贺玉婷, 候惠静, 刘秀英, 等. 纳米喷墨打印技术在食品分析检测中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 505−514. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070042

HE Yuting, HOU Huijing, LIU Xiuying, et al. Research Progress in Application of Nano Inkjet Printing Technology in Food Analysis and Testing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 505−514. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070042

· 专题综述 ·

纳米喷墨打印技术在食品分析检测中应用的研究进展

贺玉婷[1,2,3], 候惠静[1,2,3], 刘秀英[1,2,3,*], 刘　辰[1,2,3], 王平坪[1,2,3]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430000;
2.大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 湖北武汉 430000;
3.农产品加工与转化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430000）

摘　要: 食品分析检测是保障食品安全的核心环节，其技术创新对提升检测效率与精度至关重要，纳米喷墨打印技术凭借纳米级精准操控与材料可定制等优势，在食品安全检测领域表现出显著潜力。本文简述纳米喷墨打印技术的工作原理和特点，该技术通过计算机指令将纳米墨水雾化成微米级液滴逐层沉积形成功能结构，具有精准操控、材料兼容、功能集成的特点；重点阐述纳米喷墨打印材料类型及检测机制，通过对纳米材料（金属纳米粒子、半导体纳米粒子和碳基纳米材料）的精准操控，构建了基于比色法、荧光法、拉曼光谱法和电信号检测的高灵敏度器件；研究归纳了纳米喷墨打印技术在食品成分分析、微生物和有害物检测等领域的应用实例，综述其在食品分析检测方面的研究进展，并对当前存在的问题和今后的研究趋势进行了总结和展望，旨在为食品安全检测提供参考。

关键词: 纳米打印, 纳米墨水, 食品安全检测, 电化学检测, 传感检测

中图分类号: TS203　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0505−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070042

本文网刊:

Research Progress in Application of Nano Inkjet Printing Technology in Food Analysis and Testing

HE Yuting[1,2,3], HOU Huijing[1,2,3], LIU Xiuying[1,2,3,*], LIU Chen[1,2,3], WANG Pingping[1,2,3]

（1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430000, China;
2.Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education, Wuhan 430000, China;
3.Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430000, China）

Abstract: Food analysis and testing are essential components in ensuring food safety, and technological innovation is crucial for improving testing efficiency and accuracy. Nano-inkjet printing technology, with its advantages of nanoscale precision and material customizability, demonstrates significant potential in the realm of food safety detection. This study presents a concise overview of the working principles and features of nano-inkjet printing technology, which atomizes nano-ink into micron-sized droplets layer by layer under computer instructions to form functional structures, featuring precise control, material compatibility, and functional integration. The study focuses on the categories of printing materials and their corresponding detection mechanisms. By precisely manipulating nanomaterials (metal nanoparticles, semiconductor nanoparticles, and carbon-based nanomaterials), high-sensitivity devices based on colorimetric methods, fluorescence methods, Raman spectroscopy, and electrical signal detection have been developed. The study summarizes application examples of nanoscale inkjet printing technology in areas such as food composition analysis, microbial detection, and

收稿日期: 2025−07−04

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目（D20241704）。

作者简介: 贺玉婷（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮油储藏与检测、真菌毒素检测, E-mail: heyuting422@163.com。

*** 通信作者:** 刘秀英（1987−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食储备与质量安全, E-mail: xiuyingliu727@126.com。

harmful substance detection. It reviews the research progress in food analysis and detection using this technology and offers a summary and outlook on current challenges and future research trends, aiming to provide valuable insights for food safety detection.

Key words: nano printing; nano ink; food safety testing; electrochemical detection; sensing detection

食品分析检测作为保障食品安全的重要环节，其持续创新对推动检测技术的发展具有重要意义。随着食品生产规模扩大与供应链复杂化，传统检测技术在速度、成本与现场适用性方面的局限日益凸显。光谱[1]、色谱-质谱联用[2]及免疫与分子生物学等方法[3]虽各有优势，但仍面临诸多挑战，食品基质中复杂成分的干扰，严重影响痕量有害物质检测准确性；同时，检测技术设备存在成本高昂、操作复杂等问题，难以满足基层与资源有限地区的快速筛查需求。在此背景下，纳米喷墨打印技术凭借其独特的纳米级操控能力和材料可定制等特性，在食品分析检测领域展现出显著优势，该技术通过精准打印纳米传感材料等方法，开发出兼具高灵敏度、强特异性及微型化特征的新型检测平台[4]，不仅推动了传统检测方法的革新，还为便携式现场快检设备的研发提供了思路，有效提升了食品安全监测体系的响应速度与检测精度。

当前，纳米喷墨打印技术已在食品检测领域形成多维度应用场景。例如，利用表面增强拉曼散射（Surface Enhanced Raman Scattering）基底实现农兽药残留的痕量检测[5−6]，通过荧光量子点微阵列完成微生物污染的可视化筛查[7−8]，借助电化学适配体传感器实现食品新鲜度的实时监测等[9]。用纳米喷墨打印技术制备的生物传感器和试纸条[10]，能够准确、高效地进行食品分析检测，及时发现食品中的各类问题，包括成分异常、微生物污染和有害物质违规使用等[11]。此外，由于纳米喷墨打印技术可以精确控制材料的使用量，能够减少材料的浪费，进一步提高成本效益。通过微流控芯片、纸基传感器等便携化器件开发，突破了传统检测对大型仪器的依赖，推动检测场景向现场化、即时化延伸，符合现代食品行业对经济高效检测技术的追求。

本文系统介绍纳米喷墨打印技术，以及其在食品分析检测中应用的研究进展。重点介绍纳米喷墨打印的材料类型及分析方法，综述其在食品分析检测中成分分析、微生物和有害物检测等方面的应用进展，以期为纳米喷墨打印技术的发展提供重要参考。

1 纳米喷墨打印技术简介

1.1 纳米喷墨打印技术的工作原理

纳米喷墨打印技术是一种将纳米材料与数字化喷印相结合的精密制造技术。该技术的工作原理如图 1，主要包含三个关键步骤[12−14]：首先，通过计算机系统将设计图像转换为高精度的数字控制指令；其次，喷墨打印系统将纳米墨水材料雾化成微米级液滴，并按预设路径精准喷射至特定的基底表面；最后，通过逐层沉积的方式，使纳米墨水液滴按照数字模型精确堆叠，最终形成具有特定功能的微纳米结构或器件。整个打印过程的定位精度可达±5~25 μm，单层厚度控制在亚微米级[15]。

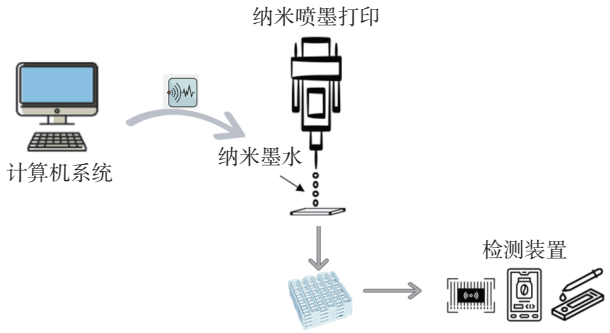


图 1 纳米喷墨打印技术的工作原理

Fig.1 Working principle of nano inkjet printing technology

纳米喷墨打印技术主要分为热喷墨打印和压电喷墨打印[16−17]。热喷墨打印具有速度快、成本低的优势，适合大规模生产结构简单的检测器件，如纸基比色传感器。热喷墨打印侧重于快速筛查，且对精度要求不高的普通化学物质检测，适合食品生产线中常见添加剂的初步检测。压电喷墨打印对墨水兼容性更好，能够精准控制液滴，适用于制备高精度、复杂结构的检测芯片，如多通道电化学传感阵列。尤其适用于食品中痕量危害物（如真菌毒素、重金属离子）的高灵敏度检测，但该技术的设备成本较高、打印速度相对较慢。

