DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260306002
引用格式: 陈亮亮, 徐琳琳, 汪进程, 等. 碳基纳米材料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, 2026, 17(16): 219–226.
Chen Liangliang, Xu Linlin, Wang Jincheng, et al. Research progress on the application of carbon-based nanomaterials in food safety detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 219–226. (in Chinese with English abstract).

碳基纳米材料在食品安全检测中的应用研究进展

陈亮亮[1], 徐琳琳[1*], 汪进程[1], 赵梦琴[1], 孟祥慧[2], 牧 凡[1], 付雪涵凌[1], 蒋洪星[1], 王冒隆[1]

(1. 滁州学院生物与食品工程学院, 滁州 239000; 2. 北京勤邦科技股份有限公司, 北京 102200)

摘 要: 食源性危害物仍是当前公共食品安全面临的重要问题, 包括微生物、重金属、抗生素、农药、兽药以及其他污染物等, 如因处理方式不当、检测不及时, 极易引发食源性疾病, 威胁消费者健康, 因此准确、快速的食源性危害物检测方法尤为重要。当前, 随着纳米材料的不断涌现, 用于食源性危害物检测的高灵敏传感体系不断建立。特别是基于碳点、碳纳米管、碳纳米纤维、氮化碳以及石墨烯等碳基纳米材料, 具有良好的生物相容性、低毒性、光学稳定性、高选择性和易修饰性等, 使其在食源性危害物检测、食品质量控制、环境监测和生物与医药等领域均表现出优异的应用潜力。本文综述了碳基纳米材料在食源性危害物检测中的应用, 强调碳基纳米材料检测食源性危害物的检测原理, 比较检测过程中基于碳基纳米材料建立的检测方法与常规检测方法优缺点, 旨在为碳基纳米材料在食品安全快速检测技术研发及实际应用中提供科学依据。

关键词: 食源性危害物; 碳基纳米材料; 快速检测; 食品安全
中图分类号: TS207.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0219–08

Research progress on the application of carbon-based nanomaterials in food safety detection

CHEN Liang-Liang[1], XU Lin-Lin[1*], WANG Jin-Cheng[1], ZHAO Meng-Qin[1], MENG Xiang-Hui[2], MU Fan[1], FU Xue-Han-Ling[1], JIANG Hong-Xing[1], WANG Mao-Long[1]

(1. *School of Biological and Food Engineering*, *Chuzhou University*, *Chuzhou* 239000, *China*; 2. *Beijing Kwinbon Technology Co*., *Ltd*., *Beijing* 102200, *China*)

ABSTRACT: Foodborne hazards remain a critical issue confronting public food safety, including microorganisms, heavy metals, antibiotics, pesticides and veterinary drugs, as well as other pollutants. Improper handling or delayed detection of these hazards can easily trigger foodborne diseases and threaten consumers' health. Therefore, accurate and rapid detection methods for foodborne hazards are particularly important. Currently, with the continuous emergence of nanomaterials, highly sensitive sensing systems for foodborne hazard detection have been increasingly established. In particular, based on carbon-based nanomaterials such as carbon dots, carbon nanotubes, carbon nanofibers, carbon

收稿日期: 2026-03-06
基金项目: 安徽省高等学校科学研究项目(2023AH051598); 滁州学院科研启动基金项目(2022qd54); 国家级大学生创新训练计划项目(202410377048); 滁州学院开放实验室项目(2024-59); 滁州学院大学生创新创业训练计划项目(2025CXXL21608, 2025CXXL21610)
第一作者: 陈亮亮(2005—), 男, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 1735710900@qq.com
***通信作者:** 徐琳琳(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: jlxulinlin@126.com

nitride, and graphene, which possesses excellent biocompatibility, low toxicity, optical stability, high selectivity and facile modifiability, they have demonstrated outstanding application potential in areas such as foodborne hazard detection, food quality control, environmental monitoring and biomedicine. This article reviewed the application of carbon-based nanomaterials in detecting foodborne hazards, elaborated on the underlying detection principles of carbon-based nanomaterials for identifying foodborne harmful substances, and compared the advantages and disadvantages of detection methods based on carbon-based nanomaterials with conventional techniques. This review aims at provide a scientific basis for the research and development and practical application of carbon-based nanomaterials in rapid food safety detection technology.

KEY WORDS: foodborne hazards; carbon-based nanomaterials; rapid detection; food safety

0 引 言

食品安全问题始终是社会各界高度关注的焦点，直接关系到人民群众的健康与生活质量[1–3]。食品常见污染物如微生物、重金属离子、抗生素、农药、兽药残留、真菌毒素以及新污染物如微塑料等[4–9]，可通过食品生产、加工、贮存和运输等环节侵染食品，成为食品安全潜在隐患[10–12]。因此食品安全检测技术在维护食品安全中尤为重要。特别是以仪器检测方法为典型代表的高效液相色谱法、气相色谱法以及酶联免疫吸附法等检测方法，虽准确性较高，但设备昂贵、操作复杂、检测条件苛刻，对专业技术人员依赖性强等缺陷，使其难以满足当前高效、低成本、低能耗的食品检测技术需求；尤其在应对突发性食品安全事件时，部分检测方法的滞后性和低灵敏性往往会导致食源性危害范围扩大，因此发展高灵敏、便捷、低碳的食源性污染物检测技术，已成为食品安全领域的重要发展方向[13–15]。

