

基于芒果叶碳量子点的高灵敏度、高选择性 荧光传感器用于检测 Cu^{2+} 和 Fe^{3+}

覃姣兰, 李玉千, 唐 靖, 何厚贤, 杨 扬, 袁 涛*

(百色学院广西城市水环境重点实验室, 广西 百色 533000)

摘要:本研究以芒果叶为碳源,经碳化后,以浓盐酸和 H_2O_2 为溶剂,通过简单的水热法制备了一种新型的芒果叶-碳量子点(CDs-M),并研究其荧光稳定性和对金属离子的识别能力。结果表明,CDs-M 溶液在不同 pH 体系、不同储存时间下具有良好的荧光稳定性,同时发现 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 能够显著猝灭 CDs-M 的荧光,其他金属离子对 CDs-M 荧光几乎没有影响。基于 CDs-M 的荧光猝灭程度与 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度具有良好的线性关系,提出了一种新型的荧光探针用于检测 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} ,检测限分别为 38.2、14.4 nmol/L。该方法对检测 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 具有高灵敏度和低检测限,且为芒果废弃物再利用开辟了新途径。

关键词:芒果叶碳量子点;铜离子;铁离子;荧光传感器

中图分类号:O657.3;TB383.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)09-0238-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.040

Highly sensitive and selective fluorescence sensor for the detection of Cu^{2+} and Fe^{3+} based on mango leaf carbon quantum dots

QIN Jiao-lan, LI Yu-qian, TANG Jing, HE Hou-xian, YANG yang, YUAN Tao*

(Guangxi Key Laboratory of Urban Water Environment, Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: In this study, mango leaves were used as a carbon source to synthesize novel carbon quantum dots (CDs-M) through a simple hydrothermal method involving carbonization followed by dissolution with concentrated hydrochloric acid and H_2O_2 . The fluorescence stability of CDs-M and their metal ion recognition capabilities were systematically investigated. The results demonstrated that the CDs-M solution exhibited excellent fluorescence stability in systems with varying pH values and over different storage durations. Notably, Cu^{2+} and Fe^{3+} induced significant fluorescence quenching of CDs-M, while other metal ions showed negligible effects. A linear relationship was observed between the fluorescence quenching intensity of CDs-M and the concentrations of Cu^{2+} and Fe^{3+} , enabling the development of a novel fluorescent probe for detecting these ions. The detection limits were determined to be 38.2 nmol/L for Cu^{2+} and 14.4 nmol/L for Fe^{3+} , indicating high sensitivity and low detection limits. This method not only provides a highly sensitive approach for Cu^{2+} and Fe^{3+} detection but also offers a sustainable strategy for the repurposing of mango leaf waste.

Key words: mango leaf carbon quantum dots; copper ions; iron ions; fluorescence sensor

铜、铁作为生命必需的重金属元素,在生物代谢中扮演着“动态平衡调节者”的角色^[1-2]。 Cu^{2+} 是细胞色素氧化酶和超氧化物歧化酶的核心辅因子,但过量摄入时,会引发阿尔茨海默症等疾病^[3-5]。 Fe^{3+} 作为氧载体血红蛋白的组分,其浓度异常可导致血色素沉积症;在环境中, Fe^{3+} 浓度过高会引起水体的营养化,形成“水华”现象,在人体内 Fe^{3+} 含量超标时,会导致心力衰竭、代谢紊乱等^[6-7]。因此,能够开发一种灵敏度高的传感器用于检测水体和人体内 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 含量具有重要意义。

截至目前为止,基于比色法^[8-9]、原子吸收法^[10]、电化学法^[11-12]、荧光法^[13-14]等多种分析技术已被用于构建 Cu^{2+} 或 Fe^{3+} 生物传感器。其中荧光传感器因具有灵敏度高、特异性强以及抗干扰能力优

异等显著优势而受到人们关注。例如, Lin 等^[15]设计一种基于金纳米粒子(AuNPs)的点击诱导荧光猝灭传感器,用于检测铜离子(Cu^{2+})和抗坏血酸(AA)。Liu 等^[16]使用溶剂热法一步合成了一种新型杂化镧系金属有机框架(ECTMN),用于定量检测水中的铁离子。但是这些方法存在选择性差、受环境干扰大、耗时长等缺点,所以,进一步开发新的荧光传感方法以解决这些问题仍然具有重要的研究意义。

