

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241206002

食品安全快速检测方法研究进展

覃 浩, 鲍 蕾*

[雀巢研发(中国)有限公司, 雀巢食品安全研究院, 北京 100016]

摘 要: 近年来, 食品安全快速检测方法的研究取得了显著进展, 涵盖了免疫学、分子生物学、化学分析和生物传感器等多种技术。免疫学方法如免疫层析和酶联免疫吸附试验具有高灵敏度和特异性, 广泛应用于食品中病原菌、毒素及药物残留的检测, 能够快速识别潜在的食品安全隐患。分子生物学技术如聚合酶链式反应则以其高效的 DNA 扩增能力, 成为检测食品中微生物和转基因成分的重要工具。化学分析方法通过光谱技术实现对食品成分的快速、无损检测, 生物传感器则结合生物识别元件与物理化学传感器, 提供灵敏、便捷的检测方案。未来, 随着技术的不断进步, 快速检测方法将朝着集成化、微型化和智能化方向发展, 进一步提升食品安全管理的效率和准确性, 为保障消费者健康提供更为可靠的支持。本文综述了近年来食品安全快速检测方法的研究进展, 探讨不同检测方法的原理、应用范围、优缺点及其在实际应用中的效果, 旨在为食品安全领域的研究者和技术人员提供参考, 推动快速检测技术的进一步发展和应用, 保障消费者的健康与安全。

关键词: 食品安全; 快速检测; 免疫学; 分子生物学; 化学分析; 生物传感器

Research progress on rapid detection methods for food safety

QIN Hao, BAO Lei*

[Nestlé China Food Safety Institute, Nestlé Research & Development (China), Beijing 100016, China]

ABSTRACT: In recent years, significant progress have been made in rapid methods for food safety, utilizing technologies such as immunology, molecular biology, chemical analysis, and biosensors. Immunological methods, including immunochromatography and enzyme-linked immunosorbent assay, are widely used for their high sensitivity and specificity in detecting pathogens, toxins, and drug residues in food, enabling quick identification of potential hazards. Molecular biology techniques, such as polymerase chain reaction, are essential for detecting microorganisms and genetically modified components due to their efficient DNA amplification. Chemical analysis methods use spectroscopic techniques for rapid, non-destructive detection of food components, while biosensors combine biological recognition elements with physicochemical sensors for sensitive and convenient detection. With ongoing technological advancements, rapid methods are expected to evolve towards integration, miniaturization, and intelligence, enhancing the efficiency and accuracy of food safety management. This article summarized the research progress of rapid detection methods for food safety in recent years, explored the principles, application scope, advantages and disadvantages of different detection methods, and their effects in practical applications. The aim is to provide reference for researchers and technicians in the field of food safety, promote the further development and application of rapid detection technology, and ensure the health and safety of consumers.

*通信作者: 鲍蕾, 研究员, 主要研究方向为食品安全与标准。E-mail: Lei.bao@rd.nestle.com

*Corresponding author: BAO Lei, Professor, Nestlé Research & Development (China), No.6, Jiuxianqiao Road, Chaoyang District, Beijing 100016, China. E-mail: Lei.bao@rd.nestle.com

KEY WORDS: food safety; rapid detection; immunology; molecular biology; chemical analysis; biosensors

0 引言

食品安全是全球公共卫生领域的核心问题,直接关系到人类健康、社会稳定和经济发展^[1]。随着全球化进程的加快和食品供应链的日益复杂,食品安全问题变得愈发突出。食品供应链的全球化不仅带来了食品种类和数量的增加,也增加了食品从生产到消费各个环节中潜在的安全风险^[2]。食品原料的安全性是确保食品安全的基础,食品原料在生产、加工、储存和运输过程中,可能受到各种生物性、化学性和物理性污染物的污染^[3]。生物性污染物包括细菌、病毒、真菌和寄生虫等,这些微生物可以通过多种途径污染食品,导致食源性疾病的发生。例如,大肠杆菌、沙门氏菌和李斯特菌等病原菌是常见的食品污染物,能够引发严重的食品中毒事件^[4];化学性污染物则包括农药残留、重金属、食品添加剂和环境污染物等,这些物质可能在农作物种植、食品加工和包装过程中引入食品中,长期摄入会对人体健康造成危害^[5];物理性污染物包括异物和包装材料等,这些污染物可能在食品生产和包装过程中混入食品中,造成消费者的身体伤害^[6]。

传统的食品安全检测方法通常依赖于实验室的复杂设备和专业人员,检测周期长、成本高,在特定方面难以满足现代食品工业快速、灵活的需求。实验室检测方法如微生物培养、化学分析和物理检测等,虽然具有较高的准确性和灵敏度,但由于其操作复杂、检测时间长,难以实现对大规模食品样本的快速筛查和现场检测^[7]。因此,开发快速、简便、低成本的安全检测方法成为当前研究的热点。随着科技的进步,快速检测方法逐渐成为食品安全领域的研究热点。这些方法通常具有操作简便、检测速度快、成本低等优点,适用于现场检测和大规模筛查,能够及时发现和控制潜在的食品安全风险。

