

SERS技术在食品安全检测领域的应用及研究进展

楚佳颖¹, 刘 蓉¹, 徐传兴², 张 鑫², 张嘉乐², 单 锋^{3*}

¹洛阳理工学院材料科学与工程学院, 河南 洛阳

²洛阳理工学院生命科学与健康工程学院, 河南 洛阳

³洛阳理工学院数学与物理教学部, 河南 洛阳

收稿日期: 2026年7月21日; 录用日期: 2026年8月23日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

食品安全是民生根本, 传统色谱、质谱等检测方法存在前处理烦琐、检测周期长、设备昂贵、无法现场快速筛查等短板, 难以满足全流程食品安全实时监管需求。表面增强拉曼光谱(Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS)依托贵金属纳米材料的等离子体增强效应, 可将分子拉曼散射信号放大 $10^4\sim 10^{10}$ 倍, 具备超高灵敏度、分子指纹特异性、无损快速、不受水分干扰、样品用量少、可便携化等突出优势, 成为食品痕量污染物快速检测的前沿核心技术。本文系统阐述SERS信号两大增强机理, 分类梳理胶体、固体、复合柔性三大类SERS活性基底的制备与性能特点, 从农兽药残留、食源性致病菌、食品添加剂与非法添加物、重金属、生物毒素、液体食品六个方面阐述近年来应用研究成果, 剖析当前SERS基底重现性差、复杂基质干扰、标准化缺失、多组分同步检测困难等核心瓶颈, 最后从新型基底开发、联用技术集成、智能光谱解析、标准化体系构建、便携式设备产业化等方向展望发展趋势, 为SERS技术在食品监管、企业自检领域落地应用提供理论参考。

关键词

表面增强拉曼光谱, SERS基底, 食品安全, 快速检测, 痕量污染物

Application and Research Progress of SERS Technology in the Field of Food Safety Detection

Jiaying Chu¹, Rong Liu¹, Chuanxing Xu², Xin Zhang², Jiale Zhang², Feng Shan^{3*}

¹School of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

²School of Life Sciences and Health Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

*通讯作者。

文章引用: 楚佳颖, 刘蓉, 徐传兴, 张鑫, 张嘉乐, 单锋. SERS 技术在食品安全检测领域的应用及研究进展[J]. 纳米技术, 2026, 16(3): 63-72. DOI: 10.12677/nat.2026.163008

Abstract

Food safety is fundamental to people's livelihoods. Traditional detection methods such as chromatography and mass spectrometry suffer from drawbacks including cumbersome pretreatment, long detection cycles, expensive equipment, and inability to perform on-site rapid screening, making it difficult to meet the real-time monitoring needs of the entire food safety chain. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS), relying on the plasmonic enhancement effect of noble metal nanomaterials, can amplify molecular Raman scattering signals by a factor of 10^4 to 10^{10} . It offers outstanding advantages such as ultra-high sensitivity, molecular fingerprint specificity, non-destructive and rapid analysis, immunity to water interference, minimal sample consumption, and portability, establishing itself as a cutting-edge core technology for rapid detection of trace contaminants in food. This paper systematically elaborates on the two major enhancement mechanisms of SERS signals, categorically reviews the preparation and performance characteristics of three types of SERS-active substrates—colloidal, solid, and composite flexible substrates—and summarizes recent application research results from six aspects: pesticide and veterinary drug residues, foodborne pathogens, food additives and illegal additives, heavy metals, biotoxins, and liquid foods. It analyzes current core bottlenecks such as poor substrate reproducibility, complex matrix interference, lack of standardization, and difficulties in simultaneous multi-component detection. Finally, it discusses future development trends in directions such as novel substrate development, integrated combined technologies, intelligent spectral analysis, establishment of standardization systems, and industrialization of portable devices, providing theoretical references for the practical application of SERS technology in food supervision and enterprise self-inspection fields.