相对于传统量子点,碳量子点具有合成简便、低毒性且多功能性等优势,可广泛应用于生物成像、光电器件、催化等领域^[17-19]。由于碳量子对 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 有较好的选择性,周稚伦等^[20]以柠檬酸为原料,用亚硫酸钠作硫掺杂剂,制备 S-CQDs(碳量子点),能有效识别 Fe^{3+} 。Ge 等^[21]以柠檬酸和六亚甲

收稿日期:2025-11-07;修回日期:2026-06-26

基金项目:百色市科学研究与技术开发计划自筹经费项目(BK20232051, BK20232047);大学生创新创业训练计划项目(202510609015, 202410609022)

作者简介:覃姣兰(1983-),女,博士,副教授,研究方向为荧光探针构建及环境污染物分析,151393800@qq.com;袁涛(1983-),男,硕士,高级实验师,研究方向为配合物合成及性质研究,通讯联系人,151393800@qq.com。

基四胺为原料,通过热处理法制备氮掺杂碳点(N-CDs)用于检测 Cu^{2+} 。但传统的碳量子点制备方法往往依赖有机溶剂,存在环境污染风险。生物质碳量子点(CQDs)不仅合成过程环保节俭,并且具有良好的稳定性^[22]。因此,开发一种绿色环保的 CQDs 用于构建一种新型的荧光传感方法检测 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 至关重要。

本文中以百色芒果叶为碳源,利用简便的一步水热法制备生物质碳量子点(CDs-M),利用荧光分光光度计测定 CDs-M 荧光强度,研究不同 pH、储存时间等环境因素对 CDs-M 的影响,探究 CDs-M 对 15 种金属离子的识别。基于 CDs-M 的荧光猝灭程度与 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度具有良好的线性关系,提出了一种新型的荧光探针用于检测 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 。

1 实验部分

1.1 主要试剂及仪器

试剂:芒果叶(采摘自校园芒果树);过氧化氢(质量分数 30%)、浓盐酸(质量分数 37%),所用的金属盐为市售硝酸盐或盐酸盐,试剂均为分析纯,使用前未经过任何处理。

仪器:F-7000 荧光分光光度计[日立科学仪器(北京)有限公司];BPG-9140A 精密鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);HP-MCE-13022(0.22 μm)水系滤膜(宁波洪谱实验科技有限公司)。

1.2 CDs-M 的制备

芒果叶碳点(CDs-M)的制备步骤如图 1 所示,具体操作如下:取芒果叶经清洗、干燥至恒重后粉碎,所得粉末过 200 目筛,将筛后粉末置于马弗炉中进行碳化处理,制得黑色炭粉。精确称取 0.101 g 上述炭粉,加入 5.0 mL 浓盐酸与 10.0 mL 质量分数 30%的 H_2O_2 ,混合均匀后转移至聚四氟乙烯反应釜,于 180℃ 条件下反应 10 h;反应结束后,待体系冷却至室温,采用 0.22 μm 水系滤膜过滤以去除不溶物,收集浅橙色上清液,加热上清液去除过量

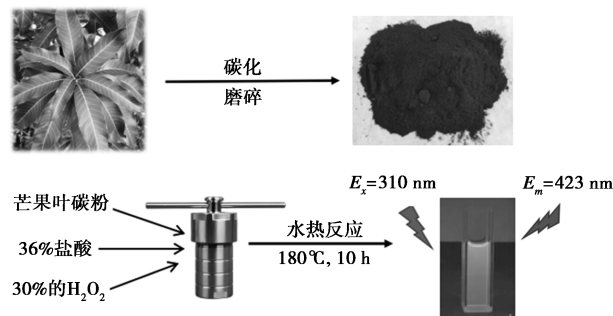


图 1 CDs-M 制备步骤

H_2O_2 ,随后加入 10.0 mL 超纯水溶解,用 HCl 溶液调节体系至中性,再经透析袋在超纯水中透析 24 h,最终获得 CDs-M 溶液,将该溶液于 4℃ 避光条件下储存,备用。

1.3 CDs-M 激发波长的选择

取 100 μL CDs-M 储备液和 3.0 mL 超纯水于比色皿中,充分混合均匀后进行光致发光性能测试。测试条件设置为:电压 580 V,狭缝宽度 5 nm;在 270~340 nm 的激发波长范围内,按照 10 nm 间隔依次测定光致发光光谱。通过分析获发射光谱与激发光谱的特征数据,确定最佳激发波长。