本文旨在系统地总结和分析近年来食品安全快速检测方法的研究进展,探讨不同检测方法的原理、应用范围、优缺点及其在实际应用中的效果。通过对现有文献的梳理和分析,以期从事食品安全研究和实践的学者、技术人员提供参考,推动快速检测技术的进一步发展和应用。

1 快速检测方法研究现状

当前,食品安全快速检测方法主要包括免疫学方法、分子生物学方法、化学分析方法和生物传感器技术等。

1.1 免疫学方法

免疫学方法是一类利用抗原与抗体之间的特异性结合反应进行检测的方法,其在食品安全快速检测领域得到

了广泛的应用^[8]。这些方法通过充分利用生物分子间的特异性识别能力,能够对食品中的微量有害物质进行高效、准确的检测^[9]。具体而言,这些方法通常具有高灵敏度和特异性,适用于多种食品污染物的检测。其高特异性使得即使在低浓度下也能可靠地识别目标物质。这种多功能性使得免疫学方法成为食品安全领域的重要工具,能够满足不同类型污染物的检测需求。免疫学方法包括酶联免疫吸附试验(enzyme-linked immunosorbent assays, ELISA)、免疫层析试验、免疫荧光试验等多种技术形式,每种技术形式都具有自身的特点和适用范围,可以根据具体的检测需求选择合适的方法进行应用。

ELISA 是一种广泛应用于实验室的检测技术,尤其在食品安全领域中具有重要意义。它能够有效检测食品中的病原菌、毒素和农药残留等有害物质,这些物质对人类健康构成潜在威胁。其基本原理是将特定抗原或抗体吸附于固相载体(如微孔板),通过加入样品和试剂进行反应,产生可测量的信号,通常表现为颜色变化,颜色深浅与目标物质浓度成正比^[10-12]。ELISA 因其高灵敏度、高特异性和快速检测的优势,在食品安全实验室中得到广泛应用。DING 等^[13]开发了一种基于噬菌体受体结合蛋白的磁性微珠 ELISA,用于快速富集和检测食品中的沙门氏菌。该方法利用噬菌体 T102 的 RBP 41 作为特异性识别元件,通过与磁性微珠结合,分离和富集沙门氏菌。整个过程耗时不到 1.5 h,检出限为 10 CFU/mL,已成功应用于脱脂牛奶、生菜和鸡胸肉等食品样本。JING 等^[14]设计了一种新方法,通过链霉亲和素支架的 DNA 四聚体提高碱性磷酸酶的负载能力,进而提高对牛奶样本中大肠杆菌 O157:H7 的检测灵敏度。该方法的线性范围为 $10^4 \sim 10^6$ CFU/mL,检出限为 3.75×10^3 CFU/mL,比传统 ELISA 提高了 6.16 倍,回收率为 86.7%~93.6%。DASANAYAKA 等^[15]开发了一种新型三明治 ELISA 方法,采用山羊 IgG 作为捕获抗体,兔 IgG 作为检测抗体,针对食品中的可溶性鱼蛋白进行检测。该方法的定量下限为 0.5 ng/mL,灵敏度较高,回收率在 83%~131%之间。该方法能够检测所有商业重要鱼类,适用于市场上食品样本中未标明的鱼类残留。ZHAN 等^[16]开发了一种高灵敏度的等离子体 ELISA,用于检测伏马毒素 B₁ (fumonisin B₁, FB₁)。该方法使用葡萄糖氧化酶(glucose oxidase, GOx)替代辣根过氧化物酶(horseradish peroxidase, HRP)作为竞争抗原的载体,GOx 催化葡萄糖氧化生成过氧化氢,导致溶液颜色从无色变为紫色,肉眼可见。该方法对 FB₁ 的检出限为 1.25 ng/mL,线性范围为 0.31~10 ng/mL,半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)为 1.86 ng/mL,具有高特异性和准确性。LU 等^[17]首次开发了

一种高灵敏度的三明治 ELISA 和直接荧光检测方法, 用于检测猪细小病毒(porcine parvovirus, PPV), 采用从双峰驼中筛选的 5 种 PPV-VP2 特异性纳米抗体。通过重组技术获得的 HRP 和增强型绿色荧光蛋白(exfoliated graphite-functionalized pigment, EGFP)融合蛋白作为探针, 显示出 92.1% 的实时聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)符合率, 能够广泛用于监测猪群中的 PPV 感染, 同时直接荧光检测方法的符合率为 81.5%。这两种方法消除了对商业二级抗体的需求, 缩短了检测时间, 具有良好的商业化前景。通过以上的研究也可以看到, ELISA 方法现在也通过创新技术如磁性微珠、DNA 四聚体和纳米抗体等进一步提升了检测效率和准确性。

