

玉竹碳量子点的制备及植物中 Cr(VI) 检测

张丽珍¹, 曹翠辉^{1*}, 张利娜¹, 杨冬业², 黄夕洋³

(1. 桂林师范学院化学与生命健康学院, 广西 桂林 541199; 2. 桂林医科大学, 广西 桂林 541199;
3. 中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006)

摘要:以玉竹叶片为生物质碳源, 采用绿色简便的一步水热法制备了具有优异荧光性能的碳量子点(P-CQDs)。材料表征显示 P-CQDs 呈椭圆形/球形, 平均粒径 2.6 nm, 表面富含 C—O、O—H 等亲水官能团, 在 381/454 nm 处具有强荧光响应。该碳量子点对 Cr(VI) 表现出高选择性荧光猝灭响应, 检测限低至 0.135 μmol/L, 显著低于饮用水安全限值(50 μmol/L)。机理研究表明, Cr(VI) 与表面官能团的配位作用导致荧光猝灭。实际应用中, P-CQDs 在商陆、青葙等植物样品中 Cr(VI) 检测的回收率达 92.7%~101.8%, RSD≤1.5%, 为富集植物中 Cr(VI) 检测提供了可持续的检测方案。

关键词:玉竹; 碳量子点; 水热合成; Cr(VI) 检测

中图分类号: O657.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)06-0268-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.042

Preparation of polygonatum odoratum carbon quantum dots and detection of Cr(VI) in plants

ZHANG Li-zhen¹, CAO Cui-hui^{1*}, ZHANG Li-na¹, YANG Dong-ye², HUANG Xi-yang³

(1. College of Chemistry and Life Health, Guilin Normal University, Guilin 541199, China;

2. Guilin Medical University, Guilin 541199, China;

3. Guangxi Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China)

Abstract: The leaves of *Polygonatum odoratum* were used as the biomass carbon source, and carbon quantum dots (P-CQDs) with excellent fluorescent properties were synthesized via a green and simple one-step hydrothermal method. Material characterization reveals that P-CQDs exhibit an ellipsoidal/spherical shape, with an average particle size of 2.6 nm. The surface is rich in hydrophilic functional groups such as C—O and O—H, and shows a strong fluorescent response at 381/454 nm. These carbon dots demonstrate a highly selective fluorescent quenching response to Cr(VI), with a detection limit as low as 0.135 μmol/L, which is significantly lower than the safety limit for drinking water (50 μmol/L). Mechanistic studies indicate that the coordination between Cr(VI) and surface functional groups leads to fluorescence quenching. In practical applications, when used for the detection of Cr(VI) in plant samples such as *Phytolacca acinosa*, *Celosia argentea*, the recovery rates of P-CQDs range from 92.7% to 101.8%, with a relative standard deviation (RSD) ≤ 1.5%. This study proposes an environmentally sustainable approach for Cr(VI) detection in plant tissues.

Key words: *Polygonatum odoratum*; carbon quantum dots; hydrothermal synthesis; Cr(VI) detection

环境中 Cr(VI) 毒性为 Cr(III) 的百倍, 易通过水、土壤进入植物中, 甚至通过食物链, 进而引发皮肤损伤、心脏器质性病变、生长发育迟缓、遗传物质损伤乃至癌变等健康风险^[1-2]。因此, 实现环境中 Cr(VI) 的精准定量检测, 对生态保护及公共健康具有重要意义。当前 Cr(VI) 的主流检测方法包括电感耦合等离子体发射光谱法^[3]、原子吸收光谱法^[4]和分光光度法^[5]等。然而这些技术普遍依赖昂贵的精密仪器, 且样品前处理流程烦琐复杂。鉴于此, 开发兼具快速响应、高灵敏度、操作简便及成本优势的检测新方法成为研究热点^[6]。

荧光传感技术凭借响应速度快、检测限低、操作便捷等特点, 在重金属离子检测领域展现出良好前景。其中, 碳量子点(CQDs)作为新兴碳基发光纳米材料, 凭借优异的光学特性、无毒性及高水溶性, 被广泛应用于生物医学、催化材料、光电器件等领域^[7-8]。目前碳量子点的合成主要分为 2 类: 自上而下策略(含电化学氧化、激光烧蚀等)和自下而上策略(如水热合成、微波辅助合成)^[9-11]。已有研究利用草、羊毛等生物质制备 CQDs 用于铬检测, 但基于玉竹的碳点合成尚未见报道^[12-14]。

本研究以玉竹为原料, 通过一步水热法合成了

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2026-04-06

基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AD23026310); 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室项目(FPRU2020-4); 桂林师范高等专科学校高层次人才项目(GCC202207)

