赵正阳, 刘吉瀚, 赵长春, 等. 双模传感技术在食品安全检测的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 488−502. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030234

ZHAO Zhengyang, LIU Jihan, ZHAO Changchun, et al. Research Progress on the Application of Dual-mode Sensing Technology in Food Safety Detection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 488−502. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030234

· 专题综述 ·

双模传感技术在食品安全检测的应用研究进展

赵正阳, 刘吉瀚, 赵长春*, 杨国海*, 渠陆陆

（江苏师范大学化学与材料科学学院, 江苏徐州 221116）

摘　要: 双模传感技术因具备高灵敏度与交叉验证能力，在食品安全检测领域表现出显著优势。本文以结合了光学检测方法的双模传感技术为重点，综述了近年来双模传感体系的构建策略及其在食品安全检测中的应用进展。通过集成两种信号，该技术可有效克服单一检测模式所遇到的选择性低、受环境干扰大等问题，已成功应用于对病原体、毒素、农药、重金属离子以及兽药等常见污染物的检测。此外，本综述重点指出了当前探针设计和样品前处理方面的挑战，并探讨了未来的发展趋势，为双模传感技术在相关领域的实际应用提供理论资料。

关键词: 双模传感, 探针, 检测, 食品安全, 光学

中图分类号: TS201.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0488−15

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030234　　本文网刊:

Research Progress on the Application of Dual-mode Sensing Technology in Food Safety Detection

ZHAO Zhengyang, LIU Jihan, ZHAO Changchun*, YANG Guohai*, QU Lulu

（School of Chemistry and Materials Science, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China）

Abstract: Dual-mode sensing technology demonstrats significant advantages in food safety detection due to its high sensitivity and cross-verification capability. This review focuses on dual-mode sensing systems integrated with optical detection methods, summarizing recent advances in their construction strategies and applications for food safety monitoring. Studies reveal that by combining two complementary signals, this technology effectively overcomes limitations of single-mode detection, such as low selectivity and susceptibility to environmental interference, and is successfully applied to detect common contaminants including pathogens, toxins, pesticides, heavy metal ions, and veterinary drugs. In addition, the review highlights current challenges in probe design and sample processing, and discusses future development trends, and lays a theoretical groundwork for the practical application of dual-mode sensing technologies in relevant fields.

Key words: dual-mode sensor; probe; detection; food safety; optics

随着人们对生活质量的日益重视, 由病原体、毒素、农药、兽药和重金属等污染物所引起的食品安全问题得到广泛关注[1]。目前食品安全检测主要有气相色谱、液相色谱、色谱-质谱联用等仪器确证分析方法, 以及酶联免疫(ELISA)、胶体金试纸、电化学、比色等便携快速检测技术。尽管这些方法具有高度的特异性、选择性好和灵敏度高等优点, 但这些单模传感技术仍易受到复杂样品基质、测试环境以及具体操作条件的影响, 从而导致检测结果不准确, 限制了其在实际检测中的应用[2−4]。因此迫切需要开发简

收稿日期: 2025−03−18

基金项目: 江苏省重点研发计划（BE2022707）, 江苏省大学生实践创新训练计划。

作者简介: 赵正阳（2003−）, 男, 大学本科, 研究方向: 食品分析, E-mail: 2787879212@qq.com。

*** 通信作者:** 赵长春（1972−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品检测, E-mail: zcch@jsnu.edu.cn。

杨国海（1986−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 纳米生物分析, E-mail: yangguohai@jsnu.edu.cn。

便快速、经济、性能稳定的分析技术并整合各自优势，从而弥补单一模式检测的固有局限性，避免假阳性结果、提高检测结果的可靠性。

近年来，双模传感因其具有明显的互补优势而日益得到人们的关注[5−6]。双模传感是指利用两个信号转换器，将检测物信息同步转换为两个互不干扰且均可用于测量的信号，从而实现对被测物质的测定。与传统的单模传感相比，双模传感在检测食品中的痕量污染物方面有着明显优势。首先，两个信号转换器独立工作的同时可实现相互验证，加强了测定结果的抗干扰性[7−8]；其次，由于两种模式的灵敏度和检测的线性范围存在差异，使得双模传感能够获得更为丰富的检测信息从而克服单模传感固有的缺陷[9−10]。本文以集成双模光学传感为重点，综述近年来应用于食品安全检测领域的双模传感器的工作原理、设计策略以及应用实例（图 1），并讨论了开发新型双模传感器所遇到的问题与挑战。

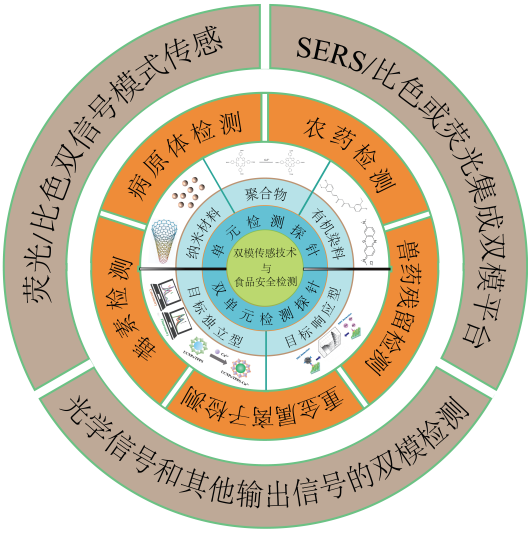


图 1　双信号模式传感原理及在食品安全检测的应用示意图

Fig.1　Schematic diagram of dual-signal mode sensing principles and its applications in food safety testing

1　双模传感原理

双模传感是指对一个样品检测可同时获得两个各自独立的传感信号，与常规的单模传感相比，其存在两种不同信号的输出系统。这些系统在设计时，通常会使用功能探针，能产生两种不同类型的信号并且信号强度受目标物种类与浓度控制。根据功能探针的设计原理不同又可分为单元检测探针与双单元检测探针。

1.1　单元检测探针

单元检测探针即传感器通过使用一个探针产生可用于对目标物实现定量测定的两种信号[11]。这些探针主要包括有机染料、植物色素、聚合物和纳米材料等。

有机染料，如具有类过氧化物酶（peroxidase，POD）的特性荧光素，其自身具有荧光信号的同时还可催化过氧化氢（hydrogen peroxide，H_2O_2）氧化 3,3',5,5'-四甲基联苯胺（3,3',5,5'-tetramethylbenzidine，TMB）变蓝以产生比色信号[12]。基于此性质，Zhou 等[13] 制备了含酚羟基的巯基化羧基配体修饰的 Au 纳米花，并将荧光素分子负载在 AuNPs 表面的疏水袋中，由于荧光素分子和 AuNPs 之间的荧光共振能量转移（fluorescence resonance energy transfer，FRET）导致检测不到荧光信号。将负载了荧光素的 AuNPs 与甲胎蛋白三明治夹心免疫复合体共价结合，当体系呈现弱碱性后，随着疏水袋中酚羟基的缺失，荧光素从 AuNPs 表面上脱落，产生强烈的荧光响应；同时由于其兼具有 POD 活性，可催化 H_2O_2 氧化 TMB 生成蓝色 $_{OX}$TMB，产生比色信号。实现了对甲胎蛋白低至 29 fg·mL^{-1}（荧光）、17.7 pg·mL^{-1}（比色）的双模信号检测（图 2A）。在该体系中，荧光素作为单元检测探针，产生了荧光和比色两种信号，并且所用的金纳米花载体放大了这两种信号，从而使得该方法具有更低的检测限。除此之外，天然植物色素姜黄素也可作为单元检测探针。Miao 等[14] 将姜黄素分子加载到 MoS_2 纳米材料上，此时由于姜黄素和 MoS_2 载体之间 FRET 效应而使得姜黄素荧光猝灭，当受到碱性刺激时，姜黄素会从 MoS_2 载体表面释放，受 pH 影响而呈现变色效应从而产生比色信号，而同时荧光得以恢复，从而获得两种信号响应。另外，TMB 不仅可作为比色分析中的显色剂，其氧化产物 $_{OX}$TMB 在红外光照射下还具有良好的光热效应，从而产生温度变化，可据此输出比色与光热双信号[15]。由于其经济、易得，有机染料及天然植物色素常被设计为单元检测探针，但由于往往需要负载到纳米材料上，不仅手续较为繁琐，而且还会导致纳米材料吸附或催化活性的改变，从而限制了其在双模检测中的广泛应用。

某些聚合物本身具备发光功能可提供光信号，经修饰后可作为单元检测探针对目标物产生两种响应信号。Chen 等[16] 制备了 Gd^{3+}−5,10,15,20-四（4-羧基苯基）卟啉配位聚合物探针并用于 Fe^{3+} 的检测，构建了荧光/比色双模传感器。由于 Fe^{3+} 会与探针发生配位使得卟啉化合物在紫外可见区域中 420 nm 附近的强吸收峰以及 500~750 nm 范围的若干个弱吸收峰发生偏移，进而导致荧光猝灭和颜色改变，产生荧光与比色两种信号（图 2B）[17−18]。当 Fe^{3+} 的浓度超过 5 μmol·L^{-1} 时，随着溶液浓度的增加，测得的红色荧光信号降低，检测限可达 98 nmol·L^{-1}（荧光）。此外，聚集诱导发光（aggregation-induced emission）聚合物，在单体分散状态下几乎不发光或发光很弱，但在聚集态时能够强烈发光。基于此独特的光学性质也常用作双模检测的单元检测探针。

纳米材料（如贵金属纳米材料、碳基纳米材料等）因信号输出通道多样、易与生物可识别元素结合等优点，在设计单元检测探针方面也备受关注[19−21]。例

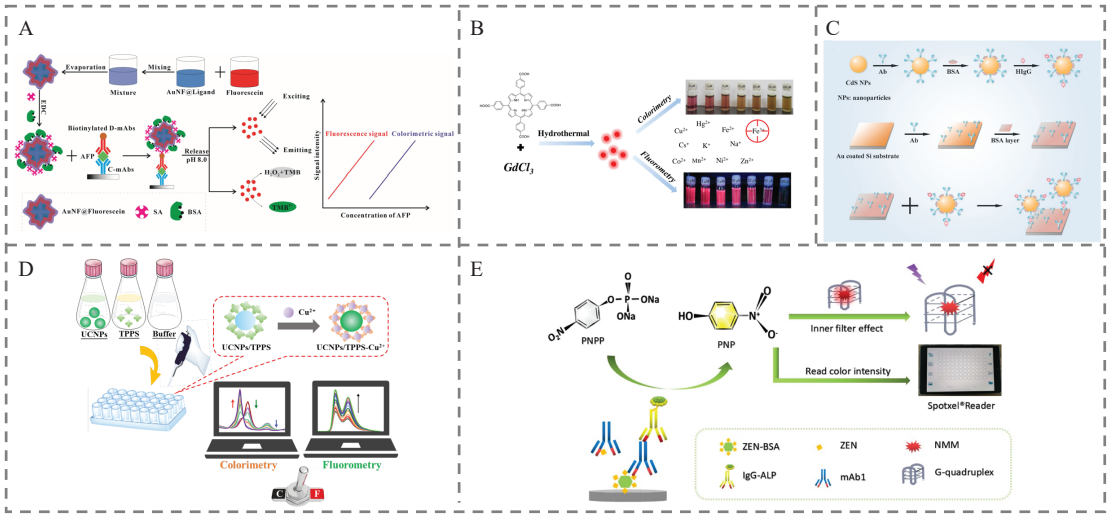


图 2　荧光/比色双模式检测实例及原理

Fig.2　Representative fluorescent/colorimetric dual-mode sensing platforms

注: A: 利用 AuNF@Fluorescein@SA 进行荧光/比色双模式检测示意图[13]; B: 利用 Gd-TCPP NCP 对 Fe^{3+}进行荧光/比色双模式检测示意图[16]; C: 利用 CdS 对 HIgG 进行光致发光和多声子共振拉曼散射双模检测[22]; D: 基于 UCNPs 和 TPPS 之间 FRET 对 Cu^{2+}双模检测传感示意图[23]; E: 荧光/比色双模检测 ZEN 的原理[24]。

