

# 食品安全检测中的纳米技术应用

吴敏\*, 李光蓉

(第一师疾病预防控制中心, 阿克苏 843000)

**摘要:** 随着食品安全问题日益受到关注, 纳米技术凭借其高灵敏度、快速响应和多功能性在食品安全检测领域展现出巨大应用潜力。本文综述了金属纳米材料、量子点和碳基纳米材料在食品有害物质残留、掺假识别和微生物污染检测中的应用进展。以纳米基因测序技术检测食源性致病菌为例, 详细分析了检测系统的构建、性能评价及实际应用效果。研究表明, 纳米基因测序技术能同时检测多种食源性致病菌, 显著提高了检出率和检测速度, 为食源性疾病的快速诊断和预防控制提供了有力技术支持。该技术在提高检测灵敏度、缩短检测时间和降低检测成本方面具有显著优势, 为食品安全检测提供了新的技术支撑。

**关键词:** 纳米技术; 食品安全检测; 快速检测

## 0 引言

食品安全直接关系到人类健康和社会发展。当前主要采用的理化分析法(高效液相色谱法、气相色谱-质谱法)、免疫分析法和微生物培养法等传统检测方法存在检测周期长、灵敏度不足等局限性。近年来, 纳米技术凭借其独特的物理化学性质和优异的分析性能, 在食品安全检测领域引起广泛关注<sup>[1]</sup>。纳米材料具有比表面积大、表面活性高、光学性质独特等特点, 可实现快速检测且灵敏度高。本文综述了金属纳米材料、量子点和碳基纳米材料在食品有害物质残留、掺假识别和微生物污染检测等领域的研究进展, 为推进纳米技术在食品安全检测中的应用提供参考<sup>[2]</sup>。

## 1 纳米技术在食品安全检测中的基本原理

### 1.1 检测原理概述

纳米技术在食品安全检测中的应用基于纳米材料独特的物理化学性质及其与目标物质的相互作用机制。纳米材料通过表面等离子体共振、荧光共振能量转移和电化学反应等多种信号转导方式实现对食品危害物的检测<sup>[3]</sup>。例如, 金属纳米颗粒在与目标分子结合时会引起表面等离子体共振峰的位移或强度变化, 进而产生可测量的光学信号; 量子点与待测物质发生特异性结合后, 通过荧光猝灭或增强效应反映待测物的浓度; 碳基纳米材料则利用其优异的导电性, 通过电化学反应实现对目标物的定量分析。这些检测原理在实际应用中往往需

要对纳米材料进行表面修饰和功能化处理, 如在金纳米粒子表面修饰特异性抗体或适配体, 增强对靶标分子的选择性识别能力。通过信号放大和转导系统的优化设计, 可显著提高检测的灵敏度和准确性, 使检测限达到十亿分之一(parts per billion, ppb)甚至万亿分之一(parts per trillion, ppt)级别<sup>[4]</sup>。

### 1.2 纳米技术在食品安全检测中的优势

纳米技术为食品安全检测带来多方面突破性进展。在灵敏度方面, 纳米材料具有量子尺寸效应和表面效应, 可将微量物质的存在转化为显著的信号响应, 使检测限降低至传统方法的千分之一<sup>[5]</sup>。如纳米金-石墨烯复合材料检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的灵敏度达 0.3 pg/mL。在检测速度上, 纳米传感器能在分钟级别内完成样品检测, 显著优于需要数小时乃至数天的传统检测方法。特异性识别方面, 通过在纳米材料表面修饰分子印迹聚合物或特异性配体, 可实现对特定危害物的精准识别, 有效避免基质干扰。同时, 纳米检测技术具有便携性强、操作简便和成本低廉等优势, 适合现场快速检测<sup>[6]</sup>。

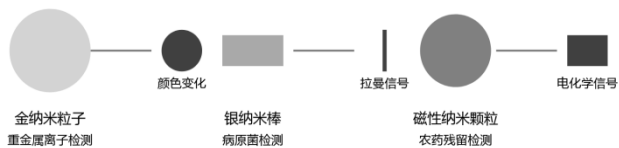
## 2 不同纳米材料在食品安全检测中的应用

### 2.1 金属纳米材料基检测技术

金属纳米材料在食品安全检测中表现出优异的性能和广泛的应用前景。金纳米粒子通过表面等离子体共振效应可实现对重金属离子的超灵敏检测, 检测限可达 0.1 ppb。在实际应用中, 金纳米粒子表面修饰巯基化合物后可特异性结合汞离子, 溶液颜色由红变蓝, 实现肉眼可见的检测<sup>[7]</sup>。银纳米材料