1.4 CDs-M 的稳定性探究

首先,考察储存时间对 CDs-M 荧光强度的影响。取 100 μL CDs-M 储备液和 3.0 mL 超纯水混合均匀,在 310 nm 的激发波长下扫描其荧光强度,每间隔 10 d 检测一次,总测试周期为 90 d,以观察实验期间 CDs-M 溶液荧光强度的变化情况。

其次,pH 作为表征溶液酸碱度的关键参数,其变化可能会对物质的结构与性质以及金属离子的检测结果产生影响。取 100 μL CDs-M 储备液于比色皿中,分别加入 3.0 mL 不同 pH 的溶液,测定不同 pH 溶液条件对 CDs-M 溶液荧光值的影响。

1.5 CDs-M 对金属离子的选择识别实验

为评估 CDs-M 在金属离子检测领域的应用潜力,本研究开展了 CDs-M 的金属离子选择性实验。在相同实验条件下,首先测定空白组荧光强度:取 100 μL CDs-M 溶液置于比色皿中,加入 3.0 mL 超纯水混匀,采用荧光分光光度计进行检测,记录空白组荧光强度数据。随后,分别向上述空白体系中加入 20 μL 浓度为 0.01 mol/L 的 15 种金属离子溶液(包括 Sn^{2+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Ni^{2+} , Cd^{2+} , K^+ , Gd^{3+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Co^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+}),混合均匀后测定各混合体系的荧光值。

1.6 CDs-M 对 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 响应时间的探究

为优化实验条件以保证数据可靠性,本实验探究 CDs-M 识别 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 的最佳反应时间。取 100 μL 的 CDs-M 溶液和 3.0 mL 超纯水混合,在与上述实验相同测试条件下测其的荧光值记为 F_0 ,随后分别加入 50 μL 0.01 mol/L 的 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 溶液,静置不同时长后测其荧光强度值。

1.7 CDs-M/ Cu^{2+} 与 CDs-M/ Fe^{3+} 体系的抗干扰实验

于 CDs-M/ Cu^{2+} 体系中,分别引入其余 14 种金属离子,探究共存离子的干扰效应。取 100 μL CDs-

M溶液和3.0 mL的超纯水混合作为空白组,测定其荧光强度;随后加入50 μL 0.01 mol/L Cu^{2+} 溶液,混合均匀并扫描荧光强度;最后加入等量的其他金属离子,混合后检测荧光变化。同理,对CDs-M/ Fe^{3+} 体系(含50 μL 0.01 mol/L Fe^{3+})进行金属抗干扰实验。

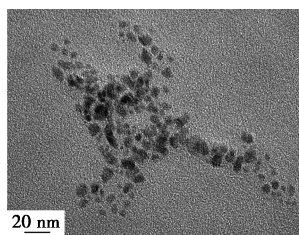
1.8 CDs-M 检测不同浓度 Cu^{2+} 、 Fe^{3+}

探究不同浓度 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 对CDs-M荧光强度的影响。在100 μL CDs-M溶液+3.0 mL超纯水体系中,逐渐增加 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的浓度,观察体系荧光变化情况。

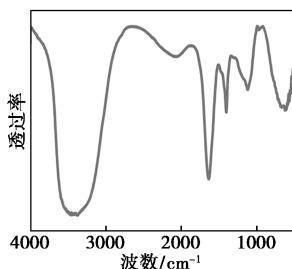
2 结果与讨论

2.1 CDs-M 的表征

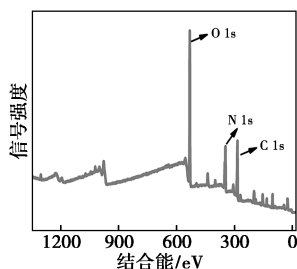
CDs-M储备液进行冷冻干燥后,再取适量CDs-M碳点用超纯水溶解,通过透射电子显微镜对CDs-M的形貌进行表征,从图2(a)看出,CDs-M呈现准球形^[23],单个CDs-M尺寸为5~10 nm,由于在溶解中未进行超声分散,CDs-M碳点未能均匀散开。利用傅里叶红外光谱对CDs-M的化学结构和表面官能团进行探究,如图2(b)所示,3 100~3 700 cm^{-1} 处有宽峰,可能为 ν_{NH_2} ,而1 140~1 090 cm^{-1} 处属于C—N的伸缩振动,CDs-M具有荧光性质的原因可能是其表面存在氨基。当 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 加入CDs-M溶液后, Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 会与其表面的氨基发生配位反应,使得荧光猝灭。X射线光电子能谱(XPS)用于进一步研究CDs-M的表面元素组成和化学价态。全元素扫描光谱结果如图2(c)所示,CDs-M的主要成