作者简介: 张丽珍(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向为纳米材料、植物细胞工程, xiaozhang446@163.com; 曹翠辉(1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为纳米 MOFs 材料、植物生化工程, 通讯联系人, caocuihui122@163.com。

水溶性碳量子点(P-CQDs)。采用透射电镜、X射线光电子能谱和红外光谱对P-CQDs的形貌特征和结构组成进行了分析,并利用紫外光谱和荧光光谱测试了P-CQDs的光学性能。P-CQDs具有良好的水溶分散性和稳定的荧光性能,其荧光可被Cr(VI)选择性猝灭。因此,可以作为一种高效、绿色的荧光探针应用于Cr(VI)检测。

1 材料与试剂

1.1 材料

玉竹枝条和叶片,采集于中国科学院广西植物研究所。

1.2 仪器与试剂

JEOL 2100F透射电子显微镜(TEM,美国FEI公司);TD-300型X射线衍射仪(XRD,荷兰Nalytical公司);Perkin-Elmer LS-55傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR,英国PerkinElmer公司);ESCALAB 250Xi X射线光电子能谱仪(XPS,美国赛默飞科技公司);HZK-FA210S电子天平(华志电子科技有限公司);FW135中药粉碎机(天津泰斯特仪器公司);MODEL:ZF-5便携式紫外分析仪(上海金鹏分析仪器公司);F-4600荧光分光光度计(日本日立公司);PECORD® 200 PLUS紫外-可见分光光度计(德国耶拿分析仪器公司)。

氯化钠(NaCl)、氯化镍(NiCl)、氯化镉(CdCl₂)、氯化镁(MgCl₂)、氯化铝(AlCl₃)、氯化锌(ZnCl₂)、氯化钾(KCl)、氯化锰(II)(MnCl₂)、氯化锰(IV)(MnCl₄)、氯化钡(BaCl₂)、氯化钙(CaCl₂)、氯化铜(II)(CuCl₂)、氯化银(AgCl)、氯化钴(II)(CoCl₂)、氯化铁(III)(FeCl₃)、氯化铁(II)(FeCl₂)、氯化铬(III)(CrCl₃)和氯化铬(VI)(CrCl₆)等(分析纯,上海阿拉丁生化试剂公司)。

2 实验方法

2.1 P-CQDs的制备

用蒸馏水清洗玉竹叶子,自然风干,用粉碎机粉碎并过筛,得到所需粉末。准确称取3.0 g粉末放入烧杯中,加入30 mL蒸馏水,转移至磁力搅拌器上搅拌30 min。样品充分混合后,倒入50 mL聚四氟乙烯(PTFE)反应容器中,放入恒温干燥箱中,在250℃下反应8 h。反应完成后,反应容器自然冷却至室温,用0.22 μm滤膜过滤样品,得到黄褐色的纯玉竹碳量子溶液(P-CQDs)。将P-CQDs冷冻干燥,得到固体粉末样品,以备后续实验使用。制备过

程如图1所示。

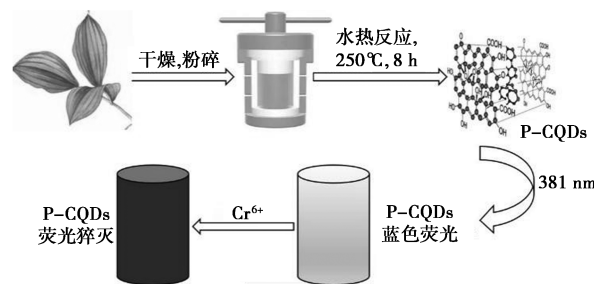


图1 P-CQDs制备及Cr⁶⁺检测示意图

2.2 P-CQDs的光学表征

紫外荧光分析测试:用移液枪将过滤后的黄褐色纯P-CQDs溶液转移到透明小玻璃瓶中,然后将其置于便携式紫外分析仪的紫外灯下,观察不同稀释倍数下P-CQDs的荧光亮度,确定最佳稀释倍数,并通过拍照记录数据。

紫外-可见分光光谱测试:取50 μL P-CQDs(1 mg/mL)样品置于1 cm石英比色皿中,然后加入2 000 μL蒸馏水并混合均匀。以蒸馏水为参比物质,在紫外-可见分光光度计中进行光谱扫描,波长扫描范围为190~1 100 nm。根据样品产生的吸收光谱中吸收峰的形状、强度和位置,分析确定P-CQDs的结构和组成。

荧光分光光谱测试:取50 μL P-CQDs(1 mg/mL)溶液转移到比色皿中,加入1 950 μL蒸馏水稀释并混合均匀,置于荧光分光光度计中,设置电压为525 V,狭缝宽度为5.0 nm,扫描范围为200~900 nm。进行多次光谱扫描,确定P-CQDs的最佳发射和激发波长。