免疫层析通过层析纸进行分离与检测, 利用抗体与目标抗原结合形成可视化结果, 便于用户直观判断^[18]。常见形式包括试纸条和胶体金试纸, 便于携带和在不同环境中使用。免疫层析的主要优势在于操作简便, 用户只需按照说明书进行简单步骤, 如添加样品和缓冲液, 等待结果。该方法通常在几分钟内得出结果, 显著提高了检测效率, 尤其适用于快速响应的食品安全监测。随着技术进步, 免疫层析的灵敏度和特异性不断提高, 能够检测更低浓度的污染物和病原体。ZHANG 等^[19]开发了一种基于免疫层析的方法, 检测湖水和鱼样本中的地西洋(diazepam, DAP)。研究设计了掺金铂的六氰合铜纳米颗粒(AuPt@Cu-HCF), 作为多信号报告器, 整合比色、光热、催化比色和催化光热效应, 形成“四合一”的多读出方法。该方法实现 DAP 的 4 种检测信号输出, 检出限分别为 0.82 ng/mL、12.82、12.26 和 4.43 pg/mL, 适用于不同场景。ZHANG 等^[20]针对氨基酰胺类杀菌剂普克米酮(pulmidone, PRM)在蔬菜中的潜在健康风险, 开发了一种与智能手机集成的免疫层析方法, 检测中国韭菜、豇豆和芹菜中的 PRM。整个预处理和检测过程可在 21 min 内完成, 回收率为 76.7%~100.7%, 相对标准偏差小于 12.6%, 定量限为 7.54~13.01 ng/g, 为现场快速检测 PRM 提供了便利平台。SUN 等^[21]开发了一种基于金纳米颗粒免疫层析(AuNPs-LFIA)的方法, 检测蜂蜜中的 6 种托烷类生物碱。最佳条件下, 检出限分别为 0.22、0.29、0.51、6.34、0.30 和 0.94 ng/mL。通过将蜂蜜样本稀释 5 倍, 该方法可在 17 min 内完成半定量和定量分析, 在一定程度上弥补了免疫层析法在托烷类生物碱检测方面的不足。WANG 等^[22]设计了两种半抗原 H1 和 H2, 实现对克百威(carbosulfan, CBF)和 3-羟基-克百威(3-OH-CBF)的广谱抗体检测。该方法检出限为 0.49~6.63 ng/mL, 回收率为 69.3%~105.7%。CHEN 等^[23]开发了一种基于表面增强拉曼散射(surface-enhanced Raman scattering, SERS)标签的免疫层析方法, 满足茶叶中噻虫嗪的敏感和准确检测需求。该方法通过多酚介导的涂层工程, 形成 Au@pBDT-TA 标签, 视觉和定量检出限分别

提高 4 倍和 720 倍, 能够在 20 min 内实现对黑茶和绿茶中噻虫嗪的定量检测, 检出限为 0.06 和 0.1 ng/g。DING 等^[24]开发了一种基于纳米金属表面能量转移(nano-metal surface energy transfer, NSET)的侧流免疫层析(lateral flow immunoassay, LFIA), 针对 T2 毒素的检测需求。通过优化纳米金颗粒(gold nanoparticles, GNPs)和量子点微球(quantum dot microspheres, QDMs)的组合, 获得最高 91.0% 的荧光猝灭效率, 最终实现 0.04 ng/mL 的检出限, 比传统免疫层析法提高 10 倍, 成为一种多功能、超灵敏的小分子筛选工具。从这些研究可看出免疫层析也通过技术创新在不断提高灵敏度和特异性, 能够在更短时间内检测更低浓度的污染物和病原体。

