汪慧, 罗晓羽, 李承谦, 等. 绿萝衍生碳点荧光传感体系检测三种肉制品中的四环素 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 419−428. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120396
WANG Hui, LUO Xiaoyu, LI Chengqian, et al. *Epipremnum aureum*-derived Carbon Dots-based Fluorescent Sensing System for the Detection of Tetracycline in Three Types of Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 419−428. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120396

·分析检测·

绿萝衍生碳点荧光传感体系检测三种肉制品中的四环素

汪　慧[1,*], 罗晓羽[1,2], 李承谦[1,2], 韩　雍[1,*]
（1.陇东学院农业与生物工程学院, 甘肃庆阳 745000;
2.兰州理工大学生命科学与工程学院, 甘肃兰州 730050）

摘　要: 为实现对肉制品中抗生素残留的灵敏检测，本研究以生物质材料绿萝为碳源，通过乙醇溶剂热法一步合成了具有双发射特征的红色荧光碳点（Red-emitting carbon dots，R-CDs），并构建了一种比率荧光传感器，用于检测三种肉制品中的四环素（Tetracycline，TC）残留。结果表明，该 R-CDs 呈分散良好的类球形，由无定形碳核与共轭 sp^2 结构域组成，且表面富含-OH、-NH_2、-COOH 及芳香族活性基团。在稀释倍数为 10、pH7.0、时间 15 min、温度 15~60 ℃ 下具有良好的荧光稳定性。在 410 nm 激发下，R-CDs 在 505 nm 和 672 nm 处呈现出双发射峰。TC 可特异性猝灭 672 nm 处荧光并同步增强 505 nm 处荧光，据此建立了基于荧光强度比值（F_{505}/F_{672}）变化的比率传感平台。该传感器在 0~4.00 μg/mL 范围内线性良好，检出限为 0.091 μg/mL，并表现出对 TC 的高选择性。进一步结合智能手机图像分析，开发了基于 RGB 信号的可视化半定量检测方法，在 0~2.50 μg/mL 线性范围内检出限达 0.024 μg/mL。在猪肉、鸡肉和牛肉的加标回收试验中，回收率为 96.80%~104.20%，相对标准偏差低于 2.41%，证实了方法的准确性与可靠性。本研究为食品中 TC 残留的现场、快速、可视化检测提供了一种绿色、灵敏且实用的新策略。

关键词: 碳点, 比率荧光, 可视化检测, 四环素
中图分类号: O657.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0419−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120396
本文网刊:

Epipremnum aureum-derived Carbon Dots-based Fluorescent Sensing System for the Detection of Tetracycline in Three Types of Meat Products

WANG Hui[1,*], LUO Xiaoyu[1,2], LI Chengqian[1,2], HAN Yong[1,*]
（1.School of Agriculture and Bioengineering, Longdong University, Qingyang 745000, China;
2.College of Life Sciences and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China）

Abstract: To enable sensitive detection of antibiotic residues in meat products, red-emissive carbon dots (R-CDs) with dual-emission, synthesized by one step via a solvothermal method using biomass *Epipremnum aureum* as the carbon source, were employed to construct a ratiometric fluorescent sensor for detecting tetracycline (TC) residues in three types of meat products. The results demonstrated that the R-CDs were well-dispersed and quasi-spherical, composed of amorphous carbon cores and conjugated sp^2 domains, with surfaces rich in -OH, -NH_2, -COOH, and aromatic active groups. The R-CDs exhibited good fluorescence stability under the conditions of a 10-fold dilution, pH7.0, an incubation time of 15 min, and temper-

收稿日期: 2025−12−31
基金项目: 国家自然科学基金（32060571）; 甘肃省重点人才项目（2025RCXM013）; 甘肃省高校产业支撑项目（2025CYZC-063）; 庆阳市联合基金重大项目（2025LZ1012）。
作者简介/通信作者*: 汪慧（1985−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品安全控制, E-mail: whui0850@qq.com。
*** 通信作者:** 韩雍（1980−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全控制, E-mail: hy0850@qq.com。

atures of 15~60 ℃. Upon excitation at 410 nm, the R-CDs displayed distinct dual-emission peaks at 505 nm and 672 nm. TC selectively quenched the fluorescence at 672 nm while enhancing the emission at 505 nm, enabling a ratiometric sensing platform based on the intensity ratio (F_{505}/F_{672}). The sensor demonstrated a good linear response in the range of 0~4.00 μg/mL, with a detection limit of 0.091 μg/mL, and exhibited high selectivity toward TC. Furthermore, a semi-quantitative visual detection method was developed using smartphone-based image analysis with RGB signals, achieving a detection limit of 0.024 μg/mL within the range of 0~2.50 μg/mL. Spiked recovery tests on pork, chicken, and beef samples yielded recoveries ranging from 96.80% to 104.20%, with relative standard deviations of less than 2.41%, confirming the method's accuracy and reliability. This study contributes to a green, sensitive, and practical strategy for the on-site, rapid, and visual monitoring of TC residues in food.

Key words: carbon dots; ratiometric fluorescence; visual detection; tetracycline

四环素(Tetracycline, TC)因其广谱抗菌活性与经济性被广泛用于畜禽及水产养殖[1]。然而, TC 的违规滥用导致肉类、乳制品及水产品中的残留问题严峻, 成为全球公共卫生问题的焦点之一[2]。食品中的 TC 残留不仅可能引起肝毒性、神经系统异常等健康风险[3], 更会加剧环境中病原菌的抗菌药物耐药性(Antimicrobial resistance, AMR)发展与传播, 导致超级细菌的出现。因此, 开发快速、灵敏且适用于现场的 TC 残留检测技术, 对保障食品安全和遏制 AMR 至关重要[4]。目前, 高效液相色谱(High-performance liquid chromatography, HPLC)和质谱(Mass spectrometry, MS)等仪器方法虽为检测金标准[5], 但依赖昂贵设备、复杂前处理及专业人员操作, 难以满足现场快速筛查的高通量与便捷性需求[6]。

碳点(Carbon dots, CDs)作为一类有机量子材料, 具有合成成本低、生物相容性好、水溶性高、荧光可调等优势[7−9]。CDs 荧光可覆盖蓝光至近红外范围[10], 且可通过设计与分析物的相互作用调控发光行为, 产生荧光强度变化甚至多发射峰的比率响应, 进而实现可视化检测, 非常适于构建便携、经济的传感器件[11]。多数传统 CDs 传感器依赖于单一发射峰的荧光增强或猝灭, 易受背景干扰、仪器波动、基质效应及探针浓度变化等影响。比率荧光传感通过测定两个以上波长的荧光强度比值, 引入内置自校准功能, 可显著提高灵敏度与选择性, 有效抵消非目标因素引起的信号波动, 从而提升定量分析的准确性与稳健性[12−13]。

然而, 合成高质量的双发射 CDs 仍是关键挑战。传统合成方法常采用柠檬酸、邻苯二胺等小分子前驱体, 过程涉及有毒溶剂, 合成条件苛刻, 产物多呈单发射, 难以直接用于比率传感, 且潜在生物毒性制约其在食品领域的应用[14]。为克服传统化学合成的局限性, 开发基于天然生物质的绿色合成策略显得尤为迫切。绿萝作为一种常见绿叶观赏植物, 其叶片中富含叶绿素衍生物、氨基酸及多糖等组分[15−17], 不仅可作为优质的碳、氮源, 其天然的卟啉结构更能有效诱导红光发射中心的形成。利用绿萝作为单一前驱体, 可在一步反应中原位构建具有独立发光特性的碳核与表面态结构, 从而实现低毒性与优异双发射性能的协同[18], 为食品安全检测提供了良好的绿色材料。