2.3 P-CQDs性能测定

不同pH对P-CQDs荧光强度的影响:研究P-CQDs在不同pH条件下的荧光特性。取50 μL P-CQDs(1 mg/mL)溶液置于比色皿中,分别加入1 950 μL pH范围为1~12的磷酸盐缓冲液(PBS),并混合均匀。基于P-CQDs的最佳激发波长,探索不同pH对样品荧光强度的影响。每次测试重复3次。

P-CQDs稳定性测试:取50 μL P-CQDs(1 mg/mL)溶液置于比色皿中,加入1 950 μL蒸馏水稀释并混合均匀,在最佳激发波长下,每隔10 min进行一次荧光扫描,确定不同时间荧光照射对P-CQDs荧光强度的影响,每组样品平行测试3次。

P-CQDs对不同离子的选择性测试:将50 μL P-CQDs(1 mg/mL)溶液转移到比色皿中,加入

1 950 μL 蒸馏水进行稀释,然后分别加入 1 μL 0.1 mol/L 的 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Ag^{+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{4+} 、 K^{+} 和 Cr^{6+} 离子溶液,每次加入后充分混合。在最佳激发波长下进行荧光扫描,根据不同金属离子对 P-CQDs 荧光强度的影响,研究 P-CQDs 对金属离子的选择性,每组样品平行测试 3 次。

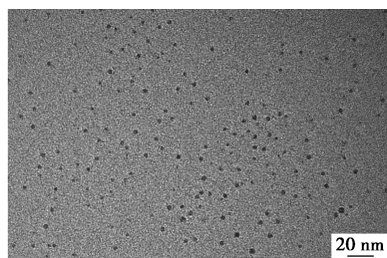
P-CQDs 对铬离子检测:取 50 μL P-CQDs (1 mg/mL) 溶液置于比色皿中,加入 1 950 μL 蒸馏水稀释并混合均匀,然后逐渐加入 0.1 mol/L 的 Cr^{6+} 溶液并充分混合,使用最佳激发波长进行扫描。每添加 1 次 Cr^{6+} 溶液测试 1 次,直到比色皿中的溶液荧光完全猝灭,每组样品平行测试 3 次。

P-CQDs 对植物中铬离子的测试:将商陆、青葙和李氏禾等植物洗干净后,置于烘箱中 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,再 75 $^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干,至质量恒重。然后分别称取烘干样品 0.2 g,磨碎后用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解,用 0.22 μm 微孔滤膜过滤后进行检测。配制 20 $\mu\text{mol/L}$ 的 Cr(VI) 用作标准溶液进行回收实验,每组样品平行测试 3 次。

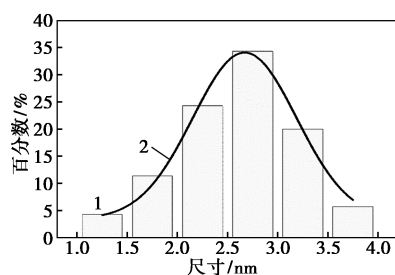
3 结果与分析

3.1 P-CQDs 的结构与形貌表征

为了表征制备的 P-CQDs 的形貌与结构,采用透射电子显微镜 (TEM)、X 射线衍射和拉曼光谱 (Raman) 进行测试分析 (图 2)。TEM 图像 [图 2 (a)] 揭示了 P-CQDs 呈现椭圆形或球形纳米颗粒,几乎没有聚集的迹象。图 2 (b) 呈现了 P-CQDs 粒度分布范围在 1.2~3.8 nm,通过高斯拟合曲线显示 P-CQDs 的平均粒径为 2.6 nm。XRD 图谱 [图 2 (c)] 中,P-CQDs 在 22 $^{\circ}$ ~25 $^{\circ}$ 之间出现了一个宽衍射峰,与文献中报道的石墨碳结构的 (002) 晶面特征一致^[15]。拉曼光谱 [图 2 (d)] 中,P-CQDs 在 1 383 cm^{-1} (D 带) 和 1 580 cm^{-1} (G 带) 处显示出 2 个特征峰,分别对应于碳结构中的 sp^3 杂化轨道的无定形碳和 sp^2 杂化轨道的二维六方晶格碳原子振动^[16]。G 带比 D 带对比更强烈,表明所制备的 P-CQDs 具有良好的石墨碳结构^[17]。