(a) TEM 图像



(b) 红外光谱图



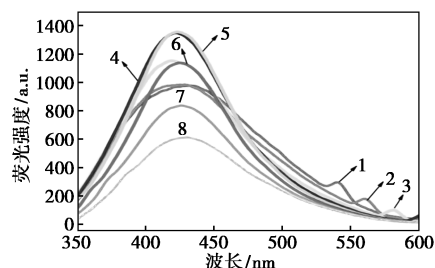
(c) XPS 全谱图

图2 CDs-M 的表征

分是C、N、O,图中3个明显的发射峰分别对应C 1s、N 1s、O 1s,可见CDs-M表面含有较多的O和N。

2.2 荧光发射波长的选择

首先研究CDs-M在不同激发波长下的发射光谱,如图3所示,CDs-M的发射光谱与激发波长有波长依赖关系。当激发波长处于270~340 nm时,CDs-M荧光强度先增大再减小,其中当激发波长为310 nm时,CDs-M在423 nm处有最强荧光发射强度。图4为CDs-M水溶液的激发和发射光谱图,以423 nm作发射峰进行CDs-M的荧光测定,结果表明CDs-M在306 nm处有最强荧光激发光谱,激发光谱与发射光谱对应的荧光值相近,即荧光强度几乎相同,因此,确定310 nm为CDs-M的最佳激发波长。



1—270 nm; 2—280 nm; 3—290 nm; 4—300 nm; 5—310 nm;
6—320 nm; 7—330 nm; 8—340 nm

图3 CDs-M在不同激发波长下的发射光谱图

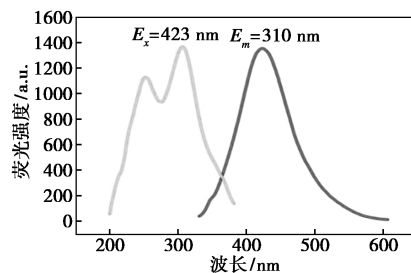


图4 CDs-M的激发和发射光谱

2.3 CDs-M 的稳定性分析

首先研究了储存时间对CDs-M溶液荧光强度的影响,如图5所示,CDs-M溶液在90 d内的荧光值变化不大,第90 d时下降了3.9%,体现了CDs-M

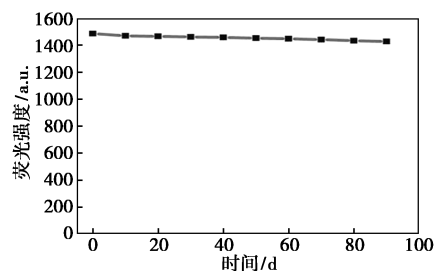


图5 储存时间对CDs-M荧光强度的影响

溶液具有优良的光稳定性,表明在一定时间内 CDs-M 荧光值几乎保持不变,有利于实验的后续开展。

接着进一步探究了不同 pH 溶液对 CDs-M 荧光强度的影响,以便选择合适的实验条件,实现 CDs-M 溶液最佳的荧光强度。如图 6 所示,不同 pH 环境对 CDs-M 溶液的荧光强度有影响,pH 在 5~11 范围时 CDs-M 荧光强度变化不明显,在强酸($\text{pH}<5$)和强碱($\text{pH}>11$)环境下该碳点荧光值减弱。考虑到金属离子在强酸环境中不易发生配位,在强碱环境中容易生成沉淀,本实验最终选择在中性水体系环境下开展研究。

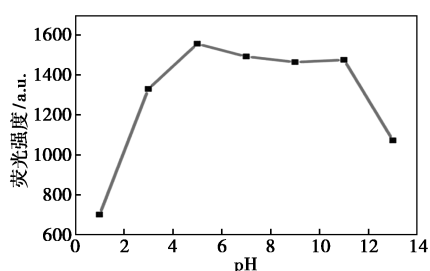


图 6 不同 pH 对 CDs-M 荧光强度的影响

2.4 可行性分析

图 7 表示 CDs-M 溶液与不同共存金属离子混合后的荧光强度。当空白组 CDs-M 溶液分别加入 Sn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 K^{+} 、 Gd^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ag^{+} 、 Co^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 后,大部分金属离子对 CDs-M 荧光有不同程度的影响作用,但体系荧光值改变幅度较小,仅 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 对 CDs-M 荧光猝灭效果较显著,荧光值分别下降了 38.72%、30.53%。结果表明,在激发波长为 310 nm 的条件下,CDs-M 溶液能特异性识别 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 。