1.2 纳米喷墨打印技术的特点

在食品分析检测领域，纳米喷墨打印技术的发展十分迅速。国内外的研究团队已经开发出多种高灵敏度的检测器件，例如，结合量子点与抗体打印的传感器用于食源致病菌检测[18]。同时，部分食品企业已开始引入打印型传感器，例如，一些奶制品厂利用这类传感器监测牛奶中三聚氰胺的残留。然而，该技术的广泛应用仍面临多重挑战。首先，墨水稳定性不足，纳米材料易团聚并堵塞喷头，影响打印的精准度与连续性；其次，墨水与基底兼容性差，导致制备的检测器件性能稳定性下降，在检测复杂食品基质时，该技术易受干扰，多目标同时检测的准确性难保障。此外，纳米喷墨打印技术在食品检测中的标准化进程缓慢，不同实验室、不同设备制备的检测器件性能差异较大，缺乏统一的性能评价标准与检测规范，这在很大程度上制约了该技术的大规模推广与应用。

不过，正是在应对这些挑战的过程中，纳米喷墨打印技术自身独特的优势得以凸显。纳米喷墨打印

技术能实现对纳米材料的精确操控与定位，定位精度达亚微米级别，实现对食品中痕量危害物的超灵敏识别；纳米喷墨打印的材料适应性广，可兼容各类纳米材料，还能根据需求灵活调整墨水配方，实现多种材料混合打印以开发不同性能的检测器件；该技术可同时打印不同功能的纳米材料或生物探针，实现对食品中不同成分的同步检测。此外，其还能结合荧光、电化学、表面增强拉曼散射等多种检测技术，通过在检测位点将纳米材料沉积，短时间内即可实现对被检测物质的快速检测，甚至可直接在食品包装内表面打印纳米传感标签，通过颜色变化直观指示食品新鲜度。

正因纳米喷墨打印技术以上的这些特点及潜力，近年众多学者对其不断地深入研究，从纳米打印材料、喷墨纳米打印方法等为切入点不断研究其在食品检测领域的更多可能。其中，打印墨水的理化性质将直接影响打印精度和图案质量，而功能材料的生物识别能力和信号传导效率则决定了检测的最终性能。因此，开发和选择适用于食品检测分析的高性能纳米打印材料，成为推动该技术实用化的关键。

2　纳米打印材料类型

在纳米喷墨打印技术的研究中，根据打印应用环境场景、检测目标特性及功能需求等的不同，通常纳米打印材料分为金属纳米粒子、半导体纳米粒子和碳基纳米材料等类型。

2.1　金属纳米粒子

含金属纳米粒子的墨水是纳米喷墨打印技术中常用功能性墨水。这类墨水通常由金（Au）、银（Ag）、铜（Cu）或钛（Ti）等金属纳米颗粒构成[19–20]。在打印过程中，这些纳米颗粒可稳定分散于溶剂中，经高精度打印形成规整功能结构。

金纳米粒子具有高电子密度、独特光学特性与良好生物相容性[21]，适合打印 SERS 基底或免疫传感器。当食品中的待测物质吸附在金纳米颗粒表面时，拉曼散射信号会被大幅增强，通过检测信号变化，就能实现对食品中微量物质的定性和定量分析[22]。银纳米粒子对多种微生物具有高抗菌活性，具备出色的导电性和显著的表面效应[23–25]，可制备出用于检测食品中微生物、蛋白质、核酸等物质的传感器。相较于传统检测方法，银纳米粒子打印提升检测灵敏度，可实现痕量检测。有研究表明，在利用银纳米粒子打印制备的传感器检测原料奶中三聚氰胺时，检测限可达到 2.32 μmol/L，无需复杂前处理与精密仪器，肉眼即可识别[26]。

金和银纳米粒子属于贵金属，成本较高，而铜纳米粒子不仅价格低廉，还兼具良好的导电性和催化活性，因此常作为喷墨打印中纳米金和银的替代材料[27]。例如，Ahmad 等[28] 将氧化铜纳米粒子（CuONPs）打印在银电极上，用于制备非酶葡萄糖生物传感器（图 2），利用 CuONPs 的化学稳定性与 Ag 表面类孔结构，避免粒子团聚与氧化干扰，制成的

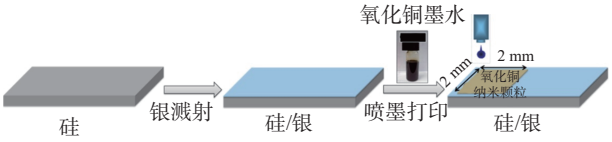


图 2　喷墨打印 Si/Ag/CuONPs 电极的过程[28]

Fig.2　Inkjet printing process of Si/Ag/CuONPs electrodes[28]

非酶葡萄糖传感器稳定性强，可用于人血清葡萄糖检测。

综合现有研究报道发现，金和银纳米粒子不仅具有更优异的导电性，而且化学稳定性更高，但是成本也较高。铜、铝纳米粒子价格低廉，具备一定导电能力，但其化学性质较为活泼，在潮湿、酸性条件或含氧化剂的食品基质中易发生氧化反应[29]，这不仅会导致导电性能显著下降，还可能引起检测信号失真。未来，如何平衡打印成本与检测稳定性，将成为金属纳米粒子墨水在喷墨打印技术中需要解决的关键问题之一。

2.2　半导体纳米粒子

半导体纳米粒子凭借其出色的光稳定性和良好的生物相容性[30]，能兼容复杂食品体系并快速响应，在食品快速检测领域展现出独特优势。量子点、二氧化钛、氧化锌是目前相关研究中报道最多的三种材料。

量子点（QDs）指直径为几个纳米的半导体纳米晶体[31]，具有优异的荧光特性，可实现多色荧光标记与成像分析[32]，通过控制特定量子点的尺寸，可以微调它们的物理、光学和电学特性。此外，量子点材料可通过阵列化排布实现多目标同步检测，为食品中多污染物的现场快速筛查提供新思路[33]。例如，Luan 等[34] 将 QDs 和聚二甲基二烯丙基氯化铵沉积，并套印乙酰胆碱酯酶成微阵列（图 3），利用有机磷对酶活性的抑制作用改变荧光强度，通过调节墨水层数控制亮度，实现食品中有机磷农药的定量快速检测。

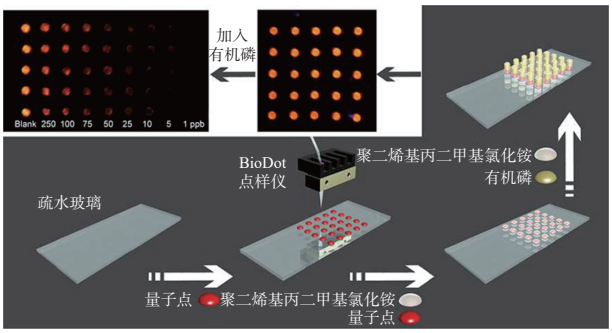


图 3　喷墨打印 CdTe 量子点/乙酰胆碱酯酶微阵列示意图[34]