Keywords

Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS Substrate, Food Safety, Rapid Detection, Trace Pollutants

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

近年来, 农药滥用、兽药残留超标、非法添加、微生物污染、重金属富集、真菌毒素污染等食品安全风险事件频发, 对国民健康与食品产业可持续发展造成严重威胁[1]-[4]。高效、灵敏、现场化的快速筛查技术成为食品安全管控刚需。国标常用高效液相色谱、气相色谱-质谱、液相色谱-串联质谱等仪器分析方法, 尽管这些方法检测精度较高, 但它们设备昂贵、操作门槛高、样品提取净化流程复杂, 单次检测需要耗时数小时, 仅适用于实验室精准定量, 无法适配农贸市场、果蔬产地、食品加工车间等现场批量筛查场景。

拉曼光谱依靠分子振动、转动产生特征指纹峰, 可实现物质定性鉴别, 但天然拉曼散射强度极弱, 普通拉曼光谱检出限难以满足痕量分析要求。1974年 Fleischmann 团队在粗糙银电极表面观测到吡啶分子拉曼信号大幅增强, 正式发现 SERS 效应[5]。随后, 电磁场增强、电荷转移两大核心机理被逐步证实,

推动 SERS 技术快速发展。伴随纳米材料制备技术迭代,金、银、核壳、石墨烯复合、柔性纸基等多元化 SERS 基底相继问世[6]-[10], 搭配便携式拉曼设备, 能够实现 ng/L、pg 级别食品污染物快速检出。

目前国内现有相关综述多聚焦单一污染物检测场景, 缺少覆盖固态、液态全品类食品, 同时系统梳理 SERS 基底类型、检测模式、实际应用场景与行业现存痛点的综述。本文将根据近年来 SERS 技术在食品安全检测领域的众多研究成果, 重点论述 SERS 基础理论、基底体系, 全面梳理其在各类食品危害物检测中的应用进展, 客观分析技术现存局限并提出可行突破路径, 为 SERS 快速检测技术的实验室优化与产业化落地提供系统性理论支撑。

2. SERS 技术基础理论

2.1. 拉曼散射与 SERS 效应原理

当单色激光照射物质分子时, 光子与分子发生非弹性碰撞, 光子和分子产生能量交换, 散射光的频率与入射光出现偏移, 这一物理现象即为拉曼散射。不同化学键结构、分子空间构型会带来独一无二的拉曼特征峰, 凭借指纹特征可直接完成物质定性识别, 但天然拉曼散射截面极小, 信号强度微弱, 常规检测手段无法实现痕量物质分析。

SERS 效应指待测分子吸附于金、银、铜等纳米级粗糙贵金属表面时, 分子拉曼散射强度被指数级放大, 信号增强倍数最高可达 $10^{10} \sim 10^{14}$, 能够达到单分子检测水平[11]。现阶段学术界普遍认可电磁场增强与电荷转移两种协同作用机制共同解释 SERS 信号放大现象, 二者作用机理、贡献程度存在明显区分。

2.2. SERS 效应两大增强机理

电磁场增强属于物理增强机制, 也是 SERS 信号提升的核心来源, 图 1(a)所示为电磁场增强的原理图。贵金属纳米颗粒受到入射激光激发后, 表面自由电子发生集体振荡, 产生局域表面等离子体共振效应, 在纳米颗粒间隙、尖端等位置形成超高电场强度的“热点”区域, 同时放大入射光与分子散射光的强度[12]。该增强机制效果主要由纳米材料种类、微观形貌、表面粗糙度决定, 与待测分子自身化学性质关联较弱, 增强因子可达 $10^8 \sim 10^{10}$ 。

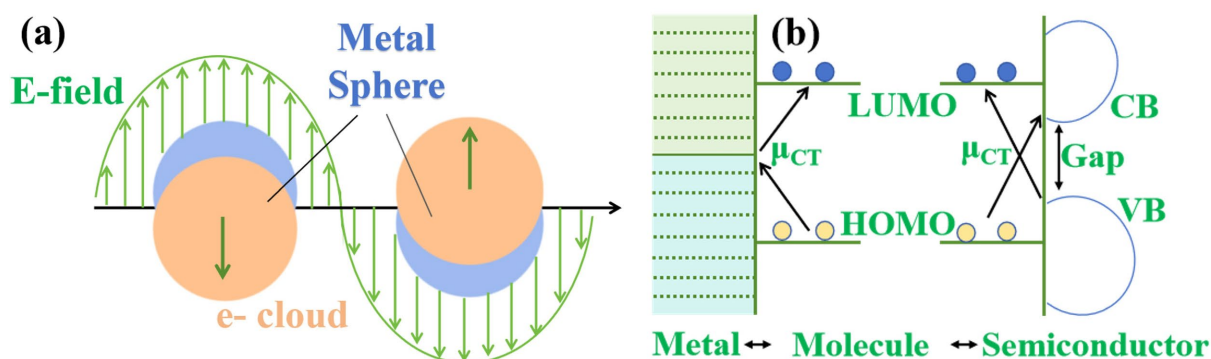


Figure 1. (a) Schematic diagram of the electromagnetic field enhancement mechanism and (b) schematic diagram of the charge transfer enhancement mechanism in SERS