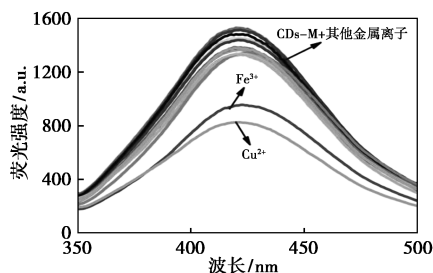
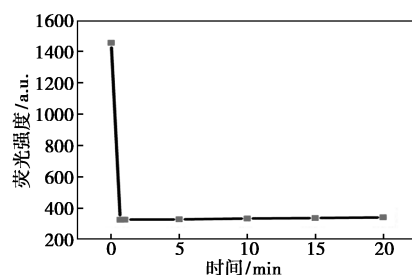


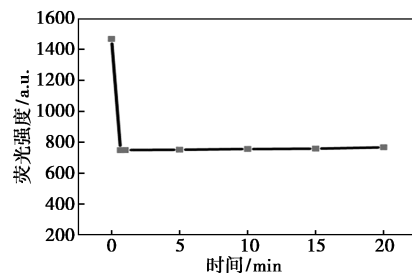
图 7 不同金属离子对 CDs-M 荧光强度的影响

2.5 CDs-M 对 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 的时间响应分析

为了展示更好的荧光检测性能,研究 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 分别与 CDs-M 反应的最佳时间。如图 8 所示,CDs-M/ Cu^{2+} 和 CDs-M/ Fe^{3+} 体系的反应时间处于 40 s 左右时,荧光值降至较低的位置,在 20 min 内荧光值几乎保持不变。所以 CDs-M 识别 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 响应时间非常短,具有操作简便的优点。



(a) CDs-M 识别 Cu^{2+} 的响应时间



(b) CDs-M 识别 Fe^{3+} 的响应时间

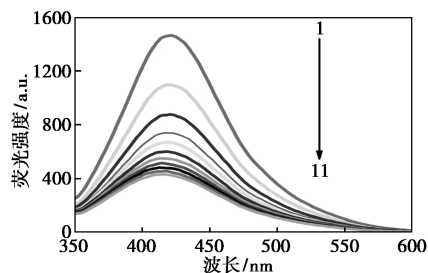
图 8 CDs-M 识别 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的响应时间

2.6 Cu^{2+} 检测性能分析

在最佳的实验条件下,将不同浓度的 Cu^{2+} 与 CDs-M 探针进行孵育,探究了该碳量子点检测分析 Cu^{2+} 的适用性。从图 9(a) 可以看出,随着 Cu^{2+} 的浓度逐渐升高,CDs-M 的荧光强度逐渐下降。当加入 Cu^{2+} 浓度达到 5.78×10^{-4} mol/L 时,CDs-M 荧光强度降到 437.1,猝灭率约为 70.37%,证明了 Cu^{2+} 对 CDs-M 的荧光具有猝灭作用。依据荧光猝灭公式 Stern-Volmer^[24]:

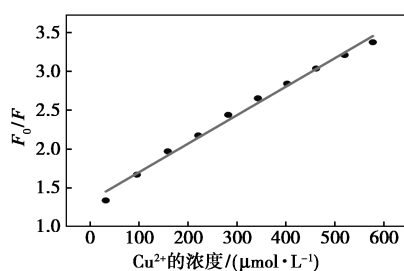
$$F_0/F = 1 + K_s [Q] \quad (1)$$

式中, F_0 为 CDs-M 空白组荧光值(无 Cu^{2+}); F 为含 Cu^{2+} 的荧光值,猝灭常数是 K_s ,由 $[Q]$ 为猝灭剂浓度(此处指 Cu^{2+} 浓度)。由公式可知, F_0/F 与 $[Q]$ 呈正比例关系,所以将 F_0/F 与 Cu^{2+} 的浓度进行作图。经过图 9(b) 分析得出 F_0/F 与 Cu^{2+} 的浓度具有良好的线性关系,线性区间为 $0.322 \times 10^{-4} \sim 5.78 \times 10^{-4}$ mol/L,线性方程为 $y = 0.00367C_{\text{Cu}^{2+}} + 1.3371$ ($R^2 = 0.992$)。根据检测限($\text{LOD} = 3\sigma/k$) 计算公式^[25],计