免疫荧光利用荧光标记的抗体特异性识别并结合目标抗原, 如食品中的病原菌和毒素。荧光标记的抗体与目标抗原结合后形成的复合物会发出荧光信号, 研究人员可通过荧光显微镜或荧光读数仪进行定性和定量分析。荧光显微镜提供高分辨率图像, 帮助观察样本中的细胞或微生物分布, 而荧光读数仪则快速、准确地测量荧光强度, 以推算样本中目标物质的浓度^[25]。免疫荧光试验的高灵敏度和特异性使其能够有效检测低浓度的病原菌和毒素, 尤其在复杂食品基质中提供可靠结果。因此, 该方法在食品安全监测中具有重要应用价值, 能够快速识别潜在的食品安全隐患, 保障消费者健康。然而, 免疫荧光试验需专门的荧光检测设备, 这可能增加实验成本和技术门槛。研究人员在实际应用中需综合考虑设备可用性、实验需求和经济性, 以选择合适的检测方法。总体而言, 免疫荧光方法是一种强大的工具, 为食品安全的快速检测提供高效、准确的解决方案, 推动食品安全监测技术的发展。YU 等^[26]介绍了一种荧光偏振免疫测定(fluorescence polarization immunoassay, FPIA)方法, 检测海藻酸(alginic acid, DA), 该物质是健忘性贝类中毒的主要毒素。对符合北美和欧盟监管限值(20 mg/kg) DA 浓度的生蚝进行回收测试, 结果显示回收率为 79.4%~114.7%, 与传统 ELISA 法相当。XIA 等^[27]开发了一种基于球形赖氨酸芽孢杆菌蛋白 S12 的 FPIA 方法, 能够同时检测 10 种氨基糖苷, 检出限为 5.25~30.25 ng/g, 显示良好的灵敏度和特异性。LARINA 等^[28]开发了一种基于碳量子点(carbon quantum dots, CQD)的 FPIA 方法, 检测庆大霉素、链霉素和阿米卡星, 检出限分别为 20、10 和 3 ng/mL, 已成功应用于乳制品中的抗生素检测。HUANG 等^[29]开发了一种超灵敏的 FPIA 方法, 检测稻米样本中的赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA), 检测范围为 0.03~0.78 ng/mL, 平均回收率为 70.0%~110.0%。NESTERENKO 等^[30]开发了一种 FPIA 方法, 检测抗菌药物磺胺噻唑, 分析时间为 5 min, 检出限为 3 ng/mL。ZHANG 等^[31]开发了一种基于单克隆抗体的 FPIA 方法, 检测地沟油中的辣椒素, 检出限为 1.56 ng/mL, 能够快速识别垃圾

油,适用于快速监测食用油的安全性。

免疫学方法在食品安全检测中的广泛应用和不断创新,极大地推动了食品安全监测技术的发展。通过提高灵敏度和特异性,这些方法能够在更短时间内检测更低浓度的污染物和病原体,保障消费者健康。然而,实际应用中仍需综合考虑设备可用性、实验需求和经济性,以选择最合适的检测方法。

1.2 分子生物学方法

分子生物学技术在食品安全检测中至关重要。基因检测技术,如 PCR、实时定量 PCR (real-time PCR, RT-qPCR) 和多重 PCR (multiplex PCR, mPCR), 广泛用于检测食品中的病原微生物和转基因成分。这些技术以其高灵敏度和特异性,成为食品安全检测的重要工具。

PCR 技术能够快速、准确地扩增特定 DNA 序列,从而在短时间内检测样本中的微生物。该过程包括变性、退火和延伸 3 个主要步骤:在变性阶段,双链 DNA 被加热分开;在退火阶段,特定引物与目标 DNA 结合;在延伸阶段,聚合酶合成新的 DNA 链。此循环过程重复多次,迅速增加目标序列的数量,从而能够在低浓度样本中也能检测到目标微生物。qPCR 在传统 PCR 基础上增加了实时监测 DNA 扩增的能力,通过荧光染料或探针实时测量荧光信号的强度,从而定量分析样本中目标 DNA 的初始浓度。这种方法提高了检测灵敏度并缩短了实验时间。mPCR 则允许同时检测多个目标序列,提高了检测效率,尤其适用于可能受到多种污染物影响的食品样本。HODZIC 等^[32]开发了一种基于水解探针(TaqMan)的多重 qPCR 系统,可在单步程序中同时检测 8 种常见的食品源性病原体,检出限约为每反应少于 10 拷贝的 DNA。BOUKHAROUA 等^[33]提出了一种快速方法,通过单一培养基进行富集和 mPCR 检测,成功识别大肠杆菌(*E. coli*)、单核细胞增生李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和沙门氏菌(*Salmonella enterica*)。PATIL-JOSHI 等^[34]开发了一种纸基 PCR 方法,使用 16S rDNA 和 LacZ 引物,能够在 2~3 h 内检测奶样中的污染物,结果与传统方法相当。YUAN 等^[35]则开发了一种基于 RT-qPCR 的电化学检测方法,能够灵敏检测活性克朗巴赫氏菌(*Cronobacter sakazakii*),检出限为 5.01×10^2 CFU/mL。

综上所述,分子生物学技术为食品安全检测提供了强有力的支持,能够有效识别和定量食品中的微生物及基因污染物,保障消费者健康。随着技术进步,这些方法的应用范围和检测能力将不断扩展,为食品安全管理提供更精准和高效的解决方案。