图 1. (a) SERS 电磁场增强原理图和(b) SERS 电荷转移增强原理图

电荷转移增强属于化学辅助增强机制, 其原理图如图 1(b)所示。当待测分子与贵金属基底距离仅数纳米时, 金属费米能级与分子 HOMO、LUMO 轨道之间发生电子跃迁与电荷交换, 改变分子极化率, 小幅提升拉曼信号强度。该机制依赖分子与基底的吸附、键合作用, 仅对含巯基、氨基等易结合官能团的

分子生效, 增强因子仅为 $10^2 \sim 10^3$ 。绝大多数食品检测体系中, 两种机理同步发挥作用, 共同实现超高灵敏度的信号输出。

2.3. SERS 两种主流检测模式

无标记直接检测是操作最简便的 SERS 分析方式, 无需额外引入拉曼分子, 直接采集待测物本身的特征指纹光谱完成定性定量, 检测流程短、成本更低, 适用于带有芳香环、羟基、巯基等易吸附官能团的农残、色素类物质。但该模式存在明显短板, 对于重金属离子、蛋白类大分子等拉曼活性弱的物质, 检测信号极易被食品基质背景噪音掩盖, 难以达到痕量检出要求。

标记间接检测依托特异性识别元件与拉曼探针实现信号转换, 通过抗体、适配体、分子印迹聚合物修饰基底, 搭配高活性染料作为报告分子, 依靠探针峰强度变化间接判断目标物浓度。该模式特异性极强, 能够检测无拉曼活性的重金属、致病菌、真菌毒素, 缺点在于基底修饰步骤烦琐, 原料成本更高, 整体检测耗时相比直接检测更长。

3. SERS 活性基底分类及制备

SERS 活性基底是决定检测灵敏度、信号重现性的核心载体, 一套理想基底需要同时满足热点密度高、制备工艺简便、储存稳定性好、信号均匀、可批量量产等条件。根据存在形态、材料复合方式, 可将现有主流基底划分为胶体基底、刚性固体基底、复合柔性基底三大类别, 如图 2 所示。

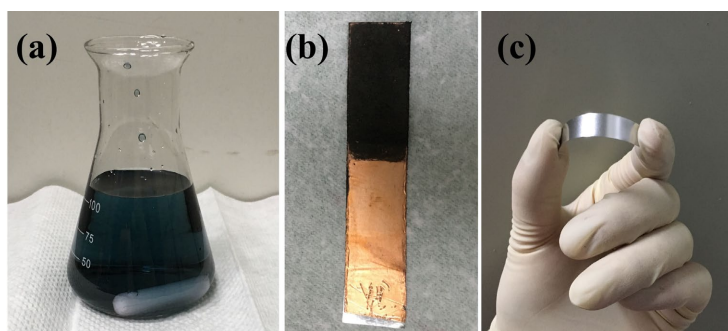


Figure 2. Typical morphologies and structures of three types of SERS substrates: (a) colloidal, (b) rigid, and (c) flexible
图 2. (a) 胶体、(b) 刚性、(c) 柔性三类 SERS 基底的典型形态结构

胶体基底以金、银纳米液相溶胶为核心, 多采用柠檬酸钠还原法、溶剂热法制备, 通过调控反应条件得到球形、纳米棒、纳米花、立方体等多种形貌金属颗粒[13]。胶体基底合成流程简单、原料成本低廉, 溶液内纳米颗粒能够形成大量热点, 适合牛奶、果汁、酒水等液态食品的快速筛查, 但液相体系下纳米颗粒缺少固定支撑结构, 极易发生团聚沉降, 不同批次溶胶的信号差异较大, 无法直接用于果蔬、肉类等固体表面原位采样。银纳米胶体增强效果优于金胶体, 金胶体则具备更好的化学稳定性, 实际研究中常制备金银核壳复合溶胶平衡两种优势。

刚性固体基底将贵金属纳米结构固定在硅片、玻璃、氧化铝、不锈钢等硬质载体表面, 制备方式包含纳米自组装、电子束光刻、磁控溅射等路线。这类基底能够精准调控纳米颗粒排布与间隙尺寸, 热点分布均匀, 检测信号重现性大幅提升, 部分光刻纳米天线基底可实现单分子检测。但电子束光刻等高精度制备手段依赖昂贵精密设备, 生产门槛高、难以大规模量产, 同时硬质基底无法贴合果蔬表皮、不规则食品曲面, 现场采样适用性较差, 多用于实验室精准定量分析。