如, 半导体纳米材料 CdS 的带隙为 2.42 eV(等同于 488 nm 光的能量), 在 488 nm 激光照射下, CdS 具有优异的光致发光(photoluminescent, PL)与多声子共振拉曼散射(multiphonon resonant raman scattering, MRRS)特性并在生物标记和检测领域显示出良好性能。Li 等[22] 采用 CdS 作为单元检测探针, 成功设计了 PL/MRRS 双信号模式传感器用于对血清 HIgG 的检测。在目标物浓度增大时, 拉曼光谱仪检测的特定发射峰峰值增大, 产生双信号响应(图 2C)。表 1 列出了代表性的单元检测探针在食品安全中分析应用示例。与传统单模检测探针相比, 双模单元检测探针通过实现双信号集成输出优化了空间利用率, 简化了传感器的检测系统。合成的有机染料、天然的植物色素、发光聚合物以及性能各异的纳米材料均可以根据各自性质设计为双模单元检测探针, 拓宽了检测领域。尤其是新颖的纳米材料的出现, 不仅具有优异的光电性能, 而且还具备类酶催化活性, 更易于设计为双模传感单元探针, 成为食品安全中分析快速发展的前沿领域。当然, 由于双模检测需要测定两种不同的信号, 对仪器的空间设计也提出更高的要求。

1.2　双单元检测探针

双单元检测探针即传感器使用两种探针分别对目标物响应并产生两个可用于定量测定的各自独立的信号。该设计允许不同功能的探针组合, 提供了更

表 1　基于单元检测探针的双模传感器在食品安全中分析应用

Table 1　Representative dual-mode sensors based on unit detection probes in food safety

探针类型	探针	目标	输出信号	检测限	文献
有机染料	TMB	草甘膦	比色/光热	32.6 ng·mL^{-1}(比色) 28.9 ng·mL^{-1}(光热)	[25]
	罗丹明6G	铅离子	视觉/荧光	2.50 μmol·L^{-1}(视觉) 0.0200 μmol· L^{-1}(荧光)	[26]
	水溶性吩嗪染料	铜离子	比色/荧光	7.60 μmol·L^{-1}(比色) 0.220μmol L^{-1}(荧光)	[27]
聚合物	芘-苯并噻唑化合物(L)	氰化物	比色/荧光	2.80×10^{-7} mol·L^{-1}(比色) –(荧光)	[28]
	碳点@铈-鸟苷酸	四环素	荧光/散射	0.0430 μmol·L^{-1}(荧光) 0.0770 μmol·L^{-1}(散射)	[29]
纳米材料	MnO_2	毒死蜱	比色/化学发光	0.0330 ng·mL^{-1}(化学发光)	[30]
	银纳米颗粒	甲醛	比色/荧光	32.8 μg·L^{-1}(荧光) 80.0 μg·L^{-1}(比色)	[31]
	MoS_2 量子点	禽流感病毒	圆二色法/荧光	7.35 pg·mL^{-1} (荧光) 80.9 pg·mL^{-1}(圆二色法)	[32]
	CuS@Au	T-2毒素	比色/光热	0.0820 ng·mL^{-1}(比色) 0.0110 ng·mL^{-1}(光热)	[33]
	铂纳米颗粒	汞离子	比色/荧光	0.800 nmol·L^{-1}(比色) 0.140 nmol·L^{-1}(荧光)	[19]
	金纳米颗粒	黄曲霉毒素B_1	比色/电化学	35.0 pg·mL^{-1}(比色) 0.430 pg·mL^{-1}(电化学)	[34]

注: –表示无数据。

多的产生信号响应的途径和双信号模式检测设计方案[23]。根据目标物与双单元检测探针之间的相互作用，又可将探针分为目标响应型与目标独立型。

目标响应型探针即目标物浓度的变化会直接影响探针响应产生的双信号强度。FRET 常用于目标响应型双单元探针的设计，选用上转换纳米粒子（upconversion nanoparticles, UCNPs）作为能量供体，当其与受体接触后由于 FRET 从而使得探针荧光强度发生变化。Yan 等[24] 基于卟啉水合物（porphyrin hydrate, TPPS）本身的绿色及其对 UCNPs 的 FRET 效应，将二者结合形成 UCNP/TPPS 无荧光的复合物，从而设计了对 Cu^{2+}进行超灵敏检测的响应探针（图 2D）。当 Cu^{2+}存在时，由于 Cu^{2+}与 TPPS 配位，吸收峰由 434 nm 蓝移到 412 nm，导致颜色由绿色变为粉红色，产生比色信号；同时由于复合物吸收带移动，FRET 受到抑制，使得荧光信号得以恢复。在该传感器中，目标物 Cu^{2+}直接与探针发生相互作用，由 TPPS 输出比色信号并同时改变了 TPPS 与 UCNPs 之间的 FRET 产生荧光信号，故为双单元响应型探针。

目标独立型探针是指探针产生的信号受到目标物浓度变化的间接影响而产生响应，如目标物通过影响催化剂活性而影响输出信号的强度等。Ma 等[35] 构建用于检测玉米赤霉烯酮（zearalenone, ZEN）的比色/荧光双模传感器（图 2E）。对硝基苯磷酸酯（p-nitrophenyl phosphate, PNPP）在碱性磷酸酶（alkaline phosphatase, ALP）的作用下去磷酸化生成黄色的对硝基苯酚（p-nitrophenol, PNP），由于其吸收峰与 G-四链体（G-quadruplex, G4）/N-甲基中卟啉 IX（N-methylmesoporphyrin IX, NMM）发射峰重合从而会因内滤效应猝灭 G4/NMM 的荧光，但 PNPP 自身无法实现该过程。因此，当没有目标物 ZEN 存在时，ZEN-牛血清白蛋白（bovine serum albumin, BSA）可捕获大量 ALP，表现出明显的黄色与较弱的荧光强度；当 ZEN 存在时，由于其会与 ZEN-BSA 竞争性结合抗体导致捕获的 ALP 减少，使得该级联反应中 PNPP 去磷酸化生成的 PNP 量减少，G4/NMM 荧光恢复[35]。该过程中，探针信号强度并不受到目标物浓度的直接影响。与目标响应型探针相比，目标独立型探针所产生的响应信号依赖于第三方对目标物与探针之间相互作用程度的敏感程度。因此为了获得可重复性分析结果，必须严格控制具体的测定条件。表 2 列出了近年来报道的基于双单元检测探针设计的双模传感器在食品安全分析中的应用示例。与单元检测探针相比，双单元检测探针因检测时各自探针独立工作，使得输出的两种信号之间的抗干扰性更强。此外，由于引入两种探针分子，构建分析平台较为繁琐，而且分析结果易受具体操作如样品装配顺序等影响。当然，双单元检测探针对目标物的检测原理各有所不同，两个分析结果间相互印证，大大增强分析结果的准确度。同时也应当注意到，构建双单元检测探针的分析平台较为复杂，存在着开发周期长，重复性较差，不利于大规模推广等缺点。

2　双模传感技术的类型

对目标物能产生快速响应的信号主要有两类：光学信号和电化学信号。光学信号包含吸收、发射、折射、散射等，分布于不同波谱区间；电化学信号包含电位，电流，电导等。理论上，若有合适的探针分子，通过合理的设计，这些信号均可相互组合构建双模传感平台。目前由于光学信号易于采集（尤其是比色信号可以目视），成为构建双模传感平台的首选。本文侧重介绍双光学信号（双模光学）传感、光学信号和其他输出信号联合的双模传感两类。

2.1　双模光学传感技术

常见的光学传感信号主要有表面增强拉曼光谱（surface-enhanced raman spectroscopy, SERS）、荧光和比色等。根据信号读出方式，集成双模光学传感技术主要分为荧光/比色、SERS/比色、SERS/荧光等模式。

2.1.1　荧光/比色双信号模式传感　荧光/比色信号模

表 2　基于双单元检测探针的双模传感器在食品安全中分析应用

Table 2　Representative dual-mode sensors based on dual-unit detection probes in food safety

探针类型	探针	目标	输出信号	检测限	文献
目标响应型	硫黄素T/G4-血红素脱氧核糖核酸酶	赭曲霉毒素	比色/荧光	9.91 nmol·L^{-1}（荧光） 0.0250 nmol·L^{-1}（比色）	[36]
	TMB/铟锡金属氧化物	黄曲霉毒素B_1	比色/光热	25.0 pg·mL^{-1}（比色） 5.00 pg·mL^{-1}（光热）	[37]
	TMB/荧光DNA	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	比色/荧光	5.30×10^{-3} ng·mL^{-1}（荧光） 3.40×10^{-2} ng·mL^{-1}（比色）	[38]
目标独立型	邻苯二胺/抗坏血酸	有机磷农药	荧光/光热	1.64 ng·mL^{-1}（荧光） 0.0840 ng·mL^{-1}（光热）	[39]
	TMB/鲁米诺	毒死蜱	比色/化学发光	5.30 ng·mL^{-1}（比色） 0.260 ng·mL^{-1}（化学发光）	[40]
	MoS_2/CdS/ZnS/Ag_2S	赭曲霉毒素	电化学/光电化学	0.001 μg·L^{-1}（电化学/光电化学（比率））	[41]
	邻苯二酚/卟啉	二硫代氨基甲酸酯	比色/荧光	9.23 n·mL^{-1}（比色） 5.95 ng·mL^{-1}（荧光）	[42]
	PNP/G4/NMM	玉米赤霉烯酮	比色/荧光	3.60×10^{-2} ng·mL^{-1}（比色） 7.20×10^{-3} ng·mL^{-1}（荧光）	[35]

式传感具有设计简单、操作方便、检测快速、可视化等优点，在双信号模式传感中占有重要地位[44]。根据目标物浓度对双信号的影响，荧光/比色双信号模式传感器的设计可分为三类，即目标分析物直接刺激策略、酶介导激活策略和生物分子介导策略[19]。