1.3 化学分析方法

化学分析法中的紫外-可见光谱、红外光谱和拉曼光谱在食品安全检测中发挥着重要作用。这些技术通过测量

物质对不同波长光的吸收、反射和散射特性,能够快速、无损地分析食品中的化学成分和潜在污染物。紫外-可见光谱技术适用于检测食品中的色素和添加剂,能够迅速提供准确结果,适合食品生产过程中的质量控制。红外光谱技术利用分子对红外光的吸收特性,提供脂肪、蛋白质和碳水化合物的详细信息,其无损检测特性使其在食品质量监测中得到广泛应用。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。ZUO 等^[36]开发了一种基于微型可见/近红外光谱仪的便携式设备,用于实时预测猪肉样品中的总活菌数(total viable count, TVC),显示出与复杂检测系统相当的性能。LUKACS 等^[37]比较了不同近红外光谱仪在低浓度蛋白粉掺假的检测能力,结果显示基于光栅台式光谱仪的数据构建的预测模型最为准确, R^2 值达到 0.96, 检出限接近 0.1%。ZUO 等^[38]采用 SERS 技术检测和分类 6 种食品源性病原菌,验证的平均准确率达到 95.65%。HUANG 等^[39]开发了一种基于金镀膜耐皿海绵(AuSp)的 SERS 检测方法,能够有效检测玉米赤霉烯酮和 T-2 毒素,检出限分别为 $1 \mu\text{g/kg}$ 和 $0.05 \mu\text{g/kg}$,且在 6 种谷物样品中的回收率为 85%~120%。

通过测量物质的光学特性分析食品中的成分和污染物,适用于各种食品质量监测和控制。研究者们开发了便携式设备和创新的检测方法,进一步提高了食品安全检测的效率和准确性,为保障食品安全提供了有力支持。

1.4 生物传感器

生物传感器是一种新兴的检测方法,基于生物识别元件(如酶、抗体和核酸)与物理化学传感器(如电化学传感器和光学传感器)的结合。这种技术实现了快速、灵敏的检测,具有显著优势。生物识别元件能够特异性识别和结合目标分析物,如病原微生物、毒素或特定化学物质。酶作为生物催化剂,通过催化反应产生可测量的信号,适用于检测食品中的农药残留或污染物。抗体在免疫传感器中用于检测食品中的病原体或过敏原,而核酸探针则用于快速识别特定微生物或转基因成分。物理化学传感器将生物识别反应转化为可测量信号,电化学传感器利用电流或电压变化进行快速检测,操作简便且成本低廉,适合现场应用。光学传感器通过测量光的吸收、荧光或散射,具有高灵敏度和快速响应,适用于复杂食品样本分析^[40]。ZHAO 等^[41]开发了一种结合机器学习和 CRISPR/Cas12a 技术的生物传感器,用于快速检测肉类物种的真实性,样本到结果的时间在 80 min 内。SUO 等^[42]开发了一种多模式生物传感器,结合电化学和比色定量技术,实现对黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)的灵敏检测,适用于现场食品安全筛查。QI 等^[43]利用 PCB 电极阵列开发适配体传感器,实现亚飞摩尔级别的 AFB₁ 检测,检出限为 620 amol/L,适合

现场应用。ZHANG 等^[44]利用局部表面等离子共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)技术开发生物传感器,检测草甘膦浓度,检出限为 1.94 $\mu\text{mol/L}$,表现良好。周强等^[45]结合分子印迹、电化学技术和金纳米颗粒修饰,开发了一种快速检测蔬菜中吡虫啉的传感器。该方法检出限为 3.3×10^{-12} mol/L。小白菜样品的加标回收率为 91.86%~102.25%,相对标准偏差为 1.98%~3.19%,该方法为农药残留速测产品的开发提供了参考。

综上所述,生物传感器技术为食品安全检测提供了高效、灵敏的解决方案,能够快速识别和定量食品中的有害成分。随着技术的不断进步,这些传感器的应用范围将进一步扩大,为食品安全管理提供更为精准和可靠的支持。

2 未来研究的方向

随着全球食品安全问题的日益严重,快速检测方法的研究与应用正变得愈发重要。未来的研究方向应聚焦于以下几个关键领域,以应对复杂的食品安全挑战^[46]。首先,集成化传感器的开发将是未来研究的一个重要趋势^[47]。通过结合电化学、光学和生物传感技术,研究人员可以设计出多功能传感器,实现对食品中多种污染物的同时检测。这种集成化的检测方法不仅提高了检测效率,还能降低检测成本,适应不同食品类型的需求。例如,利用纳米材料增强传感器的灵敏度和选择性,将有助于在复杂基质中准确识别目标分析物^[48]。乳制品生产企业可以在生产线上安装这些传感器,实现对乳制品中抗生素残留、重金属和病原菌的实时监测,确保产品质量和安全。其次,微流控技术的应用将推动快速检测设备的微型化和便携化^[49]。微流控芯片能够在极小的样本体积内进行多重分析,适合现场快速检测。这种技术的进步将使得食品生产和流通环节中的实时监测成为可能,从而及时发现潜在的安全隐患。农产品检测部门可以使用便携式微流控设备,在市场上随机抽样检测农药残留,及时发现和处理农药残留超标的问题。微流控设备也可以与智能手机应用程序结合,实现数据的实时传输和分析,提升检测的便利性和可及性。此外,人工智能(artificial intelligence, AI)和机器学习的结合将为快速检测方法的优化提供新的思路^[50]。通过对大量检测数据的深度学习和模式识别,AI 可以帮助研究人员提高检测的灵敏度和特异性,优化检测流程和结果分析。例如,利用机器学习算法分析传感器数据,可以实现对食品中微量污染物的快速识别和定量分析。在肉类产品中检测病原菌时,利用机器学习算法分析传感器数据,可以快速识别和定量分析肉类中的沙门氏菌和大肠杆菌等病原菌。肉类加工企业可以部署 AI 驱动的检测系统,对每批次产品进行检测,减少人工操作,提高检测效率和准确性。最后,标准化和规范化的检测流程将是确保检测结果可靠性的关键^[51]。未来的研究应致力于制定统一的检测标准,以便于不同实