\* 通信作者: 吴敏, 主管技师, 研究方向为卫生检验。E-mail: 2807901689@qq.com

则在食品病原菌检测中发挥重要作用,如修饰抗体的银纳米棒可通过表面增强拉曼散射技术检测沙门氏菌,检测时间缩短至30 min<sup>[8]</sup>。磁性纳米颗粒在样品前处理中具有独特优势,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米颗粒表面修饰分子印迹聚合物后可选择性富集农药残留,结合液相色谱法可实现对有机磷农药的快速检测。铂纳米材料因其优异的催化性能,被广泛应用于过氧化氢等食品添加剂的检测,已在果汁和乳制品中得到实际验证<sup>[9]</sup>(见图1)。



注:不同纳米材料通过各自特有的检测机制实现目标物的快速分析

图1 金属纳米材料检测应用示意图

## 2.2 量子点检测技术

量子点作为新型荧光探针在食品安全检测领域展现独特优势。CdSe/ZnS核壳结构量子点通过偶联抗体可实现对肉制品中克伦特罗的快速检测,检测限达到0.05 ng/mL,且荧光强度与克伦特罗浓度在0.1~100 ng/mL范围内呈良好线性关系<sup>[10]</sup>。无机盐掺杂的碳量子点具有低毒性和高稳定性,在食用油中检测苏丹红显示出优异性能,通过荧光猝灭效应可在5 min内完成检测,灵敏度优于传统高效液相色谱法。近红外量子点因其光谱窗口宽、背景干扰小的特点,被成功应用于水产品中孔雀石绿的残留检测,检出限可达0.3 μg/kg<sup>[11]</sup>。石墨烯量子点与氧化锌复合后用于检测牛奶中三聚氰胺,不仅提高了检测灵敏度,还实现了检测过程的可视化<sup>[12]</sup>。

## 2.3 碳基纳米材料检测技术

碳基纳米材料在食品安全检测中展现出多样化的应用方式。石墨烯通过 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用可高效吸附芳香族化合物,结合电化学传感技术可实现对果蔬中有机磷农药的快速筛查,检测限达到1 ng/mL,且具有良好的重现性<sup>[13]</sup>。碳纳米管修饰电极可用于检测水产品中组胺的含量,通过电化学阻抗测试实现快速定量分析,检测时间缩短至2 min。富勒烯衍生物因其独特的笼状结构,在食品防腐剂检测中表现突出,如C<sub>60</sub>-丙烯酸酯复合材料可同时检测苯甲酸和山梨酸,线性范围为0.5~100 μmol/L。氧化石墨烯与金属纳米粒子复合后用于检测乳制品中黄曲霉毒素B1,不仅提高了检测灵敏度,还大大缩短了检测时间,已在实际样品检测中得到验证<sup>[14]</sup>。

## 3 纳米技术在不同食品安全检测领域的应用

### 3.1 食品有害物质残留检测

纳米技术在食品有害物质残留检测中实现了重大突破。针对农药残留检测,多金属纳米复合材料修饰的电极可同时检测多种有机磷农药,在蔬菜样品中的检测限达到0.5 ng/g,检测时

间仅需15 min<sup>[15]</sup>。石墨烯基传感器通过表面修饰分子印迹聚合物,可同时检测多种有机磷农药,检测限同样达到0.5 ng/g。碳纳米管复合电极应用于抗生素残留检测,在畜禽产品中检测四环素类药物的灵敏度达到0.1 μg/L,且具有良好的选择性。

在兽药残留检测领域,量子点标记的抗体可通过荧光免疫层析技术快速检测牛奶中的四环素类抗生素,检测限低至0.1 μg/L,且具有良好的选择性。重金属离子检测方面,金纳米粒子修饰的比色传感器在鱼类样品中可同时检测铅、镉、汞等重金属离子,通过溶液颜色变化实现可视化检测<sup>[16]</sup>。