目标分析物直接刺激策略是如聚合物[45]、离子[46]等，可直接刺激检测探针引起荧光/比色信号的变化。例如，Nawaz 等[47]使用 4,4'-亚甲基二苯基二异氰酸酯（methylene diphenyl diisocyanate，MDI）作为交联剂将 1,10-菲啰啉-5-胺（1,10-phenanthroline-5-amine，Phen）化学键合到纤维素醋酸纤维素（cellulose acetate，CA）上，合成了一种对 Fe^{2+}响应的荧光传感器（Phen-MDI-CA）（图 3A）。当 Fe^{2+}存在时，Phen-MDI-CA 与 Fe^{2+}结合形成红色非荧光沉淀 Fe-（Phen-MDI-CA）复合物，该复合物由于存在能量转移使得 Phen-MDI-CA 的荧光猝灭，同时生成的 Fe-（Phen-MDI-CA）复合物由于金属-配体电荷转移跃迁而表现为红色，即为比色信号。由此可知，荧光/比色双信号均由于 Fe-（Phen-MDI-CA）复合物的生成而产生，即目标物直接刺激传感器并产生双信号响应。

酶介导激活策略是酶底物（如葡萄糖、过氧化氢）、酶抑制剂（如有机磷农药）等，可以通过影响相应的酶促反应间接产生荧光/比色双信号的变化。因酶自身的选择性及酶介导下的信号放大效应，该类双模传感器检测时通常表现出很高的特异性和灵敏度[48]。MnO_2 纳米片可将多巴胺氧化成绿色荧光聚多巴胺（polydopamine，PDA）并以此猝灭量子点（quantum dots，QDs）CdTe/ZnS 的红色荧光[49−50]；也可催化 H_2O_2 氧化 TMB 成蓝色 $_{OX}$TMB[51]。Yang 等[52]据此设计了比率荧光/比色双模式传感器（图 3B）用于牛奶样品中的 ALP 的活性的检测。在 ALP 存在下，MnO_2 纳米片被抗坏血酸（ascorbic acid，AA）还原为 Mn^{2+}，无法氧化多巴胺生成 PDA，使得其通过 FRET 对 CdTe/ZnS QDs 荧光的猝灭效应降低；同时对 TMB 的氧化作用减弱而使得体系褪色，实现了对超低活性 ALP 的荧光/比色双模检测[52]。该设计中，双信号的强度仅与 ALP 催化产物直接相关联，但仅有 ALP 存在时没有信号产生，故为间接检测。

生物分子介导策略是指借助生物识别作用构建起目标物与输出信号之间的联系[53]。常见的用于构建双信号模式传感的特异性识别平台有抗原-抗体、适体-受体以及 DNA 杂交链等[43]。Wang 等[54]开发了一种荧光/比色双模适体传感器用于对鱼类中的过敏原小清蛋白（parvalbumin，PV）的定量检测。该适体传感器是由适体修饰的金纳米粒子（AuNPs-Apt）、互补短链修饰的金纳米粒子（AuNPs-CS_1）和荧光染料标记的互补短链（FAM-CS_2）杂交构建（图 3C）。起初由于 AuNPs 与 FAM-CS_2 之间存在 FRET 使得荧光猝灭，当 PV 存在时由于 Apt 识别 PV 而特异性结合导致适体传感器被拆分，金纳米粒子间的距离增大使得溶液颜色改变，同时释放 FAM-CS_2，FRET 效应不再存在，荧光信号恢复，实现对目标分析物比色/荧光的双信号响应。

相比较而言，目标分析物直接刺激策略由于是目标物直接刺激响应探针而产生的双模传感信号，涉及过程简单，获得结果也更为准确。酶介导激活策略涉及酶的催化放大作用，因此此类双模传感器可获得更高的灵敏度和更低的检测限，但由于天然活性生物酶常常对测定的环境极为敏感，故需要严格控制测定条件才能获得可重复性结果。纳米酶的出现拓宽了这种传感策略的实际应用。生物分子介导策略则利用抗原-抗体或适体-受体结合的特异性构建双模传感平台，可以实现对目标物进行精准识别，具有强大的抗干扰能力。在纳米酶表面上适当地引入特异性识别抗体或适体建立双模传感平台，不仅可以对目标物进行精准识别，还可以借助纳米酶的类酶活性催化放大，实现复杂体系中痕量目标物的检测。应该注意到样品本身可能具有很深的背景颜色，难以通过常规

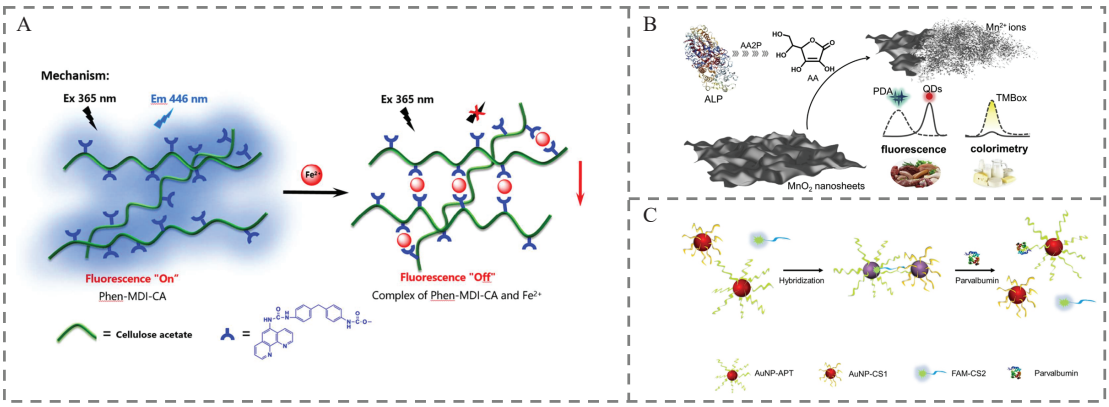


图 3 荧光/比色双模传感技术的应用

Fig.3 Applications of fluorescent/colorimetric dual-mode sensing technology

注：A：基于 Phen-MDI-CA 的比色/荧光双模传感器检测 Fe^{2+}的原理和模式[47]；B：利用 MnO_2 纳米片对 ALP 活性进行比率荧光和比色双模式测定[52]；C：基于 AuNPs 的颜色变化和 FAM-CS_2 的荧光变化的双模适体传感器用于 PV 检测的示意图[54]。

的方法扣除，使得荧光/比色双光学双模检测平台的应用受到一定的影响。

2.1.2　SERS/比色或荧光集成双模平台　SERS 与其他光学技术集成设计策略主要包括贵金属纳米颗粒的聚集与蚀刻、适体结合物的转变、荧光团修饰 SERS 标签等[55]。

金、银等贵金属纳米粒子在紫外可见光波段展现出很强的光谱吸收，表现出一定颜色的同时还可以获得局域表面等离子光谱。该吸收谱对周围介质极其敏感，会因粒子间距离的变化发生红移或蓝移；此外，局域表面等离子共振效应还增强了贵金属纳米粒子表面附近的电磁场，为基于 SERS 的检测提供了基础[56]。Feng 等[57] 基于此并结合前人的研究中存在的不足之处，设计了一种新型分子印迹聚合物表面增强拉曼光谱（molecularly imprinted polymers-SERS，MIPs-SERS）/比色双模传感器，用于测定苹果汁中的毒死蜱（chlorpyrifos，CPF）（图 4A）。通过本体聚合法合成的 CPF MIPs 可对 CPF 进行选择性识别结合，从而实现分离富集。而后使 CPF 与银纳米粒子相互作用改变纳米颗粒间的距离而使 AgNPs 发生颜色变化，产生比色信号；在此之后，收集比色反应后聚集的 AgNPs，并用激光照射进行 SERS 测量，实现双信号响应。与基于抗体或适配体的分离富集方法相比，该检测策略优点在于 MIPs 不仅制造简单、成本低而且对恶劣环境具有很好的抗干扰性；此外，整个分析处理过程所用时间小于 25 min，在某些实际检测中具有很好的应用前景。

适体或互补序列（cDNA）标记的贵金属纳米探针可以在适体-cDNA 和适体-目标检测物之间发生竞争性的偶联和释放，进而产生可检测的 SERS/荧光或 SERS/比色双信号。通常获得的 SERS/荧光或 SERS/比色信号变化方向相反。Wang 等[58] 设计了由赭曲霉毒素 A（Ochratoxin A，OTA）适体（OTA-Apt）修饰的金纳米星（Apt-AuNSs）与 Cy3 修饰的互补 DNA 功能化的金纳米球（cDNA-AuNPs）杂交组装而成的适体传感器，实现对 OTA 灵敏且快速的检测（图 4B）。在该传感器中，Cy3 的荧光信号与 SERS 信号因靠近 AuNSs 而分别被猝灭和增强。当 OTA 存在时，其与 OTA-Apt 优先结合导致 cDNA-AuNPs 与 Apt-AuNSs 解离，Cy3 与 AuNSs 距离增大，使得其荧光信号增强，SERS 信号减弱。

使用荧光团直接触发目标，并与基于适体-靶标或抗体-抗原识别的 SERS 标签共同构成双单元探针可获得 SERS/荧光双信号的同步增强或弱化[59]。例如，4-巯基苯硼酸（4-mercaptophenylboronic acid，4-MPBA）因其巯基很容易与金或银基 SERS 底物结合以及它的硼酸基团可识别结合细菌细胞壁中的肽聚糖，因此可作为 SERS 标签与细菌捕获单元[60]。Xu 等[61] 设计了纳米粒子 Au@Ag@MPBA 作为 SERS 标签，以季铵盐（quaternary ammonium salt，QAS）功能化的上转换纳米粒子作为荧光探针，开发了用于检测多种食源性致病菌的双模传感器（图 4C）。其中，SERS 标签利用受体特异性识别结合；而荧光探针可通过静电作用直接与目标细菌相结合并杀死细菌，直接触发目标分析物发生数量上的变化，从而实现了快速简便的双模光学检测。

与比色或荧光的宽波段信号相比，SERS 信号具备“指纹”功能，结合特有的电磁增强机制或化学增强机制产生热点，可实现对极低浓度目标物的精准测定。但 SERS 双模分析平台往往涉及纳米材料的蚀刻，热点的产生机制尚不明确，因此结果的重复性有时不够理想。

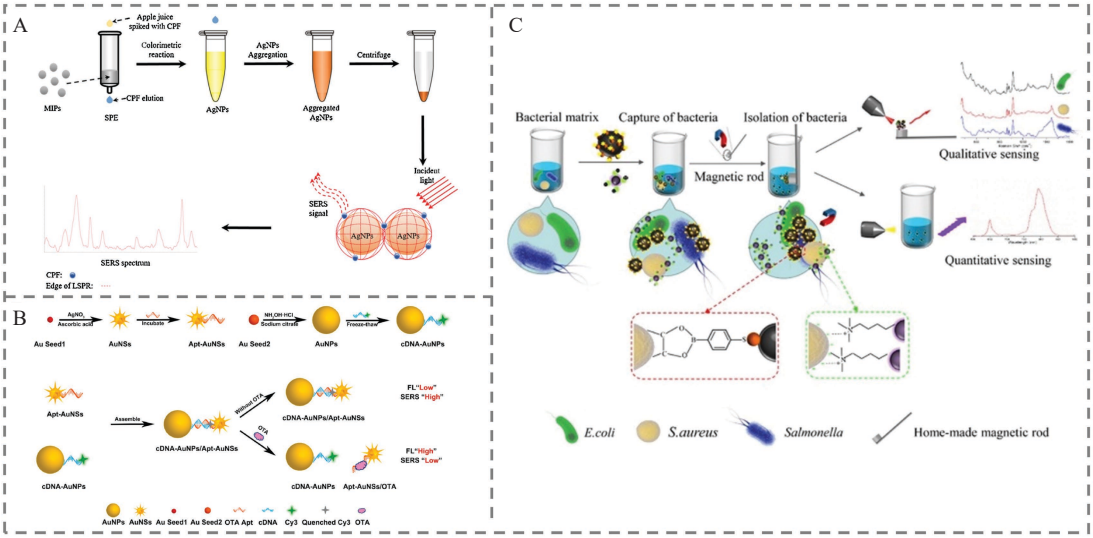


图 4　SERS/比色或荧光集成双模平台在食品检测中的应用实例

Fig.4　Application examples of integrated SERS/colorimetric or fluorescent dual-mode platforms in food detection