验室之间的结果比较和验证。这不仅有助于提高检测的可信度,还能促进国际间的合作与交流,推动全球食品安全检测技术的发展。例如,在国际贸易中,食品出口需要符合进口国的安全标准。统一的检测标准可以减少贸易争端,促进国际合作。各国食品安全监管机构可以采用统一的检测标准,对进口食品进行检测,确保符合本国的安全要求,保障消费者的健康。

3 结束语

本文系统地总结了近年来食品安全快速检测方法的研究进展,涵盖了免疫学方法、分子生物学技术、化学分析法及生物传感器等多种检测手段。随着全球食品安全问题的日益严重,快速、准确的检测技术显得尤为重要。分子生物学技术如 PCR 及其衍生方法,凭借其高灵敏度和特异性,能够有效识别和定量食品中的微生物及基因污染物,为保障消费者健康提供了强有力的支持。同时,化学分析方法和生物传感器技术的进步,使得食品中化学成分及潜在污染物的检测变得更加高效和无损。

展望未来,食品安全检测领域将继续朝着集成化、微型化和智能化的方向发展。集成化传感器的开发将实现对多种污染物的同时检测,提升检测效率并降低成本。微流控技术的应用将推动快速检测设备的便携化,使得现场检测更加便捷。AI 与机器学习的结合,将为检测方法的优化提供新的思路,提升检测的灵敏度和特异性。此外,标准化和规范化的检测流程将确保检测结果的可靠性,促进国际间的合作与交流。

综上所述,随着技术的不断进步,食品安全检测方法的应用范围和检测能力将不断扩展,为食品安全管理提供更为精准和高效的解决方案,助力全球食品安全的提升。

参考文献

- [1] PEARSON AJ, MUKHERJEE K, FATTORI V, *et al.* Opportunities and challenges for global food safety in advancing circular policies and practices in agrifood systems [J]. NPJ Sci Food, 2024, 8(1): 60.
- [2] GRIHALAKSHMI K. Impact of globalization on food security and safety: A review [J]. Plant Arch, 2022, 22(2): 297–303.
- [3] GARVEY M. Food pollution: A comprehensive review of chemical and biological sources of food contamination and impact on human health [J]. Nutrire, 2019. <https://doi.org/10.1186/s41110-019-0096-3>
- [4] PAKDEL M, OLSEN A, BAR EMS. A review of food contaminants and their pathways within food processing facilities using open food processing equipment [J]. J Food Prot, 2023, 86(12): 100184.
- [5] HELEN O, SOUMYA G, KECHRIST O, *et al.* Preventing chemical contaminants in food: Challenges and prospects for safe and sustainable food production [J]. Food Control, 2024, 155(1): 110040.
- [6] ONYEAKA H, JALATA DD, MEKONNEN SA. Mitigating physical hazards in food processing: Risk assessment and preventive strategies [J]. Food Sci Nutr, 2023, 11(12): 7515–7522.