复合柔性基底是近年食品安全检测领域的研究热点, 以滤纸、无纺布、PDMS 薄膜、医用棉签、透

明胶带等柔性材料为支撑载体,通过原位生长、物理吸附等方式负载金银纳米颗粒,衍生纸基、擦拭型、薄膜三类主流基底。柔性基底最大优势在于适配各类不规则食品表面,通过直接擦拭即可完成原位采样,无需有机溶剂萃取前处理,完全适配田间、农贸市场等现场检测场景。同时研究人员常引入石墨烯、磁性四氧化三铁、半导体材料对柔性基底改性,石墨烯可降低荧光背景、富集有机污染物,磁性材料能够实现目标物快速磁分离,有效去除食品中蛋白、多糖等基质带来的信号干扰,兼顾富集、分离、信号增强多重功能。

4. SERS 技术在食品安全检测中的应用

4.1. 农药残留检测应用

农业生产中有机磷、有机氯、杀菌剂等农药广泛使用,果蔬、谷物表面微量残留会持续危害人体代谢健康,传统色谱检测需要长时间溶剂提取,无法实现现场快速筛查,SERS 柔性擦拭基底为此提供了便捷的解决方案。现有研究中,金纳米修饰胶带、银无纺布等柔性材料可直接擦拭苹果、黄瓜、柑橘果皮,无需复杂前处理,数分钟内即可完成甲基对硫磷、福美双、毒死蜱等多种农药检测,检出限低至 ng/cm^2 级别,远低于国家食品残留限量标准。针对果汁、提取液等液态样品,Au@Ag 核壳复合溶胶基底可实现西维因、百草枯等农药的痕量定量,但果汁中果糖、有机酸等天然物质会与目标分子竞争基底吸附位点,削弱拉曼信号,通常搭配简单稀释、固相萃取步骤降低基质干扰。针对畜禽产品中的氟虫腈等小众农药, $\text{SiO}_2@\text{Au}$ 核壳颗粒基底也能够实现鸡肉、鸡蛋样品快速检出[14]。整体来看,柔性擦拭类 SERS 基底是农残现场检测最具应用潜力的路线,后续研究重点集中于优化纳米颗粒负载均匀度,进一步降低果蔬天然基质带来的信号干扰,详见表 1。

4.2. 兽药与抗生素残留检测

畜禽养殖、水产养殖过程中滥用抗生素、生长调节剂会导致药物在动物源性食品中蓄积,长期摄入会造成人体耐药性、器官损伤,依托标记型 SERS 传感技术可实现复杂肉、蛋、水产基质中微量兽药检测。针对庆大霉素、青霉素、喹诺酮类抗生素,半胱胺修饰金纳米、Ag-TiO₂ 复合基底可完成定量分析,牛奶中青霉素检出限低至 $2.54 \times 10^{-9} \text{ mol/L}$,水中多种喹诺酮类抗生素检出限均低于欧盟规定最大残留标准。水产养殖违禁药孔雀石绿可通过 PMMA 柔性自组装基底快速识别,检出限达到 0.1 nmol/L 。对于克伦特罗、莱克多巴胺等瘦肉精类非法兽药,磁性 SERS 免疫层析基底依靠磁富集与信号双重放大,可在猪肉样品中实现 pg 级别灵敏检出,整套检测流程简洁,适合屠宰场批量筛查。当前该领域研究多针对单一兽药种类建立检测体系,未来需要开发广谱识别探针,实现多种兽药共存样品同步区分检测,详见表 1。

4.3. 食品添加剂及非法添加物检测

食品添加剂分为合规防腐剂、着色剂、甜味剂与三聚氰胺、苏丹红等非法添加物,是 SERS 技术商业化研究最为成熟的应用方向。针对山梨酸钾、苯甲酸钠等常见酸性防腐剂,HfO₂ 超薄薄膜包裹银棒基底具备优良耐酸性,可对单一、混合防腐剂完成定量;人工合成与天然食品色素可通过银纳米花基底快速区分,柠檬黄、日落黄、胭脂红等色素检出限可达 $\mu\text{g/L}$ 水平[15]。肉制品中亚硝酸盐可依托磁性 SERS 试纸完成定性定量,有效规避其致癌风险。乳制品中三聚氰胺是重点管控非法添加物,Ag@SiO₂ 纳米立方体、树莓状银颗粒等多种基底均可实现痕量检测,液态奶检出限 0.17 mg/L ,低于国家限定标准。辣椒油中苏丹红 I 可通过磁性纳米银花基底定量,线性区间宽、检测误差小,详见表 1。现阶段相关检测体系大多仅能单独测定一种添加剂,开发高通量、多组分同步检测基底是该领域核心发展方向。

