

李浩佳,贺诗华,曹艺泽,等. 以碳量子点为荧光信号的生物传感器构建及其在金银花 Pb²⁺检测中的应用 [J].轻工学报,2025,40(2):72-79.

LI H J, HE S H, CAO Y Z, et al. The construction of biosensor with carbon quantum dots as fluorescence signal and its application in detecting Pb^{2+} in honeysuckle[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(2):72–79. DOI:10.12187/2025.02.008

以碳量子点为荧光信号的生物传感器构建 及其在金银花 Pb²⁺ 检测中的应用

李浩佳1,贺诗华1,曹艺泽1,郭西玉1,朱由余1,赵玮钦1,2,黄淳1

1. 西安科技大学 化学与化工学院,陕西 西安 710054;

2. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西 西安 710054

摘要:以葡萄柚皮为原料,采用水热法制备碳量子点(G-CQDs),并以此构建一种用于金银花中 Pb²⁺检测的 荧光生物传感器。利用圆二色光谱、透射电子显微镜、紫外-可见吸收光谱、荧光光谱等对 G-CODs 的形貌和 光学性能进行表征,优化该荧光生物传感器的实验条件,并对其检测性能进行分析。结果表明:G-CQDs 呈 球形且分布均匀,平均粒径为 2.41 nm,最佳激发波长为 350 nm;荧光生物传感器的适宜实验条件为 Hemin 浓度 60 μmol/L、反应时间 30 min、反应温度 25 ℃、K⁺浓度 10 mmol/L 和 pH 值为 6.5;与其他金属离子 (Ag⁺、Zn²⁺、Cd²⁺、Cu²⁺和 Hg²⁺)相比,荧光生物传感器对 Pb²⁺的选择性更高,且其 Δ荧光强度随着 Pb²⁺质量浓 度的增加而增强,在 0.1~5.0 μg/mL 线性范围内,二者线性关系良好, R^2 为 0.998 0,检测限为 0.063 9 μg/ mL;与传统方法相比,该荧光生物传感器的准确性良好,且具有绿色环保、经济有效、操作简单等优势。 关键词:荧光生物传感器;碳量子点;DNAzyme;G-四链体;金银花;Pb²⁺

中图分类号:TS207.3 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2025)02-0072-08

0 引言

金银花,学名为忍冬,是忍冬科植物属多年生 半常绿灌木^[1]。作为一种传统的药食同源中药材, 金银花具有抗菌、抗病毒、抗炎、调节肠道菌群、抗 肿瘤等多种药理作用^[2]。随着现代工业的发展,农 耕土地受到重金属污染的问题日益加剧,这不仅削 弱了金银花的药效,还会导致重金属离子在金银花 中累积,进而可能进入人体引发健康风险^[3-4],特别 是 Pb²⁺的摄入,会阻碍人体血红蛋白的合成,甚至 会对神经系统、心血管系统和肾脏造成损害[5-6]。

目前,最常用的原子吸收光谱、电感耦合等离 子体质谱等 Pb²⁺检测方法仍然是传统仪器分析 法,这些检测方法不仅操作复杂,且仪器昂贵^[7-8]。 随着生物技术与纳米材料的快速发展,许多创新 的检测方法开始被用于 Pb²⁺检测。DNAzyme 是一 种可以催化多种化学反应的 DNA 分子,在特定金 属离子存在的情况下,可通过催化底物链的裂解 实现信号放大^[9-10]。Y.Y.Li 等^[11]设计了一种基 于 AuNPs-DNAzyme 荧光探针和 CRISPR-Cas12a

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52102051)

收稿日期:2024-03-06;修回日期:2024-05-22;出版日期:2025-04-15

作者简介:李浩佳(1999—),女,河南省郑州市人,西安科技大学硕士研究生,主要研究方向为分析化学。E-mail:lhj16369909@ 163.com

通信作者:赵玮钦(1981—),男,甘肃省武威市人,西安科技大学讲师,博士,主要研究方向为生物传感器。E-mail:wqzhao@xust.edu.cn

基因编辑蛋白的 Pb²⁺荧光传感器,其 Pb²⁺检出限 达 24 pmol/L。A. Ravikumar 等^[12]以 SYBER Green I 和亚甲基蓝作为荧光信号,设计了一种基于 DNAzyme 的 Pb²⁺生物传感器,其 Pb²⁺检出限为 5 nmol/L^[13]。上述方法虽然对 Pb²⁺具有较高的特 异性和灵敏度,但高成本的荧光材料限制了其应 用范围。