Fig.3　Inkjet printing of CdTe quantum dots/acetylcholinesterase microarrays[34]

二氧化钛纳米粒子因具有强氧化性、化学性质稳定、光催化活性高及低毒性等特性[35–36]，可用于制备光催化降解有机污染物的装置，去除食品中有害物质，同时也可用于构建光电化学传感器，实现食品中

有害物质的检测。氧化锌具有独特的光电性能和催化活性[37],将氧化锌纳米颗粒墨水打印在基底上,利用氧化锌对特定气体的吸附和反应特性,可制备具有高灵敏度和选择性的气体传感器,可用于检测食品中的微生物和化学物质[38]。

2.3 碳基纳米材料

以石墨烯和碳点等为主的碳基纳米材料,主要应用在传感器和分离富集。高导电性与较大比表面积的特点,使该材料在提高传感器的电子传输效率,确保信号的快速与稳定传导等方面发挥重要作用。

石墨烯因其独特的材料特性(包括优异的高电导率、超大比表面积和良好的生物相容性),在提升电化学传感器性能方面展现出显著优势[39]。例如,Hassan 等[40] 将石墨烯与氧化锌纳米颗粒分散在乙醇溶剂中,制备用于沉积活性层的油墨溶液,并将其打印在低成本衬底上,成功制备了基于石墨烯/氧化锌纳米复合薄膜的湿度传感器。该复合材料结合了两种单独材料的优点并提高了传感器性能,通过喷墨打印的复合薄膜的活性层,能达到约 300 nm 的厚度,实现了高灵敏度和宽传感范围。

碳点(CDs)是一种尺寸小于 10 nm 的新型荧光碳基纳米材料[41],由于其优异的荧光特性、良好的生物相容性和低毒性可被用于生物传感器[42−43]。如 Deng 等[44] 以三种荧光碳点为墨水,在改性的滤纸上打印多通道微流控传感器,可同步半定量检测维生素 C、NO_2^-与日落黄,在检测过程中,荧光淬灭变化肉眼可见,且打印工艺实现高分辨率、低成本量产。喷墨打印使该芯片具有高分辨率、低成本、高效量产等优点,已成为纸基传感器制造的最前沿技术之一。

综上所述,金属纳米粒子凭借独特光学、导电及抗菌性能,在 SERS 检测等领域优势显著,但仍存在解决成本与稳定性平衡问题;半导体纳米粒子光稳定性强,适用于食品快速筛查;碳基纳米材料则因其优异的导电性与生物相容性,为传感器系统的构建提供了重要支撑。三类材料协同推动纳米喷墨打印技术在食品检测领域发展,未来研究应着重优化材料性能,强化墨水配方与打印工艺适配性,以满足实际应用需求。

3 基于纳米喷墨打印技术的分析方法

纳米喷墨打印技术凭借其精准定位、高通量制备及良好的材料兼容性等优势,在食品分析与检测领域展现出巨大应用潜力。该技术主要通过光学、电化学等信号转换机制,结合纳米材料的协同作用,实现对食品中有害物质的高灵敏度检测。根据所用纳米墨水的特性和检测原理差异,分析方法主要分为比色法、荧光法、拉曼光谱法和电信号检测法。

3.1 比色法

比色法是基于物质对特定波长光的吸收或散射特性,通过颜色变化实现对目标物检测的技术[45]。与纳米喷墨打印技术融合时,凭借后者高精度沉积特性,纳米墨水被均匀打印于特定基材表面。当打印的纳米材料与目标物特异性结合时,可诱导纳米材料光学性质改变,产生肉眼可辨或仪器可检测的显色响应。

Shibata 等[46] 采用喷墨打印技术制备了一种距离读出式微流控纸基分析装置,利用光极纳米球的显色长度变化实现饮用水样品中 Ca^{2+}的裸眼定量检测,这种基于距离比色的检测模式无需复杂仪器,适用于水质的现场快速筛查。Yu 等[47] 利用特定的鼠伤寒沙门氏菌适配体,与聚苯乙烯微粒上的金纳米颗粒相结合制备生物墨水,并打印到 NC 膜上,构建适配体侧向层析体系用于检测鼠伤寒沙门氏菌。该生物墨水在打印中功能稳定,多层沉积保障了信号强度,实现生物捕获分子高效固定。相比 Shibata 等[46] 的研究,该方法检测对象更具针对性,且在检测灵敏度和特异性上表现优异,对常见食源性致病菌交叉反应率低于 5%。但该技术在墨水制备上更为复杂,对实验操作要求较高,为食品安全监测提供了新的技术方案。Li 等[48] 报道了其最新研究,成功开发出基于 Fe-β-CD 纳米酶的喷墨打印试纸传感器。该研究创新性地采用喷墨打印技术将 Fe-β-CD 纳米酶精确沉积于滤纸基底,通过智能手机色彩分析技术,建立了抗坏血酸的高效比色检测平台。该方法利用智能手机分析色彩,与裸眼检测相比提升检测精度,检测灵敏度达 6.1 μmol/L。不过,该技术对智能手机设备及配套分析软件有一定要求,在设备兼容性上存在挑战。

综合以上研究,未来纳米打印技术与比色法的发展将呈现检测目标多元化的趋势,检测范围不再局限于小分子,而是拓展至微生物等更广泛的目标物。通过纳米墨水的功能革新,如将酶、适配体等生物分子负载于纳米材料中,利用生物-纳米协同效应,可实现高特异性、高灵敏度的比色检测,满足不同应用场景的需求。

3.2 荧光法

荧光法是基于荧光纳米材料(如量子点、上转换纳米颗粒、荧光染料)的发光特性[49],通过检测荧光信号强度、波长或寿命变化实现目标物分析的技术[50]。其原理是利用纳米材料受激发后产生的荧光信号与目标物发生特异性相互作用,从而实现对生物分子、化学污染物等的高灵敏度检测。

Tong 等[51] 进一步升级了荧光打印技术,通过水热法合成多色荧光碳点,并将其与抗生素适体和二硫化钼纳米片结合,制备出“荧光关闭”型纳米探针,再通过喷墨打印制备纸基微流控芯片。该技术创新性地整合了多色荧光编码与智能手机检测平台,利用不同碳点的特征发射波长实现多种抗生素的同步识别,通过手机捕捉荧光颜色变化完成定量分析。相较于试纸条,微流控芯片设计减少了试剂消耗并缩短了检测时间,但该技术依赖多色荧光材料的精准合成与打印配比控制,对墨水稳定性要求更为严苛。

综合来看,荧光法与纳米喷墨打印技术的结合

从单信号可视化检测到比率荧光设计，再到最新研究的多色荧光编码与智能手机联用，逐步实现了从定性到定量、从单目标到多目标、从依赖仪器到现场便携的技术跨越。未来研究将集中于新型纳米荧光打印墨水的开发与实际应用，进一步拓展在复杂食品基质中痕量污染物检测的应用场景。

3.3　拉曼光谱技术

拉曼光谱技术（SERS）具有快速、无损、高灵敏度、高选择性等优点[52]，且对样品的制备要求较低，可直接检测固体、液体、气体等多种形态的食品样品，是食品成分分析、农药残留以及污染物检测的重要工具。纳米喷墨打印技术为 SERS 基底制备开辟新途径，通过精准控制金属纳米墨水沉积，实现高活性、高重现性检测平台的规模化生产，二者融合已成为食品检测领域的关键技术趋势。