近年来，碳基纳米材料因其良好的生物相容性、敏感的光电特性、易功能化修饰等特点而被广泛用于生物、医药、催化、清洁储能等领域中。主要包括尺寸小于 10 nm 的零维碳基纳米材料碳点(carbon dots, CDs)，sp^2 和 sp^3 杂化为主体，基于表面态或分子态发光[16–17]；一维的碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)、碳纳米纤维(carbon nanofibers, CNFs)，sp^2 杂化为主体，直径通常在 0.5~2 nm 之间，具有良好的轴向力学性能、本征电导率和热导率[18–19]；二维的石墨烯及其衍生物以及其他碳纳米材料等，具有良好的机械强度[20–21]，在高性能复合材料、柔性电子及传感领域展现出巨大潜力(表 1)。

随着研究的不断深入，碳基纳米材料合成方法也逐渐从传统的化学气相沉积法、电弧放电法、高温裂解法逐步过渡到操作条件更加温和，更易调控结构形貌的水热法、微波辅助合成法以及模板法等[30–32]。此外，合成原料也逐渐趋向绿色环保，以传统化石基材料逐渐向可再生生物质合成原料如果皮、秸秆、餐余垃圾等转变[33–35]。合成途径及原料不断革新，为拓宽碳基纳米材料应用领域提供可能。而新型碳基纳米材料不断涌现，也为高效、简便、低成本的食品安全快速检测技术创新与研发创造新机遇[36]。

本文系统综述了碳基纳米材料在食品安全检测中的研究进展，梳理了不同维度碳基纳米材料的构效机制。重点探讨了碳基纳米材料在食品分析样品前处理、对食源性危害物如重金属、农药残留、食源性致病菌、真菌毒素等检测机制与优势，并对碳基纳米材料的界面抗污染、比率型自校准、机器学习辅助设计等予以应用展望，以期应对复杂食品基质中的多靶标检测的挑战。本文旨在为碳基纳米材料在食品安全快速检测领域的材料设计、方法开发与实际应用提供参考依据。

表 1 碳基纳米材料的制备工艺及应用

Table 1 Preparation process and application of carbon-based nanomaterials

维度	名称	制备工艺	应用领域	参考文献
零维	碳量子点(carbon quantum dots, CQDs)、纳米金刚石等	水热法、微波辅助法、热解法等	生物成像、靶向药物递送、传感器等	[22–23]
一维	CNTs、CNFs 等	化学气相沉积法、电弧放电法、热等离子体法等	能源存储、纳米电子器件、污染物吸附与过滤等	[24–25]
二维	石墨烯、碳纳米片等	机械剥离法、化学气相沉积法、氧化还原法等	高性能电子器件、透明导电薄膜、超高强度复合材料等	[26–27]
三维	石墨烯气凝胶、石墨烯泡沫等	化学氧化法、热还原、模板法等	电导材料、污染物吸附、柔性电子器件等	[28–29]

1　碳基纳米材料的检测传感机制

碳基纳米材料核心结构的 π-π 跃迁和表面结构的 n-π 跃迁是其发光现象出现的重要原因。在传感过程中，碳基纳米材料表面特殊官能团与目标物质发生相互作用，或影响其与相邻能量受体间距离，改变激发态电子非辐射跃迁路径，从而导致光学信号改变，实现对目标物检测[37]。在实际应用过程中，CDs 表面易修饰特性使其易与目标分子通过 π-π 堆积、静电吸引或氢键作用发生特异性吸附，从而在电极界面形成稳定的识别层，增强检测特异性[38]。

2　碳基纳米材料在食品安全检测中的应用

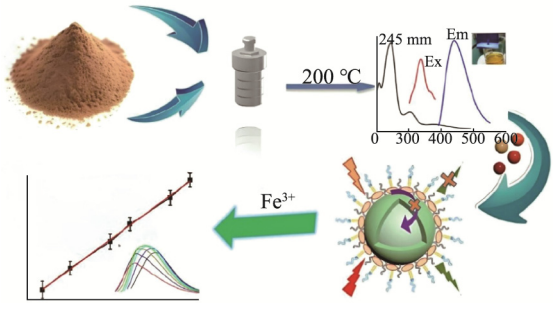
2.1　样品前处理

在食品安全检测中，高效的食品样品前处理是减除复杂基质干扰目标污染物测定的重要环节，但传统前处理方法如固相萃取、液相萃取等过程烦琐、需消耗大量试剂、耗时长，且食品基质中的蛋白质、糖、脂类等易对目标物产生基质效应等技术短板[39]。而碳基纳米材料体积小、比表面积大、官能团丰富、多孔结构以及低溶剂消耗等特性已成为解决传统前处理短板的有效途径之一[40]。以 CNTs 为例，具有较高的比表面积和吸附性，且能通过表面官能团修饰或复合其他材料增强对目标物的选择性和稳定性。Zanchin 等[41]利用壳聚糖(chitosan, CS)海绵结构将 CNT 均匀负载于多孔内壁制备碳基纳米复合材料 CNT-CS，有效降低 CNT 团聚并增强表面活性位点与有机酸等极性组分相互作用，制备具有多孔结构和黏结性的复合型吸附材料 CNT-CS，作为超高效液相色谱-质谱法检测茄子中农药残留前处理吸附剂，可有效去除复杂基质中色素和脂质干扰物，从而实现对 111 种农药残留的高效多残留分析，方法检出限为 5~25 μg/kg，该前处理方法为农产品中农药残留检测提供了新的环保方案。此外，Li 等[42]以磁性氧化石墨烯为吸附剂，建立了茶饮料中吡咯里西啶生物碱的分散磁性固相萃取(dispersive magnetic solid-phase extraction, d-MSPE)前处理方法，吸附效率高达 83%~99%，方法检出限低至 0.01~0.6 μg/L，吸附和洗脱过程仅需 20 min 和 6 min。Arain 等[43]以铝镁合金(MnAl)层状双氢氧化物杂化磁性多壁 CNTs 为吸附剂，从香料样品中选择性萃取铅离子，方法检出限低至 0.314 μg/L，应用于姜黄等实际样品中加标回收率为 97.8%~102.7%。此外，CDs 在微萃取技术中的应用获得了良好效果，Khalilipour 等[44]基于金属有机框架与氮掺杂 CDs 复合材料的 d-SPE 法，同时结合分散液-液微萃取技术，成功用于生牛乳中黄曲霉毒素的提取富集，方法检出限可达 0.69~1.09 ng/L。因此，碳基纳米材料作为新型前处理吸附剂，在提高前处理效率和分析灵敏度的同时，有效降低了有机溶剂消耗，符合绿色分析化学发展趋势，为后续碳基纳米材料传感检测平台的精准测定提供了可靠保障。