以葡萄柚皮为原料制备的生物质碳材料是一种绿色、环保的新型功能材料。X.Z.Huo等^[14]利用天然葡萄柚皮和尿素作为原料,成功制备了碳量子点(G-CQDs),可用于治疗人体微生物感染。P.Xiao等^[15]使用从葡萄柚皮中提取的碳量子点,开发了一种简单且实用的光致发光免疫分析方法。然而,目前关于葡萄柚皮衍生碳量子点在荧光生物传感器领域的研究还鲜见报道。鉴于此,本研究拟以葡萄柚皮为原料,采用水热法制备 G-CQDs,构建用于检测金银花中 Pb²⁺的荧光生物传感器,利用圆二色光谱、透射电子显微镜、紫外-可见吸收光谱、荧光光谱等手段对 G-CQDs 的结构和荧光发射性能进行分析,优化荧光生物传感器的实验条件,并对其检测性能进行分析,以期为保障中药材产品品质与安全提供一种新型的检测方法。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

链霉亲和素包被的磁珠(MBs,粒径为1μm), 苏州海狸生物医学工程有限公司;血红素(Hemin), 合肥巴斯夫生物科技有限公司;二甲基亚砜(分析 纯),天津市富宇精细化工有限公司;Pb²⁺标准溶液 (质量浓度为 0.1 g/L),上海易恩化学技术有限公 司;DNA 序列(引物序列见表 1),生工生物工程(上 海)股份有限公司;磷酸缓冲盐溶液(PBS 缓冲液)、 4-羟乙基哌嗪乙磺酸(HEPES 缓冲液),武汉普诺 赛生物科技有限公司;Tris-EDTA 缓冲液(TE 缓冲 液),武汉安道麦新能源有限公司;Pb²⁺、Ag⁺、Zn²⁺、 Cd²⁺、Cu²⁺和 Hg²⁺样品溶液,广州和为医药科技有限 公司;葡萄柚,西安永辉超市;普通金银花,西安老 百姓大药房;被 Pb²⁺污染的金银花(生长土壤中含 Pb²⁺),西安科技大学保存。

1.2 主要仪器与设备

TU-1950型紫外-可见光分光光度(UV-Vis) 计,北京普析通用仪器有限责任公司;Duetta型荧光 光谱仪(AFS),堀场(中国)贸易有限公司;Applied Photophysics Chirascan V100型圆二色光谱(CD)仪, 英国应用光物理公司;FEI Tecnai G2 F20型透射电 子显微镜(TEM),美国 FEI 公司;101型电热恒温鼓 风干燥箱,青岛明博环保科技有限公司;Agilent 7850型电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)仪,安捷 伦科技(中国)有限公司;MARS 6型微波消解 (MDS)仪,美国 CEM 公司;BHW-09C型赶酸仪,上 海博通化学科技有限公司。

表1 引物序列

Table 1 Primer sequences

	-
名称	序列
Pb-enzyme	5'-GCAGTCTCTGAAGTAGC- GCCGCCGTATAGTGATGAC-3'
Pb-substrate	Biontin-5'-GTCATCACTATrAG- GAAGAGACTGATGTTGA-3'
发夹探针	5'-CCACCCATAGACTTCAACATCAGTCTA- TAAGTATGGGTGGGTGGGTGGGT-3'