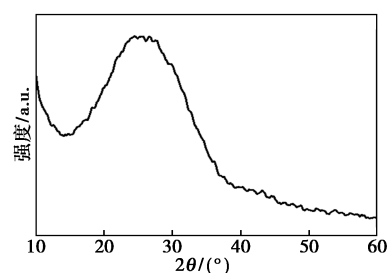


(a) TEM 图

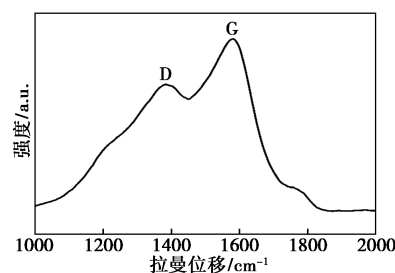


1—尺寸分布;2—高斯拟合

(b) 尺寸分布示意图



(c) XRD 图谱



(d) 拉曼光谱

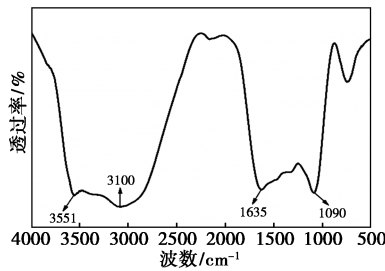
图 2 P-CQDs 的形貌与结构表征图

3.2 P-CQDs 的 FT-IR 和 XPS 表征

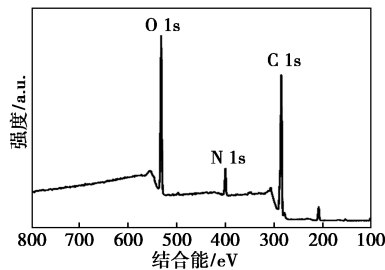
利用傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 分别分析 P-CQDs 的化学组成和表面官能团。FT-IR 光谱 [图 3 (a)] 展现了 P-CQDs 在 3 100~3 551 cm^{-1} 处显示出一个宽的 N—H/O—H 伸缩振动峰,而 C—O 和 C=O 伸缩振动分别在 1 090、1 635 cm^{-1} 处显现^[18]。这表明碳量子点的表面充满了含氧官能团,如 C—O、C=O 和 O—H,增强了 P-CQDs 的水溶性。

XPS [图 3 (b)] 呈现了 P-CQDs 3 个主要特征峰对应于 C 1s (286.4 eV)、N 1s (401.3 eV) 和 O 1s (533.2 eV)。由表 1 可知,样品表面由 3 种元素组成:C、N 和 O,其中碳占 64.58%,氮占 8.21%,氧占 27.20%。表明 P-CQDs 具有相对简单的含氧官能团阵列。高分辨 C 1s [图 3 (c)] 显示了 P-CQDs 在 288.6、286.4、285.1 eV 处有 3 个拟合峰,分别对应 C—N、C—C 和 C—O 键。高分辨 N 1s 光谱 [图 3 (d)] 显示了在 401.3、399.4 eV 处的 2 个拟合峰,分

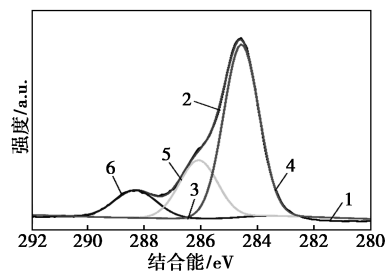
别归属于氨基氮和吡啶氮。高分辨 O 1s 光谱[图 3 (e)]显示了在 533.2、531.5 eV 处 2 个拟合峰,分别



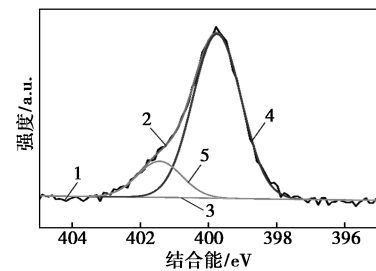
(a) FT-IR 光谱



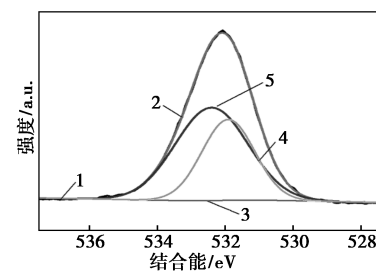
(b) XPS 全谱



1—测试谱;2—拟合线;3—基线;4—CO;5—CC;6—CN
(c) C 1s 光谱



1—测试谱;2—拟合线;3—基线;4—吡啶氮;5—氨基氮
(d) N 1s 光谱



1—测试谱;2—拟合线;3—基线;4—OH;5—CO
(e) O 1s 光谱

图 3 P-CQDs 的组成和结构表征

表 1 P-CQDs 表面各元素的相对含量

%	
C	N
64.58	8.21
O	
27.2	

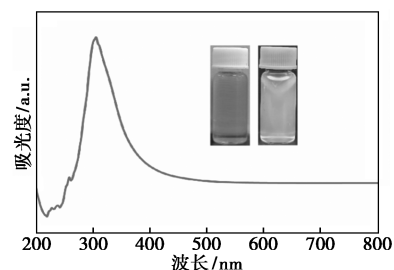
对应于 C—O 和—OH 键^[19]。XPS 光谱与 FT-IR 光谱一致,证实了 P-CQDs 表面存在丰富的富氧官能团,这些亲水基团的存在可能使 P-CQDs 在传感领域具有重要的应用潜力。