2.2　重金属离子检测

碳基纳米材料作为一种新兴的荧光纳米探针，在重金属离子检测中展现出独特优势，其核心在于表面化学结构形成的可控识别机制[45]。Maity 等[46]以印楝(*Azadirachtaindica.* Juss.)种子为碳源，通过热解法与表面季铵化修饰合成的碳点(amino ionic carbon dots, Ai-CDs)对不同重金属离子表现出差异化的荧光响应模式，Ai-CDs 在 Al^{3+}、Cd^{2+}、Mn^{2+}、Ni^{2+}、Co^{2+}、Cu^{2+}、Cu^{+}和 As^{3+}等多种离子中，对 Cd^{2+}和 As^{3+}具有显著的荧光猝灭作用，而对于 Cu^{2+}和 Cu^{+}离子，其荧光出现选择性增强。这种增强/猝灭双模式响应基于不同金属离子与 Ai-CDs 表面含氧和含氮官能团之间特异性的配位作用形成电荷转移复合物，通过动态猝灭机制改变 Ai-CDs 表面态发光中心的辐射跃迁效率，其中 Cu^{2+}/Cu^{+}因独特的电子结构引入了新的辐射跃迁路径导致荧光增强，触发了光致电子转移从而达到灵敏检测目的。该方法有效利用废弃生物质实现了绿色、低成本制备生物质 CDs，并通过对单一探针信号的多元解读，为发展适用于复杂基质中多目标重金属离子的快速筛查提供了新的解决思路。

此外，Wu 等[47]以黑木耳为前驱体，采用一步水热法合成氮掺杂 CDs，该碳基纳米材料在多种共存金属离子中对 Fe^{3+}表现出专一性的荧光猝灭效应。其猝灭常数随温度升高而降低的结果符合静态猝灭特征，紫外-可见吸收光谱的变化进一步证实 Fe^{3+}与碳基纳米材料表面的羧基、羟基等基团形成了非荧光基态复合物。这种基于特异性配位的静态猝灭机制，保证了其在复杂环境样品中仍能保持高度的抗干扰能力。在实际水样加标检测中，该探针在 3~40 μmol/L 范围内呈现良好的线性响应，检出限为 0.28 μmol/L，加标回收率为 95.8%~104.6%，该研究为构筑具有高选择性、高灵敏度及实际应用潜力的荧光传感平台提供了参考(图 1)。碳基纳米材料对重金属离子检测的应用为低成本、高灵敏检测提供新路径。



注：Ex 为激发波长(excitation wavelength)；Em 为发射波长(emission wavelength)。

图 1　CQDs 荧光探针检测 Fe^{3+}的原理[47]

Fig.1 Mechanism of Fe^{3+} detection by CQDs fluorescence probe[47]

2.3 农药与兽药残留检测

碳基纳米材料经表面化学修饰精准调控其传感性能, 可实现农药、兽药残留检测的实际应用。Esfandiyari-Bayat 等[48]以生菜、卷心菜等农业废弃物为碳源, 通过尿素辅助水热法合成氮掺杂 CDs, 在合成过程中, 氮元素主要以吡啶氮的形式掺入 CDs 骨架, 所构建的活性位点有效提升掺杂 CDs 的量子产率, 量子产率从未掺杂的 6%大幅提升至 32.5%。当目标检测物除草剂氟草胺存在时, 其紫外吸收光谱与荧光发射光谱发生明显重叠, 通过内滤效应有效猝灭 CDs 荧光, 物理层面的光学传感机制避免复杂分子识别元件的修饰, 能够实现对氟草胺 23.3~2012.9 μg/kg 的宽线性范围, 检出限为 18.8 μg/kg, 用于番茄、黄瓜等实际样品检测时, 样品前处理采用简便的溶剂提取法以去除基质影响, 将 10 g 匀浆样品与 10 mL 乙酸乙酯混合并温和振荡, 在 –5 ℃下以 5000 r/min 离心 15 min, 取上层有机相经 0.45 μm 滤膜过滤后直接进行荧光分析, 该氮掺杂 CDs 回收率与精密度与气相色谱-质谱法无统计学差异。此外, Chen 等[49]以四环素类抗生素为检测目标, 当目标物与表面富含羧基、氨基的氮硫共掺杂 CDs 接触时, 二者可通过酰胺化反应形成共价键, 同时 CDs 的芳香结构与抗生素的共轭体系发生 π-π 堆积, 表面负电荷区域与药物分子中带正电的氨基产生静电吸引, 实现多重作用协同改变 CDs 表面电子状态, 进而产生明显的荧光猝灭现象。由此构建的传感器对牛奶中四环素的检出限远低于国际安全标准(≤100 μg/kg), 且在不同基质中回收率稳定、重现性良好。碳基纳米材料对食品中农药残留的检测应用, 实现了对食品中痕量目标物快速、准确且低成本的检测。