注：A：MIPs-SERS/比色双传感系统测定苹果汁中毒死蜱的示意图[57]；B：Apt-AuNSs、cDNA-AuNPs 的制备和 SERS/荧光双模检测 OTA 示意图[58]；C：Au@Ag SERS 标签和 UCNPs 的双模式用于多种食源性致病菌的定性和定量分析示意图[61]。

2.2 光学信号和其他输出信号的双模检测

尽管集成的双模光学检测系统提高了检测结果的准确度以及交叉验证能力，但也存在诸多不足[62−63]。例如，荧光/比色双光学检测系统容易受到复杂的样品基质和样品颜色的影响，而 SERS 信号通常又和基底材料制备技术密切相关，从而导致检测结果出现偏差。引入其他非光学输出信号，如电化学发光（electrochemiluminescence, ECL）、光电化学（photoelectrochemical, PEC）、磁弛豫开关（magnetic relaxation switch, MRS）、表面等离子共振技术（surface plasmon resonance, SPR）等，可有效解决这些问题。例如，基于 ECL 无需激发光源的特点，ECL/比色双信号模式传感平台可有效地避免了比色模式存在的背景信号高、灵敏度低的缺点[64]；类似地，PEC 传感器利用光作为激发源来产生光电流作为检测信号，这种特性使激发光源与检测信号之间能够有效分离，从而降低背景信号并提高灵敏度[65]；电化学方法（electrochemistry, EC）具有的稳定性好、检测灵敏高等优点已被广泛用于并弥补光学易受环境因素干扰的固有缺陷[66]。表 3 列出了一些涉及光学信号和其他输出信号的双信号模式传感器。结果表明，与前述双模光学传感器相比，将光学检测技术与电化学等非光学检测方法结合可有助于进一步提高传感器检测的灵敏度与准确性。相比较光学双模传感需要涉及两种不同的光学检测方法，电化学检测、化学发光以及光热等信号的检测更容易实现，使得仪器的设计更为轻便，易于现场检测、在线检测。另外，由于其他输出信号检测与光学信号检测的信号源往往不同，这样也可以有效地规避相互干扰，在一定条件下能确保两者检测结果的独立性与准确性。

3 用于食品安全分析的双模传感技术

得益于双模传感具有相互印证、受外部环境干扰少、结果的准确度高等优点，双模传感技术被越来越多地应用于食品安全分析领域，并得到快速发展。食品中的污染物如病原体、生物毒素、农药残留、兽药残留以及重金属离子等的双模传感检测技术均有报道。

3.1 病原体检测

金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）是常见的食源性病原体之一，易使人患上一系列疾病。Gao 等[77] 利用 MnO_2 纳米片设计了比率荧光和比色双模式生物传感器用于检测 *S. aureus*（图 5A）。当 MnO_2 纳米片存在时，具有蓝色荧光的碳点会因内滤效应发生猝灭。同时，该材料可以将无色无荧光的邻苯二胺氧化为具有荧光发射的黄色 2,3-二氨基吩嗪，这种氧化导致颜色变化和双发射荧光的产生。当 *S. aureus* 存在时，磁珠分离后上清液中 MnO_2 纳米片含量降低，蓝色发射碳点荧光恢复，氧化产生的 2,3-二氨基吩嗪数量减少，其黄色及其荧光强度减弱，表现为 440 nm 吸收峰增强与 555 nm 处的吸收峰降低。通过测定体系的比率荧光（$F_{440\ nm}/F_{555\ nm}$）和比色信号，金黄色葡萄球菌的检测限可低至 22 CFU·mL^{-1}（比色）、9 CFU·mL^{-1}（比率荧光）。另外，由于脂质体纳米胶囊具备两性分子的双亲结构、可随意调节的纳米级的尺寸、易于靶向修饰的表面，从而可有效精准负载大量的信号分子，常常用于放大检测信号，提高检测灵敏度。Deng 等[78] 开发了 Cys@liposome 纳米分析平台，该平台可特异性识别目标物，磁性分离后 Cys@liposome 被破坏释放出 L-半胱氨酸分子与显色剂反应产生比色和荧光信号（图 5B）。由于脂质体纳米胶囊放大效应使得检测限分别低至 1 CFU·mL^{-1}（荧光）和 10 CFU·mL^{-1}（比色），可用于牛奶样品中的 *S. aureus* 的检测。

大肠杆菌 O157:H7 另一种常见的食源性致病

表 3 涉及光学信号和其他输出信号的双信号模式传感

Table 3 Dual-mode sensing involving optical signals and other output signals

光学信号	其他信号	目标物	检测原理	检测限	文献
荧光	ECL	百草枯	百草枯恢复四二茂铁猝灭的两种信号	8.00×10^{-3} ng·mL^{-1}（ECL） 5.90×10^{-2} ng·mL^{-1}（荧光）	[67]
	EC	OTA	OTA促进DNA-AgNCs探针的合成从而加强双信号强度	0.0250 pg·mL^{-1}（EC） 0.110 pg·mL^{-1}（荧光）	[68]
	MRS	蓖麻毒素B毒素	目标物竞争性结合适体导致探针产生的双信号变化	0.800 pg·mL^{-1}（MRS） 3.00 pg·mL^{-1}（荧光）	[69]
	MRS	黄曲霉素	目标物结合磁珠，磁分离后影响探针浓度并产生双信号变化	0.142 μg·kg^{-1}（MRS） 0.0490 μg·kg^{-1}（荧光）	[70]
比色	光热	Fe^{3+}	Fe^{3+} 会介导原位生成普鲁士蓝，产生双信号响应	70 nmol·L^{-1}（光热） 210 nmol·L^{-1}（比色）	[71]
	PEC	微囊藻毒素	分析物可增加光电流，也可还原Ag^{+}产生颜色变化	3.00×10^{-5} ng·mL^{-1}（PEC） 4.00×10^{-5} ng·mL^{-1}（比色）	[72]
	EC	亚硝酸盐	NO_2^-诱导$_{OX}$TMB的重氮化反应并降低了TMB的电化学氧化信号	21.0 nmol·L^{-1}（EC） 0.190 μmol·L^{-1}（比色）	[73]
	MRS	氟苯尼考	氟苯尼考导致探针聚集，从而产生两种信号变化	5.65 nmol·L^{-1}（MRS） 10.0 μmol·L^{-1}（比色）	[74]
SERS	PEC	卡那霉素	目标物竞争性结合适体导致双信号关闭	0.530 pmol·L^{-1}（PEC） 4.80 pmol·L^{-1}（SERS）	[75]
	ECL	创伤弧菌	目标物被捕获后激活双信号	1.00 CFU·mL^{-1}（ECL） 100 CFU·mL^{-1}（SERS）	[76]

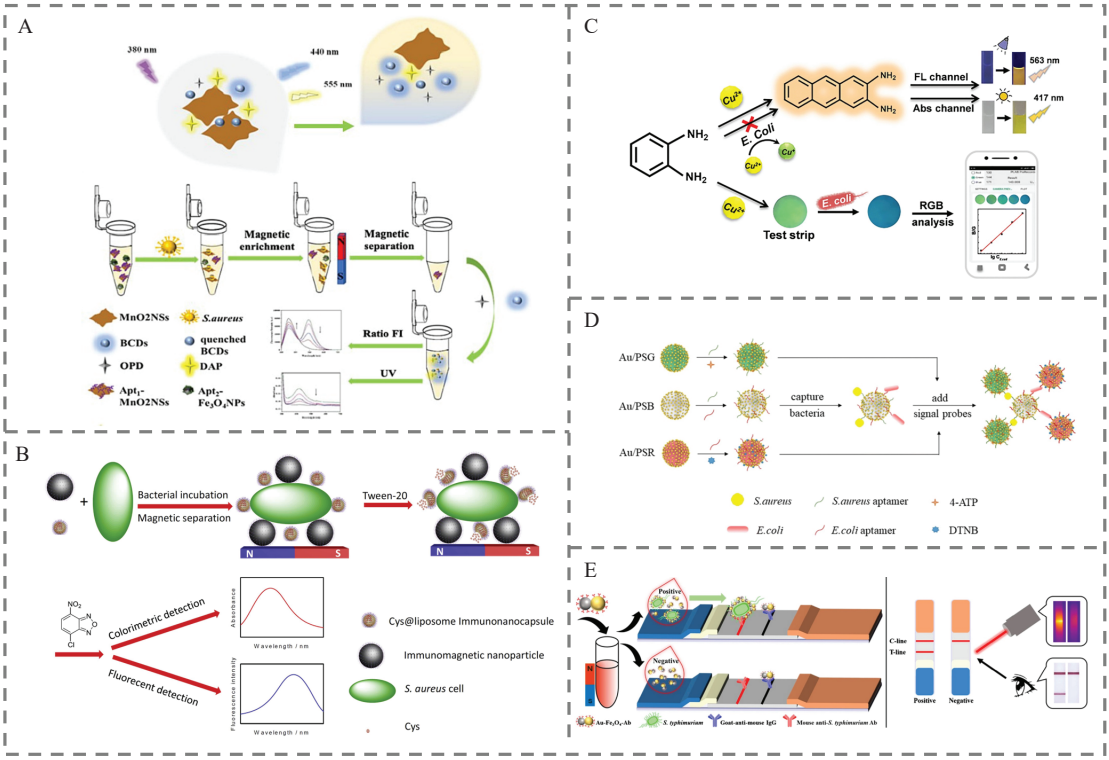


图 5　双模传感技术对食品中致病菌检测的应用实例

Fig.5　Application examples of dual-mode sensing technology for the detection of pathogenic bacteria in food

注：A：利用二氧化锰纳米片和碳点对金黄色葡萄球菌进行双模式测定示意图[77]；B：基于比色与荧光响应对金黄色葡萄球菌进行免疫分析示意图[78]；C：利用智能手机进行荧光和比色双模检测大肠杆菌的示意图[79]；D：Au/PS 等离子体耦合微腔适配体传感器的测定过程[80]；E：比色和光热双模式 LFIA 检测鼠伤寒沙门氏菌的示意图[81]。