尽管基于天然生物质合成的 CDs 在食品安全检测领域展现出显著应用潜力, 但利用单一植物前驱体原位合成高质量的双发射 CDs, 并进一步构建针对复杂食品基质中抗生素残留的便携式双模式传感体系的研究仍显不足。本研究以天然生物质绿萝为碳源, 合成具有双发射特征的红色荧光碳点, 并以此构建了针对 TC 的特异性双模式检测体系。通过分析该传感体系的光学响应规律与传感特性, 结合智能手机成像技术, 探究其在比率荧光定量和基于色彩变化的可视化半定量检测中的应用效果, 并考察该方法在实际肉制品基质中的准确性与可靠性, 旨在为食品中 TC 残留的现场、快速筛查提供一种绿色、高效的双模式检测策略, 同时拓展天然生物质比率荧光材料的制备思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪肉、鸡肉、牛肉　市售; 新鲜绿萝叶　收集于陇东学院生农科技园; 四环素(TC)、盐酸金霉素(Chlortetracycline, CTC)、土霉素(Oxytetracycline, OTC)　分析纯, 上海阿拉丁生化科技有限公司; 诺氟沙星(Norfloxacin, NOR)、红霉素(Erythromycin, ERY)、阿莫西林(Amoxicillin, AMOX)　分析纯, 上海迈瑞尔生化科技有限公司; 邻苯二胺、浓硫酸、氢氧化钠、冰乙酸、硼酸、磷酸、甲醇、丙酮　分析纯, 天津市天利化学试剂有限公司; 实验用水为超纯水; Britton-Robinson(BR)缓冲液　磷酸、冰乙酸、硼酸按体积比 1∶1∶1混合, 再用 0.20 mol/L 氢氧化钠溶液调节为 pH2.0~12.0 的 BR 缓冲液, 实验室自制。

F97Pro 荧光分光光度计　上海棱光技术有限公司; JEM-2100F 场发射透射电子显微镜　日本 JEOL 公司; UV2300Ⅱ紫外可见分光光度计　上海天美科学仪器有限公司; D8 X 射线衍射仪　德国 Bruker 公司; Nicolet iS20 傅里叶变换红外光谱仪、ESCALAB 250Xi X 射线光电子能谱仪　美国 Thermo Fisher Scientific 公司; ST2100 pH 计　常州奥豪斯仪器有限公司; YBE-KH-100 聚四氟乙烯反应釜　内胆容积为 100 mL, 上海志泽生物科技发展公司; H1850 高速台式离心机　湘潭市仪器仪表有

限公司；DGG-9030B 电热恒温鼓风干燥箱　上海森信试验仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　R-CDs 的制备　参照 Wang 等[19] 的方法制备红色荧光碳点（Red-emitting carbon dots, R-CDs），略作修改。以绿萝为碳源，80% 乙醇为溶剂，通过溶剂热法合成 R-CDs。步骤为：将新鲜采集的绿萝剪切后称取 10.00 g 放入研钵中，加入 40.00 mL 80% 乙醇，研磨 15 min，过滤出滤液，然后将其转入高压反应釜中，180 ℃ 保持 4 h。反应结束后，待体系冷却至室温，将所得的溶液以 10000 r/min 转速离心 10 min 以去除不溶性沉淀，然后用 0.22 μm 微孔滤膜过滤，收集澄清滤液，并于 4 ℃ 条件下保存备用。

1.2.2　R-CDs 的表征

1.2.2.1　微观结构观察　通过透射电子显微镜（Transmission electron microscopy, TEM）观察 R-CDs 的形貌。将 R-CDs 溶液冻干，收集絮状物并研磨成粉；将所得粉末在超纯水中超声分散均匀后，取适量稀释液滴于超薄碳膜网上，室温下干燥后于场发射透射电子显微镜上观察其形貌并统计粒径分布。

1.2.2.2　R-CDs 的结构特性分析　取适量 R-CDs 粉末填充到玻璃样品架上，用载玻片压平，使样品与样品台持平，采用 X 射线衍射仪（X-ray diffraction, XRD）测定其晶型结构。设置工作电压 40 kV，工作电流 40 mA，扫描范围 10°~80°，连续式步进扫描，步长为 0.02，扫描速度 1°/min。

1.2.2.3　傅里叶变换红外光谱分析　采用傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR）分析 R-CDs 表面基团。使用 KBr 压片法制备样品，扫描范围为 400~4000 cm^{-1}，分辨率为 4.00 cm^{-1}。

1.2.2.4　X 射线光电子能谱分析　采用 X 射线光电子能谱（X-ray photoelectron spectroscopy, XPS）确定 R-CDs 表面元素组成和化学键状态。将 R-CDs 粉末固定到样品台上，设置 X 射线光源为 Al 靶，测试功率 150 W，以测得结合能 284.80 eV 的 C 1s 进行校准。

1.2.2.5　紫外可见吸收光谱分析　取稀释后的 R-CDs 溶液 3.0 mL 于 5 mL 试管中，加入 1.0 mL 2.00 μg/mL 的 TC 标准溶液，涡旋混匀，得到 R-CDs+TC 混合液。采用紫外可见吸收光谱仪（Ultraviolet-visible absorption spectroscopy, UV-Vis）对稀释后的 R-CDs 溶液和 R-CDs+TC 混合液进行扫描。以去离子水作为空白对照，扫描波长范围为 300~720 nm，扫描速度为 600 nm/min。

1.2.2.6　荧光光谱分析　采用荧光光谱仪（Fluorescence Spectrometer, FL）对 R-CDs 的荧光性质进行分析。以稀释 10 倍的 R-CDs 水溶液作为样品溶液，设定激发和发射狭缝宽度均为 5 nm。固定激发波长为 410 nm，发射波长范围为 300~720 nm，得到 R-CDs 的荧光发射光谱。

1.2.3　检测条件的优化　为了提高所构建的 R-CDs 荧光传感器检测 TC 的灵敏度，本研究采用逐级单因素优化法，对 R-CDs 的稀释倍数、激发波长、反应体系的 pH、孵育时间及孵育温度进行了优化。首先，在初始预设条件（室温 25 ℃、超纯水自然 pH、预设激发波长 365 nm）下，将 R-CDs 溶液分别稀释至 5、10、20、50 和 100 倍，测定荧光强度，确定最佳稀释倍数。其次，固定最佳稀释倍数，按照文献 [20] 中红光 CDs 的典型激发特性，在 350~420 nm 范围内进行光谱扫描，锁定最佳激发波长。随后，固定最佳稀释倍数及最佳激发波长，在室温下采用不同 pH（2.0~12.0）的 BR 缓冲溶液体系，分别进行荧光强度测定，探究酸碱度对荧光响应性能的影响，以确定最佳 pH。最后，在上述确定的最佳稀释倍数、最佳激发波长及最佳 pH 条件下，加入待测物 TC 构建传感体系，分别在时间梯度（0~40 min）及温度梯度（15~60 ℃）下监测荧光响应变化，最终确定最佳孵育时间和最佳孵育温度。