对于真菌毒素检测,还原氧化石墨烯结合金纳米粒子用于真菌毒素检测,在谷物样品中对黄曲霉毒素B1的检测限达到0.05 ng/mL,且操作简便快速。富勒烯衍生物在食品防腐剂检测方面表现突出,通过电化学传感可同时检测苯甲酸和山梨酸,检测范围为0.5~100 μmol/L,已在实际样品检测中得到验证。碳量子点-金纳米粒子复合材料在谷物样品中对黄曲霉毒素的检测限达到0.05 ng/mL,且操作简便,适合现场快速筛查<sup>[17]</sup>。

### 3.2 食品掺假识别检测

纳米技术为食品掺假识别提供了有效解决方案。石墨烯量子点因其独特的荧光性质,可用于检测牛奶中的三聚氰胺掺假,通过荧光猝灭效应实现定量检测,检测限为0.02 mg/L,且不受蛋白质等基质干扰<sup>[18]</sup>。金纳米棒在通过表面等离子体共振技术可识别油脂掺假,检测植物油中掺杂劣质油的含量,灵敏度达到1%。银纳米颗粒修饰的拉曼增强基底可用于检测肉制品中的瘦肉精,通过特征拉曼峰的变化实现快速鉴别,检测时间缩短至10 min。磁性纳米材料结合分子印迹技术可识别果汁中的人工色素掺假,选择性分离目标物质后通过比色法实现定量分析,已在市售样品中得到验证<sup>[19]</sup>。

### 3.3 食品微生物污染检测

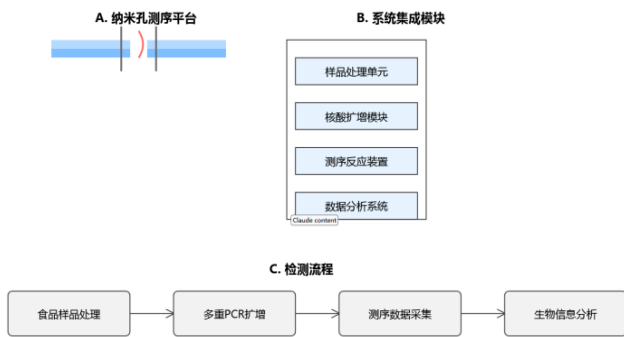
纳米技术在食品微生物污染检测中显示出独特优势。磁性纳米颗粒偶联特异性抗体后可实现对大肠杆菌O157:H7的免疫磁分离,结合量子点荧光标记技术,检测限可达到10 CFU/mL。碳纳米管修饰电极可用于快速检测和鉴定常见食源性致病菌,检出限可达到50 CFU/mL,大大缩短了传统培养方法所需的时间<sup>[20]</sup>。金纳米粒子修饰的侧向流试纸条用于检测沙门氏菌,通过颜色变化实现肉眼可见的快速检测,检测时间从48 h缩短至30 min。

以纳米基因测序技术检测食源性致病菌为例,该技术采用蛋白质纳米孔阵列,可在4~6 h内完成多种病原体的同时检测和鉴定,检测限达到10 CFU/g。系统对130份不同类型食品样本的验证结果表明,检出率为20%,结果符合率达98.5%。与传统方法相比,该技术不仅显著提高了检测效率,还可获得病原体的全基因组信息,为溯源分析提供重要依据。

## 4 纳米技术在食品安全检测中的应用价值

### 4.1 检测系统的构建

纳米基因测序系统主要由纳米孔测序平台和生物信息分析系统组成。采用蛋白质纳米孔阵列技术, 在脂质双分子层上构建直径为 10 nm 的纳米孔道。通过 DNA 分子在纳米孔中的转运过程产生的离子电流信号变化实现碱基识别。系统集成了样品处理、核酸扩增、测序和数据分析等模块, 实现一体化检测。为提高检测效率, 采用多重 PCR 技术同时扩增沙门氏菌、单核细胞增生李斯特氏菌、大肠杆菌 O157 等常见食源性致病菌的特异性基因片段。通过优化引物设计和扩增条件, 确保各目标基因获得均一扩增(见图 2)。