从 SERS 活性基底的制备技术来看，Liao 等[53]采用直接喷墨打印策略，将含金属纳米材料的墨水打印于柔性纸基底，制备出 SERS 活性试纸。该技术的核心优势在于简化基底制备流程，直接通过打印实现金属纳米颗粒的均匀沉积，同时，柔性纸基底本身无拉曼背景信号干扰，且多孔结构可增强目标物吸附，对常见拉曼活性分子及食品有毒物质均展现出高灵敏度。不过，该方法的局限性在于基底稳定性依赖墨水与纸张的结合力，长期储存易出现纳米颗粒脱落的情况，且检测对象未针对复杂食品基质进行优化，抗干扰能力有待验证。

Han 等[54]则在基底改性技术上实现突破，先对纤维素纸的表面进行改性，再通过喷墨打印将银纳米颗粒图案化沉积，制备出便携式 SERS 阵列。表面改性处理显著提升了银纳米颗粒与纸基底的结合稳定性，同时增强了对目标物的吸附能力，阵列式微结构增加了金属纳米颗粒间的间隙区域，进一步提升检测灵敏度。该 SERS 阵列可直接应用于牛奶、酸奶等复杂乳制品基质中三聚氰胺的检测，且具有较高的重现性和良好的灵敏度，解决了基底稳定性与复杂基质抗干扰问题，拓展了技术在实际食品样品检测中的适用性。

3.4　电信号

电信号检测是基于纳米材料修饰电极界面的电化学响应特性，通过监测电流、电位、阻抗等电信号变化实现目标物定量分析的技术，其核心在于利用纳米材料（如石墨烯、金属纳米颗粒）的高导电性特性。电信号检测无需光学激发系统，通过电化学反应直接获取信号，具有检测速度快、仪器便携化、成本低等特点。

Dang 等[55]通过在 PET 薄膜上喷墨打印银纳米颗粒的墨水，并在银图案顶部进行铜电沉积，设计了一种柔性 RFID 标签传感器，用于检测肉制品的保质期。该传感器可贴合食品包装表面，实时监测肉制品储存过程中挥发性盐基氮、组胺等指标引发的电信号变化，适用于食品供应链的批量监测。但也存在明显局限，银-铜复合电极在高湿度食品储存环境中易发生氧化，导致检测信号漂移，难以满足长期监测需求。相比之下，Ebrahimi 团队[56]直接在纸基上打印高导电性纳米银墨水，开发了用于牛肉中组胺检测的电化学传感器。纸基的多孔结构加速了分子吸附，使检测可在 20 min 内完成，通过配方优化，可将银颗粒团聚率控制在 5% 以内，提升电极均匀性，为食品中生物胺的现场快速检测提供了低成本、便携式的新方案。

综上，基于纳米喷墨打印技术的四种分析方法，凭借该技术精准沉积、高通量制备的核心优势，结合纳米材料的独特光学或电化学特性，成功实现对食品中有害物质的高灵敏度检测，且在便携化与现场化应用场景中展现出潜力。

4　纳米喷墨打印技术在食品分析检测中的应用

食品分析检测是保障食品安全和品质的重要手段，通过科学的方法对食品中的各种成分、有害物质等进行定性和定量分析，如检测食品中的营养成分、微生物、毒素、重金属、添加剂超标等[57]（表 1），可以有效减少有害物质对人体造成危害，更好地保障消费者的健康。

4.1　食品成分分析检测

纳米喷墨打印技术为蛋白质、氨基酸、维生素等食品营养成分的分析检测提供了新路径，其制备的传感器和微流控芯片在实际应用中展现出显著优势，同时也存在待突破的局限。

Shen 等[58]用聚苯乙烯和疏水性二氧化硅纳米颗粒制备疏水基材，以胶体球分散体为墨水，打印了 Y 形光子晶体（PC）微流控芯片，并同步打印定位检测探针，用于食品中蛋白质的无标记检测，该芯片 Y 形分支末端可同时对比有/无抗体探针的靶抗原响应，借助 PC 阻带特性引导流体传输，通过比色分析监测流体通量，肉眼即可观察结果。同时喷墨打印可以实现 PC 微流体芯片的一步制造，有助于提升芯片活性位点密度，进一步保障检测灵敏度。Kant 等[59]聚焦于无酶电化学传感器的喷墨打印制备，采用绿色方法合成水性金纳米墨水，打印在聚乙烯醇缩甲醛基底上制成电极，构建用于葡萄糖检测的无酶传感器，该传感器对于葡萄糖的测定检测限（LOD）为 10 mmol/L，具有 0.05~35 mmol/L 的宽线性范围。该传感器解决了酶联免疫法中酶易失活的问题，即使在存在复杂样品基质的情况下也能对葡萄糖分析具有很高的选择性，未来可以大规模生产，用于生物和食品样品中葡萄糖的常规监测。

维生素作为食品中重要的微量营养成分，其快速检测同样依赖纳米喷墨打印技术的创新应用，Jadav 等[60]将纳米颗粒与环氧树脂复合制备导电油墨，通过喷墨打印固化技术构建银/碳丝网印刷电极，通

表 1 纳米喷墨打印技术在食品分析检测中的应用

Table 1 Application of nano inkjet printing technology in food analysis and testing

检测目标	纳米材料	应用形式	检出限	方法特点	应用场景	参考文献
抗坏血酸	铁基*β*-环糊精纳米酶	试纸条	6.1 μmol/L	试纸条+智能手机模式	果汁类食品的AA含量测定	[48]
组氨酸标签蛋白	聚丙烯酸酯基光聚合物和多孔硅	适配体传感器	0.04 μmol/L	监测多孔硅的反射率变化	组氨酸标签蛋白纯化特异性检测	[70]
葡萄糖	AuNPs	电化学传感器	10 μmol/L	绿色合成, 无酶传感器	血清中葡萄糖常规监测	[59]
As^{3+}和L-半胱氨酸	AMTPP-AgNPs	纸基传感器	As^{3+}: 0.05 μmol/L、L-半胱氨酸: 0.063 μmol/L	双检测模式: 紫外精准; 纸基+手机适合现场	食品样品(肉类、玉米)中As^{3+}污染及L-半胱氨酸含量监测	[61]
组胺	AgNPs	纸基传感器	10 nmol/L	成本更低、制作更快、分析时间短	牛肉等肉类样品中组胺的现场快速检测	[56]
三聚氰胺	AgNPs	SERS阵列	0.27 mg·L^{-1}	银墨水储存12周稳定, 无需复杂前处理	牛奶、酸奶中三聚氰胺现场快速检测	[54]
大肠杆菌	AuNPs	安培免疫传感条	PBS缓冲液6×10^2 CFU/mL; 牛奶中约5×10^3 CFU/mL	灵敏度更高、特异性强, 且为低成本一次性电极	食品(如牛奶)中大肠杆菌O157:H7的现场快速筛查	[62]
FB_1和AFB_1	半导体单壁碳纳米管	生物传感器	FB_1: 8.23 pg/mL、AFB_1: 7.48 pg/mL	可同时检测两种毒素且检出限更低	谷物中FB_1和AFB_1的同时现场检测	[71]
ZEN和OTA	氧化镍-羧基化多壁碳纳米管; Ag/AgCl	电化学传感器	独立检测: ZEN6 ng/mL、OTA15 ng/mL; 同时检测: ZEN14 ng/mL、OTA45 ng/mL	不受钾、镁的影响	谷物类饲料中ZEN和OTA的现场同时检测	[66]
重金属化合物	AgNPs	SERS阵列	–	无需复杂样品处理及标记, 制备成本低	重金属化合物检测	[67]
Hg^{2+}	AgNPs	纸基比色传感器	10 μg/L	不受其他金属离子/阴离子干扰	水样中Hg^{2+}的现场快速检测	[72]
碘离子	碳点和AuNCs	荧光比色试纸条	荧光探针溶液: 0.70 μmol/L、试纸条: 2.0 μmol/L	减少假阳性, 抗F^-、Cl^-等阴离子干扰; 温度稳定性优异,	医疗监测、现场健康筛查	[73]
孔雀石绿	AuNPs	SERS试纸	1 nmol/L	直接擦拭果蔬表面取样, 且背景拉曼/荧光信号低, 支持分子成像	食品农残现场快速筛查	[53]
农药	金纳米颗粒	SERS芯片	低于10 ppm	检测快、便携, 能检测12种农残	果蔬中农药残留的现场即时检测	[74]