1.2.4　TC 比率荧光标准曲线的绘制　为构建比率型荧光传感器，参照何谐等[21] 的方法，首先将 2.00 mL 稀释 10 倍的 R-CDs 溶液与 1.00 mL BR 缓冲液（pH7.0）在室温下混合并涡旋振荡 15 min，制得 R-CDs 传感测试液。使用荧光分光光度计，在 410 nm 激发波长下扫描该传感器的荧光光谱，记录其在 505 nm 和 672 nm 处的发射峰强度（分别记为 F_{505} 与 F_{672}），并计算其强度比值（Fr）=F_{505}/F_{672}。为建立定量分析的标准曲线，配制一系列浓度范围为 0~4.00 μg/mL 的 TC 标准溶液。分别取 1.00 mL 不同浓度的 TC 溶液，加入装有上述 R-CDs 溶液的 5 mL 试管中，混合均匀后于室温孵育 15 min，随后进行荧光测定。通过分析 Fr 值与 TC 浓度之间的对应关系，绘制比率荧光标准曲线，并计算检出限（Limit of Detection, LOD）。

$$LOD(\mu g/mL) = 3\sigma/k$$

式中，σ 为 7 组空白实验的标准偏差；k 为标准曲线的斜率。

1.2.5　选择性和抗干扰性评价　为评估该传感器的选择性与抗干扰能力，在最优条件下，考察了其对 TC 及其他常见抗生素类干扰物的选择性响应。步骤如下：在含 2.00 mL R-CDs 溶液与 2.00 mL BR 缓冲液的体系中，分别加入 1.00 mL 不同分析物标准溶液（TC 为 2.00 μg/mL，CTC、OTC、AMOX、ERY、NOR 为 20.00 μg/mL 及超纯水空白对照，各设 3 组平行）；所有样品在室温避光反应 15 min 后，于 505 nm 和 672 nm 处测定荧光强度，通过比较信号差异系统评价该传感器的选择性及抗干扰性能。

1.2.6　加标回收试验　取经搅碎处理的肉类样品

10.00 g, 均匀分装于三组烧杯中。分别向其中加入不同浓度(0、2.00、4.00 μg/mL)的 TC 标准溶液, 混匀后室温静置孵育 2 h, 以使分析物与样品基质充分结合。随后, 向各样品中加入 20.00 mL 丙酮, 振荡提取 30 min。提取液在 11000 r/min 下离心 15 min, 去除样品中大颗粒杂质, 收集上清液, 并经 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 所得滤液作为待测样品溶液。采用已构建的 R-CDs 比率荧光传感器, 测定各样品溶液在 505 nm 和 672 nm 处的荧光强度, 计算 Fr, 并代入前述标准曲线求得 TC 的测定浓度。根据加标浓度与测定结果, 计算加标回收率与相对标准偏差(RSD), 以评估方法的准确度与精密度。加标回收率按下式计算。

$$加标回收率(\%)=\frac{X_1-X_2}{X_3}\times 100$$

式中: X_1 为加标样品测定浓度; X_2 为样品自身所含分析物的浓度; X_3 为加入的标准品浓度。

1.2.7 可视化检测平台的构建 为构建可视化检测平台, 首先按照 1.2.4 节所述方法配制 R-CDs 传感测试液。在 410 nm 紫外光激发下, 观察并记录不同浓度 TC(0~2.50 μg/mL)对 R-CDs 传感测试液颜色的影响。为减少环境光对成像条件的干扰, 所有图像采集均在自制的紫外灯暗箱中进行。该暗箱内置紫外光源, 并设有固定样品槽与拍摄窗口, 可保证拍照时外界光线一致。使用智能手机(小米 14)在暗箱窗口处拍摄样品图像。随后, 通过 Color Picker 软件提取图像的颜色通道信息, 获取相应的 RGB 值。具体操作流程参照文献 [22] 方法: 首先将样品管固定在暗箱内; 开启紫外灯后, 通过暗箱前侧窗口拍摄样品照片; 将照片导入 Color Picker 软件读取其红(R)、绿(G)、蓝(B)通道的数值, 分别提取单一颜色通道值并计算不同通道间的比值参数(如 R/G、B/G、B/R 等)。通过比较各颜色参数与 TC 浓度之间的线性关系, 筛选出拟合度最高的参数作为最终的响应信号。最后, 基于该最佳参数绘制标准曲线, 建立可视化定量检测方法。

1.3 数据处理

本文所有实验均做三次平行(除条件优化中的孵育时间和孵育温度外), 结果用平均值表示。采用 Microsoft Excel 2021 和 OriginPro 2025 软件进行数据存储、统计分析及图形绘制。使用 Thermo Avantage 软件对 XPS 光谱数据进行分峰拟合, 以解析 R-CDs 表面元素的化学结合状态; 利用 ImageJ 软件对 TEM 图像进行统计分析, 随机选取视野内的 50 个 R-CDs 测量直径, 进而构建粒径分布直方图。数据的统计学分析采用 SPSS Statistics 26.0 软件, 通过 Duncan 新复极差法进行显著性检验, 显著性水平设定为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 R-CDs 的表征

通过 TEM 对 R-CDs 进行观察可知, 所制备的 R-CDs 颗粒呈类球形, 分散性良好(图 1A), 粒径大小(图 1B)为 3.74~13.69 nm, 平均粒径为 8.40 nm,