曲线 1~11 分别代表体系中 Cu^{2+} 浓度分别为 0、0.322、0.958、1.59、2.21、2.82、3.43、4.02、4.62、5.20、5.78 ($\times 10^{-4}$ mol/L)

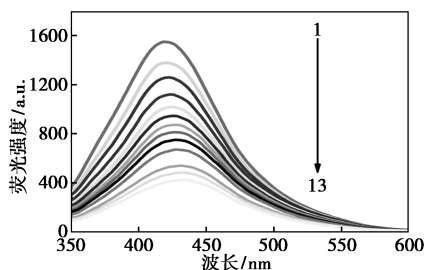
(a) 在不同 Cu^{2+} 浓度下 CDs-M 荧光响应的光谱变化

(b) F_0/F 随 Cu^{2+} 浓度变化的线性关系曲线图 9 CDs-M 对 Cu^{2+} 荧光响应滴定实验与 F_0/F 浓度线性拟合关系

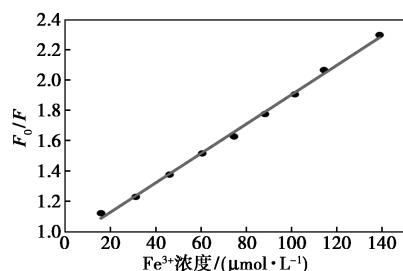
算出检测限为 38.2 nmol/L。

2.7 Fe^{3+} 检测性能分析

在最佳的实验条件下,将不同浓度的 Fe^{3+} 与 CDs-M 探针进行孵育,探究了该碳量子点检测分析 Fe^{3+} 的适用性。如图 10(a) 所示,随着 Fe^{3+} 浓度逐渐升高,CDs-M 的荧光强度逐渐下降。当体系中 Fe^{3+} 浓度为 2.25×10^{-4} mol/L 时,CDs-M 荧光值降到 427.6,荧光值下降了 72.61%,证明 Fe^{3+} 对 CDs-M 的荧光具有猝灭作用。依据公式(1),将 F_0/F 与 Fe^{3+} 浓度进行作图。经过图 10(b) 分析得出 F_0/F 与 Fe^{3+} 浓度具有良好的线性关系,线性区间为 $0.159 \times 10^{-4} \sim 1.39 \times 10^{-4}$ mol/L,线性方程为 $y = 0.009\,68C_{\text{Fe}^{3+}} + 0.939\,5$ ($R^2 = 0.997$)。根据 3σ 原则,检测限(LOD)可计算为 14.4 nmol/L。

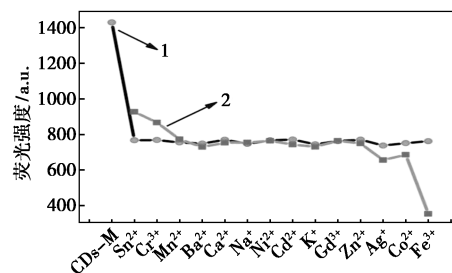


曲线 1~13 分别代表体系中 Fe^{3+} 浓度分别为 0、0.159、0.313、0.462、0.606、0.746、0.882、1.01、1.14、1.39、1.84、2.05、2.25 ($\times 10^{-4}$ mol/L)

(a) 在不同 Fe^{3+} 浓度下 CDs-M 荧光响应的光谱变化(b) F_0/F 随 Fe^{3+} 浓度变化的线性关系曲线图 10 CDs-M 对 Fe^{3+} 荧光响应滴定实验与 F_0/F 浓度线性拟合关系

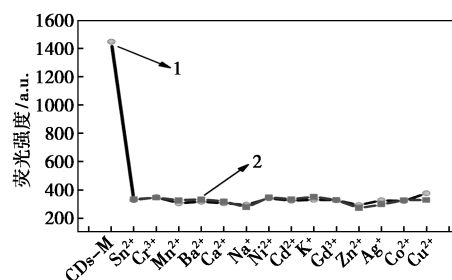
2.8 CDs-M/ Cu^{2+} 体系的抗干扰分析

为了评估 CDs-M 传感体系的特异性,探究 CDs-M 对其他金属离子的荧光响应情况。由图 11 可知,大部分金属离子对 CDs-M/ Cu^{2+} 体系没有明显干扰,而 Sn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ag^+ 和 Co^{2+} 对 CDs-M/ Cu^{2+} 体系具有较小干扰。并且加入 Fe^{3+} 之后会使 CDs-M 的荧光发生显著猝灭,可见 Fe^{3+} 对该传感体系具有较强的干扰性。因此,在用 CDs-M 识别 Cu^{2+} 时,需要屏蔽 Sn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ag^+ 、 Co^{2+} 、 Fe^{3+} 这 5 种金属离子,尤其是 Fe^{3+} 。