3.3 P-CQDs 的光学性能表征

为了深入研究 P-CQDs 的光学性能,进行了紫外-可见 (UV-Vis) 吸收光谱测试。图 4(a) 插图(左)显示了 P-CQDs 在自然光下呈现出透明的浅黄色,表明了其具有单色光分散性。当 P-CQDs 在紫外灯(365 nm)下时,呈现出鲜艳的蓝紫色发光[图 4(a)插图(右)],表明其具有良好的发光能力。UV-Vis 光谱[图 4(a)]显示 P-CQDs 在 220~300 nm 波长范围内具有明显的特征吸收区域,在 300 nm 处达到峰值,吸收带延伸到可见光区域。这种现象可能是由于 P-CQDs 结构中 C—O 的 n-π* 吸收所致^[20]。

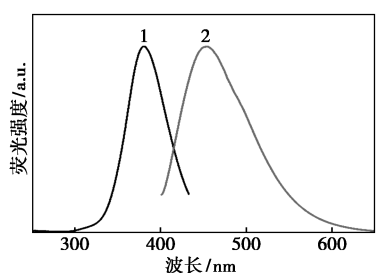
通过荧光光谱分析进一步探究 P-CQDs 的光学特性。如图 4(b)所示,P-CQDs 的最佳激发和发射波长分别为 381、453 nm。图 4(c)的 P-CQDs 荧光光谱显示,发射波长从 400 nm 缓慢移动到 600 nm,荧光发射峰发生了红移,荧光强度先上升后下降。当激发波长超过 381 nm 时,P-CQDs 的荧光强度开始减弱,表明激发波长依赖性可能与碳量子点表面的缺陷状态有关^[21]。因此,选择 381 nm 作为后续实验测试的激发波长。

为了探究不同 pH 对 P-CQDs 样品荧光强度的影响,在 381 nm 的最佳激发波长下,测试不同 pH 条件下 P-CQDs 荧光强度。如图 4(d)所示,pH 在 1~10 范围内,随着 pH 增加,荧光强度逐渐增加,在 pH=10 时,荧光强度达到顶峰,在 pH=12 时,荧光

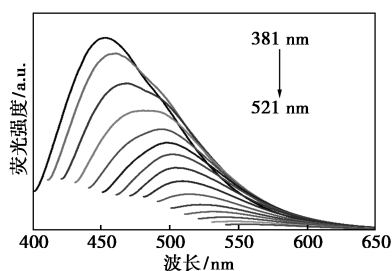


(a) P-CQDs 的紫外-可见光谱

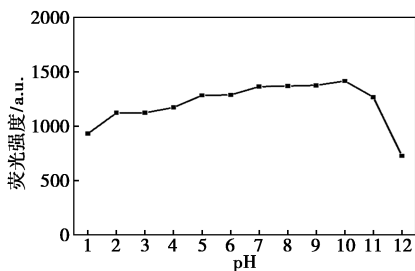
(插图:左为在日光下照片,右为在紫外灯下照片)



(b) P-CQDs 激发射光谱



(c) 不同激发波长激发的荧光发射光谱



(d) 不同 pH 溶液对 P-CQDs 荧光强度的影响

图 4 P-CQDs 的光学性质表征

强度才明显下降,表明 P-CQDs 强大的耐酸碱能力和宽广的 pH 稳定性范围^[22]。

为了评估 P-CQDs 的光学稳定性,将样品置于氙灯下连续照射 180 min,在 381 nm 的最佳激发波长下,测试不同照射时间的荧光发射光谱。如图 5(a)所示,随着照射时间的推移,P-CQDs 的荧光强度基本保持稳定,没有明显的猝灭现象,表明 P-CQDs 具有较好的荧光稳定性。