2.4 食源性致病菌检测

病原微生物如大肠杆菌 O157:H7、副溶血性弧菌和沙门氏菌等是导致食源性疾病暴发的重要诱因[50–51]。碳基材料表面化学性质可以通过精确调控以适配不同类型的识别元件, 从而将特异性的生物识别信号转变为放大的光学信号。Fatemi 等[52]基于氧化石墨烯的荧光适配体传感器的荧光共振能量转移(fluorescence resonance energy transfer, FRET)猝灭能力, 通过羧基化修饰使氧化石墨烯表面富含能够与适配体通过 π-π 堆积作用结合的活性位点, 当标记了荧光基团的适配体吸附于材料表面时荧光处于猝灭状态, 当检测目标菌大肠杆菌出现, 适配体因其更高的亲和力与细菌结合并脱离石墨烯表面, 荧光随即恢复, 该方法对大肠杆菌的线性检测范围为 10^5~10^7 CFU/mL, 检出限 10^3 CFU/mL, 检测过程可在 30 min 内完成。此外, 因食品样本成分复杂, 背景干扰强, 可利用 CDs 某一特定波长荧光对目标的选择性响应, 另一波长荧光作为内置参照, 构建双发射体系, 显著提升在实际样品检测的准确性。Feng 等[53]以木聚糖为碳源, 建立了一种基于适配体的比率型荧光平台, 用于副溶血性弧菌的灵敏检测。罗丹明 B (rhodamine B, RhB)经水解反应嵌入二氧化硅纳米颗粒中形成具有橙色荧光的 RhB@SiO_2 内参, 并在其表面均匀包裹有蓝色荧光特性的 CDs 为响应元件, CDs 上修饰的适配体(Dabcyl)可特异性识别目标物。当副溶血性弧菌存在时, 适配体结合目标并发生构象变化, 导致 Dabcyl 远离 CDs, 蓝色荧光得以恢复。此时, RhB 的橙色荧光保持稳定, 二者强度的比值即可用于定量, 该方法有效克服了环境波动或探针浓度不均带来的误差, 检出限为 1.15 CFU/mL。

此外, 基于氧化石墨烯的 FRET 猝灭型传感器和基于 CDs 的比率型荧光平台在食源性致病菌检测方面的应用已经日益完善。以氧化石墨烯、CDs 及功能化碳纳米材料为代表, 通过外部调控表面官能团、结合适配体和特异性抗体识别元件, 实现了对大肠杆菌 O157: H7、副溶血性弧菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌等多种致病菌的灵敏检测。其中, FRET 猝灭型传感器操作简单、效率极高, 但往往依赖于单一的荧光信号, 样品基质干扰影响较大; 而通过内置参照信号的比率型传感器, 通过消除环境波动以减弱复杂食品基质的干扰达到更高的稳定性。然而适配体较高的筛选成本与不同生产批次间稳定性的差异, 多数检测仍停留在加标回收实验阶段, 对真实样本的验证不足, 而且缺少多种致病菌的多重检测平台, 交叉干扰风险仍存在。总体而言, 碳基荧光传感器在食源性致病菌现场快速检测领域已展现出充分潜力, 未来应重点关注开发低成本、高稳定性的识别元件, 优化多重检测策略, 以推动其从实验室研究向实际应用转化。

2.5 真菌毒素检测

黄曲霉毒素(aflatoxin, AF)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)等真菌毒素具有强致癌性, 是谷物、坚果中重点监控的对象[54]。Cai 等[55]基于功能化石墨烯氧化物(functionalized graphene oxide, FGO)的荧光适配体传感器利用 π-π 堆积作用, 将分别标记花菁 3 染料(cyanine 3, Cy3)与花菁 5 染料(cyanine 5, Cy5)的黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, AFB_1)和黄曲霉毒素 M_1 (aflatoxin M_1, AFM_1)适配体吸附于 FGO 表面, 借助荧光共振能量转移实现信号猝灭/恢复的转换。在无目标物环境中荧光几乎完全淬灭, 当体系中出现 AFB_1 或 AFM_1, 相应适配体会因构象变化从 FGO 表面解离, 荧光随之恢复, 该方法在 AFB_1 与 AFM_1 的检测中表现出极强的灵敏度, 检出限分别达到 8.7 pg/mL 和 20.1 pg/mL, 且能在其他常见霉菌毒素共存情况下保持良好特异性。这种基于 FGO 与适配体协同作用的传感策略, 不仅操作简便、响应迅速, 也为多目标同时检测提供了一条可扩展的技术路径。以农业废弃物衍生 CDs 为核心的传感技术, 有效降低了合成材料成本,