1—CDs-M+ Cu^{2+} ; 2—CDs-M+ Cu^{2+} + M^{n+} 图 11 共存的其他金属离子对 CDs-M 识别 Cu^{2+} 影响

2.9 CDs-M/ Fe^{3+} 体系的抗干扰分析

为了评估 CDs-M 传感体系检测 Fe^{3+} 的特异性,进一步探究了 CDs-M 检测 Fe^{3+} 是否受其他共存金属离子干扰。实验中探究了在 CDs-M 识别 Fe^{3+} 时,检测其他共存重金属离子对实验的影响。当不同的金属离子加入 CDs-M 与 Fe^{3+} 体系时,实验结果如图 12 所示,受试金属离子对 CDs-M 检测 Fe^{3+} 都没有明显干扰,可见,CDs-M 在水系环境中检测 Fe^{3+} 的方法具备较强的抗干扰能力。

1—CDs-M+ Fe^{3+} ; 2—CDs-M+ Fe^{3+} + M^{n+} 图 12 共存的其他金属离子对 CDs-M 识别 Fe^{3+} 的影响

2.10 实际水样中 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的检测

选择百色市右江河水 and 实验室自来水作为研究对象,检测 CDs-M 在实际水样中对 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 检测的可行性。右江河水在市区内滨江半岛公园河岸边

随机采样,水样经 $0.22\ \mu\text{m}$ 水系过滤膜过滤, 4°C 冰箱保存备用。自来水样直接取用实验室自来水,未经特别处理。用已知浓度的 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 进行加标回收实验(重复 3 次取平均值),分别计算 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 检测的回收率和相对标准偏差 RSD ,结果见表 1。由表 1 可知,在右江河水 and 自来水样中分别加入 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 后,回收率在 $96\% \sim 106\%$ 之间, $RSD < 5.0\%$,对实际水样中的离子检测具有较好的稳定性。

表 1 CDs-M 加标回收实验测不同水样中的 Cu^{2+} 和 Fe^{3+}

水样	Cu^{2+} 加标值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cu^{2+} 检测值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	RSD / %
右江河水	100	106.62	106.62	1.460
自来水	100	96.81	96.81	0.854

水样	Fe^{3+} 加标值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fe^{3+} 检测值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	RSD / %
右江河水	100	102.03	102.03	2.03
自来水	100	100.86	100.86	4.88

3 结论

本研究采用绿色、便捷的水热法成功制备出芒果叶碳量子点(CDs-M),并通过荧光分光光度计探究其对常见重金属离子的识别性能。结果表明该芒果叶碳点具有优良的光稳定性,在 90 d 的观测期内,荧光强度几乎无明显变化。就溶液 pH 环境而言,碳点荧光强度在 pH 为 $5 \sim 11$ 范围内保持相对稳定,而在强酸($\text{pH} < 5$)和强碱($\text{pH} > 11$)条件下则会减弱,因此本实验选择在中性水溶液环境中开展相关探究。在金属离子识别方面,该芒果叶碳点对 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 表现出较强的识别作用,检测限分别为 38.2 、 $14.4\ \mu\text{mol/L}$,体现出较高的灵敏度。综上,研究表明所制备的碳量子点在 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 的检测方面具有较大应用潜力,同时也为芒果废弃物资源的利用开辟了新途径。

参考文献

- [1] Xue P, Zhuang H, Shao S, et al. Biodegradable ionic nanoregulators for synchronous modulation of copper and iron ion homeostasis in breast cancer therapy [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 511:162041.
- [2] Yang Y S, Wang L B, Yang F, et al. A novel pyrazole-pyrazoline fluorescent probe for the detection of Cu^{2+} and Fe^{3+} in living cells[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 329:125533.
- [3] Liu S, Chen X, Qi X, et al. The role of metal ion metabolism in the pathogenesis of diabetes and associated complications[J]. Frontiers in Endocrinology, 2025, 16:1541809.
- [4] Bisaglia M, Bubacco L. Copper ions and Parkinson's disease: why is homeostasis so relevant? [J]. Biomolecules, 2020, 10(2):195.