注:rA 表示一个腺苷核糖核苷酸和裂解位点。

1.3 实验方法

1.3.1 Pb-MBs 和 G-CQDs 制备 Pb-MBs 制备:将 一定量的 DNA 序列溶解在 300 μL TE 缓冲液(Tris-HCl 浓度 10 mmol/L, EDTA 浓度 1 mmol/L, pH 值 为 8.0)中,使 DNA 浓度为 100 μmol/L, 于 90 ℃ 水 浴锅中保持 15 min 后,冷却至室温;将 1 mL MBs 置 于 2 mL PBS 缓冲液(NaCl 浓度 0.137 mol/L, KCl 浓度 0.002 7 mol/L, Na₂HPO₄ 浓度 0.01 mol/L, KH₂PO₄ 浓度 0.001 8 mol/L)中浸泡 3 h,用蒸馏水 洗涤 3 次后,收集 1 mL MBs 溶液;于室温条件下,向 MBs 溶液中加入 10 μL Pb-substrate(100 μmol/L)溶 液后, 摇床振荡混合 30 min, 再加入 10 μL Pbenzyme 溶液(100 μmol/L), 摇床振荡混合 30 min, 制得 Pb-MBs。

G-CQDs 制备:将一定量的新鲜葡萄柚皮洗净, 于 220 ℃电热恒温鼓风干燥箱中干燥 3 h,研磨后过 100 目筛;取 0.5 g 葡萄柚皮粉末溶于 25 mL 去离子 水中,超声 30 min,于 200 ℃ 聚四氟乙烯高压反应 釜中加热 12 h 后,经 0.22 µm 滤膜过滤,将所得滤 液置于4℃冰箱中保存,备用。

1.3.2 金银花样品处理 将一定量的新鲜金银花 用超纯水冲洗干净,置于 60 ℃烘箱中干燥后,研磨 过 100 目筛。称取 0.5 g 金银花粉末置于聚四氟乙 烯消解罐中,加入 7 mL HNO₃(质量分数为 68%)溶 液,浸泡过夜。将金银花浸泡液置于 MDS 仪中,设 置微波消解程序为:5 min 升温至 120 ℃,保持 2 min;4 min 升温至 150 ℃,保持 3 min;6 min 升温 至 190 ℃,保持 25 min。微波消解完全后,赶酸至 1 mL,再用超纯水定容至 25 mL,备用。

1.3.3 荧光生物传感器设计原理 本研究设计的 Pb²⁺荧光生物传感器工作原理见图 1。由图 1 可知, 由葡萄柚皮制备的 G-CQDs 与 Hemin 结合可形成 Hemin/G-CQDs 复合物,其中 G-CQDs 的荧光可以被 Hemin 猝灭。生物素修饰的 Pb-substrate 通过亲和 素-生物素相互作用与链霉亲和素包被的磁珠结合, 再与 Pb-enzyme 配对,形成 Pb-MBs。在 Pb²⁺存在的 情况下,Pb-MBs 识别 Pb²⁺后激活 Pb-enzyme 的催化 活性,导致 Pb-substrate 裂解并释放出一段单链 DNA; 该单链 DNA 与发夹探针结合后,会改变后者结构,使 富含鸟嘌呤(G)的碱基核苷酸序列形成 G-四链 体^[16];G-四链体进一步与 Hemin/G-CQDs 复合物中 的 Hemin 结合,恢复 G-CQDs 被 Hemin 猝灭的荧光。

1.3.4 荧光生物传感器检测过程 取 50 μL 处理 后的金银花样品(20 mg/mL)与 50 μL Pb-MBs 混 合,在 50 μL HEPES 缓冲液(10 mmol/L)中室温孵 育 30 min。将上述溶液靠近磁架放置 10 min 后,取 50 μL 上清液置于离心管中,加入 5 μL 发夹探针



图1 荧光生物传感器设计原理图

Fig. 1 The design principle diagram of fluorescence biosensor

(100 μmol/L)溶液,于 25 ℃条件下孵育 30 min,加 入 100 μL G-CQDs 溶液(含 60 μmol/L Hemin),再 加入 345 μL PBS 缓冲液,直到混合溶液的最终体积 达到 500 μL。反应 30 min 后,记录 Hemin/G-CQDs 的荧光强度。