为可持续、低成本的现场快检技术发展提供了新思路。Yuncu 等[56]以生物质碳源合成了具有红蓝双发射荧光 CDs, 并结合分子印迹技术构建了比率型荧光探针(dual-emission molecularly imprinted polymers, DE-MIP$_S$)。该探针利用 AFB_1 对红色荧光的特异性猝灭作用进行定量检测, 同时以不受干扰的蓝色荧光作为内参, 有效减少了环境波动和探针浓度差异带来的误差。荧光强度比与 AFB_1 在 0.1~200 ng/mL 质量浓度范围内呈良好的线性关系, 检出限低至 0.05 ng/mL, 在实际植物油样品中的加标回收率为 89.0%~107.4%。

碳基荧光传感技术已在 AFB_1、ZEN、OTA 等主要真菌毒素的快速检测方面取得了进展, 基于功能化石墨烯结合 FRET 策略与生物质 CDs 结合分子印迹技术构建的比率型荧光探针实现了 AFB_1 等真菌毒素的快速检测。相较于传统的高效液相色谱法或质谱联用法, 荧光传感器具有操作简便、响应迅速、成本较低等优势, 尤其适用于现场筛查。然而, 基于碳基纳米材料的检测方法仍存在有待突破的技术瓶颈, 一方面, 大多传感器在复杂基质如酱油、牛奶等物质的抗干扰能力仍需进一步验证; 另一方面, 实验室规模的批次重复性和工业化生产的可扩展性尚待解决, 且多目标传感策略较为匮乏, 现有方法大多针对单一毒素, 难以满足实际应用中多种毒素共同污染的检测需求。综合来看, 以生物质废弃物为碳源的比率型分子印迹传感器兼顾了成本、稳定性和抗干扰能力, 为现场快检提供了更具实用性的一种解决思路。未来研究应进一步推动传感器的小型化与集成化, 加强对实际污染样品检测的系统性验证, 发展高通量、多靶标检测平台以更好地服务于食品安全监管的实际需求。

2.6　其他污染物检测

食品添加剂亚硝酸盐、防腐剂超标以及腐败产生的生物胺等也是威胁食品安全的重要因素[57–58]。基于金纳米颗粒与碳纳米复合材料构建的电化学传感器, 为水中亚硝酸盐的实时监测提供了新思路。Wahyuni 等[59]将羟基化多壁 CNTs 与石墨烯复合, 并修饰金纳米颗粒后修饰于玻碳电极表面形成三维导电网络, 显著增加了电极有效表面积并利用金纳米颗粒的催化作用加速了电子转移, 使亚硝酸盐在较低过电位下发生灵敏的氧化反应。在实际水样测试中, 传感器对亚硝酸盐的检出限可达 3.64 μmol/L, 且能在多种共存离子干扰下保持稳定响应, 表明此类碳基复合电极在复杂环境样品中具备良好的适用性与可靠性。此外, CDs 作为荧光参照物, 在生物胺的视觉化检测中也表现出独特优势。Liu 等[60]构建了基于炭黑(carbon black, CB)的 CB-Ni^{2+}@CDs 比例荧光试纸, 用于组胺的快速定性定量分析, CDs 作为内在标准荧光信号始终保持稳定, 而识别元件 CB 与 Ni^{2+}结合后荧光猝灭, 加入组胺后因配体交换恢复发光。这种双信号输出模式有效消除了背景干扰, 试纸在紫外灯下随组胺浓度增加呈现从黄绿到蓝色的明显色变。实际样品检测回收率在 88.3%~104.7%, 与国家标准方法结果一致。

3　结束语

碳基纳米材料为食品安全检测技术的革新与发展创造了新机遇, 有效弥补了传统方法检测成本高、检测环境苛刻等缺陷。然而目前大多数基于碳基纳米材料的检测技术仍处于实验室研发阶段, 仍需严格且标准的方法学验证和长期实践评估其稳定性、重复性和实际检测中的抗干扰能力等。因此未来的趋势并非替代, 而是一定程度的互补与融合, 从而构建高效、可靠的食品安全监测网络。

3.1　基质干扰与污染问题的应对

食品基质中蛋白质、脂质等大分子的非特异性吸附会导致传感器灵敏度下降与假阳性信号。在 CDs 或石墨烯表面共价修饰两性离子聚合物或亲水性聚乙二醇链段, 利用水化层产生的空间位阻与能量势垒抑制蛋白吸附可以抑制此类污染。此外, 将碳基传感单元封装于金属有机框架或共价有机框架孔道内, 借助孔径筛分效应选择性透过小分子目标物而阻挡大分子干扰物。在前处理环节, 开发集成有石墨化 CB 与 N-丙基乙二胺的一次性净化柱, 可以在进样前快速去除色素与有机酸, 显著降低基质背景干扰。

3.2　稳定性与重现性不足的改善

碳基荧光探针的储存稳定性差与信号波动是商业化应用的阻碍。采用冻干重构策略, 将碳基探针与海藻糖等冻干保护剂共同封装, 可以有效延长试剂盒在常温下的货架期, 在使用时仅需加入样品提取液即可恢复传感活性。同时, 通过引入内参比信号, 以两个波长荧光强度比值作为输出信号, 可自动校准因探针浓度不均、光源波动或环境 pH 变化引起的强度偏差。在材料合成端, 利用机器学习算法建立合成参数与传感性能间的构效关系模型, 有望从源头减小不同生产批次间的差异。