菌。Wang 等[79] 利用邻苯二胺作为探针建立了一种荧光和比色双模传感平台用于 O157:H7 的检测（图 5C）。当有 Cu^{2+}存在时会氧化探针生成黄色且具有橙色荧光的 2,3-二氨基吩嗪。但大肠杆菌可以将 Cu^{2+}还原为 Cu^{+}，使得该氧化反应受到抑制，产生的双信号降低，对大肠杆菌的检测限分别为 44 CFU·mL^{-1}（比色）和 100 CFU·mL^{-1}（荧光）。在检测平台中引入选择性更高的核酸适体，由于适体分子与目标分子的特异性结合，可有效降低复杂基质的干扰。Lei 等[80] 利用 AuNPs 修饰聚苯乙烯（polystyrene，PS），开发了 SERS/荧光双模式适体传感器。首先聚苯乙烯微球捕获两种细菌，而后两种细菌再分别被带有两种荧光的聚苯乙烯微球识别结合形成“三明治”夹心结构。其中，红色荧光聚苯乙烯微球和 5,5'-二硫双（2-硝基苯甲酸）分别在 1325 cm^{-1} 处提供红色荧光信号和拉曼信号，用于标记大肠杆菌。随着细菌数量的增加，双信号强度增强，实现对目标物的超灵敏检测（图 5D）。由于特异性适体的引入，方法的选择性也大大提高，结果的可靠性也随之增强。

此外，食品还常会被沙门氏菌（*Salmonella*）所污染。Wen 等[81] 制备了 Au-Fe_3O_4 多功能纳米粒子并将其与测流免疫层析技术（lateral flow immunoassay，LFIA）集成，用于对鼠伤寒沙门氏菌的比色和光热双模式检测（图 5E）。Au-Fe_3O_4NPs 兼具 AuNPs 的局部表面等离子体共振与 Fe_3O_4 的超顺磁性，故可提供比色信号并能富集目标物，同时因纳米颗粒粒径很小，共振吸收占据主导从而产生热能而兼具光热效应[82]。将探针与鼠伤寒沙门氏菌混合，并将富集后的复合物加载到 LFIA 试纸上，阳性样本可同时被 T 线上的鼠伤寒沙门氏菌抗体以及 C 线捕获而显色，而阴性样本只能与 C 线作用，然后利用便携式红外热像仪测量 T 线光热信号可实现对目标物的定量，检测限为 5×10^5 CFU·mL^{-1}（视觉）和 5×10^4 CFU·mL^{-1}（光热）。由于传感器件中的 Au-Fe_3O_4 同时具有靶纯化、靶富集和双模检测等诸多功能，与传统的金基 LFIA 相比有更高灵敏度，并可适用于复杂基质。该检测体系中的光热信号在特定波长激发下才能产生显著的温度变化，这有利于提高该检测策略的特异性；此外，该信号的产生依赖光热转换产生的热效应，而非直接的光学信号，因此可有效减少样品中固有的光学背景的干扰；同时，该模式利用激光照射产生响应信号，无需接触样品，降低了污染风险，适用于对活体的精准分析。

3.2　毒素检测

生物在生长代谢过程中会产生对人体有害的毒素。Li 等[83] 以金汞齐（Au@HgNPs）为探针，设计了对 OTA 进行选择性 SERS/比色双模式检测策略（图 6A）。合成的 S-CDs/AuNPs 催化甲基汞发生还原反应生成汞单质并进一步形成金汞齐。利用甲基

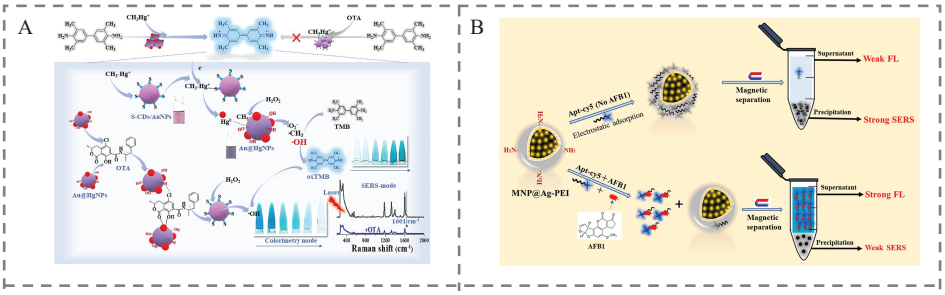


图 6 双模传感技术对食品中生物毒素检测的应用实例

Fig.6 Application examples of dual-mode sensing technology in the detection of biotoxins in food

注: A: 对 OTA 进行 SERS/比色双模式检测原理示意图[83]; B: SERS/荧光双信号适配传感器测定黄曲霉毒素 B_1 原理示意图[84]。

紫、叔丁醇等自由基捕获剂以及电子顺磁共振检测后发现, 金汞齐和甲基自由基可催化 H_2O_2 产生羟基自由基和超氧阴离子自由基, 进而氧化 TMB 显蓝色产生比色信号; 在对不同组成的样品的 ζ-电位的测量结果中可知电荷转移复合物导致金汞齐产生了使 SERS 信号增强的“热点”。当 OTA 存在时, Au@HgNPs 可以通过提供氢键和配位键位点与 OTA 分子结合, TMB 氧化反应受到抑制, 从而同时关闭显色和 SERS 信号。结果表明 OTA 的检测下限分别为 0.29 μg·L^{-1}(比色), 0.16 μg·L^{-1}(SERS)。He 等[84] 以荧光染料 cy5 作为探针, 设计了一种基于聚乙烯亚胺改良后的银涂层磁性纳米粒子而开发的双信号适配体传感器并用于对坚果中黄曲霉毒素 B_1 的检测(图 6B)。因合成的微球表面带有许多亲水的伯胺基团, 因此显著提高了微球的分散性使得带负电荷的 apt-cy5 很容易通过静电吸附被吸附在该材料上。这种吸附作用导致 cy5 分子和银壳间的距离很短, 从而产生了“热点”效应并通过电磁场增强显著放大了 cy5 的 SERS 信号。磁分离后, 上清液中几乎不含 apt-cy5 分子, 导致上清液中的荧光信号极其微弱。当黄曲霉毒素 B_1 存在时, 由于 AFB_1 和 apt-cy5 之间的特异性结合会导致很少的 apt-cy5 分子被吸收到检测探针表面。磁分离后, 沉淀的 SERS 信号显著减弱, 但上清液的荧光信号大大增强。从而产生双信号响应。该双模检测策略弥补了单信号检测各自的缺陷, 体现了很好的协同效应。另外, 由于引入了特异性强的适体, 使得检测结果的可靠性显著提高。

3.3 农药残留检测

有机磷农药(organophosphorus pesticides, OPs)残留不仅对人身健康产生危害, 还会影响生态系统。Cai 等[85] 利用 AuNPs 聚集诱导发光以及 MnO_2 猝灭荧光的性质, 构建了基于 MnO_2-AuNPs-SiO_2 复合材料的荧光/比色双模生物传感器(图 7A)。ALP 诱导 L-抗坏血酸-2-磷酸钠去磷酸化产生 AA, 并还原 MnO_2 纳米片为 Mn^{2+}使溶液褐色褪去, 同时 AuNPs-SiO_2 荧光恢复。当 OPs 存在时, ALP 活性受到抑制, 被分解的 MnO_2 纳米片减少, 使得 AuNPs-SiO_2 的荧光强度减弱, 进而体系自身颜色加深, 实现对 OPs 的荧光/比色双模检测。为了提高检测的选择性, Shen 等[86] 构建的 PtPdNPs@g-C_3N_4 纳米酶检测平台同样采用改变酶催化活性来实现对 OPs 的分析(图 7B)。纳米酶具有氧化酶活性, 可将邻苯二胺氧化生成黄色且具有荧光的 2,3-二氨基吩嗪。而乙酰硫代胆碱被水解生成的硫代胆碱会清除溶液中的氧自由基, 抑制对邻苯二胺的氧化。当 OPs 存在时, 乙酰胆碱酯酶失活, 进而实现对有机磷农药的比色/比率荧光双信号响应。两种检测方案都是利用目标物影响酶的活性而间接引起信号响应, 提高了检测的特异性, 使得检测结果更加准确可靠。

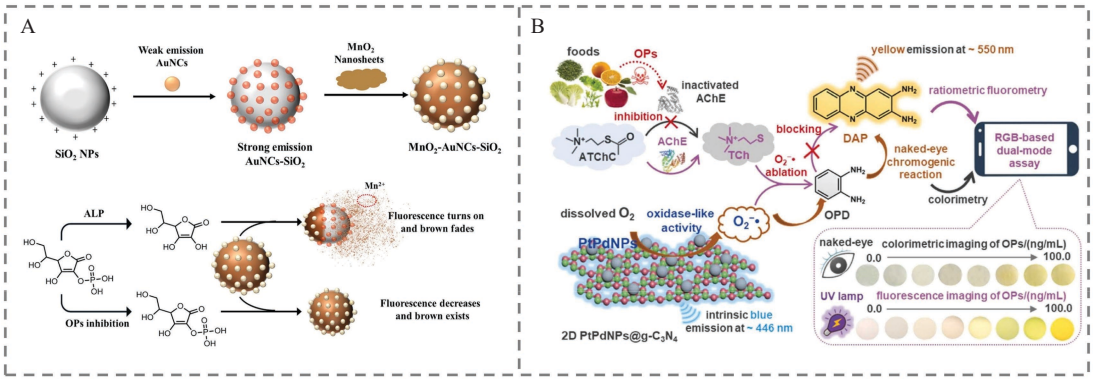


图 7 双模传感技术对食品农残检测的应用实例

Fig.7 Application examples of dual-mode sensing technology in the detection of pesticide residues in food

注: A: 荧光/比色双模式检测 OPs 原理示意图[85]; B: 智能手机辅助的 PtPdNPs@g-C_3N_4 纳米酶便携式传感器用于对残留 OPs 进行现场视觉比色和荧光双模式检测示意图[86]。

3.4　重金属离子检测

汞(Hg)、铅(Pb)、铜(Cu)等重金属通过工业废水排放会被植物摄取，对食品安全造成危害。Ye 等[87]利用 ROX 氨基荧光团和 G-四链体分别修饰 DNAzyme 酶链和底物链组装成双单元探针，设计了比色/荧光双模传感器用于对 Pb^{2+}的测定(图 8A)。该传感器中由于碱基互补配对导致 G-四链体-血红素复合物的过氧化物酶活性被抑制，同时因为 ROX 氨基和 G-四链体的接近而产生光诱导电子转移效应，使得探针荧光被猝灭。当 Pb^{2+}存在时，G-四链体-血红素复合物从 DNAzyme 酶链上解离，酶活性得以提高并恢复了荧光，同时氧化 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸产生比色信号，对 Pb^{2+}的检测限可达 1.29 nmol·L^{-1}(比色)和 0.16 nmol·L^{-1}(荧光)。

借助于适体特异识别能力，也可增加检测的选择性。例如，Li 等[88] 利用 Au@Ag/石墨烯上转换作为信号探针，设计了一种基于特定适配体和 cDNA 互补配对的双模生物传感器并用于检测食品中的 Hg^{2+}(图 8B)。石墨烯上转换纳米材料的荧光与 SERS 被贵金属增强。探针通过适配体和 cDNA 的互补配对并结合在磁珠(magnetic beads, MBs)表面。在没有 Hg^{2+}的情况下，产生的复合物很容易被外部磁场吸引到一边，上清液因无信号探针而没有观察到 SERS 和荧光信号。相反，在引入 Hg^{2+}后，适配体与 Hg^{2+}发生特异性结合，导致一些信号探针被释放到上清液中。在外部磁场的吸引下，MBs-适配体 Hg^{2+}沉积在一起。随着 Hg^{2+}浓度的增加，上清液显示出强烈的 SERS 和荧光信号，建立了 Hg^{2+}浓度与上清液信号强度的正相关关系。该双模生物传感器检测限分别为 0.33 ng·mL^{-1}(SERS)和 1 ng·mL^{-1}(荧光)。该策略具有很好的通用性，即改变特定的适配体便可应用到其他靶标的检测[89]。