注: A 部分显示纳米孔结构(10 nm); B 部分说明完整检测流程

图 2 纳米基因测序系统示意图

### 4.2 检测性能评价

系统性能评价显示出纳米基因测序技术具有显著优势。在最优条件下(温度 37°C, pH 7.5), 单个纳米孔每秒可测序 450 个碱基, 24 小时内可完成高达 30 Gb 的数据输出。对人工污染的食品样品进行检测, 系统对常见食源性致病菌的检测限达到 10 CFU/g, 且能同时检测和鉴定多种病原体。重复性试验中, 批内相对标准偏差为 2.8%, 批间相对标准偏差为 3.6%, 表明系统具有良好的稳定性和可重复性。通过与传统培养法和实时荧光 PCR 方法对比, 证实了该技术的准确性和可靠性。

### 4.3 与传统检测方法的对比分析

通过系统对比实验发现, 纳米基因测序技术在食源性致病菌检测中具有显著优势(见表 1)。该技术检测灵敏度可达 10 CFU/g, 远优于传统培养法和实时荧光 PCR 方法。在检测时效性方面, 从样品处理到数据分析仅需 4~6 h, 比传统培养法缩短了 90% 以上的时间。特别是在多重检测能力上, 单次测序可同时分析超过 100 种病原体, 而常规 PCR 方法通常仅能同时检测 3~4 种。此外, 纳米测序技术还具有独特的基因分型能力, 可直接获得病原体的全基因组信息, 为溯源分析和耐药性研究提供重要依据。成本效益分析显示, 虽然单样品检测成本略高于传统方法, 但考虑到检测通量、时间成本和信息获取量, 纳米测序技术具有明显的综合优势。该技术的自动化和标准化程度高, 操作人员培训周期短, 有效降低了人为误差, 提高了检测结果的可靠性。

表 1 不同方法检测食源性致病菌的性能比较

检测方法	检测限(CFU/g)	检测时间(h)	同时检测菌种数	基因分型能力	检测成本(元/样)
纳米基因测序	10	4-6	> 100	是	200
传统培养法	100	48~72	1	否	150
实时荧光 PCR	50	2~3	3~4	否	180
微生物芯片	100	12~24	20~30	部分可能	300

### 4.4 实际样品应用验证

为验证纳米基因测序技术的实用性, 本研究对收集的 130 份不同类型食品样本进行了系统性检测分析(见表 2)。样品类型包括生鲜肉类、即食食品、水产品等, 覆盖了主要的高风险食品品类。检测结果显示, 共有 26 份样品(检出率 20%)检出目标病原体, 其中沙门氏菌 12 株、单核细胞增生李斯特氏菌 8 株、致病

性大肠杆菌 6 株。通过与传统培养法和 PCR 方法的平行比对, 结果符合率达 98.5%, 证实了该方法的准确性。在分子分型方面, 成功获得了所有检出菌株的血清型和毒力基因信息, 为后续的溯源调查和风险评估提供了重要依据。该技术显著提高了检测效率, 满足了疾病预防控制工作对快速检测的迫切需求。样品检测过程中未出现假阳性, 各项质控指标均符合要求。

表 2 纳米基因测序技术检测不同食品样品中致病菌的验证结果

样品类型	样品数	检出菌株	结果符合率(%)	检测用时(h)	RSD(%, n=6)
生鲜肉类	45	沙门氏菌(7 株)大肠杆菌(3 株)	98.2	5.5	3.2
即食食品	35	李斯特菌(8 株) 沙门氏菌(2 株)	99.0	6.0	3.5
水产品	30	大肠杆菌(3 株)沙门氏菌(2 株)	98.5	5.8	3.8
熟肉制品	20	沙门氏菌(1 株)	97.8	6.2	4.0

## 5 纳米技术在食品安全检测中的发展趋势

纳米技术在食品安全检测领域的发展呈现以下趋势:首先,多功能纳米材料的开发成为研究热点,通过表面修饰和功能化设计,实现对多种食品危害物的同时检测。其次,便携式纳米传感器的研发不断推进,为现场快速检测提供了可能。再次,智能化检测系统的构建日益重要,通过集成多种纳米材料和检测方法,提高检测的准确性和可靠性。此外,纳米材料的生物相容性和环境友好性研究也在不断深化,以确保检测过程的安全性。未来,随着人工智能等新技术的融入,纳米检测技术的自动化和标准化水平将进一步提升,为食品安全保障提供更有力的技术支持。