Table 1. Summary of representative studies on SERS-based detection of food hazards
表 1. SERS 食品危害物检测代表性研究汇总表

检测目标类别	基底材料	样品基质	前处理方式	检出限 LOD	总检测时长
农药残留	Au@Ag 核壳胶体溶胶	果汁、柑橘果皮	果皮直接擦拭；果汁简单稀释	ng/cm ² (果皮)；10 ⁻⁸ mol/L (液体)	3~8 min
	金纳米修饰柔性胶带	黄瓜、苹果表皮	无萃取，原位擦拭洗脱	2.1 ng/cm ²	5 min
	SiO ₂ @Au 核壳颗粒	鸡肉、鸡蛋提取液	低速离心稀释	0.03 µg/kg	10 min
兽药/抗生素残留	半胱胺修饰金纳米溶胶	牛奶	离心脱脂、pH 微调	2.54 nmol/L (青霉素)	12 min
	Ag-TiO ₂ 复合刚性基底	养殖水体、鱼肉匀浆	固相微萃取富集	0.1 nmol/L (孔雀石绿)	15 min
	磁性 SERS 免疫层析基底	猪肉匀浆	磁珠快速富集、清洗	pg 级 (克伦特罗)	8 min
食品添加剂/非法添加物	HfO ₂ 包裹银纳米棒基底	饮料、酱油	简单稀释，无需脱蛋白	µg/L (山梨酸钾)	6 min
	树莓状银纳米颗粒	液态奶	直接混匀	0.17 mg/L (三聚氰胺)	4 min
	磁性纳米银花基底	辣椒油	少量正己烷稀释萃取	0.05 µg/L (苏丹红I)	10 min
食源性致病菌	万古霉素修饰银纳米棒硅基底	生鲜猪肉、豆芽浸泡液	过滤粗提，缓冲液稀释	100 CFU/mL	25 min
	适配体原位合成银纳米体系	生鲜牛肉浸出液	短时孵育捕获细菌	1.5 CFU/mL	40 min
重金属离子	4-MBA 功能化金溶胶	红茶浸泡液、果蔬汁液	过滤除渣，探针孵育	nmol/L (Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 、As ³⁺)	18 min
	磁性 DNA 修饰金银合金基底	饮用水、谷物消解液	磁分离富集	pm 级(Hg ²⁺)	20 min
生物毒素与液体食品专项检测	MXene 负载金二聚体复合基底	花生提取液	甲醇简易萃取、氮气吹干复溶	0.6 pg/mL (黄曲霉毒素 B1)	20 min
	磁分离复合银纳米基底	玉米粉末浸出液	缓冲液萃取、磁富集	fg 级别多种真菌毒素	22 min
	液-液界面金银溶胶	煎炸食用油	少量正己烷稀释	0.1 µg/L (苯并芘)	7 min
	银纳米柔性试纸	蜂蜜、葡萄酒	纯水稀释降低粘度	nmol/L (农残、二氧化硫)	9 min

4.4. 食源性致病菌检测

沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等食源性致病菌极易引发群体性食物中毒，传统微生物培养法耗时数天，PCR 检测操作复杂，SERS 标记传感为快速菌种识别提供新路径。不同细菌细胞膜脂质、蛋

白组分存在差异,具备独特的原生拉曼指纹,但信号强度微弱,研究多采用万古霉素、小麦胚芽凝集素、适配体修饰银纳米基底,依靠特异性结合捕获目标菌种,放大特征信号。万古霉素修饰银纳米棒可区分6种常见食源性致病菌,检出限低至100 CFU/mL;适配体原位合成银纳米颗粒体系可在40分钟内完成金黄色葡萄球菌检测,检出限1.5 CFU/mL,搭配便携式拉曼设备可用于生鲜肉类、豆芽现场微生物筛查,详见表1。该技术现存短板在于广谱识别生物探针数量较少,食品复杂基质中细菌富集分离步骤繁琐,后续需要研发通用性更高的识别元件,简化样品前处理流程。