注: “–”表示未记录。

过循环伏安法用于果汁中维生素 C 的检测。其对维生素 C 的检测限为 35 μg, 检测范围为 35~280 μg, 实际检测的果汁样品中维生素 C 含量范围为 5~60 mg/100 mL, 与标准生化方法相比, 该方法无需复杂样品前处理、检测响应时间短(<4 s), 且制备成本更低、更易实现小型化与现场检测, 还可避免果汁中常见的柠檬酸、葡萄糖等物质的干扰, 适用于食品行业快速分析需求。在单一成分检测基础上, 多重检测方法可同步检测多种分析物, 是该领域的重要研究方向, 能显著提升检测效率、降低成本。Rasheed 等[61] 通过喷墨打印将 AMTPP 功能化银纳米颗粒沉积在滤纸上, 制备纸基传感器, 结合紫外-可见分光光度法和智能手机辅助分析来检测食品样品中 As^{3+}和 L-半胱氨酸。通过紫外-可见分光光度法测定, As^{3+}的 LOD 为 0.0092 μmol/L、检测范围 0.1~100 μmol/L, L-半胱氨酸的 LOD 为 0.0052 μmol/L、检测范围 0.01~100 μmol/L, 而喷墨打印纸基传感器的 LOD 分别为 0.05 μmol/L(As^{3+})和 0.063 μmol/L(L-半胱氨酸), 检测范围均为 0.1~100 μmol/L, 且在加标肉类(鸡肉、牛肉、羊肉、鱼肉)和玉米样品中回收率良好。

综上, 纳米喷墨打印技术在食品成分分析中, 突破了传统检测方法对大型仪器的依赖, 具有低成本、便携化和可视化等优势, 可满足多场景检测需求。检测速度平均缩短 50% 以上、检测限接近传统精密仪器水平。但复杂基质中稳定性与抗干扰能力待提升、高成本纳米材料限制规模化推广, 未来需开发多成分检测芯片、优化墨水配方、选用低成本材料拓展应用场景。

4.2 微生物检测

食品中细菌、真菌等微生物污染会在生产、加工、储存、运输等环节侵入, 导致食品变质、营养成分损失, 甚至产生毒素危害人体健康, 因此, 快速、准确地检测食品中微生物对于保障食品安全至关重要, 纳米喷墨打印技术在该领域应用效果突出。

Lin 等[62] 开发了一种基于金纳米颗粒修饰丝网印刷碳电极的一次性安培免疫传感试纸条, 检测牛奶中的大肠杆菌 O157:H7。该试纸条采用间接夹心安培法免疫测定, 制成 AuNPs/FeDC-SPCE 免疫传感条, 可以在 1 h 内检测到牛奶样品中大约 50 CFU 的大肠杆菌 O157:H7。传统微生物培养法检测大肠杆菌 O157:H7 需 24~48 h, 且检测限多在 100 CFU 以上, 该技术大幅缩短检测时间、降低检测限, 为食品

微生物快速检测提供新思路，提升检测效率。随着研究的不断深入，微生物检测从单纯的利用纳米材料增强检测信号，发展到深入探究纳米材料与其他物质的协同作用。除免疫传感技术之外，酶促反应与纳米喷墨打印结合的检测方式，为微生物可视化检测开辟了新路径。Creran 等[63] 开发了一种基于喷墨打印技术的酶促试纸条，用于快速检测水中细菌（图 4），通过将 β-半乳糖苷酶与阳离子金纳米颗粒的静电复合物，以及显色底物氯酚红-β-D-吡喃半乳糖苷分别打印在纸条上，利用细菌表面负电荷竞争取代酶-纳米颗粒复合物，恢复酶活性并催化底物生成紫色产物，实现可视化检测。该技术对水中常见盐类和重金属干扰耐受性强，传统比色法检测水中细菌易受盐类、重金属影响，需要复杂的前处理去除干扰，而该试纸条无需额外处理即可直接检测，检测时间从传统方法的 2~3 h 缩短至 40 min 内。同时，纳米打印实现精确图案化沉积，提升酶促试纸条活性位点密度，同一批次试纸条检测信号 RSD 小于 8%，重现性优于传统手工点样制备的试纸条。

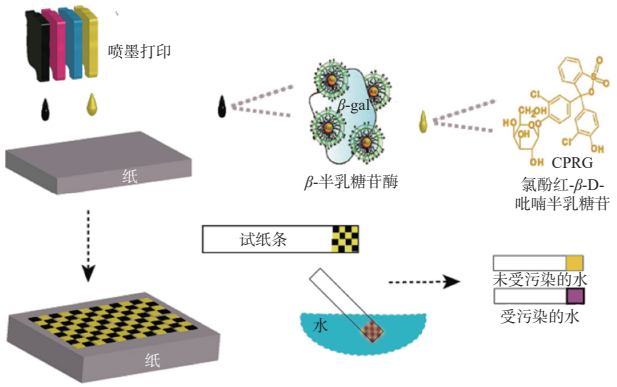


图 4　喷墨打印的酶试纸检测细菌示意图[63]

Fig.4　Schematic diagram of the detection of bacteria by inkjet printed enzyme test strips[63]

除了直接检测微生物本身，其代谢产物的检测也是保障食品安全的重要环节。Neagu 等[64] 开发了一种基于分子印迹聚合物空心微球、氧化锌纳米颗粒和导电碳糊的混合电活性墨水，通过喷墨打印技术在塑料基底上批量制备传感器，用于检测源自铜绿假单胞菌的脂多糖（LPS）。该传感器在磷酸盐缓冲液中具有良好稳定性，对铜绿假单胞菌 LPS 的选择性显著优于肠道链球菌和大肠杆菌的 LPS（交叉反应率<5%），传统免疫法对结构相似的 LPS 物种交叉反应率多在 10%~15%。喷墨打印可实现传感器的低成本、高通量制备，为食品中特定微生物代谢产物的批量检测提供可行方案。纳米喷墨打印技术能够优化检测技术，提供更便捷的检测方式，将极大地拓展微生物检测的应用场景，提升微生物检测的及时性和普及性，对保障公众健康和提升生活质量具有深远意义。

4.3　有害物检测

食品中真菌毒素、重金属及农兽药残留等有害物质对人体健康构成严重威胁，开发快速、准确的分析检测技术对保障食品安全至关重要。在食品危害物检测方面，纳米喷墨打印技术推动现场快速检测技术的发展，促进便携式检测设备的开发，应用效果显著。