## 6 结束语

文章系统综述了纳米材料在食品安全检测领域的应用进展。研究表明,金属纳米材料通过表面等离子体共振效应可实现重金属离子的超灵敏检测,检测限可达 $0.1\text{ ppb}(\text{ppb}=10^{-9})$ ;量子点基检测技术在食品违禁添加剂检测中表现出优异性能,可在 $5\text{ min}$ 内完成检测;碳基纳米材料则在农药残留和抗生素检测方面具有独特优势,检测灵敏度达到 $\text{ng/mL}$ 级别。这些纳米技术相比传统检测方法具有检测速度快、灵敏度高和多功能性等显著优点。然而,在实际应用中仍需深入研究纳米材料的稳定性、生物相容性以及检测方法的标准化问题。未来,随着多功能纳米材料的开发和检测技术的优化,纳米技术将在食品安全检测领域发挥更重要的作用,为保障食品安全提供有力的技术支持。

## 参考文献

- [1] 董悦洋.食品中有毒微生物的快速检测方法研究[J].中国食品,2024,(22):93-95.
- [2] 陈伟,李晓莹.基于纳米技术的多组分食品安全检测方法研究[J].食品安全导刊,2024,(31):157-159.
- [3] 何艳艳,沈靖淇,刘泰戈,等.CRISPR技术在食品安全检测中的应用、挑战及展望[J].生物加工过程,2024,22(05):549-559.
- [4] 杨昌平,李俊祥.纳米技术在食品中农药残留快速检测中的应用与实验结果[J].中外食品工业,2024,(16):45-47.
- [5] 邵卓麒,刘彦泓,朱金艳,等.基于贵金属纳米酶的比色传感技术在食品安全检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2024,15(12):135-142.
- [6] 赵馨竹.纳米酶生物传感器在食品质量与安全检测中的应用研究[J].食品安全导刊,2024,(17):84-86.
- [7] 郑丽敏,韩楠,雷清峰.甲醛荧光探针的制备及在食品安全快速检测中的应用研究[J].河南农业,2024,(11):36-37.
- [8] 孔明慧,吴佳航,卢扬,等.上转换纳米材料在食品安全检测中的研究进展[J].发光学报,2024,45(05):824-836.
- [9] 付建瑞.食品安全检测中微生物检测技术的运用[J].食品安全导刊,2024,(07):177-179,183.
- [10] 冷远遼,范思雨,胡馨予,等.动态光散射传感器在食品安全检测中的应用进展[J].食品与生物技术学报,2023,42(07):1-10.
- [11] 席玥.微纳界面DNA壳层的构建及其应用于生物成像和食品安全检测研究[D].上海:上海海洋大学,2023.
- [12] 杨燕.基于DNA纳米技术的食品中真菌毒素快速检测新方法研究[D].西安:陕西科技大学,2023.
- [13] 刘秀娟,巢玉彬.食品安全检测中的磁性纳米酶显色技术[J].食品安全导刊,2023,(01):177-179.
- [14] 韩晓宇,娄楠.磁性纳米酶显色技术在食品安全检测中的应用[J].现代食品,2022,28(19):143-145.
- [15] 郎爽,贾丽,周慧娟,等.基于金纳米粒子的比色法在食品安全检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2022,13(17):5586-5594.
- [16] 冷远遼,黄诗锦,陈樾蕊,等.基于双功能纳米探针的免疫层析技术在食品安全检测中的应用[J].食品与发酵工业,2023,49(06):300-307.
- [17] 王言之,吕梦琪,王思蓉,等.纳米技术在添加剂安全检测中的应用进展[J].化工与医药工程,2021,42(06):62-66.
- [18] 李佳银,罗磊,熊莹姿,等.磁性纳米酶显色技术在食品安全检测中的应用[J].食品工业科技,2022,43(05):416-423.
- [19] 翟艳芳,岳锋,王选年.纳米抗体技术及其在食品安全检测中的应用[J].广东农业科学,2020,47(05):112-118.
- [20] 潘明飞,杨晶莹,刘凯欣,等.基于纳米材料的表面分子印迹技术在食品安全检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2020,11(03):675-681.