- [7] KABIRAZ MP, MAJUMDAR PR, MAHMUD MC, *et al.* Conventional and advanced detection techniques of foodborne pathogens: A comprehensive review [J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e15482.
- [8] LEI HT, WANG ZH, EREMIN SA, *et al.* Application of antibody and immunoassay for food safety [J]. *Foods*, 2022, 11(6): 826.
- [9] LI RX, WEN Y, WANG FL, *et al.* Recent advances in immunoassays and biosensors for mycotoxins detection in feedstuffs and foods [J]. *J Anim Sci Biotechnol*, 2021, 12(1): 108.
- [10] KHAN R, ANWAR F, GHAZALI FM. A comprehensive review of mycotoxins: Toxicology, detection, and effective mitigation approaches [J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e28361.
- [11] QIN LG, XIAO JX, YANG HF, *et al.* Rapid immunoassays for the detection of quinoxalines and their metabolites residues in animal-derived foods: A review [J]. *Food Chem*, 2024, 443: 138539.
- [12] LIANG YF, YANG JY, SHEN YD, *et al.* A breakthrough of immunoassay format for hapten: recent insights into noncompetitive immunoassays to detect small molecules [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2024, 14: 1–11.
- [13] DING YF, HUANG CX, ZHANG YM, *et al.* Magnetic microbead enzyme-linked immunoassay based on phage encoded protein RBP 41-mediated for rapid and sensitive detection of *Salmonella* in food matrices [J]. *Food Res Int*, 2023, 163(1): 112212.
- [14] JING XD, SHAN S, XING KY, *et al.* Sensitive fluorescence ELISA with streptavidin scaffolded DNA tetrads for the detection of *Escherichia coli* O157:H7 [J]. *J Dairy Sci*, 2023, 106(9): 5930–5939.
- [15] DASANAYAKA BP, ZHAO JL, ZHANG JK, *et al.* Development of a sensitive sandwich-ELISA assay for reliable detection of fish residues in foods [J]. *Anal Biochem*, 2021, 635: 114448.
- [16] ZHAN SN, ZHENG LY, ZHOU YF, *et al.* A gold growth-based plasmonic ELISA for the sensitive detection of fumonisin B1 in maize [J]. *Toxins*, 2019, 11(6): 323.
- [17] LU QZ, LI XX, ZHAO JK, *et al.* Nanobody-horseradish peroxidase and -EGFP fusions as reagents to detect porcine parvovirus in the immunoassays [J]. *J Nanobiotechnol*, 2020, 18(1): 7.
- [18] LIU SJ, SUN CY, ZHANG XY, *et al.* Advances in enhancement-type signal tracers and analysis strategies driven lateral flow immunoassay for guaranteeing the agri-food safety [J]. *Biosens Bioelectron*, 2025, 268: 116920.
- [19] ZHANG FY, WANG J, LIU WH, *et al.* A “four-in-one” immunochromatographic strip for multi-readout detection of diazepam in lake water and fish via nanozyme-mediated colorimetric, catalytic, and photothermal activities [J]. *Talanta*, 2024, 285: 127275.
- [20] ZHANG BB, LI S, ZHANG WT, *et al.* Sensitive and portable intelligent detection platform construction and dietary risk assessment of procymidone in Chinese leek, cowpea and celery [J]. *Food Chem*, 2024, 465(2): 142081.
- [21] SUN BY, WANG CL, WANG ZL, *et al.* Strategy for accurate detection of six tropane alkaloids in honey using lateral flow immunosensors [J]. *Sensors*, 2024, 24(22): 7265.
- [22] WANG JK, BU T, CUI QQ, *et al.* A broad-spectrum antibody-based lateral flow immunoassay for detection of carbofuran and 3-hydroxy-carbofuran [J]. *Food Chem*, 2024, 465(2): 142062.
- [23] CHEN C, XU WQ, ZHU YN, *et al.* Lateral flow immunoassay for the rapid detection of thiamethoxam in tea based on a SERS Tag constructed by phenolic-mediated coating engineering [J]. *J Agric Food Chem*, 2024, 72(44): 24786–24796.
- [24] DING MY, DOU LN, BU T, *et al.* Nanometal surface energy transfer-based lateral flow immunoassay for T2 toxin detection [J]. *Biosens Bioelectron*, 2025, 267: 116779.
- [25] MUKHAMETOVA LI, EREMIN SA. Fluorescence polarization assays for organic compounds in food safety [J]. *Front Biosci*, 2024, 16(1): 4.
- [26] YU O, MAO F, MOTOHIRO K, *et al.* Rapid determination of domoic acid in seafood by fluorescence polarization immunoassay using a portable analyzer [J]. *Anal Sci*, 2023, 39(12): 2001–2006.
- [27] XIA WQ, ZHANG L, WANG JP. Development of a fluorescence polarization assay for multi-determination of 10 aminoglycosides in pork muscle sample based on ribosomal protein S12 and studying its recognition mechanism [J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3196.
- [28] LARINA MY, FARAFONOVA OV, EREMIN SA, *et al.* Using carbon quantum dots for the determination of aminoglycoside antibiotics by fluorescence polarization immunoassay [J]. *J Anal Chem*, 2023, 78: 54–62.
- [29] HUANG XR, TANG XQ, JALLOW A, *et al.* Development of an ultrasensitive and rapid fluorescence polarization immunoassay for ochratoxin A in rice [J]. *Toxins*, 2020, 12(11): 682.
- [30] NESTERENKO IS, HENDRICKSON OD, SMIRNOVA NI, *et al.* Development of a polarization fluorescent immunoassay for sulfathiazole and its application for honey testing [J]. *Appl Biochem Microb*, 2023, 59: 104–109.
- [31] ZHANG JL, ZHANG MH, YANG QQ, *et al.* A simple and rapid homogeneous fluorescence polarization immunoassay for rapid identification of gutter cooking oil by detecting capsaicinoids [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2022, 414(20): 6127–6137.
- [32] HODZIC E, GLAVINIC A, WADEMAN C. A novel approach for simultaneous detection of the most common food-borne pathogens by multiplex qPCR [J]. *Biomol Biomed*, 2023, 23(4): 640–648.
- [33] BOUKHAROUA A, GONZÁLEZ A, MIGUEL GF, *et al.* Simultaneous detection of four main foodborne pathogens in ready-to-eat food by using a simple and rapid multiplex PCR (mPCR) assay [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(3): 1031.
- [34] PATIL-JOSHI A, RANGASWAMY BE, APTE-DESHPANDE A, *et al.* Paper-based PCR method development, validation and application for microbial detection [J]. *J Genet Eng Biotechnol*, 2021, 19(1): 37.
- [35] YUAN YY, WU XY, LIU ZM, *et al.* A signal cascade amplification strategy based on RT-PCR triggering of a G-quadruplex DNzyme for a novel electrochemical detection of viable *Cronobacter sakazakii* [J]. *Analyst*, 2020, 145(13): 4477–4483.
- [36] ZUO JW, PENG YK, LI YY, *et al.* Nondestructive intelligent detection of total viable count in pork based on miniaturized spectral sensor [J]. *Food Res Int*, 2024, 197(1): 115184.
- [37] LUKACS M, ZAUUU JZ, BAZAR G, *et al.* Comparison of multiple NIR spectrometers for detecting low-concentration nitrogen-based adulteration in protein powders [J]. *Molecules*, 2024, 29(4): 781.
- [38] ZUO HX, SUN YY, HUANG MM, *et al.* Classification and identification of foodborne bacteria in beef by utilising surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with chemometric methods [J]. *Foods*, 2024, 13(22): 3688.