真菌毒素常污染谷物、坚果等食品，其中黄曲霉毒素 B_1（AFB_1）、玉米赤霉烯酮（ZEN）、赭曲霉毒素 A（OTA）等危害尤为突出，传统检测方法（如高效液相色谱-质谱联用法）虽精度高，但需复杂前处理与大型仪器，纳米喷墨打印技术通过构建高灵敏度传感器，有效解决传统方法的局限。例如，Siva 等[65] 采用电液动力学打印技术，将超薄 MXene（Ti_3C_2Tx）溶液沉积于微电极表面，通过 AFB_1 抗体与 MXene 纳米片的表面偶联，在 Si/SiO_2 基底上成功构建了场效应晶体管生物传感器，实现对 AFB_1 的高效检测。该传感器 LOD 低至 5.689 ppb，远低于食品中霉菌毒素的允许限值，检测时间从传统高效液相色谱的 1~2 h 缩短至 20 min 内，且无需复杂样品前处理，可直接用于现场快速筛查，为谷物类食品中 AFB_1 的早期污染检测提供高效方案。针对多种真菌毒素同步检测的需求，纳米喷墨打印技术的多材料整合能力提供了新途径，Veenuttranon 等[66] 通过开发 NiO-MWCNT（-COOH）改性碳墨水，采用喷墨打印制备了功能化丝网印刷电极，构建可同步检测玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素 A 的电化学传感器，该传感器对 ZEN 的检测范围为 0.04~10.24 μg/mL、LOD 为 14 ng/mL，对 OTA 的检测范围为 0.16~10.24 μg/mL、LOD 为 45 ng/mL，单次检测时间约 20 s 所需样品量约 100 μL，适合现场即时分析。

Eshkeiti 等[67] 通过在硅片上喷墨打印 AgNP 的墨水成功地制造了一种新型 SERS 衬底。通过测试 HgS、CdS 和 ZnO 等重金属化合物，证明了该 SERS 衬底具有产生增强拉曼效应的能力，可以用于重金属化合物的检测。Guo 等[68] 则聚焦于汞离子检测，开发了硅纳米晶体与红色荧光碳点的比率荧光探针体系，该探针显示了 Hg^{2+} 可视化测定的高选择性和灵敏度，检测限为 7.63 nmol/L，并通过喷墨打印技术将其固定于滤纸上制成可视化试纸，检测时只需将试纸与样品接触，通过肉眼观察荧光颜色变化即可判断 Hg^{2+} 是否超标，无需复杂仪器辅助，实现了汞离子的现场肉眼检测。这种方法不仅解决了 SERS 检测需拉曼光谱仪的局限，还可以扩展到生物和食品领域的视觉分析。

在食品农药残留检测领域，开发简便、低成本且适用于现场快速筛查的分析技术始终是研究重点。纳米喷墨打印技术通过制备低成本、高灵敏度的 SERS 基底，为农药残留现场检测提供新路径。Wang 等[69] 提出了一种新颖的 SERS 衬底打印技术，通过修改自动 TLC 采样器，将银纳米颗粒（AgNPs）打印到滤纸上制备 SERS 基底，结合便携式拉曼光谱仪实

现对水果表面福美双的检测(图 5)。该基底对福美双的 LOQ 为 10^{-5} mg/kg, 检测范围为 10^{-8}~10^{-1} mg/mL, 实际应用于苹果和梨表面福美双检测时, 检出限分别低至 3.9×10^{-4} 和 2.5×10^{-3} mg/kg, 远低于规定的安全限值。该方法简便、成本低、可按需打印和大规模生产, 为农药残留的现场快速检测提供了有效手段。为进一步提升农药残留检测的便携性与实用性, Mu 等[74] 将 SERS 芯片与日常电子设备结合, 构建了更贴近现场应用的检测系统。通过喷墨打印将金纳米颗粒均匀沉积到柔性聚合物基底, 制成可插拔式 SERS 检测芯片, 用于苹果、葡萄等水果中农药残留的检测。该芯片可直接插入到检测物质中, 通过手机应用程序一键即可进行农药残留的测量, 成功检测了 12 种具有特征拉曼光谱的农药, 检出限小于 10 ppm。该系统检测成本低, 时间在 5 min 内, 大幅降低检测门槛, 可满足水果流通环节的现场快速筛查需求。

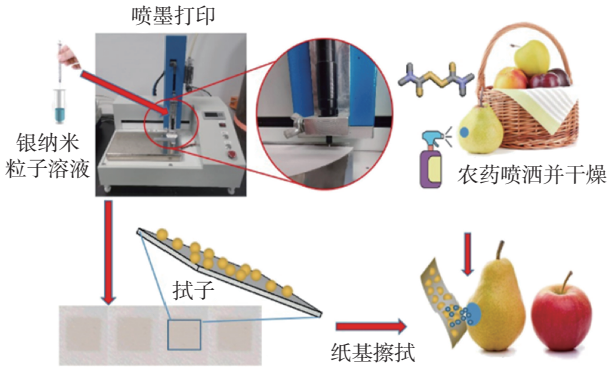


图 5 AgNPs@纸拭子 SERS 基底的制备[69]

Fig.5 Preparation of SERS substrate for AgNPs@ paper swabs[69]

5 结论与展望

纳米喷墨打印技术作为一种新兴的技术, 在食品分析检测领域展现出了巨大的应用潜力, 该技术主要用于制备传感器、拉曼光谱分析技术的传感芯片和基底, 用于固定功能性纳米材料。相比利用传统的纳米材料涂布与固定技术, 纳米喷墨打印技术支持定制化图案打印, 制备的基底重现性好, 具备规模化生产潜力。此外, 除了实现对单一目标物质的检测, 纳米喷墨打印技术还能够整合电化学、SERS、荧光等多种检测机制于单一芯片, 通过阵列化设计实现农药残留、重金属、微生物毒素等的多目标物同步分析。然而, 纳米喷墨打印技术在墨水制备、打印规模化生产等方面还面临一些挑战, 未来可以通过优化墨水配方、提升基底稳定性等方面进行突破, 为食品安全现场监测提供创新思路; 同时要建立标准化、自动化生产体系, 开发多喷头协同打印设备实现检测阵列高通量制造; 还需响应可持续发展需求, 开发环保型墨水材料, 降低打印过程的能耗与废弃物排放, 推动食品检测技术与生态环境协调发展。随着相关技术的不断发展和完善, 纳米喷墨打印技术有望在食品领域得到更广泛的应用, 为保障食品质量安全、推动食品行业发展做出重要贡献。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 彭春晓. 光谱技术在食品检验检测中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2025(19): 120−123,127. [PENG Chunxiao. Research on the application of spectral technology in food inspection and testing [J]. China Food Safety Magazine, 2025(19): 120−123,127.]

[2] 陈华桂. 色谱-质谱联用技术在农药残留检测中的应用及优化策略[J]. 食品安全导刊, 2025, 19(24): 154−156. [CHEN Huagui. Application and optimization strategies of chromatography-mass spectrometry in pesticide residue detection[J]. Food Safety Guide Magazine, 2025, 19(24): 154−156.]

[3] 赵浩. 生物检测技术在食品检验中的应用分析[J]. 食品安全导刊, 2024(19): 165−167,171. [ZHAO Hao. Application analysis of biological detection technology in food inspection[J]. China Food Safety Magazine, 2024(19): 165−167,171.]

[4] MURATA K. Super-fine ink-jet printing for nanotechnology [C]. Proceedings International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems. IEEE, 2003: 346−349.

[5] KIM A, BARCELO S J, LI Z Y. SERS-based pesticide detection by using nanofinger sensors[J]. Nanotechnology, 2015, 26(1). doi: 10.1088/0957-4484/26/1/015502.