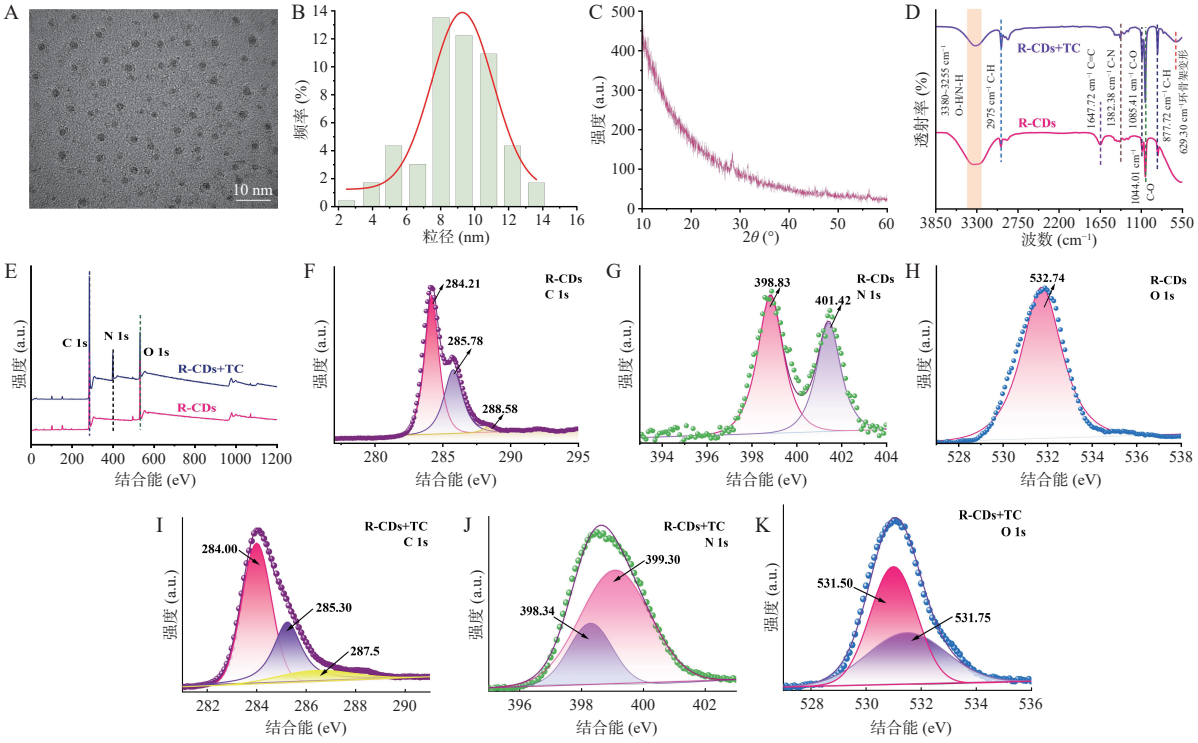


图 1 R-CDs 的表征

Fig.1 Characterization of R-CDs

注: A. R-CDs 的 TEM 图像; B. R-CDs 的粒径分布图; C. R-CDs 的 XRD 图; D. R-CDs 与 R-CDs+TC 的 FT-IR 图; E. R-CDs 的 XPS 全谱图; F~H: R-CDs 的 XPS 高分辨 C 1s、N 1s 和 O 1s 图谱; I~K: R-CDs+TC 的 XPS 高分辨 C 1s、N 1s 和 O 1s 图谱。

处于量子限域区间[23]。用 XRD 分析 R-CDs 的晶体结构(图 1C)，在约 28°处仅观察到一个微弱的宽峰，未出现明显的晶体衍射峰，表明 R-CDs 主要为无定形碳结构，不具有长程有序的石墨烯类晶格。采用 FT-IR 和 XPS 对 R-CDs 的表面化学性质进行了分析。FT-IR 光谱(图 1D)显示，在 3380~3255、2975、1647.72、1382.38、1085.41、1044.01 和 877.72 cm^{-1} 处存在特征吸收峰，分别归属于 O-H/N-H、C-H、C=C、C-N 及 C-O 键的振动[24]。这些结果表明 R-CDs 表面存在丰富的活性基团，如-OH、-NH_2、-COOH 以及芳香族的结构，这些结构提高了 R-CDs 的水溶性，保证双发射的稳定性。加入 TC 后的 FT-IR 光谱 3380~3255 cm^{-1} 处的 O-H/N-H 宽伸缩振动峰发生了明显的展宽与红移；同时，原 R-CDs 在 1647.72 cm^{-1} 处的 C=C 振动峰消失[25]，并在 629.30 cm^{-1} 处新产生了环骨架变形特征峰。这些图谱特征的改变直观地表明 R-CDs 的表面基团与 TC 分子之间发生了相互作用。XPS 全谱(图 1E)表明 R-CDs 主要由 C、O 和 N 三种元素构成。C 1s 高分辨谱(图 1F)可拟合为三个峰，结合能分别为 284.21、285.78 和 288.58 eV，对应 C-C/C=C、C-N 及 C=O/C=N 键[26]。N 1s 谱(图 1G)在 398.83 和 401.42 eV 处的信号可归属为-NH_2 及 N-H 基团[27]。O 1s 谱(图 1H)中 532.74 eV 的主峰则对应于 C-O 键[28]。而在结合 TC 后(图 1I~图 1K)，C 1s 拟合峰分别偏移至 284.00、285.30 和 287.50 eV；N 1s 峰变为 398.34 和 399.30 eV；O 1s 主峰则偏移至 531.50 eV。各元素结合能的明显位移进一步证实了 R-CDs 表面官能团与 TC 分子发生了结合。综合上述 FT-IR 与 XPS 的分析结果，明确了 R-CDs 的无定形碳核、共轭 sp^2 结构域及富含-OH、-NH_2 等官能团的表面化学结构。该结构特征一方面赋予了 R-CDs 优异的水溶性并保证了双发射荧光的稳定性，另一方面其表面丰富的活性基团为与靶分子 TC 的高效识别与结合提供了必要的结构基础[29]。

进一步通过紫外-可见吸收光谱与荧光光谱表征其光学性质(图 2)。R-CDs 在 260 nm 和 386 nm 处呈现两个明显的吸收峰，分别归因于碳核的 π-π 跃迁及表面官能团相关的 n-π 跃迁[30]，说明 R-CDs 中可能有苯环和共轭体系存在。当加入 TC 后，R-CDs 与 TC 构成的混合体系的紫外-可见吸收光谱在 290 nm 和 338 nm 处出现新的特征吸收峰，表明 R-CDs 与 TC 分子之间产生了有效的相互作用[31]。在 410 nm 激发下，R-CDs 呈现出 505 nm 和 672 nm 的双发射峰，R-CDs 溶液在日光灯下呈淡黄色，在紫外灯下呈红色荧光(图 2)，这与其碳核结构和丰富的表面态密切相关，为构建比率型荧光传感器提供了理想的光学基础。

2.2　检测条件优化

为优化 R-CDs 荧光传感器的检测性能，考察了

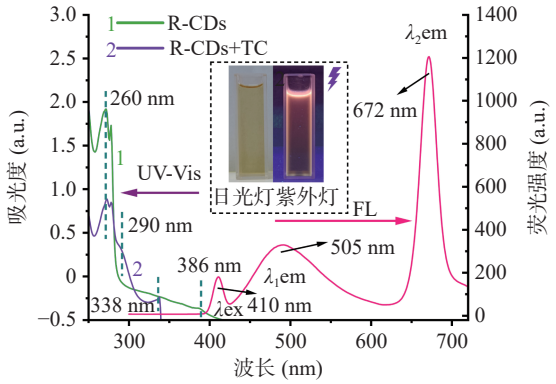


图 2　R-CDs 的光学性质

Fig.2　Optical properties of R-CDs

稀释倍数、激发波长、pH、孵育时间及温度的影响(图 3)。结果表明，R-CDs 荧光传感器在稀释 10 倍时，其在 505 nm 和 672 nm 处的荧光强度大于稀释 5 倍时的强度，并达到最大发射值。当稀释倍数进一步增加(20~100 倍)时，随着浓度的降低，荧光强度逐渐减弱(图 3A)。由于在 10 倍稀释条件下可获得最强的荧光背景信号，有利于后续检测，因此确定 10 倍为最佳稀释倍数。

在 350~420 nm 激发波长范围内，R-CDs 的荧光光谱始终呈现双发射峰特征(图 3B)。其中，位于短波长处的发射峰(505 nm)随激发波长的增加发生红移，表现出明显的激发依赖性；而位于 672 nm 处的长波长发射峰位置基本保持不变，表明两者来源于不同的发光中心。进一步分析发光强度的变化规律可知，随着激发波长增加，短波长峰的发射强度持续上升(在 420 nm 激发时最高)；而 672 nm 处的主峰强度则在 410 nm 激发时达到最大值，随后在 420 nm 时出现下降。综合考虑获取最高的主峰响应信号，同时兼顾双发射峰之间良好的分离度，最终选择 410 nm 作为最佳激发波长。