Hou 等[90] 利用合成的 Zr-TPPS 金属有机骨架构建了新型比率荧光/比色双模传感器，实现了通过肉眼观察对 Cu^{2+}进行半定量分析与使用双模信号对 Cu^{2+}的精确检测(图 8C)。随着 Cu^{2+}浓度的增加，由于 Cu^{2+}与该材料之间的相互作用和静态猝灭，使得检测探针在 667 nm 处的红色荧光强度逐渐降低；同时，探针可作为电子供体并将电子转移到受体荧光素异硫氰酸酯，使得其在 515 nm 处的绿色荧光强度逐渐增强。而卟啉与铜离子配位会使得环电子云的密度发生变化，从而导致吸收光谱的变化并且在紫外灯下显示出明显的颜色变化。实现对目标物的比率荧光与比色双信号响应。此外，该检测探针还可通过在阳光下从绿色到无色的颜色变化来实现对 Cu^{2+}进行比色检测，具有克服环境干扰或仪器误差的优点。

3.5　兽药残留检测

兽药，如抗生素，用于预防或治疗动物疾病。然而，药物残留可以通过肉品摄入进入人体，引起机体过敏反应或中毒，对人类健康构成威胁。Qi 等[91] 利用 Ag@NH_2-MIL-101(Al)纳米探针，为抗生素的准确评估提供了即时检测(point of care testing, POCT)思路(图 9A)。基于因四环素(tetracycline, TCs)的吸收光谱与探针的荧光发射光谱存在很大重叠而引起的内滤效应，使得在目标物存在时探针自身的荧光信号被猝灭；同时，金属有机框架(metal-organic framework, MOF)材料上组装的 Ag 纳米粒子的电子在光电场下会在纳米颗粒周围产生局部电磁场，引起表面等离子体共振并提供增强的拉曼信号[92]。因此，当探针通过氢键作用对目标物进行识别结合后产生强度变化相反的两种信号响应，已成功应用于蜂蜜样品中四环素含量的检测。该方法的优势在于，MOF 材料为荧光探针，解决了传统的荧光纳米探针所不可避免遇到的荧光团寿命短和检测过程中接收

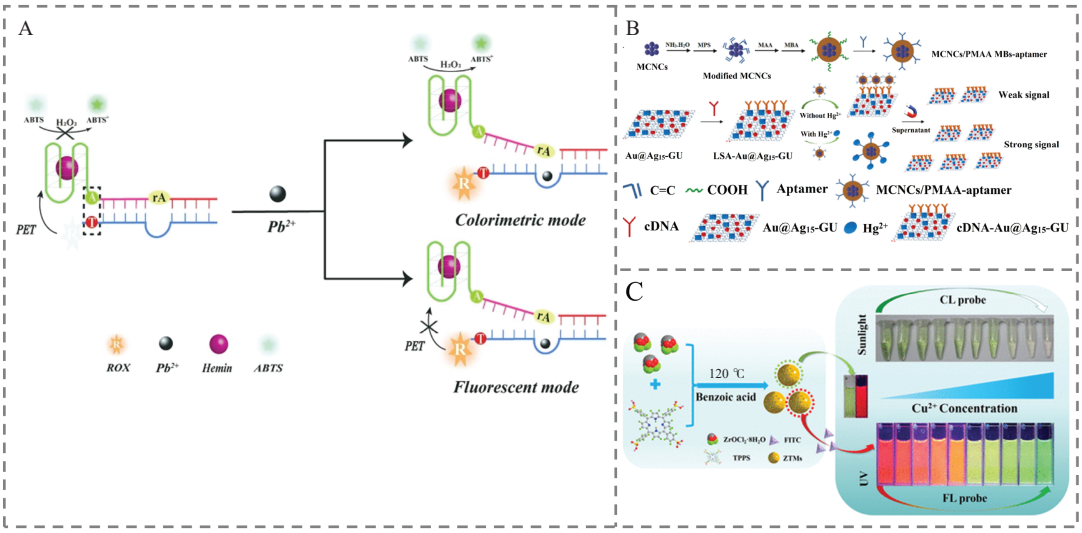


图 8　双模传感技术对食品中重金属检测的应用实例

Fig.8　Application examples of dual-mode sensing technology in the detection of heavy metals in food

注：A：双模探针测定 Pb^{2+}的原理示意图[87]；B：基于 Au@Ag/石墨烯上转换纳米杂化物的生物传感器用于检测 Hg^{2+}示意图[88]；C：Cu^{2+}比率荧光和比色双模式检测示意图[90]。

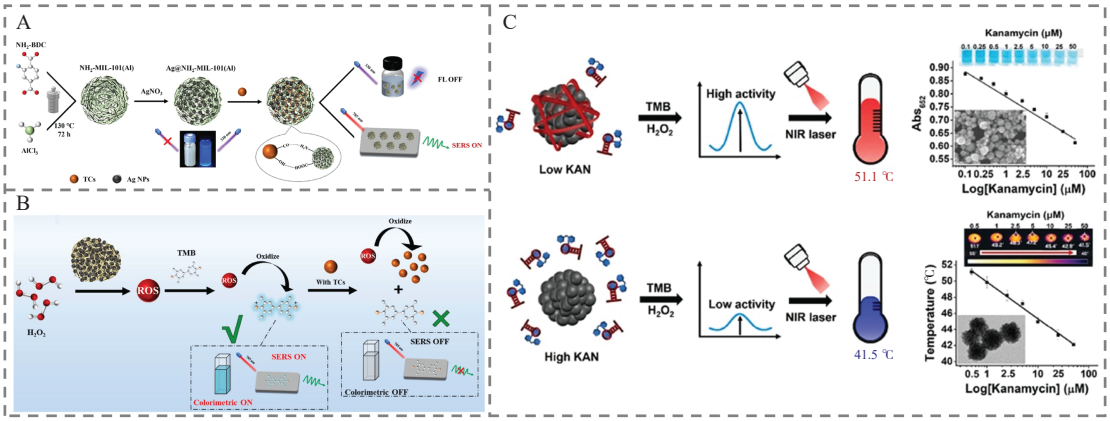


图 9 双模传感技术对食品中兽药残留检测的应用实例

Fig.9 Application examples of dual-mode sensing technology in the detection of veterinary drug residues in food

注: A: 使用双模纳米探针检测四环素示意图[91]; B: 比色/SERS 双模检测四环素的传感和竞争机制示意图[93]; C: 卡那霉素检测原理示意图[94]。

到的荧光背景信号干扰的问题; 此外, 借助氢键相互作用对目标物进行识别, 与依赖抗体或适体等方法相比, 在具有良好的特异性的同时, 无需复杂生物分子固定与修饰处理。在该检测体系中, 所采用的方法是对四环素进行直接检测。此外, 因 MOF 材料具有多种性质, 该团队还基于 MOF 的金属原子通常具有一定的催化活性的性质以及四环素可以调节纳米材料中过氧化物酶或氧化酶的催化活性, 利用该探针设计了一种对四环素进行间接检测的比色/SERS 双模检测的策略[93](图 9B)。当目标物存在时, MOF 材料的催化活性减弱, 相同条件下反应体系所产生的$_{OX}$TMB 量减少, 其颜色及 SERS 信号减弱, 实现双信号响应。经比较, 两种检测方法的灵敏度相当。

卡那霉素(kanamycin, KAN)具有广谱抗菌特性, 过度使用会导致环境和食物中残留的卡那霉素过多, 从而对人体健康造成潜在的威胁。Lee 等[94] 利用$_{OX}$TMB 作为单元检测探针, 设计了一种对卡那霉素进行比色/光热双模检测策略(图 9C)。该团队利用带正电的壳聚糖(chitosan, CS)为稳定剂将具有优异过氧化物酶样活性的铂纳米粒子聚集的同时实现了带负电荷的卡那霉素适配体(KAN binding aptamer)与铂纳米粒子静电结合, 合成了一种 CS@PtNPs@KBA 复合材料。KBA 除了作为识别单元外, 还可增强铂纳米粒子的酶样活性。$_{OX}$TMB 自身具有蓝色, 同时也是一种常见的光热剂, 可将照射的近红外光的能量转化为热量。当目标物存在时, KBA 与 KAN 特异性结合并从复合材料中脱落, 使得铂纳米粒子的酶样活性降低, 在相同的反应条件下, 所产生的两种信号强度下降, 实现双信号输出。在对实际牛奶样品的检测中体现了该方法良好的特异性与准确度。该方法以具有可逆变性和复性以及长期储存稳定性的优点的适配体作为识别单元, 同时选择的输出信号的类型简便易分析, 使得该策略与常见的免疫测定不同, 它具有操作简单、成本低且检测时不需要洗涤步骤, 在减少测定时间和保持高灵敏度方面非常有益。

4 问题与挑战

双模传感器在检测食品污染和保障食品安全等方面发挥了重要作用, 但仍然存在一些问题和挑战。双模检测的优点在于能够使用两种不同的信号来指示目标物的浓度, 但通常需要两个不同的设备来收集。因此, 开发一些集成信号阅读器, 特别是便携式设备并与双模检测技术融合, 可以进一步促进在即时检验领域中的应用; 目前关于双模传感的报道中, 荧光/比色、SERS/比色和 SERS/荧光三类双信号模式传感最为常见, 但双光学检测体系可能容易受到检测物中固有的色素和荧光的干扰。因此, 开发基于不同信号类型的双模传感器将有助于进一步提高传感器的可靠性和灵敏度; 大多数双模传感器检测探针的设计依赖纳米材料, 纳米材料能够提高传感器的性能, 但它们合成步骤繁琐且性能容易受到温度、pH 等环境因素的影响, 且部分纳米材料如金、银纳米颗粒因容易聚集而使得稳定性和均一性有待提高。因此有必要开发合成简单、催化性好、稳定性强的新型纳米材料, 以进一步提高这些传感器的性能。目前, 部分纳米酶探针因其可同时引发两种信号而在多个领域中获得了青睐, 如可以通过催化发色底物原位产生的有色氧化物作为 SERS 标签, 或使用带有 SERS 标记的纳米酶作为探针, 从而实现对目标检测物的 SERS 与比色双信号响应[95]。但其选择性低的缺点是目前应用的最大障碍, 采取措施(如改变纳米酶结构)以增强其特异性是目前需努力的方向之一[96]; 实际的检测环境条件和样品中的复杂成分与实验室研究有很大不同, 这是目前为实现成功应用而面临的主要问题之一; 难以实现同时检测多个目标。大多数双模传感器仅会对一种有害物作出响应, 但食品中含有的污染物一般不止有一种, 比如玉米中会存在黄曲霉素、玉米赤霉烯酮等多种毒素。因此, 开发具有多个检测点的双模传感器以实现对食品中含有的多种有害物质的一步检测, 是可考虑的方向之一; 随着分析科学的发展, 一些具有特殊性质的新兴信号转换已经

被提出，如光声信号、NIR-II 荧光、余辉发光、暗场光散射等。这些信号转导不仅具有明显的信号强度外，而且生物兼容性好，因此可将双模传感的应用由体外扩展到体内，来满足日益增长的检测需求。此外，将双模传感技术与微流体、横向免疫层析等技术相结合，并利用机器学习等方法，会有助于提高检测的灵敏度与可靠性。

5　结论

综上所述，本文从多方面系统性展示了结合光学检测方法的双模检测体系的构建逻辑及其在食品污染物检测中的应用实例，体现了该技术在消除复杂基质干扰和现场进行快速且准确的检测等方面的显著优势；此外，总结了目前该技术所遇到的问题并针对各困境提出了可能的解决方法。未来，得益于特异性识别技术的进一步发展以及优异光电性能新材料的快速涌现，双模传感技术的可靠性及灵敏度将会得到进一步的提高；同时可通过将双模传感与单分子检测技术联用，结合人工智能等帮助对信号进行解析等方法实现对更低浓度的污染物的准确检测，为食品质量安全提供技术保障。

© 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] JI Y X, HUANG Y, CHENG Z H, et al. Lateral flow strip biosensors for foodborne pathogenic bacteria via direct and indirect sensing strategies: A review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(27): 10250−10268.