3.3　高通量多靶标检测能力的拓展

单一目标物检测难以满足实际应用中同步筛查的需求。利用 3~5 种具有差异化表面修饰的 CDs 组成传感阵列, 虽然各 CDs 对多种目标物存在交叉响应, 但通过结合主成分分析可提取特征指纹图谱, 可以实现多组分同步定性识别与半定量分析。此外, 微流控纸基元件通过在不同亲水区域预固定针对不同目标的特异性适配体-CDs 复合物, 利用毛细作用引导样品分流并使用智能手机读取各区域光学信号, 可以实现低成本、多靶标的并行可视化筛查。

3.4　纳米材料环境与健康风险的管控

碳基纳米材料在广泛应用的同时, 需要重视其潜在

的环境累积效应与生物安全性。贯彻绿色全生命周期理念，优先使用农业废弃物或食品加工副产物作为碳源，采用低能耗水热合成路径并减少强酸与有毒有机试剂的使用，可以有效降低环境负荷。通过将碳纳米材料与磁性纳米颗粒复合，检测完成后借助外加磁场可以实现绝大部分纳米材料的回收与重复利用，防止纳米环境污染的同时也降低了使用成本。

展望未来，碳基纳米材料亟待与人工智能和机器学习深度融合，例如在材料设计层面，人工智能基于生成式模型与高通量虚拟筛选，预测不同杂原子掺杂对碳材料表面态及电子结构的调控规律，针对目标污染物的高特异性识别点位进行逆向设计，有效缩短了试错周期。信号解析层面，通过深度学习算法提取传感器产生的多维荧光或电化学特征信号，实现多种重金属、农药、兽药残留等有食源性危害物的定性定量分析并避免复杂食品基质的干扰。系统集成层面，计算芯片与神经网络相结合，智能手机可以作为便携式检测仪器，实现人工智能实时分析样品与云端溯源预警的自动化检测，为构建便携式、智能化的食品安全风险预警网络提供核心技术支撑。此外，碳基纳米材料的合成原料及合成方法应更加贴合绿色发展理念。坚信随着多元化技术的交叉融合，碳基纳米材料能够更加有效地融入新型食品安全检测技术的开发和实际应用中，为维护食品安全提供可持续保障。

参考文献

[1] 刘蔼滢, 林琳, 廖晓珊, 等. 2021—2023 年广东省市售预制菜食品质量安全现状分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 302–309.
Liu Aiying, Lin Lin, Liao Xiaoshan, et al. Analysis on the quality and safety status of prepared dishes in Guangdong Province from 2021 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 302–309.

[2] 曾宪涛. 食品安全风险评估机制与食品检测技术探究[J]. 现代食品, 2025, 31(19): 146–149.
Zeng Xiantao. Research on food safety risk assessment mechanism and food inspection technology [J]. Modern Food, 2025, 31(19): 146–149.

[3] Xavier I B, de Tavares J, Pontes E D S, et al. Understanding food safety on sprouts and microgreens: contamination routes, outbreaks and challenges [J]. Food Research International, 2025, 214: 116589.

[4] Kabir F, Binte-Abdullah R, Alam M N E, et al. Unsafe to eat? A systematic review of heavy metal contamination in urban street foods: sources, risks, and regional disparities [J]. Measurement: Food, 2025, 20: 100256.

[5] 刘幸科. 食品中重金属污染物检测技术的创新与提升策略[J]. 现代食品, 2025, 31(23): 88–90.
Liu Xingke. Innovation and enhancement strategies for the detection technologies of heavy metal contaminants in foods [J]. Modern Food, 2025, 31(23): 88–90.

[6] Singh A K, Choudhary J K, Shukla S K, et al. Agroecosystem contamination with heavy metals due to road transportation: a global threat to safe food security [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 194: 1265–1282.

[7] Şen L, Kabak B. Mycotoxin contamination in hazelnuts: food safety challenges in a changing climate [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 144: 107699.

[8] Atnkut B, Nigussie A, Berza B, et al. Mycotoxins contaminations in Ethiopian food: impacts, challenges, and mitigation strategies [J]. Food Control, 2025, 171: 111066.

[9] Melikoglu M. Microplastics and nanoplastics in food systems: contamination, impacts, and mitigation strategies–a global review [J]. Next Research, 2025, 2(4): 100998.

[10] Rekibi S, Duflos G, Grard T, et al. Exposure to the main organic plastic additives through food contamination [J]. Environmental Pollution, 2025, 376: 126359.

[11] 蒲长城. 食品安全要与产业高质量发展密切结合[N]. 中国食品安全报, 2026-01-01 (C01).
Pu Changcheng. Food safety should be closely integrated with the high-quality development of industries [N]. China Food Safety News, 2026-01-01 (C01).

[12] 韩万鑫, 祁艳霞, 程荟元, 等. 药食同源动物源食品质量控制方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 80–90.
Han Wanxin, Qi Yanxia, Cheng Huiyuan, et al. Research progress on quality control methods for medicinal and edible homologous animal-derived foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 80–90.

[13] Liu Ling, Zhu Yizhe, Chai Zitao, et al. Multiresidue determination of alkylamines and alkylamides in meat by liquid chromatography high-resolution mass spectrometry and implications for food safety [J]. Journal of Chromatography A, 2026, 1768: 466642.

[14] Gomiero A, Øysæd K B, Palmas L, et al. Application of GC-MS-pyrolysis to estimate the levels of microplastics in a drinking water supply system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125708.

[15] 李欢, 费湘伟, 董荣建. 食品快速检测技术与人工智能在食品安全领域的协同应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 246–253.
Li Huan, Fei Xiangwei, Dong Rongjian. Collaborative application of rapid food detection technology and artificial intelligence in the field of food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 246–253.