溶液 pH 对 Fr 具有显著影响(图 3C)。经 Duncan 多重比较分析可知 pH 组间存在统计学差异。在 pH2.0~6.0 范围内，Fr 值虽呈现缓慢上升趋势，但整体显著低于中性条件，这可能与表面质子化形成的氢键网络限制了荧光发射有关[32]。当 pH 由 6.0 升至 7.0 时，Fr 值急剧上升并达到最大值，与其他 pH 组存在显著性差异(P<0.05)，这可能与表面电荷状态及能级结构的转变相关[33]。而在碱性条件下(pH8.0~12.0)，荧光响应虽有所回落但相对平稳，显著低于 pH7.0(P<0.05)，这可能源于传感器表面去质子化的羧基、羟基等基团，与 TC 分子中的酚羟基、酰胺键等发生特异性电子或能量转移[34]。综合考虑荧光响应强度及实验安全性，选择 pH7.0 为最佳 pH。

孵育时间优化结果如图 3D 所示，加入 TC 后荧光响应迅速，虽然在 5 min 时已观察到较高的 Fr 值，且 10 min 后处于平稳状态，但为了确保反应体系达到完全的热力学平衡状态，并消除人工操作过程中时间控制微小差异带来的误差，最终选择 15 min 作为

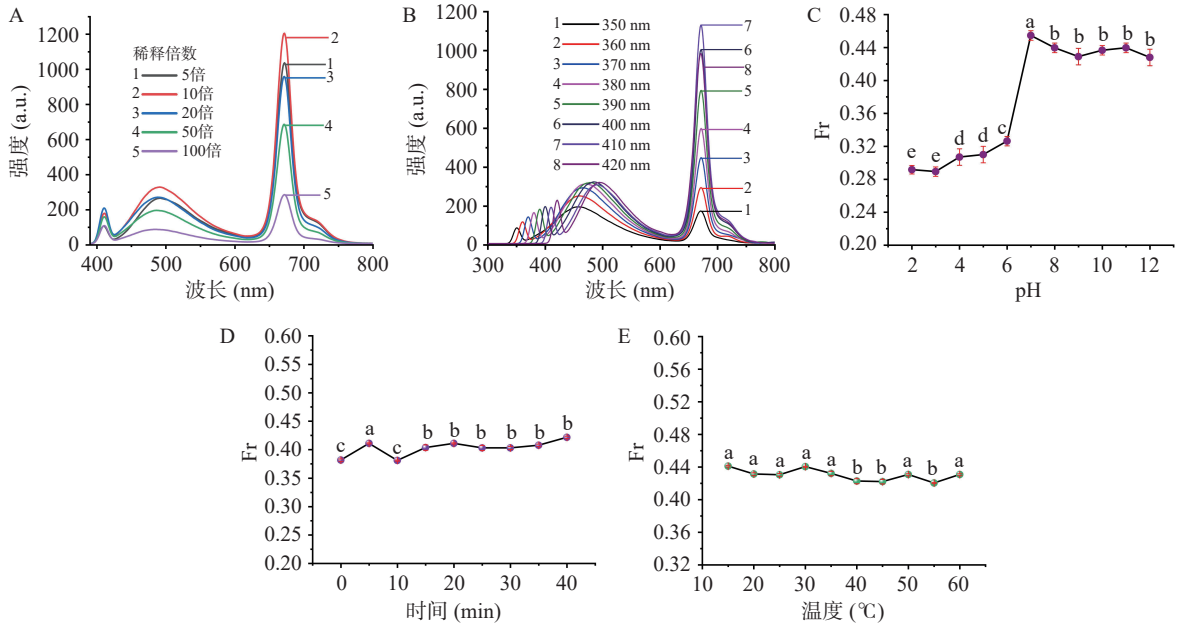


图 3 R-CDs 检测条件优化

Fig.3 Optimization of the detection conditions for R-CDs

注: A. R-CDs 在不同稀释倍数下的荧光光谱图; B. R-CDs 在不同激发波长下的荧光光谱图; C~E 分别为不同 pH、孵育时间、孵育温度对荧光强度的影响; 不同小写字母表示经 Duncan 多重比较分析差异显著(P<0.05)。

最佳孵育时间以保证检测结果的高重现性。

R-CDs 传感体系在较低温度区间(15~30 ℃)内荧光响应保持相对稳定及较高水平, 表现出优异的热稳定性(图 3E); 当温度超过 40 ℃ 时, Fr 值略有下降。考虑到 25 ℃ 最接近常规实验室室温, 在此条件下进行检测既能获得理想的灵敏度, 又无需额外的加热或控温设备, 极大地简化了检测流程, 符合现场检测的需求, 所以最终选择 25 ℃ 为最佳孵育温度。综上, 确定最优检测条件为: R-CDs 稀释 10 倍、410 nm 激发波长、pH7.0、孵育时间 15 min 和孵育温度 25 ℃。

2.3 TC 比率荧光标准曲线

为了验证该 R-CDs 荧光传感器对 TC 的灵敏性, 在最优条件下, 向传感体系中加入不同浓度的 TC 标准溶液, 构建 Fr 与 TC 浓度之间的荧光标准曲线。如图 4A 所示, 以 Fr 值为纵坐标, TC 浓度为横坐标绘制标准曲线, 结果显示二者在 0~4.00 μg/mL 范围内呈良好的线性关系, 线性方程为 y=0.0952x+0.2792, 决定系数(R^2)为 0.9998, 这一良好的线性响应源于 R-CDs 荧光传感器敏锐的光谱变化(图 4B)。在 TC 浓度 0~4.00 μg/mL 范围内, R-CDs 荧光传感器在 505 nm 处的荧光强度随浓度增加而增强, 同时在 672 nm 处的荧光强度随浓度增加而降低, 呈现出明显的“此消彼长”比率荧光特性。根据公式计算得到 LOD 为 0.091 μg/mL。该数值低于文献中多数同类方法(表 1), 表明该方法具有更高的检测灵敏度。

2.4 选择性和抗干扰性分析

通过记录 Fr 的变化评估了 R-CDs 荧光传感器的选择性与抗干扰性能。如图 5A 所示, 加入 TC 后,

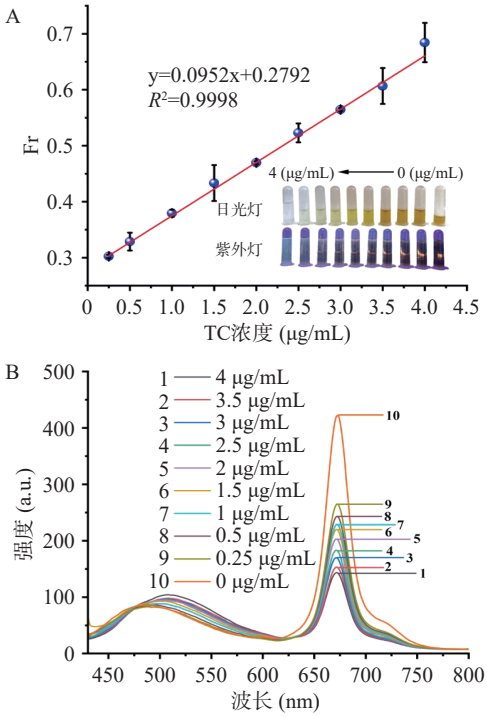


图 4 TC 的校准曲线(A)与不同浓度 TC 的荧光光谱图(B)

Fig.4 Corresponding calibration curve (A) and fluorescence emission spectra (B) of R-CDs recorded in the presence of varying concentrations of TC