- [39] HUANG XZ, XIA L, LI GG. Gold-grafted melamine sponge as surface-enhanced Raman spectroscopy substrate for enzyme-linked immunoassay of mycotoxins in cereal samples [J]. *Mikrochim Acta*, 2024, 191(12):758.
- [40] SINHA S, UPADHYAY LSB. Biosensing technology for detection and assessment of pathogenic microorganisms [J]. *Future Microbiol*, 2024, 29: 1–16.
- [41] ZHAO ZY, WANG RM, YANG XQ, *et al.* Machine learning-assisted, dual-channel CRISPR/Cas12a biosensor-in-microdroplet for amplification-free nucleic acid detection for food authenticity testing [J]. *ACS Nano*, 2024. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10823>
- [42] SUO ZG, LU T, LIU JH, *et al.* Electrochemistry-glucosemeter-smartphone integrated multi-mode biosensor for accurate detection of aflatoxin B1 [J]. *Anal Chim Acta*, 2025, 1333: 343398.
- [43] QI HC, ZHANG J, ZHANG XY, *et al.* A disposable microfluidic aptasensor for one-step and real-time detection of sub-femtomolar-level aflatoxin B1 in food [J]. *Food Res Int*, 2024, 197(1): 115144.
- [44] ZHANG Q, GU CF, SINGH R, *et al.* Hump-shaped seven-core fiber-based WaveFlex biosensor for rapid detection of glyphosate pesticides in real food samples [J]. *Opt Express*, 2024, 32(15): 25789–25804.
- [45] 周强, 牛明芬, 王镜然, 等. 金纳米颗粒修饰分子印迹电化学传感器快速检测蔬菜中吡虫啉含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(13): 1–9.
- ZHOU Q, NIU MF, WANG JR, *et al.* Rapid detection of imidacloprid in vegetables using a molecularly imprinted electrochemical sensor modified with gold nanoparticles [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(13): 1–9
- [46] SHEN C, WANG R, NAWAZISH H, *et al.* Machine vision combined with deep learning-based approaches for food authentication: An integrative review and new insights [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2024, 23(6): e70054.
- [47] SUN RM, LI Y, DU T, *et al.* Recent advances in integrated dual-mode optical sensors for food safety detection [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2023, 135(5): 14–31.
- [48] RUI XY, JIA BZ, WEN P, *et al.* Applications of electrospun nanofibers in food safety and quality analysis: A review [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2024, 152: 104686.
- [49] JIANG WJ, TANG Q, ZHU YD, *et al.* Research progress of microfluidics-based food safety detection [J]. *Food Chem*, 2024, 441: 138319.
- [50] ZATSU V, SHINE AE, THARAKAN JM, *et al.* Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence-a review [J]. *Food Chem X*, 2024, 24: 101867.
- [51] 吴鹏, 孙雅和, 朱旭丽, 等. 食源性致病菌快速检测技术及其标准化应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 426–437.
- WU P, SUN YH, ZHU XL, *et al.* Research progress on rapid detection technology and standardized application of foodborne pathogens [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2024, 45(5): 426–437.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

作者简介



覃 浩, 博士, 主要研究方向为分析化学与食品安全。

E-mail: hao.qin@rd.nestle.com



鲍 蕾, 研究员, 主要研究方向为食品安全与标准。

E-mail: Lei.bao@rd.nestle.com