3.4 不同金属离子对 P-CQDs 荧光强度的影响

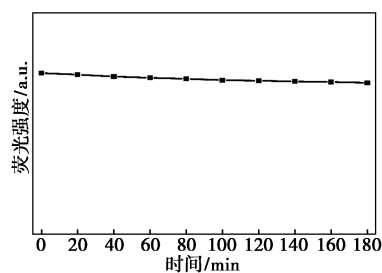
为了探究不同金属离子对 P-CQDs 荧光强度的影响,在 381 nm 波长激发下,监测 P-CQDs 暴露于各种金属离子时的荧光强度。如图 5(b)所示,当存在 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Ag^+ 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{4+} 离子时,P-CQDs 的荧光强度变化很小,荧光强度相对稳定。在 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 离子中,P-CQDs 的荧光强度稍微波动。当存在 Cr^{6+} 时,P-CQDs 表现出明显的荧光猝灭效应,表明 Cr^{6+} 对 P-CQDs 具有强烈的荧光猝灭作用。荧光强度的变化可能和

Cr^{6+} 与 P-CQDs 表面富氧官能团的络合有关,表明 P-CQDs 对 Cr^{6+} 具有显著的选择性响应^[23]。

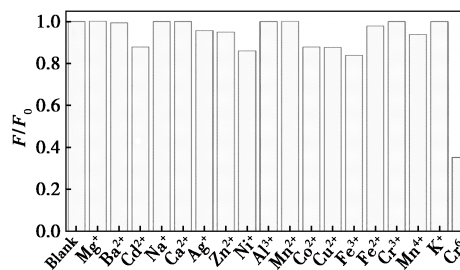
3.5 离子选择性和 Cr^{6+} 检测机制

基于 P-CQDs 对 Cr^{6+} 的特异性响应,考察了不同浓度的 Cr^{6+} 对 P-CQDs 荧光强度的影响。如图 5(c)所示,随着 Cr^{6+} 浓度的增加,P-CQDs 的荧光强度逐渐减弱,但没有发生红移或峰形变化,表明了 P-CQDs 对 Cr^{6+} 响应具有灵敏度高及适合检测的特性,P-CQDs 可以作为荧光探针检测 Cr^{6+} 。图 5(d)呈现了相对荧光强度 F/F_0 与 Cr^{6+} 浓度之间的线性关系(F_0 和 F 分别为加入 Cr^{6+} 前后 P-CQDs 的荧光强度)。P-CQDs 的相对荧光强度 F/F_0 与 Cr^{6+} 浓度在 0~100 $\mu\text{mol/L}$ 范围内呈现出良好的线性关系。线性回归方程为 $F/F_0 = -0.021 1c + 2.267 8$,相关系数为 $R^2 = 0.991 5$ 。基于 $X + 3SD$ 计算的 LOD 为 0.135 $\mu\text{mol/L}$,其中 X 是平均值, SD 是标准偏差。该 LOD 明显低于饮用水中 Cr^{6+} 的允许浓度,该阈值设定为 50 $\mu\text{mol/L}$,表明 P-CQDs 对 Cr^{6+} 识别具有较高的灵敏度。

P-CQDs 对 Cr^{6+} 的选择性荧光猝灭[图 5(b)]突出了它们作为复杂基质中 Cr^{6+} 特定探针的潜力。在测试的金属离子中,只有 Cr^{6+} 引起明显的荧光猝灭,对 Cr^{6+} 的响应最为明显,在 100 $\mu\text{mol/L}$ 时猝灭效率超过 80% [图 5(c)]。这种选择性可归因于 Cr^{6+} 的强氧化性及其对 P-CQDs 表面含氧官能团(如羟基和羧基)的亲合力,正如 FT-IR 和 XPS 分析所证实的。 Cr^{6+} 与 P-CQDs 表面官能团之间的配



(a) 不同激发时间对 P-CQDs 荧光强度的影响



(b) 不同金属离子对 P-CQDs 荧光强度的影响

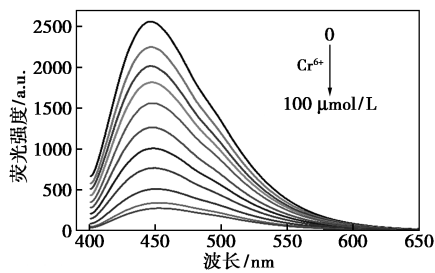
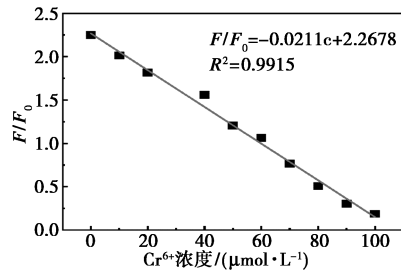
(c) 不同浓度 Cr^{6+} 对 P-CQDs 荧光强度的影响(d) P-CQDs 荧光强度比值 F/F_0 与 Cr^{6+} 浓度之间的线性关系图