R-CDs 在 505 nm 处的荧光发射增强, 而在 672 nm 处的荧光强度则降低, 表现出典型的双发射特异性响应。加入其他干扰物质后, 尽管部分物质改变了光谱的整体形态(例如, NOR 在 484 nm 波段出现新峰), 但在本研究所选定的特定监测波长(505 nm 和 672 nm)处, 干扰物的荧光强度基本保持不变。对于结构类似物 CTC, 虽然其导致 505 nm 和 672 nm 处

表 1　不同荧光传感器检测性能对比

Table 1　Comparison of the detection performance of different fluorescent sensors

抗生素	方法	线性范围(μg/mL)	LOD(μg/mL)	参考文献
TC	荧光测定法	0.84~26.70	0.249	[35]
	荧光测定法	0.04~22.20	0.187	[36]
	荧光测定法	0～88.90	0.093	[37]
	荧光测定法	8.89～44.40	0.209	[38]
	荧光测定法	0～26.70	0.696	[39]
	荧光测定法	0~4.00	0.091	本研究

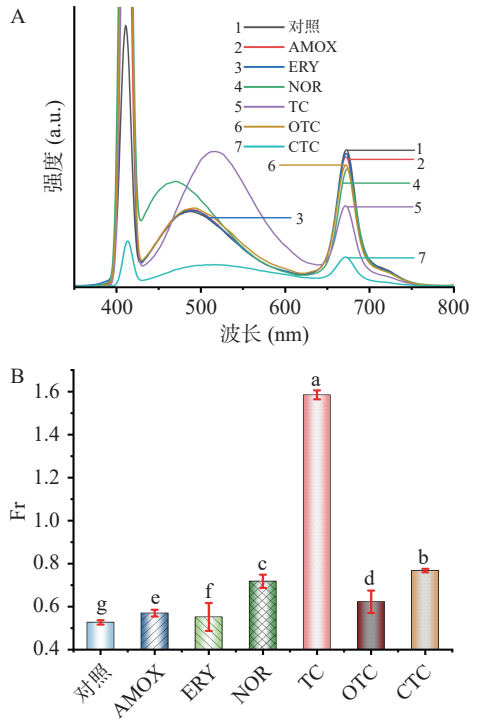


图 5　R-CDs 荧光传感器对 TC 的选择性及抗干扰性能评价

Fig.5　Evaluation of the selectivity and anti-interference performance of the R-CDs fluorescence sensor toward TC

注：A. R-CDs 对不同抗生素的选择性荧光光谱；B. R-CDs 对不同抗生素的选择性；不同小写字母表示经 Duncan 多重比较分析差异显著(P<0.05)。

的绝对荧光强度均发生大幅降低，但由于两峰呈现同步猝灭趋势，基于该双波长构建的比率荧光策略有效抵消了这种背景波动的干扰。图 5B 进一步印证了上述光谱规律。数据显示，在所有测试物质中，仅有目标物 TC 引起了 Fr 值的急剧上升。对于容易产生背景干扰的结构类似物(CTC、OTC)以及光谱发生偏移的 NOR，尽管它们引起了 Fr 值的轻微响应和上升，但其最高上限(Fr<0.8)仍被极大地抑制，显著低于 TC 的特异性响应信号(Fr≈1.6，P<0.05)。而其余抗生素(如 AMOX 和 ERY)引起的荧光变化极其微弱，几乎等同于空白对照。综上所述，尽管不同共存物质可能引起 R-CDs 光谱的改变，但本研究确立的基于 505 nm 和 672 nm 双发射峰的比率荧光策略，有效屏蔽了非特异性光谱影响及单波长强度波动的干扰，凸显了该传感体系对 TC 良好的特异性识别能力与抗干扰性能。

2.5　加标回收试验

为评估 R-CDs 荧光传感器在实际样品中对 TC 的检测性能，开展了加标回收试验。如表 2 所示，TC 的加标回收率为 96.80%~104.20%，RSDs 为 0.34%~2.41%，表明该方法准确可靠、重现性良好。综上，该 R-CDs 荧光传感器在 TC 检测中表现出良好的准确度、稳定性与灵敏度，适用于复杂实际样品的快速筛查，为食品中 TC 残留的高灵敏分析提供了可靠手段。

表 2　实际样品的加标回收率(n=3)

Table 2　Recoveries of actual samples (n=3)

抗生素	样品	添加值(μg/mL)	检出值(μg/mL)	回收率(%)	RSD(%)
TC	猪肉	0	<LOD		
		2.00	2.01±0.01	101.00±0.04	0.34
		4.00	4.04±0.06	96.80±1.01	2.41
	鸡肉	0	<LOD		
		2.00	1.80±0.04	104.20±0.02	1.10
		4.00	3.96±0.09	102.00±0.01	0.70
	牛肉	0	<LOD		
		2.00	2.31±0.04	101.10±1.02	1.21
		4.00	4.01±0.02	98.10±0.06	0.42

2.6　可视化检测

TC 可显著改变 R-CDs 荧光传感器溶液的颜色。在 410 nm 紫外光照射下，其荧光颜色从红棕色转变为亮绿色(图 4A)。为量化这种荧光颜色变化，基于荧光光谱数据计算了相应的 CIE 1931 色度坐

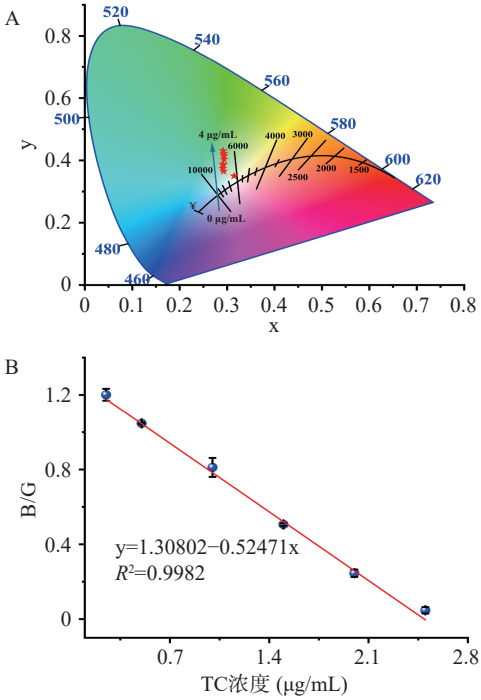


图 6　基于 R-CDs 的 TC 可视化检测及色度分析

Fig.6　Visual detection and colorimetric analysis of TC based on R-CDs

注：A. CIE 色度图(“¥”代表 TC 浓度为 0 μg/mL 时 R-CDs 的初始色度坐标；红色“★”代表添加不同浓度 TC 后体系的色度坐标轨迹)；B. 不同浓度 TC 与 R-CDs 的 B/G 值的校准曲线。

标。如图 6A 所示，当 TC 浓度从 0 增至 4.00 g/mL 时，色度坐标从橙红区域沿色度图系统性地向高纯度绿色区域迁移。这一清晰的坐标迁移轨迹与肉眼观察结果完全一致，同时也为比色传感提供了明确的颜色依据。为进一步实现便携式半定量分析，利用智能手机采集不同 TC 浓度溶液在紫外光下的图像，并通过 Color Picker 软件提取其 RGB 颜色通道值。结果显示，在 0~2.50 μg/mL 浓度范围内，B/G 值与 TC 浓度呈良好线性关系，线性回归方程为 y=1.30802−0.52471x（R^2=0.9982），LOD 为 0.024 μg/mL（图 6B）。该结果证实了基于智能手机图像分析的可视化比色传感策略的可行性。