[2] UMAPATHI R, SONWAL S, LEE M J, et al. Colorimetric based on-site sensing strategies for the rapid detection of pesticides in agricultural foods: New horizons, perspectives, and challenges[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2021, 446: 214061.

[3] UMAPATHI R, GHOREISHIAN S M, SONWAL S, et al. Portable electrochemical sensing methodologies for on-site detection of pesticide residues in fruits and vegetables[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2022, 453: 214305.

[4] UMAPATHI R, PARK B, SONWAL S, et al. Advances in optical-sensing strategies for the on-site detection of pesticides in agricultural foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 69−89.

[5] HONG S L, ZHANG Y N, LIU Y H, et al. Cellular-Beacon-Mediated Counting for the ultrasensitive detection of Ebola Virus on an integrated micromagnetic Platform[J]. Analytical Chemistry, 2018, 90(12): 7310−7317.

[6] WANG Z K, ZHAO Z Y, LIU C Y, et al. A long-wavelength ultrasensitive colorimetric fluorescent probe for carbon monoxide detection in living cells[J]. Photochemical Photobiological Sciences, 2019, 18: 1851−1857.

[7] HE D Y, DU Z, WANG Y F, et al. Quantitative detection of campylobacter jejuni with a core-satellite assemblies-based dual-modular aptasensor[J]. Food Control, 2022, 135: 108828.

[8] HU J J, JIANG W L, CHEN Q, et al. Solid-state nanochannel with multiple signal outputs for furin detection based on the biocompatible condensation reaction[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(42): 14036−14041.

[9] CHEN P P, QIAO X Y, LIU J H, et al. Dual-signaling amplification electrochemical aptasensor based on hollow polymeric nanospheres for acetamiprid detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(16): 14560−14566.

[10] KOYAPPAYIL A, KIM H T, LEE M H. An efficient and rapid synthesis route to highly fluorescent copper microspheres for the selective and sensitive excitation wavelength-dependent dual-mode sensing of NADH[J]. Sensors Actuators B: Chemical, 2021, 327: 128887.

[11] YUAN M J, LI Y L, LI J B, et al. A colorimetric and fluorometric dual-modal assay for mercury ion by a molecule[J]. Organic Letters, 2007, 9(12): 2313−2316.

[12] LIU L, SHI Y, YANG Y F, et al. Fluorescein as an artificial enzyme to mimic peroxidase[J]. Chemical Communications, 2016, 52(96): 13912−13915.

[13] ZHOU Y F, HUANG X L, XIONG S C, et al. Dual-mode fluorescent and colorimetric immunoassay for the ultrasensitive detection of alpha-fetoprotein in serum samples[J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1038: 112−119.

[14] MIAO L Y, ZHU C Z, JIAO L, et al. Smart drug delivery system-inspired enzyme-linked immunosorbent assay based on fluorescence resonance energy transfer and allochroic effect induced dual-modal colorimetric and fluorescent detection[J]. Analytical Chemistry, 2018, 90(3): 1976−1982.

[15] YI D Y, WEI Z X, ZHENG W, et al. Glucose detection based on the photothermal effect of oxTMB using a thermometer[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 323: 128691.

[16] CHEN X, WANG Y R, ZHAO X X, et al. A gadolinium(III)-porphyrin based coordination polymer for colorimetric and fluorometric dual mode determination of ferric ions[J]. Microchimica Acta, 2019, 186(2): 63.

[17] LI Z Q, LI P, XU Q Q, et al. Europium (III)–β-diketonate complex-containing nanohybrid luminescent pH detector[J]. Chemical Communications, 2015, 51(53): 10644−10647.

[18] XU Q Q, LI Z Q, LI H R. Water-soluble luminescent hybrid composites consisting of oligosilsesquioxanes and lanthanide complexes and their sensing ability for Cu^{2+}[J]. Chemistry–A European Journal, 2016, 22(9): 3037−3043.

[19] ZHOU Y, MA Z F. Fluorescent and colorimetric dual detection of mercury (II) by H_2O_2 oxidation of o-phenylenediamine using Pt nanoparticles as the catalyst[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 249: 53−58.

[20] SHEN C L, SU L X, ZANG J H, et al. Carbon nanodots as dual-mode nanosensors for selective detection of hydrogen peroxide[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 447.

[21] ZHOU X M, GUO X M, PEI X Q, et al. Hollow graphitic carbon nitride with tunable shell thickness for electrochemiluminescence and photoelectrochemistry dual-mode detection of cardiac troponin I[J]. Microchemical Journal, 2024, 200: 110405.

[22] LI H Y, WEN X K, DING Y D, et al. Photoluminescent and multi-phonon resonance Raman scattering dual-mode immunoassays based on CdS nanoparticles for HIgG detection[J]. Microchimica Acta, 2022, 189(12): 477.

[23] HUANG G L, LUO X L, JIANG G Y, et al. Insight into nanomaterials mediated dual-modal assay for food safety: Design principles and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 139: 104132.

[24] YAN Q, CHEN Z H, XUE S F, et al. Lanthanide-doped nanoparticles encountering porphyrin hydrate: Boosting a dual-mode optical nanokit for Cu^{2+} sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 268: 108−114.
[25] LUO X L, YAN Y F, ZHANG F Y, et al. Interface engineered self-induced and cascading nanozyme for colorimetric and photothermal dual-mode pesticide sensing[J]. Materials Today Chemistry, 2024, 40: 102202.
[26] XIE X Q, PAN M F, HONG L P, et al. An "Off–On" Rhodamine 6G hydrazide-based output platform for fluorescence and visual dual-mode detection of lead(Ⅱ)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(25): 7209−7217.
[27] WEI T B, YONG B R, DANG L R, et al. A simple water-soluble phenazine dye for colorimetric/fluorogenic dual-mode detection and removal of Cu^{2+} in natural water and plant samples[J]. Dyes and Pigments, 2019, 171: 107707.
[28] LI J J, WEI W, QI X L, et al. Highly selective colorimetric/fluorometric dual-channel sensor for cyanide based on ICT off in aqueous solution[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 228: 330−334.
[29] LIU S G, YANG S J, LIU S Y, et al. A fluorescent and scattering dual-mode probe based on a carbon dot@cerium-guanosine monophosphate coordination polymer network for tetracycline detection[J]. Anal Methods, 2022, 14(43): 4300−4308.
[30] OUYANG H, LU Q, WANG W W, et al. Dual-readout immunochromatographic assay by utilizing MnO_2 nanoflowers as the unique colorimetric/chemiluminescent probe[J]. Analytical Chemistry, 2018, 90(8): 5147−5152.
[31] YAO D C, WANG Y G, LI H R. Silver clusters based sensor for low content formaldehyde detection in colorimetric and fluorometric dual mode[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 305: 127451.
[32] AHMED S R, NEETHIRAJAN S. Chiral MoS_2 quantum dots: Dual-mode detection approaches for avian influenza viruses [J]. Global Challenges, 2018, 2(4): 1700071.
[33] SHU R, LIU S J, WANG M L, et al. Dual-plasmonic CuS@Au heterojunctions synergistic enhanced photothermal and colorimetric dual signal for sensitive multiplexed LFIA[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 255: 116235.
[34] QIAN J, REN C C, WANG C Q, et al. Gold nanoparticles mediated designing of versatile aptasensor for colorimetric/electrochemical dual-channel detection of aflatoxin B_1[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 166: 112443.
[35] MA L Y, ZHANG X P, XIAO Y, et al. Fluorescence and colorimetric dual-mode immunoassay based on G-quadruplex/*N*-methylmesoporphyrin IX and *p*-nitrophenol for detection of zearalenone[J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134190.
[36] HE K Y, SUN L P, WANG L, et al. Engineering DNA G-quadruplex assembly for label-free detection of Ochratoxin A in colorimetric and fluorescent dual modes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 126962.
[37] WANG C Q, ZHAO X, GU C D, et al. Fabrication of a versatile aptasensing chip for aflatoxin B_1 in Photothermal and Electrochemical Dual Modes[J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(12): 3390−3399.
[38] HONG F, REN L Q, CHEN Y P. Kill three birds with one stone: Zr-MOF-mediated composite multi-functional materials to enhance the efficiency for fluorescent and colorimetric dual-signal readout bioassay[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139149.
[39] ZHANG S Y, WANG Z, FENG Y Y, et al. A novel fluorescent and photothermal probe based on nanozyme-mediated cascade reaction for detecting organophosphorus pesticide residues[J]. Talanta, 2024, 279: 126620.
[40] CHAI H N, YU K, ZHAO Y M, et al. MOF-On-MOF dual enzyme-mimic nanozyme with enhanced cascade catalysis for colorimetric/chemiluminescent dual-mode aptasensing[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(28): 10785−10794.
[41] QILENG A, LIANG H Z, HUANG S L, et al. Dual-function of ZnS/Ag_2S nanocages in ratiometric immunosensors for the discriminant analysis of ochratoxins: photoelectrochemistry and electrochemistry[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 314: 128066.
[42] FENG Y Y, JIANG W Q, LI H, et al. Detection of dithiocarbamate pesticide residues in tea by colorimetric and fluorescent double-mode probe regulated by tyrosinase[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 426: 137026.
[43] DUAN W N, WANG X Z, WANG H X, et al. Fluorescent and colorimetric dual-mode aptasensor for thrombin detection based on target-induced conjunction of split aptamer fragments[J]. Talanta, 2018, 180: 76−80.
[44] ZHOU Y F, HUANG X L, HU X Y, et al. Recent advances in colorimetry/fluorimetry-based dual-modal sensing technologies[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 190: 113386.
[45] LU W J, GAO Y F, JIAO Y, et al. Carbon nano-dots as a fluorescent and colorimetric dual-readout probe for the detection of arginine and Cu^{2+} and its logic gate operation[J]. Nanoscale, 2017, 9(32): 11545−11552.
[46] GAO X X, ZHOU X, MA Y F, et al. A fluorometric and colorimetric dual-mode sensor based on nitrogen and iron co-doped graphene quantum dots for detection of ferric ions in biological fluids and cellular imaging[J]. New Journal of Chemistry, 2018, 42(18): 14751−14756.
[47] NAWAZ H, TIAN W G, ZHANG J M, et al. Cellulose-based sensor containing phenanthroline for the highly selective and rapid detection of Fe^{2+} ions with naked eye and fluorescent dual modes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(2): 2114−2121.
[48] XIONG Y, GAO B, WU K S, et al. Fluorescence immunoassay based on the enzyme cleaving ss-DNA to regulate the synthesis of histone-ds-poly (AT) templated copper nanoparticles[J]. Nanoscale, 2018, 10(42): 19890−19897.
[49] ZHAI W Y, WANG C X, YU P, et al. Single-layer MnO_2 nanosheets suppressed fluorescence of 7-hydroxycoumarin: mechanistic study and application for sensitive sensing of ascorbic acid in vivo[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(24): 12206−12213.
[50] LIN Z Z, LI M J, LV S Z, et al. *In situ* synthesis of fluorescent polydopamine nanoparticles coupled with enzyme-controlled dissolution of MnO_2 nanoflakes for a sensitive immunoassay of cancer biomarkers[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2017, 5(43): 8506−8513.
[51] TIAN F Y, ZHOU J, MA J, et al. MnO_2 nanosheets as oxidase mimics for colorimetric detection of alkaline phosphatase activity[J]. Microchimica Acta, 2019, 186(7): 408.
[52] YANG Q, WANG X Y, PENG H K, et al. Ratiometric fluorescence and colorimetry dual-mode assay based on manganese dioxide nanosheets for visual detection of alkaline phosphatase activity[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 302: 127176.