4.5. 食品重金属检测

铅、汞、镉、砷等重金属通过食物链持续生物富集,极低浓度即可损伤人体神经、肝肾器官,重金属离子本身无拉曼活性,行业通用方案是引入巯基苯甲酸、ATP、氨基苯硼酸等探针分子,依靠探针结合重金属后的光谱变化完成间接定量。4-MBA 功能化金纳米溶胶可同时识别 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{3+} 三种重金属离子,红茶样品中的汞离子可通过金银合金 SERS 传感器精准测定,检测结果与 ICP-MS 仪器高度吻合,详见表1。磁性 DNA 修饰基底对 Hg^{2+} 检出限可达 pm 级别,具备优良选择性[16]。目前检测难点在于多种重金属离子共存时特征峰相互重叠,难以单独区分,需要设计多活性位点特异性探针,提升体系多组分分辨能力。

4.6. 生物毒素与液体食品专项检测

黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、呕吐毒素等真菌毒素具备强致癌、致畸特性,在谷物、坚果中微量存在,常规检测灵敏度不足,基于适配体的 SERS 传感器可实现 pg、fg 级别超灵敏检出。MXenes 负载金二聚体基底检测花生中黄曲霉毒素 B1 检出限 0.6 pg/mL,磁分离联用 SERS 技术可在 20 分钟检出牛奶中蓖麻毒素,多种真菌毒素阵列基底能够一次性完成玉米样品多毒素同步定量。针对牛奶、食用油、酒水、蜂蜜等液态食品,SERS 不受水分干扰的特性具备独特优势:各类金银基底可快速测定乳制品三聚氰胺与多种抗生素;液-液界面 SERS 体系可识别煎炸油中苯并芘、区分地沟掺假油;饮料中人工甜味剂、色素,葡萄酒中二氧化硫,保健酒中西地那非均可实现快速定量,针对蜂蜜高粘稠基质,通过简单萃取搭配银溶胶基底即可完成氯霉素、农残筛查[17],详见表1。液态食品基质复杂程度高,油脂、多糖、蛋白均会产生背景干扰,开发专用富集基底与简易前处理联用方案是该领域优化重点。

5. SERS 技术应用现存核心瓶颈

尽管 SERS 技术在各类食品危害物检测中展现出突出优势,但距离标准化、商业化大规模应用仍存在多重现实瓶颈,基底性能、样品基质干扰、检测标准化、设备产业化四大层面的问题亟待解决。

首先是 SERS 基底的稳定性与重现性缺陷。液相金银胶体极易团聚,不同合成批次纳米颗粒形貌、尺寸存在差异,直接造成检测信号波动;光刻、自组装刚性基底制备成本高昂,无法大批量工业化生产;纸基、擦拭型柔性基底存在纳米颗粒负载不均匀、热点随机分布的问题,定量检测相对标准偏差偏高,难以满足食品安全定量检测国标要求。同时多数复合改性基底储存周期短,放置一段时间后增强性能明显衰减,无法做成长期储存的商品化检测试剂盒,限制了基层监管、食品企业的普及使用。

其次是复杂食品基质带来的严重信号干扰。食品体系组分复杂,蛋白、多糖、油脂、有机酸等大分子会优先吸附在基底热点区域,抢占目标分子结合位点,大幅降低待测物拉曼信号,同时产生高强度背景噪音。蜂蜜、酸奶、高油酱料等高粘度、高有机质样品干扰最为突出,现有多数高灵敏实验室体系都需要固相萃取、磁分离、稀释等净化步骤,一定程度丧失 SERS 快速、无损的核心优势,如何设计具备选择性吸附功能的基底,简化甚至省去前处理是当前重要研究课题。

第三是多组分同步检测能力不足与标准化体系缺失。现阶段绝大多数 SERS 检测体系仅针对单一危害物建立定量曲线,食品中多种农残、毒素、重金属共存时,拉曼特征峰相互重叠,人工与常规算法难以拆分,无法实现一次采样全风险筛查。同时行业内没有统一的基底制备规范、检测操作流程,不同实验室、不同仪器测得的检出限、线性范围差异巨大,全国范围内尚未建立覆盖果蔬、肉、乳、粮油全品类食品污染物 SERS 标准指纹数据库,光谱识别依赖人工经验,容易出现误判。更关键的是,目前暂无 SERS 相关食品安全国家标准,检测数据无法作为市场执法、质量判定的法定依据,仅能作为实验室预筛查参考,极大限制技术落地。

最后是便携式检测设备产业化滞后。高精度 SERS 检测多依赖实验室大型共聚焦拉曼仪器,设备体积庞大、价格昂贵;市面现有便携式拉曼设备激光功率、光谱分辨率不足,难以捕捉极低浓度样品的微弱拉曼信号,配套的一次性 SERS 试纸、擦拭采样产品稀缺,无法适配农贸市场、田间地头、小型加工厂等现场快速检测场景,设备与耗材的产业化开发进度远落后于实验室理论研究。