图 5 P-CQDs 的离子选择性表征图

位可能诱导电子从 P-CQDs 转移到 Cr^{6+} , 通过静态猝灭机制导致荧光猝灭^[23]。相比之下, 其他电荷密度或氧化还原活性较低的金属离子(如 Mg^{2+} 、 Na^+) 表现出最小的相互作用, 表明了 P-CQDs 对 Cr^{6+} 的特异性。

3.6 实际应用检测

P-CQDs 在植物样品中 Cr^{6+} 检测(表 2)展示了它们在环境监测中的实际效用。高回收率(95.9%~101.8%)和低 RSD 值($\leq 1.5\%$)表明良好的准确性和重现性, 可与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等先进分析技术相媲美, 且具有简单、经济和便携的优势^[24-25]。此外, 使用草本生物物质的绿色合成方法符合可持续化学原则, 与基于合成化学的探针相比, 最大限度地减少了环境影响。与已报道的基于 CQDs 的 Cr^{6+} 传感器相比, P-CQDs 在检测限和选择性方面表现出具有竞争力的性能^[26]。

表 2 植物样品中 Cr^{6+} 的测定及加标回收实验结果 ($n=3$)

样品	测量值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	添加值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	RSD/ %
商陆	0	20	19.18	95.9	1.1
青葙	0	20	19.62	98.1	1.2
李氏禾	0	20	20.36	101.8	1.5

4 结论

本研究以玉竹为原料, 通过一步水热法合成了水溶性碳量子点(P-CQDs)。采用透射电镜、X 射

线光电子能谱和红外光谱对 P-CQDs 的形貌特征和结构组成进行了分析, 并利用紫外光谱和荧光光谱测试了 P-CQDs 的光学性能。发现 P-CQDs 具有良好的水溶分散性和稳定的荧光性能, 在较宽的 pH 范围内, 保持较稳定的荧光强度, 同时 P-CQDs 对实验室条件下和实际植物样品中的 Cr^{6+} 均表现出特异的选择响应性。因此, 可以将其作为一种高效、绿色的荧光探针应用于 Cr^{6+} 检测。

参考文献

- [1] Liu N, Zhang Y Q, Huang J Y, *et al.* Multifunctional CDs as photoinitiators: Detection and reduction for Cr(VI) [J]. *J Ind Eng Chem*, 2024, 130: 297.
- [2] Guo W W, Lei Y Y, Yu X X, *et al.* Ratiometric fluorometric and colorimetric dual-signal sensing platform for rapid analyzing Cr(VI), Ag(I) and HCHO in food and environmental samples based on N-doped carbon nanodots and o-phenylenediamine [J]. *Food Chem*, 2024, 437: 137945.
- [3] Spanu D, Monticelli D, Binda G, *et al.* One-minute highly selective Cr(VI) determination at ultra-trace levels: An ICP-MS method based on the on-line trapping of Cr(III) [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 412: 125280.
- [4] Khazaeli S, Nezamabadi N, Rabani M, *et al.* A new functionalized resin and its application in flame atomic absorption spectrophotometric determination of trace amounts of heavy metal ions after solid phase extraction in water samples [J]. *Microchem J*, 2013, 106: 147.
- [5] Agrawal K, Patel K S, Shrivastava K, *et al.* On-site determination of tin in geological and water samples using novel organic reagent with iodide [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 164(1): 95.
- [6] Zhang D D, Jiang W Z, Zhao Y P, *et al.* Carbon dots rooted PVDF membrane for fluorescence detection of heavy metal ions [J]. *Appl Surf Sci*, 2019, 494: 635.
- [7] Atchudan R, Edison T N J I, Aseer K R, *et al.* Highly fluorescent nitrogen-doped carbon dots derived from Phyllanthus acidus utilized as a fluorescent probe for label-free selective detection of Fe^{3+} ions, live cell imaging and fluorescent ink [J]. *Biosens Bioelectron*, 2018, 99: 303-311.
- [8] Farshbaf M, Davaran S, Rahimi F, *et al.* Carbon quantum dots: recent progresses on synthesis, surface modification and applications [J]. *Artif Cell Nanomed B*, 2018, 46: 1331-1348.
- [9] Wang J J, Feng M, Zhan B. Advances in preparation of graphene quantum dots [J]. *Prog Chem*, 2013, 25: 86-94.
- [10] Cao L, Anilkumar P, Wang X, *et al.* Reverse Stern-Volmer behavior for luminescence quenching in carbon nanoparticles [J]. *Can J Chem*, 2011, 89: 104-109.
- [11] Salinas-Castillo A, Ariza-Avidad M, Pritz C, *et al.* Carbon dots for copper detection with down and upconversion fluorescent properties