[6] MARTINS N C T, FATEIXA S, FERNANDES T, et al. Inkjet printing of Ag and polystyrene nanoparticle emulsions for the one-step fabrication of hydrophobic paper-based surface-enhanced Raman scattering substrates[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(5): 4484−4495.

[7] YANG Xingxing, SUN Jiadi, CUI Fangchao, et al. An eco-friendly sensor based on CQD@MIPs for detection of N-acylated homoserine lactones and its 3D printing applications[J]. Talanta, 2020, 219: 121343.

[8] SADEGHI M, KASHANIAN S, NAGHIB S M, et al. A highly sensitive nanobiosensor based on aptamer-conjugated graphene-decorated rhodium nanoparticles for detection of HER2-positive circulating tumor cells[J]. Nanotechnology Reviews, 2022, 11(1): 793−810.

[9] XU Yuan, LIU Zhangming, LIU Rui, et al. Inkjet-printed pH-sensitive QR code labels for real-time food freshness monitoring[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(33): 18453−18462.

[10] CHANDRA P, PANESAR P S. Nanosensing and bioanalytical technologies in food quality control[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.

[11] LIN M. Nanotechnology-based approaches for rapid detection of chemical and biological contaminants in foods[M]. Nanotechnology in the Food, Beverage and Nutraceutical Industries. Amsterdam: Elsevier, 2012: 317-334.

[12] KOMURO N, TAKAKI S, SUZUKI K, et al. Inkjet printed (bio)chemical sensing devices[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(17): 5785−5805.

[13] WU Yuyao, ZHANG Yanzhen, YAN Mingyu, et al. Research progress on the application of inkjet printing technology combined with hydrogels[J]. Applied Materials Today, 2024, 36: 102036.

[14] LE H P. Progress and trends in ink-jet printing technology [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 1998, 42(1): 49−62.

［15］ SHARMA P, HASAN M R, NAIKOO U M, et al. Aptamer based on silver nanoparticle-modified flexible carbon ink printed electrode for the electrochemical detection of chikungunya virus[J]. Biosensors, 2024, 14(7): 344.
［16］ 王颖. 喷墨打印技术及其应用发展[J]. 丝网印刷, 2024(16): 60−62. ［WANG Ying. Inkjet printing technology and its application development[J]. Screen Printing, 2024(16): 60−62.］
［17］ ALI SHAH M, LEE D G, LEE B Y, et al. Classifications and applications of inkjet printing technology: A review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 140079−140102.
［18］ ZHAO Wenbo, LIANG Xiao, ZHONG Zitao, et al. Colorimetric and fluorescence dual-mode sandwich biosensor for visual detection of multiple foodborne pathogens with concanavalin A modified magnetic nanoparticles and CdTe quantum dots[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 444: 138415.
［19］ AZIZI-LALABADI M, GARAVAND F, JAFARI S M. Incorporation of silver nanoparticles into active antimicrobial nanocomposites: Release behavior, analyzing techniques, applications and safety issues[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 293: 102440.
［20］ SIDDIQI K S, UR RAHMAN A, TAJUDDIN, et al. Properties of zinc oxide nanoparticles and their activity against microbes[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1): 141.
［21］ SANTOS M C D, NASCIMENTO Y M, MONTEIRO J D, et al. ATR-FTIR spectroscopy with chemometric algorithms of multivariate classification in the discrimination between healthy vs. Dengue vs. Chikungunya vs. Zika clinical samples[J]. Analytical Methods, 2018, 10(10): 1280−1285.
［22］ HASANOVA N, ÇELIK S E, APAK R. Dithioerythritol functionalized gold nanoparticles−based fluorometric sensing of biogenic amines in food samples[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104837.
［23］ MODY V, SIWALE R, SINGH A, et al. Introduction to metallic nanoparticles[J]. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 2010, 2(4): 282.
［24］ GHIUȚĂ I, CRISTEA D, CROITORU C, et al. Characterization and antimicrobial activity of silver nanoparticles, biosynthesized using *Bacillus* species[J]. Applied Surface Science, 2018, 438: 66−73.
［25］ 王丹丹, 沈庆绪. 纳米银导电油墨及其在柔性印刷电子中的应用[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 18−27. ［WANG Dandan, SHEN Qingxu. Research progress of nano-silver conductive ink and its application in flexible printing electronics[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 18−27.］
［26］ PING Hong, ZHANG Minwei, LI Hongkun, et al. Visual detection of melamine in raw milk by label-free silver nanoparticles [J]. Food Control, 2012, 23(1): 191−197.
［27］ KHAN S, HOSSAIN M K. Classification and properties of nanoparticles[M]. Nanoparticle-Based Polymer Composites. Amsterdam: Elsevier, 2022: 15-54.
［28］ AHMAD R, VASEEM M, TRIPATHY N, et al. Wide linear-range detecting nonenzymatic glucose biosensor based on CuO nanoparticles inkjet-printed on electrodes[J]. Analytical Chemistry, 2013, 85(21): 10448−10454.
［29］ SINGH R, SINGH E, NALWA H S. Inkjet printed nanomaterial based flexible radio frequency identification (RFID) tag sensors for the Internet of nano things[J]. RSC Advances, 2017, 7(77): 48597−48630.
［30］ MANOSWINI M, MAJUMDAR A G, PANY B, et al. Rapid detections of food pathogens using metal, semiconducting nanoparticles, and their hybrids: A review[J]. Emergent Materials, 2023, 6(1): 15−30.
［31］ 张婉, 黄琳泓, 胡馨元, 等. 喷墨打印量子点薄膜制备的影响因素研究[J]. 包装工程, 2024, 45(7): 23−30. ［ZHANG Wan, HUANG Linhong, HU Xinyuan, et al. Factors affecting the preparation of quantum dot films by inkjet printing[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(7): 23−30.］
［32］ BONILLA J C, BOZKURT F, ANSARI S, et al. Applications of quantum dots in Food Science and biology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 53: 75−89.
［33］ NIU Chenyue, YAO Zhiliang, JIANG Shanxue. Synthesis and application of quantum dots in detection of environmental contaminants in food: A comprehensive review[J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163565.
［34］ LUAN Enxiao, ZHENG Zhaozhu, LI Xinyu, et al. Inkjet-assisted layer-by-layer printing of quantum dot/enzyme microarrays for highly sensitive detection of organophosphorous pesticides[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 916: 77−83.
［35］ BABAEI E, DEHNAD A, HAJIZADEH N, et al. A study on inhibitory effects of titanium dioxide nanoparticles and its photocatalytic type on *Staphylococcus aureus, Escherichia coli* and *Aspergillus flavus*[J]. Applied Food Biotechnology, 2016, 3(2): 115−123.
［36］ YEMMIREDDY V K, HUNG Y C. Selection of photocatalytic bactericidal titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles for food safety applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(1): 1−6.
［37］ KHALIL A S, HARTNER S, ALI M, et al. Stable aqueous dispersions of ZnO nanoparticles for ink-jet printed gas sensors[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2011, 11(12): 10839−10843.
［38］ CONÉDÉRA V, YOBOUÉ P, MESNILGRENTE F, et al. Manufacturability of gas sensor with ZnO nanoparticles suspension deposited by ink jet printing[C]//Spie moems-Mems-Nems. 2010: 75900M.
［39］ PARATE K W. Graphene biosensors for healthcare and food spoilage monitoring[D]. Ames: Iowa State University, 2021.
［40］ HASSAN G, BAE J, LEE C H, et al. Wide range and stable ink-jet printed humidity sensor based on graphene and zinc oxide nanocomposite[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(7): 5806−5813.
［41］ LI Jiurong, GONG Xiao. The emerging development of multicolor carbon dots[J]. Small, 2022, 18(51): 2205099.
［42］ BAKER S, BAKER G. Luminescent carbon nanodots: Emergent nanolights[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2010, 49(38): 6726−6744.
［43］ TUERHONG M, XU Y, YIN X B. Review on carbon dots and their applications[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(1): 139−150.
［44］ DENG Yafeng, LI Qingzhi, ZHOU Yihua, et al. Fully inkjet printing preparation of a carbon dots multichannel microfluidic paper-based sensor and its application in food additive detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(48): 57084−57091.
［45］ GILCHRIST A, NOBBS J. Colorimetry, theory[M]. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. Amsterdam: Elsevier, 2017: 328-333.
［46］ SHIBATA H, HIRUTA Y, CITTERIO D. Fully inkjet-printed distance-based paper microfluidic devices for colorimetric calcium determination using ion-selective optodes[J]. Analyst,