6. SERS 技术未来发展趋势

针对当前 SERS 技术存在的各类短板,结合纳米材料、人工智能、精密光学行业发展方向,未来 SERS 在食品安全检测领域的研发与产业化将围绕五大核心方向推进。

第一方向是低成本、高均匀、长稳定新型多功能基底开发。重点推进无纺布、可降解生物纸、环保聚合物等柔性载体基底规模化制备工艺,优化原位生长技术,改善纳米颗粒分布均匀度,降低定量检测 RSD;大力发展磁性、MOF、MXene、石墨烯复合改性基底,集成目标物磁富集、基质屏蔽、多重信号增强功能,简化样品净化步骤;研发储存周期长、活性衰减慢的基底修饰方案,推动一次性 SERS 擦拭试纸、检测试剂盒量产,降低使用成本,面向基层监管与中小企业普及。

第二方向是多技术联用一体化检测体系构建。将 SERS 与薄膜微萃取、分子印迹等简易前处理技术结合,实现复杂食品样品快速净化富集;开发 SERS-荧光、SERS-电化学双模传感平台,依靠双重信号互相校验,提升定性识别准确率;结合微流控芯片技术,搭建微量样品高通量检测平台,实现一次进样同步筛查多种食品污染物,解决多组分峰重叠干扰问题。

第三方向是人工智能赋能智能光谱解析与数据库建设。引入主成分分析、支持向量机、深度学习等机器学习算法,实现光谱自动降噪、重叠峰拆分、自动定性定量,减少人工判读误差;联合各地高校、检测机构搭建统一食品危害物 SERS 标准指纹数据库,覆盖农残、兽药、毒素、重金属、添加剂全品类,建立云端共享检索平台,为现场便携式设备提供智能识别支撑。

第四方向是行业标准化体系与法定方法建设。一是联合光谱仪器企业、检测机构、高校制定 SERS 基底、前处理、光谱采集行业团体标准,固定上述粒径、分辨率、回收率等量化质控参数;二是构建全国统一云端食品危害物 SERS 标准指纹库,限定峰位偏移、光谱采集分辨率统一;三是开展多基质、多实验室协同验证,补齐方法准确度、精密度、检出限全套验证数据,推动将柔性 SERS 快速筛查纳入食品安全补充检测国标,实现检测结果执法采信;建立基底、仪器、耗材三级质控溯源体系,每批次试纸配套标准质控样品。

第五方向是便携式拉曼设备轻量化、高性能迭代升级。优化便携式仪器光学光路、激光发射与信号接收模块,提升微弱痕量信号捕捉能力;开发小型化、一体化、低功耗手持 SERS 检测终端,搭配配套柔性擦拭基底耗材,打造“设备+一次性试纸”完整现场快速检测方案,适配果蔬产地、商超、屠宰场、餐饮后厨等多元应用场景,真正实现食品安全全链条实时监测。

7. 结论

SERS 技术凭借超高分子识别特异性、单分子级检测灵敏度、检测速度快、样品损耗少、不受水分干

扰、可便携现场检测等独特优势,弥补了传统大型色谱质谱仪器操作繁琐、无法现场筛查的短板,在农药兽药残留、食源性致病菌、非法添加剂、重金属、真菌毒素、液态食品品质等各类食品安全风险物检测中展现出不可替代的应用潜力。现阶段该技术仍受基底重现性差、食品复杂基质干扰、多组分同步检测困难、行业标准缺失、便携设备产业化不足等多重因素制约,整体处于实验室研究向实际产业应用过渡的关键阶段。未来随着纳米复合材料制备工艺持续迭代、多模态联用传感体系不断完善、人工智能光谱解析算法深度落地,以及行业标准化体系逐步搭建,高稳定性、低成本、易操作的 SERS 柔性基底与一体化便携检测产品将持续推向市场。SERS 有望成为食品安全全链条风险筛查的通用核心技术,为食品企业出厂自检、农贸市场日常抽检、食品安全风险应急预警提供高效技术支撑,全方位守护国民饮食健康安全。