2.7 检测机制

FT-IR 图谱中特征振动峰（如 O-H/N-H）的明显展宽与偏移，伴随原有峰的消失及新特征峰的产生，再结合 XPS 分析中 C、N、O 各元素结合能的显著位移，为 R-CDs 与 TC 的结合提供了光谱学证据。从结构基础来看，R-CDs 表面富含-OH、-NH_2/N-H 及 C=O/C=N 等含 O/N 官能团，并具有一定的 sp^2 芳香结构域，为 TC 提供了多位点结合界面。TC 的识别主要来源于其与 R-CDs 之间的多重非共价相互作用。TC 的多羟基、酰胺与羰基位点可与 R-CDs 表面的-OH、-NH_2/N-H 及 C=O/C=N 形成氢键网络，其芳香环共轭结构可与 R-CDs 芳香域发生 π-π 堆积，同时在不同 pH 条件下还可产生静电吸引或排斥[40]。上述作用协同改变 R-CDs 表面的局域极性、氢键环境与电荷分布，从而调控表面陷阱态能级以及辐射或非辐射跃迁的竞争过程[33]（图 7A）。在双发射体系中，505 nm 和 672 nm 的两处发射峰可分别归属为较低能级的发光中心（源于碳核或浅表面态）和与羰基或含氮缺陷相关的深表面态[41]。TC 与 R-CDs 特异性的结合引发了体系光学特性的转变。紫外-可见吸收光谱显示（图 7B），加入 TC 后体系在 290 nm 和 338 nm 处出现了新的吸收峰，290 nm 处的增强可归因于 TC 芳香环与 R-CDs 芳香域发生 π-π 堆积后其 π→π*跃迁的变化[42]，而 338 nm 处吸收的出现则可能与 TC 的羰基（n→π*跃迁）参与形成氢键或电荷转移有关[43]，这为基态复合物的形成提供了直接光谱证据。此外，该复合物在紫外区的宽吸收带与 R-CDs 的激发光谱存在重叠，对激发光产生了强烈的竞争吸收与屏蔽效应，即内滤效应（IFE），进一步加剧了 R-CDs 荧光的猝灭[44]。为直观阐明上述相互作用对双发射荧光行为的调控机制，图 7C 构建了相应的能量传递模型。在该模型中，505 nm 发光中心可视作能量给体，而 672 nm 深表面态为能量受体。在 TC 结合后，受体发射中心（672 nm）因静态猝灭与 IFE 的叠加作用，其荧光强度显著衰减；同时，TC 分子在 R-CDs 表面的吸附可能阻断或削弱了体系内部由给体向受体的能量转移通道。由于指向低能态的耗散路径受到限制，激发态能量在更大程度上滞留于给体能级，并主要通过辐射跃迁释放，宏观表现为 505 nm 发射峰的相对恢复与增强。该基于能量转移受阻所引发的差异化调控效应（即受体猝灭与给体增强并存），最终赋予该传感体系显著的“此消彼长”型比率荧光响应特征，从而实现对 TC 的高灵敏检测。

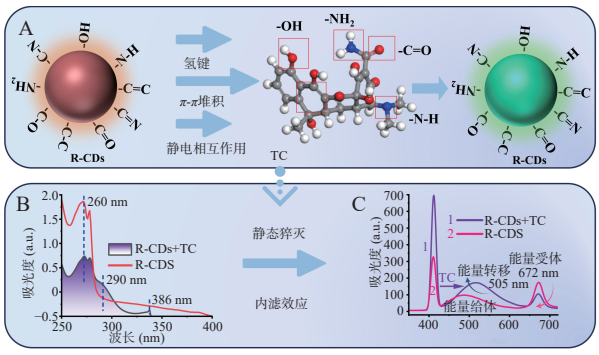


图 7 R-CDs 与 TC 相互作用的机理示意图

Fig.7 Schematic illustration of the mechanism for the interaction between R-CDs and TC

3 结论

本研究以绿萝为单一前体，通过乙醇溶剂热法一步合成了具有 505 nm 和 672 nm 双发射特征的 R-CDs。基于 TC 对 R-CDs 双发射峰的特异性响应，构建了比率荧光传感与智能手机 RGB 分析相结合的双模式检测平台。结果显示，比率荧光模式在 0~4.00 μg/mL 范围内线性良好，检出限为 0.091 μg/mL；可视化半定量模式在 0~2.50 μg/mL 范围内同样呈现良好的线性响应，LOD 低至 0.024 μg/mL。在猪肉、鸡肉及牛肉样品的加标回收试验中，回收率为 96.80%~104.20%，RSD 低于 2.41%，证实了方法的准确性与可靠性。本研究表明富含发光基团的生物质能有效构建双发射 CDs 的传感体系，为食品中 TC 残留提供了一种绿色、低成本且无需大型仪器的可视化检测策略。本研究目前仅通过加标试验验证了方法可行性，基于低检出限能保证检测的有效性，尚未对真实样品进行验证，存在一定局限性，后续工作将引入标准方法（如 HPLC）进行平行确证。同时探索红移发射波长及结合微流控与人工智能算法，以开发适应复杂基质的高通量智能检测技术与设备。

© 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] RONG M, HUANG Y, LIN C, et al. Recent advances in optical sensing for tetracycline antibiotics[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2024, 178: 117839.

[2] MENG W, BAI X, WANG B, et al. Biomass-derived carbon dots and their applications[J]. Energy & Environmental Materials, 2019, 2(3): 172−192.

[3] TIAN J, AN M, ZHAO X, et al. Advances in fluorescent sensing carbon dots: An account of food analysis[J]. ACS Omega,