- [5] Zhang B, Burke R. Copper homeostasis and the ubiquitin proteasome system[J]. Metallomics, 2023, 15(3):mfad010.
- [6] Camaschella C, Pagani A. Mendelian inheritance of anemia due to disturbed iron homeostasis[C]. Seminars in Hematology. WB Saunders, 2021, 58(3):175-181.
- [7] Kayani K F, Shatery O B A, Mustafa M S, et al. Environmentally sustainable synthesis of whey-based carbon dots for ferric ion detection in human serum and water samples: evaluating the greenness of the method[J]. RSC Advances, 2024, 14(8):5012-5021.
- [8] Wang Y D, Xian Y L. Colorimetric sensing strategy through the coordination chemistry between ascorbic acid 2-phosphate and copper ions[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(18):7202-7211.
- [9] 孙长霞, 苏逸菲, 汤梦怡, 等. 双波长等吸收点紫外-可见分光光度法测定口蘑中微量铜(II)离子的研究[J]. 分析试验室, 2019, 38(12):1427-1431.
- [10] 吴东明, 李怡, 陈耀华, 等. 溶解性有机质对溶液中铁离子检测的影响及原因分析[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7):1441-1448.
- [11] Wang R, Mo Z, Pei H, et al. Fluorometric/electrochemical dual-channel sensors based on carbon quantum dots for the detection and information anti-counterfeiting [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2022, 432:114118.
- [12] Bai Z, Li P, Fu H, et al. Fluorescence and electrochemical integrated dual-signal sensor for the detection of iron ions in water based on an ITO substrate[J]. Analyst, 2022, 147(20):4489-4499.
- [13] Zhou W, Hu Z, Wei J, et al. A ratiometric fluorescent probe based on PCN-224 for rapid and ultrasensitive detection of copper ions [J]. Composites Communications, 2022, 33:101221.
- [14] Du B, Li Q, Huang K, et al. A quinoline-fluoran hybrid fluorescent probe for selectively and sensitively sensing copper ions and fluorescence imaging application [J]. Journal of Molecular Structure, 2023, 1271:134015.
- [15] Lin S, Liu S, Dai G, et al. A click-induced fluorescence-quenching sensor based on gold nanoparticles for detection of copper(II) ion and ascorbic acid[J]. Dyes and Pigments, 2021, 195:109726.
- [16] Liu J, Zhao C, Yang J, et al. A novel hybrid lanthanide metal-organic frameworks based on porphyrin for rapid detection of iron ions [J]. Analytica Chimica Acta, 2024, 1319:342961.
- [17] Giordano M G, Seganti G, Bartoli M, et al. An overview on carbon quantum dots optical and chemical features[J]. Molecules, 2023, 28(6):2772.
- [18] Kong J, Wei Y, Zhou F, et al. Carbon quantum dots: properties, preparation, and applications[J]. Molecules, 2024, 29(9):2002.
- [19] Liu Y, Chen J, Xu Z, et al. Detection of multiple metal ions in water with a fluorescence sensor based on carbon quantum dots assisted by stepwise prediction and machine learning [J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(6):3415-3420.
- [20] 周稚伦, 江林, 韩梦鑫, 等. 碳量子点的制备及在水体中 Fe^{3+} 离子的传感研究[J]. 化学工程与装备, 2024, (7):4-7.
- [21] Ge J, Shen Y, Wang W, et al. N-doped carbon dots for highly sensitive and selective sensing of copper ion and sulfide anion in lake water[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(2):105081.
- [22] Wang C, Shi H, Yang M, et al. Facile synthesis of novel carbon quantum dots from biomass waste for highly sensitive detection of iron ions[J]. Materials Research Bulletin, 2020, 124:110730.
- [23] 刘玉莹, 汪溪远, 梅傲雪. 生物质碳量子点的绿色制备及对 Cu^{2+} 的检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(1):248-253.
- [24] 许怡飞, 刘璐, 石士考, 等. 柿子叶制备碳量子点的光谱性质及对 Fe^{3+} 的荧光探针[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(8):2418-2422.
- [25] 程琳琳, 严康利, 王一凡, 等. 白花蛇舌草碳量子点的制备及其检测铁离子和抗菌活性研究[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(7):1988-1995. ■