- as excitation sources [J]. Chem Commun; Camb, 2013, 49: 1103–1105.
- [12] Liu S, Tian Q, Wang L, *et al.* Hydrothermal treatment of grass: a low-cost, green route to nitrogen-doped, carbon-rich, photoluminescent polymer nanodots as an effective fluorescent sensing platform for label-free detection of Cu(II) ions [J]. Adv Mater, 2012, 24: 2037–2041.
- [13] Wang L, Bi Y D, Hou J, *et al.* Facile, green and clean one step synthesis of carbon dots from wool: application as a sensor for glyphosate detection based on the inner filter effect [J]. Talanta, 2016, 160: 268–275.
- [14] Liu W, Diao H P, Chang H H, *et al.* Green synthesis of carbon dots from rose-heart radish and application for Fe³⁺ detection and cell imaging [J]. Sensors Actuators B-Chem, 2017, 241: 190–198.
- [15] Chen B B, Liu Z X, Deng W C, *et al.* A large-scale synthesis of photoluminescent carbon quantum dots: Self-exothermic reaction driving-formed nanocrystalline core at room temperature [J]. Green Chem, 2016, 18: 5127–5132.
- [16] Li W S, Huang S P, Wen H Y, *et al.* Fluorescent recognition and selective detection of nitrite ions with carbon quantum dots [J]. Anal Bioanal Chem, 2020, 412: 993–1002.
- [17] Zu F L, Yan F Y, Bai Z J, *et al.* The quenching of the fluorescence of carbon dots: A review on mechanisms and applications [J]. Microchim Acta, 2017, 184: 1899–1914.
- [18] Wang L, Wen S J, Su S, *et al.* Progress on the luminescence mechanism and application of carbon quantum dots based on biomass synthesis [J]. RSC Adv, 2023, 13: 19173–19194.
- [19] Lyn B, Guo X, Gao D G, *et al.* Research progress on the improvement of the stability of perovskite quantum dots [J]. Chem Ind Eng Pro, 2021, 40: 247–258.
- [20] Zangeneh K K, Pandikumar A, Jayabal S, *et al.* Amalgamation based optical and colorimetric sensing of mercury(II) ions with silver@graphene oxide nanocomposite materials [J]. Microchim Acta, 2016, 183: 369–377.
- [21] Behera P K, Sahu D, Jali B R, *et al.* A Simple method for synthesizing nitrogen-doped carbon quantum dots for fluorescent “turn off” mercury(II) ion sensing [J]. J Fluoresc, 2024, 3: 42–52.
- [22] Zhao B X, Xu H, Zhang K L, *et al.* Visible-light-driven CQDs/TiO₂ photocatalytic simultaneous removal of Cr(VI) and organics; Cooperative reaction, kinetics and mechanism [J]. Chemosphere, 2022, 307: 135897.
- [23] Chauhan P, Chaudhary S, Kumar R. Biogenic approach for fabricating biocompatible carbon dots and their application in colorimetric and fluorometric sensing of lead ion [J]. J Clean Prod, 2021, 279: 123639–123653.
- [24] Bai L J, Su X H, Feng J P, *et al.* Preparation of sugarcane bagasse biochar/nano-iron oxide composite and mechanism of its Cr(VI) adsorption in water [J]. J Clean Prod, 2021, 320: 128723.
- [25] Sahu U K, Ji W W, Liang Y, *et al.* Mechanism enhanced active biochar support magnetic nano zero-valent iron for efficient removal of Cr(VI) from simulated polluted water [J]. J Environ Chem Eng, 2022, 10: 107077.
- [26] Zhao S J, Lan M H, Zhu X Y, *et al.* Green synthesis of bifunctional fluorescent carbon dots from garlic for cellular imaging and free radical scavenging [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7: 17054–17060. ■

陕煤集团煤化工 CCUS 项目投产

近日,陕煤集团所属陕西煤业新型能源科技股份有限公司投资建设的二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)一体化项目一期工程,完成 72 h 联合调试,全工艺流程顺利贯通并产出纯度 99.3% 以上的合格液态二氧化碳,标志着项目正式具备试生产条件。

该项目是关中地区目前单体规模最大的煤化工尾气 CCUS 一体化项目,总规划产能 30 万 t/a。该项目依

托园区企业产生的高浓度二氧化碳气源,采用国内先进压缩液化精制工艺,实行全程密闭安全生产管控,具备低耗高效、安全可控的突出优势。一期工程投运后,年可处理二氧化碳原料气 16 万 t,实现碳减排 15.7 万 t,推动工业二氧化碳从“单纯废气减排”向“资源化回收、循环化利用”转型升级,为同类型煤化工企业低碳改造提供可复制、可推广的范例。(陕煤集团)