[16] 李钜哲, 施蕴仪, 胡杰, 等. 基于碳量子点/铕基金属有机框架荧光探针定量检测牛奶中的四环素类抗生素[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 10–19.
Li Juzhe, Shi Yunyi, Hu Jie, et al. Quantitative analysis of tetracycline antibiotics in milk based on a carbon quantum dot/europium-based metal-organic framework fluorescent probe [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 10–19.

[17] Suganya K, Venkatesh N, Sakthivel P. Review on carbon quantum dots: emerging nanomaterials for energy and environmental applications [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2026, 14(1): 120994.

[18] Meftahi A, Kashef-Sabery M S, Alibakhshi S, et al. Carbon nanotubes and nanofibers as building blocks for the future: structure, synthesis, properties, and functionalization perspectives [J]. Materials Science and Engineering: B, 2025, 322: 118622.

[19] Choudhary F, Mudgal P, Parvez A, et al. A review on synthesis, properties and prospective applications of carbon nanomaterials [J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2024, 38: 101186.

[20] Rehman N, Ashutosh P, Kumar R. Thermal reduction synthesis approach of reduced graphene oxide for the preparation of a label-free and prompt immuno sensing of *Salmonella enterica via* electrochemical techniques [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2025, 48: 100789.

[21] Marimuthu M, Xu Kuncheng, Song Wei, et al. Safeguarding food safety: nanomaterials-based fluorescent sensors for pesticide tracing [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141288.

[22] Rosales S, Medina O E, Garzon N, et al. Systematic review of carbon quantum dots (CQD): definition, synthesis, applications and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 219: 115854.

[23] Hamda A S, Areti H A, Gudeta R L, et al. Carbon-based nanomaterials for water treatment: a comprehensive review of recent advances and mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2025, 23: 100834.

[24] Qin Qinghua. Research progress and applications of carbon nanotubes, black phosphorus, and graphene-based nanomaterials: insights from computational simulations [J]. Computers, Materials & Continua, 2025, 85(1): 1–39.

[25] Umapathi R, Pemminati S, Rani G M, et al. Progress and perspectives of carbon nanomaterials based electrochemical modifiers for the detection of environmental contaminants [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2026, 347: 103698.

[26] Ying Danfeng, Zhou Xufeng, Liu Zhaoping. Applications of graphene in energy storage devices: from fundamental research to engineering practice [J]. Applied Energy, 2026, 406: 127243.

[27] Patar S, Mittal R, Dutta A, et al. Algae derived N-doped mesoporous carbon nanoflakes fabricated with nickel ferrite for photocatalytic removal of Congo red and rhodamine B dyes [J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 51: 104710.

[28] 李神勇, 秦身钧, 门长全, 等. 煤基纳米功能材料的制备与应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2025, 50(7): 3552–3565.
Li Shenyong, Qin Shenjun, Men Changquan, et al. Advances in preparation and application of coal-based functional nanomaterials [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(7): 3552–3565.

[29] Shi Fei, Jiang Xizhuo, Wang Xiaodong, et al. Green fabrication of graphene-like N-doped carbon aerogel from chitosan for high-performance supercapacitor [J]. Journal of Energy Storage, 2026, 156: 121595.

[30] Singh H, Saima, Aggarwal V, et al. Carbon dots: an emerging food analysis nanoprobes for detection of contaminants [J]. Food Chemistry, 2025, 485: 143180.

[31] Xu Zijun, Wu Zhe, Poulin P, et al. A state-of-the-art review on carbon-based nanomaterials for engineering applications [J]. Cleaner Materials, 2026, 19: 100363.

[32] 汪慧, 李承谦, 罗晓羽, 等. 碳点荧光探针检测食品中的土霉素残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 225–232.
Wang Hui, Li Chengqian, Luo Xiaoyu, et al. Detection of oxytetracycline residues in food by carbon dots fluorescent probes [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 225–232.

[33] 韩天奇, 任大勇, 牛海月, 等. 食品基碳量子点的制备、生物活性及其在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 113–121.
Han Tianqi, Ren Dayong, Niu Haiyue, et al. Research progress on the preparation, biological activity and application in food packaging of food-based carbon quantum dots [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 113–121.

[34] Elagamy S H, Obaydo R H, Barseem A, et al. Dual emissive carbon dots as Ratiometric fluorescence sensors: a comprehensive review [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2025, 50: 100930.

[35] Lesch R, Visser E D, Seroka N S, et al. Biomass-derived carbon-based nanomaterials: current research, trends, and challenges [J]. Journal of Renewable Materials, 2025, 13(10): 1935–1977.

[36] Das P, Nath P C, Pandey V K, et al. Carbon quantum dots as emerging biosensors for food safety and environmental applications: advances and challenges [J]. Applied Food Research, 2025, 5(2): 101255.

[37] Sun Feifei, Li Peiran, Wu Guojian, et al. Carbon nanomaterials-based smart dual-mode sensors for colorimetric and fluorescence detection of foodborne hazards [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 152: 104681.

[38] Ghrib B. Recent advances in two-dimensional layered nanomaterials for electrochemical sensing of folic acid: from fundamentals to real-world application [J]. Results in Chemistry, 2025, 18: 102629.