2023, 8(10): 9031.
[4] VANBAELEN T, MANOHARAN-BASIL S S, KENYON C. 45 years of tetracycline post exposure prophylaxis for STIs and the risk of tetracycline resistance: A systematic review and meta-analysis[J]. BMC Infectious Diseases, 2024, 24(1): 376.
[5] MANDLATE J S, SOARES B M, SEEGER T S, et al. Determination of cadmium and lead at sub-ppt level in soft drinks: An efficient combination between dispersive liquid-liquid microextraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 907.
[6] AYERDURAI V, CIEPLAK M, KUTNER W. Molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensors for food contaminants determination[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023, 158: 116830.
[7] KUMAR J V, RHIM J W. Fluorescent carbon quantum dots for food contaminants detection applications[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 111999.
[8] 孙甲, 衡辉, 谷庆阳. 荧光碳点的性能及其应用研究进展[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(9): 1405−410. [SUN J, HENG H, GU Q Y. Research progress on properties and applications of fluorescent carbon dots[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(9): 1405−410.]
[9] 李赟, 王群芳, 黄楠, 等. 碳点荧光探针的绿色化学进展[J]. 广州化学, 2025, 50(2): 20−27. [LI Y, WANG Q F, HUANG N, et al. Progress in green chemistry of carbon dots material as fluorescent probes[J]. Guangzhou Chemistry, 2025, 50(2): 20−27.]
[10] CUI L, REN X, SUN M, et al. Carbon dots: Synthesis, properties and applications[J]. Nanomaterials, 2021, 11(12): 3419.
[11] LU S, YANG B. Carbon dots are shining in the world[J]. SmartMat, 2022, 3(2): 207.
[12] FENG X, YU S, CAI J, et al. A ratiometric fluorescent platform based on xylan-derived carbon dots for detecting *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 228: 120871.
[13] MA J, SUN L, GAO F, et al. A review of dual-emission carbon dots and their applications[J]. Molecules, 2023, 28(24): 8134.
[14] 钱敏捷, 胡钦. 荧光碳点在食品检测中的应用[J]. 食品安全导刊, 2021(28): 156−158. [QIAN M J, HU Q. Application of fluorescent carbon dots in food detection[J]. Food Safety Guide, 2021(28): 156−158.]
[15] 黄杨, 高田毅, 朱宏星, 等. 基于生物基质碳点构建荧光探针用于腌腊肉制品中亚硝酸盐的检测[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 354−361. [HUANG Y, GAO T Y, ZHU H X, et al. A fluorescent probe based on biological matrix carbon dots for the detection of nitrite in cured meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 354−361.]
[16] 胡伟英, 叶锡光, 陈忠正, 等. 普洱茶-硒掺杂碳量子点和单质硒的同时制备及其在 Fe^{3+}检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 316−324. [HU W Y, YE X G, CHEN Z Z, et al. Simultaneous preparation of Pu-erh tea-selenium-doped carbon quantum dots and elemental selenium and its application in Fe^{3+} detection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 316−324.]
[17] 孙昊雪, 孙梦影, 张巍元, 等. 生物质碳点的合成及应用进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2024, 38(3): 59. [SUN H X, SUN M Y, ZHANG W Y, et al. Synthesis and application progress of biomass carbon dots[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2024, 38(3): 59.]
[18] ABDULLAHI H, NYANDAT E, GAL EFFI C, et al. Cyclohexanols of *Halleria lucida*[J]. Phytochemistry, 1986, 25(12): 2821.
[19] WANG H, LI C, LUO X, et al. Biomass-derived multi-emissive carbon dots-based ratiometric fluorescence and visual detection of residual chlortetracycline hydrochloride and hemin chloride in food matrix[J]. Microchemical Journal, 2026, 223: 117350.
[20] DIVYA S, NARAYAN S, AINAVARAPU S R K, et al. Insight into the excitation-dependent fluorescence of carbon dots[J]. Chemical Physics and Physical Chemistry, 2019, 20: 984.
[21] 何谐, 雒雪丽, 李春花, 等. 氮掺杂碳点的开关型荧光传感器检测蔬菜中的生物硫醇[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 178. [HE X, LUO X L, LI C H, et al. Detection of biothiols in vegetables by switched fluorescence sensor with nitrogen-doped carbon dot[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 178.]
[22] XU Z, ZENG C, ZHAO Y, et al. Smartphone-based on-site detection of hydrogen peroxide in milk by using a portable ratiometric fluorescent probe[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135381.
[23] MINTZ K J, BARTOLI M, ROVERE M, et al. A deep investigation into the structure of carbon dots[J]. Carbon, 2021, 173: 433.
[24] XU D, LEI F, CHEN H, et al. One-step hydrothermal synthesis and optical properties of self-quenching-resistant carbon dots towards fluorescent ink and as nanosensors for Fe^{3+} detection[J]. RSC Advances, 2019, 9(15): 8290−9.
[25] MANNO D, ORLANDO M M, GABRIELE A, et al. Optimized synthesis and characterization of highly reproducible carbon dots for bioimaging applications[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2025, 255: 114951.
[26] RAO L, ZHANG Q, SUN B, et al. Multicolor luminescent carbon dots: Tunable photoluminescence, excellent stability, and their application in light-emitting diodes[J]. Nanomaterials, 2022, 12(18): 3132.
[27] LIU W, LI C, REN Y, et al. Carbon dots: Surface engineering and applications[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2016, 4(35): 5772−88.
[28] WANG H, SUN P, CONG S, et al. Nitrogen-doped carbon dots for "green" quantum dot solar cells[J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1): 27.
[29] 刘翼泽, 李鹏飞, 孙再成. 碳点发光机制与结构之间的构效关系[J]. 高等学校化学学报, 2025, 46(6): 43−56. [LIU Y Z, LI P F, SUN Z C. Correlation between the photoluminescence mechanism and structure of carbon dots[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2025, 46(6): 43−56.]
[30] IBARRA-PRIETO H D, GARCIA-GARCIA A, AGUILERA-GRANJA F, et al. One-pot, optimized microwave-assisted synthesis of difunctionalized and B-N co-doped carbon dots: Structural characterization[J]. Nanomaterials, 2023, 13(20): 2753.
[31] ZU F, YAN F, BAI Z, et al. The quenching of the fluorescence of carbon dots: A review on mechanisms and applications[J]. Microchimica Acta, 2017, 184(7): 1899−914.
[32] ZHANG Q, WANG R, FENG B, et al. Photoluminescence mechanism of carbon dots: Triggering high-color-purity red fluorescence emission through edge amino protonation[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6856.
[33] ZHANG H, BAI J, CHEN X, et al. Surface state-based panchromatic luminescent carbon dots[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 678: 77−87.
[34] TANG X, WANG L, YE H, et al. Biological matrix-derived carbon quantum dots: Highly selective detection of tetracyclines[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2022,

424: 113653.
[35] FAN Y, QIAO W, LONG W, et al. Detection of tetracycline antibiotics using fluorescent "Turn-off" sensor based on S, N-doped carbon quantum dots[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 274: 121033.
[36] ZHANG M, YU H, TANG X, et al. Multifunctional carbon dots-based fluorescence detection for Sudan I, Sudan IV and tetracycline hydrochloride in foods[J]. Nanomaterials, 2022, 12(23): 4166.
[37] WANG N, XU Z, ZHU B, et al. A novel functionalized nitrogen- and sulfur-co-doped nanocarbon dots for the fluorescence detection and photocatalysis degradation of tetracycline antibiotics[J]. Environmental Research, 2025, 278: 121654.
[38] LI W, LUO K, LV M, et al. Carbon quantum dots derived from marine *Eucheuma denticulatum* for the efficient and sensitive detection of tetracycline[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2024, 26(4): 70.
[39] ZHENG J, SHI X. Preparation of carbon dots of double emission polymer and its application in the detection of tetracycline, water content in edible oil, and information anti-counterfeiting[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35(27): 1811.
[40] MINH HOANG N, THI BICH NGOC N, THI LAN HUONG P, et al. Hydrogen bonding effect on pH-sensing mechanism of carbon dots[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 160: 111944.
[41] JIANG M, SUN Y, CHEN M, et al. Multicolor luminescence of carbon dots: from mechanisms to applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 153761.
[42] MOHAMMED S J, OMER K M, HAWAIZ F E. Deep insights to explain the mechanism of carbon dot formation at various reaction times using the hydrothermal technique: FT-IR, 13C-NMR, 1H-NMR, and UV-visible spectroscopic approaches[J]. RSC Advances, 2023, 13(21): 14340−14349.
[43] LI S, GOU R, ZHANG C. N-π stacking in energetic crystals[J]. Crystal Growth & Design, 2022, 22(3): 1991−2000.
[44] D C M, B M M, SAHOO S, et al. Isolating the effects of photon reabsorption in the photoluminescence spectrum of carbon dots[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 342: 126392.