detection of Biological Pathogens. *Methods and Applications in Fluorescence*.
- [52] Li, J., Yang, X., Li, Q., Yang, D., Hu, Q., Zhong, Z., *et al.* (2024) Sensitive Colorimetric Aptasensor for Multiple Foodborne Pathogens Detection Based on PCN-Mo Peroxidase-Like Activity. *Food Bioscience*, **59**, Article ID: 103910. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103910>
- [53] Guo, Y., Zhao, J., Ma, X., Cai, M., Liu, S., Sun, C., *et al.* (2024) A Colorimetric Biosensor with Infrared Sterilization Based on Cuse Nanoparticles for the Detection of *E. coli* O157:H7 in Food Samples. *Microbiology Spectrum*, **12**, e03978-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03978-23>
- [54] Batule, B.S., Kim, S.U., Mun, H., Shim, W. and Kim, M. (2018) Development of Hrpzyme-Integrated PCR Platform for Colorimetric Detection of Foodborne Pathogens. In: Rincken, T. and Kivirand, K., Eds., *Biosensing Technologies for the Detection of Pathogens—A Prospective Way for Rapid Analysis*, InTech, 173-190. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72649>
- [55] Hou, S., Lin, T., Ding, Z., Cui, S., Cao, Y., Jiao, J., *et al.* (2025) Nanoparticles-Based Lateral Flow Immunochromatographic Strip for Detection of Foodborne Pathogen: A Review. *Food Chemistry*, **496**, Article ID: 146595. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146595>
- [56] Weng, X., Zhang, C. and Jiang, H. (2021) Advances in Microfluidic Nanobiosensors for the Detection of Foodborne Pathogens. *LWT*, **151**, Article ID: 112172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112172>
- [57] Zhang, C., Wang, Y., Liu, Z., Bai, M., Wang, J. and Wang, Y. (2022) Nanobody-Based Immunochromatographic Biosensor for Colorimetric and Photothermal Dual-Mode Detection of Foodborne Pathogens. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **369**, Article ID: 132371. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132371>
- [58] Zhang, Y., Liu, M., Yu, Y. and Chen, S. (2025) Frost-Resistant Hydrogel Colorimetric Sensing Array for Accurate Detection of Foodborne Pathogens in Cold Chain Systems. *Biosensors and Bioelectronics*, **271**, Article ID: 116990. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116990>
- [59] Holliday, E.G. and Zhang, B. (2024) Machine Learning-Enabled Colorimetric Sensors for Foodborne Pathogen Detection. *Advances in Food and Nutrition Research*, **111**, 179-213. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2024.06.004>
- [60] Sayad, A., Ibrahim, F., Mukim Uddin, S., Cho, J., Madou, M. and Thong, K.L. (2018) A Microdevice for Rapid, Monoplex and Colorimetric Detection of Foodborne Pathogens Using a Centrifugal Microfluidic Platform. *Biosensors and Bioelectronics*, **100**, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.08.060>