[39] 余鸿涛, 雷红涛, 郭家辉, 等. 基于磁性纳米材料的样品前处理技术在食品检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(19): 1–12.
Yu Hongtao, Lei Hongtao, Guo Jiahui, et al. Recent advances in the application of magnetic nanomaterials-based pretreatment methods in food analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(19): 1–12.

[40] 潘元沛. 食品理化检验中样品前处理方法分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(7): 106–108.
Pan Yuanpei. Analysis of sample processing methods in food physical and chemical testing [J]. Science & Technology Information, 2025, 23(7): 106–108.

[41] Zanchin C F, Floriano L, de Farias B S, et al. Carbon nanotubes stabilized in chitosan sponge (CNT-CS) as a new alternative clean-up sorbent for pesticide multiresidue determination in eggplants using QuEChERS and UHPLC-MS/MS [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417(7): 1407–1419.

[42] Li Shiqi, Lu Yuting, Ma Guicen, et al. Magnetic graphene oxide nanocomposite materials for magnetic dispersive solid-phase extraction and determination of pyrrolizidine alkaloids in tea beverages [J]. Food Chemistry, 2025, 486: 144636.

[43] Arain M B, Soylak M. Synthesis of magnetic multi-walled carbon nanotubes with layered double hydroxide (M-MWCNTs@MnAl-LDH) nanocomposite as an adsorbent for lead extraction [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141311.

[44] Khalilipour G, Karamibonari A R, Movassaghghazani M, et al. MOF@N–doped carbon dots–based dispersive solid phase extraction combined dispersive liquid–liquid microextraction of several aflatoxins from raw cow's milk samples prior to HPLC–FLD [J]. Microchemical Journal, 2024, 202: 110806.

[45] Lin Xiaotong, Sun Chunlong, Du Wen, et al. Research progress on functional carbon dots for detecting heavy metal ions in the fields of environmental protection and food safety [J]. Talanta, 2026, 302: 129405.

[46] Maity S, Kumar S, Singh G, et al. Selective sensing of heavy metal ions using carbon dots synthesized from *Azadirachta indica* seeds [J]. Sensors & Diagnostics, 2025, 4(5): 407–415.

[47] Wu Haizhi, Gao Hongfeng. Preparation of *Auricularia auricula* doped carbon-nitrogen quantum dots and their application in detecting heavy metal ions [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2025, 53(10): 100596.

[48] Esfandiyari-Bayat F, Tavallali H, Baezzat M R, et al. Sustainable agro-waste derived nitrogen-doped carbon dots for sensitive fluorescence detection of ethalfluralin residues in vegetables [J]. Sustainable Food Technology, 2026, 4(1): 813–822.

[49] Chen Xiumei, Che Jinxin. Nitrogen and sulfur Co-doped carbon dots derived from granatums and ammonium persulfate to detect tetracyclines in milk [J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100112.

[50] Alhussaini M S, Alyahya A A I, Al-Ghanayem A A. Advances in carbon dot-based fluorometric and colorimetric probes for the detection of pathogenic bacteria: a review [J]. Dyes and Pigments, 2026, 246: 113361.

[51] Lei Qiaowen, Liu Chenghao, Nan Xinru, et al. Carbon dots-based electrochemical and fluorescent biosensors for the detection of foodborne pathogens: current advance and challenge [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2025, 529: 216457.

[52] Fatemi K, Lau S Y, Kiew S F, et al. Development and characterization of a functionalized graphene oxide-based fluorescent aptasensor for point of care detection of foodborne *E. coli* [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2025, 181: 115154.

[53] Feng Xiwen, Yu Shanshan, Cai Jihai, et al. A ratiometric fluorescent platform based on xylan-derived carbon dots for detecting *Vibrio parahaemolyticus* [J]. Industrial Crops and Products, 2025, 228: 120871.

[54] 孙冰心, 孙铮, 王简. 食品中生物毒素快速检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 75–84.
Sun Bingxin, Sun Zheng, Wang Jian. Research progress on rapid detection technology of biological toxins in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 75–84.

[55] Cai Yuzheng, Guo Ge, Fu Yankun, et al. A fluorescent aptasensor based on functional graphene oxide and FRET strategy simultaneously detects aflatoxins B_1 and aflatoxins M_1 [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2024, 52(6): 100408.

[56] Yuncu H, Nadaroglu H, Bozkurt E. Eco-friendly synthesis of carbon quantum dots (CQDs) from hazelnut husk for sensitive aflatoxin B_1 (AFB_1) detection [J]. Toxicology Reports, 2024, 13: 101824.

[57] Zheng Jiaxin, Lian Zimin, Liu Ting, et al. A review for carbon dots-based fluorescent sensing tools for antibiotic and pesticide residues progress, challenge and perspective [J]. Food Control, 2025, 172: 111201.

[58] Zhong Yaping, Shao Kayi, Zhang Ruixia, et al. N,S-co-doped carbon quantum dots as a versatile platform for monitoring hydrogen sulfide and nitrite based on Fe^{2+}/Fe^{3+} redox cycle: applications in food safety and bioimaging [J]. Food Control, 2026, 184: 112012.

[59] Wahyuni W T, Rahman H A, Hidayat R A, et al. Electrochemical sensors based on gold nanoparticles and nanocomposite of MWCNT-OH/graphene for detecting hydrazine and nitrite simultaneously [J]. Next Materials, 2025, 8: 100677.

[60] Liu Xiuying, Kang Si, Wang Wen, et al. Ratiometric fluorescent test strips based on CB-Ni^{2+}@CDs probes for visual detection of histamine [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101522.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)