参考文献

- [1] Yaseen, T., Pu, H. and Sun, D. (2018) Functionalization Techniques for Improving SERS Substrates and Their Applications in Food Safety Evaluation: A Review of Recent Research Trends. *Trends in Food Science & Technology*, **72**, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.012>
- [2] Danezis, G.P., Tsagkaris, A.S., Camin, F., Brusica, V. and Georgiou, C.A. (2016) Food Authentication: Techniques, Trends & Emerging Approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **85**, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026>
- [3] Wu, Y.P., Yu, W.F., Yang, B.H. and Li, P. (2018) Self-Assembled Two-Dimensional Gold Nanoparticle Film for Sensitive Nontargeted Analysis of Food Additives with Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *The Analyst*, **143**, 2363-2368. <https://doi.org/10.1039/c8an00540k>
- [4] Liu, W.K., Guo, A.L., Bao, X.Y., Li, Q., Liu, L., Zhang, X.S., *et al.* (2022) Statistics and Analyses of Food Safety Inspection Data and Mining Early Warning Information Based on Chemical Hazards. *LWT*, **165**, Article ID: 113746. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113746>
- [5] Fleischmann, M., Hendra, P.J. and McQuillan, A.J. (1974) Raman Spectra of Pyridine Adsorbed at a Silver Electrode. *Chemical Physics Letters*, **26**, 163-166. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(74\)85388-1](https://doi.org/10.1016/0009-2614(74)85388-1)
- [6] Park, J.E., Yonet-Tanyeri, N., Vander Ende, E., Henry, A., Perez White, B.E., Mrksich, M., *et al.* (2019) Plasmonic Microneedle Arrays for in Situ Sensing with Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS). *Nano Letters*, **19**, 6862-6868. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b02070>
- [7] Hanosh, S., K. M. and George, S.D. (2025) Plasmonic Slippery Surface for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy and Protein Adsorption Inhibition. *Analytical Chemistry*, **97**, 2610-2617. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c01844>
- [8] Al-Ogaidi, I., Gou, H., Al-kazaz, A.K.A., Aguilar, Z.P., Melconian, A.K., Zheng, P., *et al.* (2014) A Gold@Silica Core-Shell Nanoparticle-Based Surface-Enhanced Raman Scattering Biosensor for Label-Free Glucose Detection. *Analytica Chimica Acta*, **811**, 76-80. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.12.009>
- [9] Viehrig, M., Thilsted, A.H., Matteucci, M., Wu, K., Catak, D., Schmidt, M.S., *et al.* (2018) Injection-Molded Microfluidic Device for SERS Sensing Using Embedded Au-Capped Polymer Nanocones. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 37417-37425. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13424>
- [10] Gu, C., Meng, D., Yu, X., Li, L. and Zhao, Z. (2023) Highly Sensitive and Flexible GFF/Au/AgNPs SERS Substrate and Its Application for Rapid Hazardous Residues Detection on Food. *Plasmonics*, **18**, 1541-1552. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01864-3>
- [11] Gao, T., Wang, Y., Wang, K., Zhang, X., Dui, J., Li, G., *et al.* (2013) Controlled Synthesis of Homogeneous Ag Nanosheet-Assembled Film for Effective SERS Substrate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **5**, 7308-7314. <https://doi.org/10.1021/am401552x>
- [12] Shan, F., Zhang, X.Y., Fu, X.C., Zhang, L.J., Su, D., Wang, S.J., *et al.* (2017) Investigation of Simultaneously Existed Raman Scattering Enhancement and Inhibiting Fluorescence Using Surface Modified Gold Nanostars as SERS Probes. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 6813. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07311-8>
- [13] Shan, F., Huang, J., Zhu, Y. and Wei, G. (2024) Photo-Thermal Conversion and Raman Sensing Properties of Three-Dimensional Gold Nanostructure. *Molecules*, **29**, Article 4287. <https://doi.org/10.3390/molecules29184287>
- [14] 金靖, 郑峰, 郭志勇, 尤龙杰, 陈曦. 表面增强拉曼光谱法在食品安全检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 113-123.
- [15] 孙娇娇, 董军, 郭玉蓉. SERS 技术在食品安全检测中的应用[J]. 西安邮电大学学报, 2020, 25(1): 85-91, 110.

- [16] 罗松松, 卓泽晟, 刘梦迪, 杨康. 表面增强拉曼光谱技术在食品安全检测领域中的应用[J]. 福建轻纺, 2025(5): 3-11.
- [17] 邹婷婷, 徐振林, 杨金易, 王弘, 孙远明, 沈玉栋. 表面增强拉曼光谱技术在食品安全检测中的应用研究进展[J]. 分析测试学报, 2018, 37(10): 1174-1181.