[53] HU J, JIANG Y Z, WU L L, et al. Dual-signal readout nanospheres for rapid point-of-care detection of ebola virus glycoprotein[J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(24): 13105−13111.
[54] WANG Y B, LI H, ZHOU J R, et al. A colorimetric and fluorescent gold nanoparticle-based dual-mode aptasensor for parvalbumin detection[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105413.
[55] SUN R M, LI Y H, DU T, et al. Recent advances in integrated dual-mode optical sensors for food safety detection[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 14−31.
[56] WEI H R, HOSSEIN ABTAHI S M, VIKESLAND P J. Plasmonic colorimetric and SERS sensors for environmental analysis[J]. Environmental Science: Nano, 2015, 2(2): 120−135.
[57] FENG S L, HU Y X, MA L Y, et al. Development of molecularly imprinted polymers-surface-enhanced Raman spectroscopy/colorimetric dual sensor for determination of chlorpyrifos in apple juice[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 241: 750−757.
[58] WANG H, ZHAO B B, YE Y F, et al. A fluorescence and surface-enhanced Raman scattering dual-mode aptasensor for rapid and sensitive detection of ochratoxin A[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 207: 114164.
[59] JANG H, HWANG E Y, KIM Y, et al. Surface-enhanced raman scattering and fluorescence-based dual nanoprobes for multiplexed detection of bacterial pathogens[J]. Journal of Biomedical Nanotechnology, 2016, 12(10): 1938−1951.
[60] YUAN K S, MEI Q S, GUO X J, et al. Antimicrobial peptide based magnetic recognition elements and Au@Ag-GO SERS tags with stable internal standards: a three in one biosensor for isolation, discrimination and killing of multiple bacteria in whole blood[J]. Chemical Science, 2018, 9(47): 8781−8795.
[61] XU Y, HASSAN M M, ZHU A, et al. Dual-mode of magnetic assisted Au@Ag SERS tags and cationic conjugated UCNPs for qualitative and quantitative analysis of multiple foodborne pathogens[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 344: 130305.
[62] SALEH R O, ALMAJIDI Y Q, MANSOURI S, et al. Dual-mode colorimetric and fluorescence biosensors for the detection of foodborne bacteria[J]. Clinica Chimica Acta, 2023, 553: 117741.
[63] LIU L Y, WANG Y, XUE Z H, et al. Research progress of dual-mode sensing technology strategy based on SERS and its application in the detection of harmful substances in foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 148: 104487.
[64] XU H, LI C R, MAO R J, et al. Colorimetric and ECL dual-mode aptasensor for smartphone-based onsite sensitive detection of aflatoxin B_1 in combination with ZnO@MWCNTs/g-C_3N_4 nanosheets and CuO@CuPt nanocomposites[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 262: 116569.
[65] CHEN Y X, GU W L, ZHU C Z, et al. Recent Advances in photoelectrochemical sensing for food safety[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(22): 8855−8867.
[66] PAN Y X, JIANG J, KAN X W. Diazo-reaction based dual-mode colorimetric-electrochemical sensing of nitrite in pickled food[J]. Analyst, 2023, 148(19): 4869−4876.
[67] CHENG M Q, ZHANG J, HUANG T, et al. A dual-mode sensor platform with adjustable electrochemiluminescence-fluorescence for selective detection of paraquat pesticide[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137030.
[68] SUO Z G, LIU J H, FENG B B, et al. Construction of an electrochemical-fluorescent dual-mode sensor with a dual-mode signal AgNC probe synthesized from cytosine-rich DNA for OTA detection[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2023, 11(36): 8679−8688.
[69] WANG T, LIU S, REN S Y, et al. Magnetic relaxation switch and fluorescence dual-mode biosensor for rapid and sensitive detection of ricin B toxin in edible oil and tap water[J]. Analytica Chimica Acta, 2022, 1232: 340471.
[70] LIN X Q, FANG Y W, WEI J, et al. Gd_2O_3: Eu^{3+} nanoparticle-based magnetic relaxation switch/fluorescence dual-mode immunoassays for aflatoxin B_1 in grain[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 396: 134564.
[71] XUE X, GAO M, RAO H H, et al. Photothermal and colorimetric dual mode detection of nanomolar ferric ions in environmental sample based on in situ generation of prussian blue nanoparticles[J]. Analytica Chimica Acta, 2020, 1105: 197−207.
[72] WEI J, CHANG W D, QILENG A, et al. Dual-modal split-type immunosensor for sensitive detection of Microcystin-LR: enzyme-induced photoelectrochemistry and colorimetry[J]. Analytical chemistry, 2018, 90(15): 9606−9613.
[73] LEI P, WU N, ZHOU Y, et al. Simple strategy for dual-responsive ratio electrochemical-colorimetric detection of nitrite in food and environment[J]. Microchimica Acta, 2024, 191(11): 701.
[74] WANG Q, HUANG L, PEI K L, et al. A magnetic relaxation switching and colorimetric dual-mode aptasensor for the rapid detection of florfenicol and florfenicol amine in eggs[J]. Analytica Chimica Acta, 2022, 1208: 339849.
[75] LIU F L, XU X L, ZHU L H, et al. Signal-off based dual-mode sensing platform for ultrasensitive detection of antibiotics in food samples[J]. Talanta, 2025, 284: 127248.
[76] WEI W T, LIN H, HAO T T, et al. Dual-mode ECL/SERS immunoassay for ultrasensitive determination of *Vibrio vulnificus* based on multifunctional MXene[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 332: 129525.
[77] GAO X, ZHANG H M, LIU L, et al. Nano-biosensor based on manganese dioxide nanosheets and carbon dots for dual-mode determination of *Staphylococcus aureus*[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137144.
[78] DENG W F, CHENG C, YANG H, et al. Ultrasensitive immunoassay of *Staphylococcus aureus* based on colorimetric and fluorescent responses of 4-chloro-7-nitrobenzo-2-oxa-1, 3-diazole to $_L$-cysteine[J]. Talanta, 2019, 202: 244−250.
[79] WANG C N, GAO X, WANG S, et al. A smartphone-integrated paper sensing system for fluorescent and colorimetric dual-channel detection of foodborne pathogenic bacteria[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, 412: 611−620.
[80] LEI M L, XU C X, SHAN Y Q, et al. Plasmon-coupled microcavity aptasensors for visual and ultra-sensitive simultaneous detection of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, 412: 8117−8126.
[81] WEN C Y, ZHAO L J, WANG Y, et al. Colorimetric and photothermal dual-mode lateral flow immunoassay based on Au-Fe_3O_4 multifunctional nanoparticles for detection of *Salmonella typhimurium*[J]. Microchimica Acta, 2023, 190(2): 57.
[82] FENG W, ZHOU X J, NIE W, et al. Au/polypyrrole@Fe_3O_4 nanocomposites for MR/CT dual-modal imaging guided-photothermal therapy: An *in vitro* study[J]. 2015, 7(7): 4354−4367.
[83] LI Q L, HAN Q Q, YANG D Z, et al. Methylmercury-sensitized “turn on” SERS-active peroxidase-like activity of carbon dots/AuNPs nanozyme for selective detection of ochratoxin A in coffee[J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137440.
[84] HE H Y, SUN D W, PU H B, et al. A SERS-Fluorescence

dual-signal aptasensor for sensitive and robust determination of AFB_1 in nut samples based on Apt-Cy5 and MNP@Ag-PEI[J]. Talanta, 2023, 253: 123962.

[85] CAI Y, QIU Z Y, LIN X B, et al. Self-assembled nanomaterials based on aggregation-induced emission of AuNCs: Fluorescence and colorimetric dual-mode biosensing of organophosphorus pesticides[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 321: 128481.

[86] SHEN Y Z, GAO X, CHEN H H, et al. Ultrathin C_3N_4 nanosheets-based oxidase-like 2D fluorescence nanozyme for dual-mode detection of organophosphorus pesticides[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 451: 131171.

[87] YE T, CHEN H H, BAI L, et al. A colorimetric and fluorescent dual-mode sensor based on bifunctional G-quadruplex-hemin complex for the determination of Pb^{2+}[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 309: 123807.

[88] LI H H, HUANG X Q, HASSAN M M, et al. Dual-channel biosensor for Hg^{2+} sensing in food using Au@Ag/graphene-upconversion nanohybrids as metal-enhanced fluorescence and SERS indicators[J]. Microchemical Journal, 2020, 154: 104563.

[89] FAN Q, LI J H, ZHU Y H, et al. Functional carbon quantum dots for highly sensitive graphene transistors for Cu^{2+} ion detection [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(4): 4797−4803.

[90] HOU J J, JIA P, YANG K R, et al. Fluorescence and colorimetric dual-mode ratiometric sensor based on Zr-tetraphenylporphyrin tetrasulfonic acid hydrate metal-organic frameworks for visual detection of copper ions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(11): 13848−13857.

[91] QI J J, LI J K, WAN Y Q, et al. A fluorescence and SERS dual-mode sensing on tetracycline antibiotics based on Ag@NH_2-MIL-101(Al) nanoprobe[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137586.

[92] WANG X T, GUO L. SERS activity of semiconductors: crystalline and amorphous nanomaterials[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(11): 4231−4239.

[93] QI J J, WAN Y Q, LI J K, et al. A competitive dual-mode for tetracycline antibiotics sensing based on colorimetry and surface-enhanced Raman scattering[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2025, 272.

[94] LEE H B, SON S E, HA C H, et al. Dual-mode colorimetric and photothermal aptasensor for detection of kanamycin using flocculent platinum nanoparticles[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 249.

[95] SONG C Y, LI J X, SUN Y Z, et al. Colorimetric/SERS dual-mode detection of mercury ion via SERS-Active peroxidase-like Au@AgPt NPs[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 310: 127849.

[96] FAN H Z, ZHANG R F, FAN K, et al. Exploring the specificity of nanozymes[J]. ACS Nano, 2024, 18(4): 2533−2540.