2019, 144(4): 1178−1186.
[47] YU Y C, WANG Z J, JI X Y, et al. Application of a dual-modality colorimetric analysis methodto inkjet printing lateral flow detection of *Salmonella typhimurium*[J]. Microchimica Acta, 2024, 191(9): 559.
[48] LI Jun, ZHANG Jie, YANG Xianling, et al. One-pot synthesis smartphone-assisted test strip based on food-grade Fe-*β*-Cyclodextrin nanozymes for rapid colorimetric analysis of ascorbic acid in foods and supplements[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142158.
[49] LIU Jinghan, LI Ying, LIU Lin, et al. Current progress on antibiotic sensing based on ratiometric fluorescent sensors[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(2): 176−184.
[50] KAKKAR S, GUPTA P, KUMAR N, et al. Progress in fluorescence biosensing and food safety towards point-of-detection (PoD) system[J]. Biosensors, 2023, 13(2): 249.
[51] TONG Xinyu, LIN Xianfeng, DUAN Nuo, et al. Laser-printed paper-based microfluidic chip based on a multicolor fluorescence carbon dot biosensor for visual determination of multiantibiotics in aquatic products[J]. ACS Sensors, 2022, 7(12): 3947−3955.
[52] DASARY S S R, SINGH A K, SENAPATI D, et al. Gold nanoparticle based label-free SERS probe for ultrasensitive and selective detection of trinitrotoluene[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(38): 13806−13812.
[53] LIAO W J, ROY P K, CHATTOPADHYAY S. An ink-jet printed, surface enhanced Raman scattering paper for food screening[J]. RSC Advances, 2014, 4(76): 40487−40493.
[54] HAN Caiqin, LI Yuqi, JIA Qin, et al. On-demand fabrication of surface-enhanced Raman scattering arrays by pen writing, and their application to the determination of melamine in milk[J]. Microchimica Acta, 2017, 184(8): 2909−2917.
[55] DANG M C, NGUYEN D S, DANG T M D, et al. Design and testing of RFID sensor tag fabricated using inkjet-printing and electrodeposition[J]. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2014, 5(2): 025012.
[56] EBRAHIMI R, HASANZADEH M, SHADJOU N. Construction of flexible paper-based sensor for label-free recognition of histamine in cow meat samples by conductive nano-silver ink: A new platform for the analysis of biogenic amines towards early diagnosis of meat spoil[J]. RSC Advances, 2025, 15(8): 5916−5931.
[57] 唐年琴. 食品分析检验的必要性及相关技术研究[J]. 中外食品工业, 2024(7): 74−76. [TANG Nianqin. The necessity of food analysis and testing and related technology research[J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2024(7): 74−76.]
[58] SHEN Weizhi, LI Mingzhu, YE Changqing, et al. Direct-writing colloidal photonic crystal microfluidic chips by inkjet printing for label-free protein detection[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(17): 3089−3095.
[59] KANT T, SHRIVAS K, TAPADIA K, et al. Inkjet-printed paper-based electrochemical sensor with gold nano-ink for detection of glucose in blood serum[J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(18): 8297−8305.
[60] JADAV J K, UMRANIA V V, RATHOD K J, et al. Development of silver/carbon screen-printed electrode for rapid determination of vitamin C from fruit juices[J]. LWT, 2018, 88: 152−158.
[61] RASHEED S, HUSSAIN K, ARIF S, et al. Smartphone-integrated inkjet-printed paper sensor and UV/Vis spectrophotometric method for on-site detection of As^{3+} and L-cysteine in food samples using novel AMTPP-functionalized silver nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141921.
[62] LIN Y H, CHEN S H, CHUANG Y C, et al. Disposable amperometric immunosensing strips fabricated by Au nanoparticles-modified screen-printed carbon electrodes for the detection of food-borne pathogen *Escherichia coli* O157: H7[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2008, 23(12): 1832−1837.
[63] CRERAN B, LI X M, DUNCAN B, et al. Detection of bacteria using inkjet-printed enzymatic test strips[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(22): 19525−19530.
[64] NEAGU A L, GAVRILA A M, MIRON A, et al. 3D inkjet printing of hybrid electroactive ink based on molecularly imprinted polymers for lipopolysaccharides detection[J]. Electrochimica Acta, 2024, 506: 145044.
[65] SIVA S, BODKHE G A, CONG C H, et al. Electrohydrodynamic-printed ultrathin $Ti_3C_2T_x$-MXene field-effect transistor for probing aflatoxin B1[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147492.
[66] VEENUTTRANON K, LU X B, CHEN J P. Ultrasensitive electrochemical sensing for simultaneous rapid detection of Zearalenone and ochratoxin A in feedstuffs and foodstuffs[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154807.
[67] ESHKEITI A, NARAKATHU B B, REDDY A S G, et al. Detection of heavy metal compounds using a novel inkjet printed surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrate[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 171: 705−711.
[68] GUO Xinfeng, LIU Cui, LI Nian, et al. Ratiometric fluorescent test paper based on silicon nanocrystals and carbon dots for sensitive determination of mercuric ions[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(6): 171922.
[69] WANG Shiyao, HAO Qingxiang, ZHAO Yanan, et al. Two-dimensional printed AgNPs@Paper swab for SERS screening of pesticide residues on apples and pears[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(12): 4982−4989.
[70] ARSHAVSKY-GRAHAM S, ENDERS A, ACKERMAN S, et al. 3D-printed microfluidics integrated with optical nanostructured porous aptasensors for protein detection[J]. Microchimica Acta, 2021, 188(3): 67.
[71] HE Yue, WANG Hui, YU Zhixue, et al. Hydrophobic paper used to construct a disposable chemiresistive immunosensor for the simultaneous detection of FB1 and AFB1[J]. Advanced Materials Interfaces, 2024, 11(33): 2400307.
[72] MONISHA, SHRIVAS K, KANT T, et al. Inkjet-printed paper-based colorimetric sensor coupled with smartphone for determination of mercury (Hg^{2+})[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 414: 125440.
[73] JIANG Ruoxuan, ZHANG Yuchao, ZHANG Qianru, et al. Carbon dot/gold nanocluster-based fluorescent colorimetric paper strips for quantitative detection of iodide ions in urine[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(9): 9760−9767.
[74] MU Taotao, WANG Shengnan, LI Tianshu, et al. Detection of pesticide residues using nano-SERS chip and a smartphone-based Raman sensor[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(2): 5200206.