1.3.5 G-CQDs 形貌和光学性能表征 采用 CD 仪 分析 G-CQDs 的光学特性,采集范围为 230 ~ 320 nm;利用 TEM 观测 G-CQDs 的形貌和粒径分 布,工作电压为 200 kV;采用 UV-Vis 检测 G-CQDs 在不同波长下的吸收光谱,采集范围为 200 ~ 500 nm;采用 AFS 仪测试 G-CQDs 的荧光发射光谱, 激发波长为 370~680 nm。

1.3.6 荧光生物传感器实验条件优化 对加入 Hemin/G-CQDs 后的反应时间(10 min、20 min、 30 min、40 min、50 min)、反应温度(20 ℃、25 ℃、 30 ℃、35 ℃、40 ℃)、K⁺浓度(5 mmol/L、10 mmol/ L、15 mmol/L、20 mmol/L、25 mmol/L)和缓冲液 pH 值(5.5、6.0、6.5、7.0、7.5)进行优化。优化某一条 件时,其他条件均不变,且为最优条件。检测结果 以 Δ 荧光强度表示。

1.3.7 荧光生物传感器选择性和灵敏度测定选择性测定:取 50 μL 含有 4 μg/mL Pb²⁺、Ag⁺、Zn²⁺、Cd²⁺、Cu²⁺和 Hg²⁺的 6 种样品溶液,分别与 50 μL Pb-MBs 混合,其余步骤同 1.3.4。

灵敏度测定:取 50 μL 含不同质量浓度(0~ 5 μg/mL)Pb²⁺的样品溶液与 50 μL Pb-MBs 混合, 其余步骤同 1.3.4。

1.3.8 荧光生物传感器准确性测试 以蒸馏水为 空白对照,普通金银花、被 Pb²⁺污染的金银花为实 际样品,利用本实验构建的荧光生物传感器检测实 际样品中的 Pb²⁺质量浓度,并通过 ICP-MS 法验证 该荧光生物传感器的准确性。

1.4 数据处理

每个样品均重复进行 3 次实验,将获得的数据 去除异常值,结果取平均值。采用 Origin 2018 软件 处理数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 可行性分析

图 2 为不同样品溶液的 CD 图和 AFS 图。由图

2a)可知,当 Pb²⁺存在时,在 264 nm 处和 244 nm 处 分别出现一个正峰和一个负峰,这表明在 Pb²⁺ + Pb-MBs+发夹探针+Hemin/G-CQDs 体系中存在平 行 G-四链体^[17]。由图 2b)可知, Pb²⁺ +Pb-MBs+发 夹探针+Hemin/G-CQDs 体系的荧光强度明显高于 另外两个体系。这是因为当 Pb²⁺存在时,在发夹探 针的帮助下,能够产生 G-四链体,而 G-四链体与 Hemin 结合后, G-CQDs 的荧光得以恢复。

图 3 为 G-CQDs 光学性能和形貌表征。由图 3a)可知,G-CQDs 呈球形且分布均匀;G-CQDs 的平 均粒径为2.41 nm,尺寸分布在1~5 nm之间。由图 3b)可知,在269 nm 处出现了较宽的吸收峰,归属 C == C 键的 $\pi - \pi^*$ 跃 迁^[18]; 实验过程中发现, G-CQDs 水溶液在日光下呈淡黄色,在 365 nm 紫外 激发波长下呈亮蓝色。由图 3c)可知,当激发波长 从 300 nm 增大至 420 nm 时, AFS 的峰值先升高后 降低,且当激发波长为 350 nm 时,AFS 的峰值最高。 研究^[19]发现, Hemin 可以通过 π—π 键堆积在 G-CQDs 表面, 使 G-CQDs 的荧光猝灭。由图 3d) 可 知,G-CQDs 的荧光强度随 Hemin 浓度(0~60 µmol/ L)的增加而降低,且二者呈良好的线性相关(R^2 = 0.9909)。当 Hemin 浓度大于 60 µmol/L 时,超出 线性范围, Hemin 浓度与 G-CODs 荧光强度的降低 不成比例,影响后续实验 G-CQDs 荧光强度恢复的 计算。因此,选择 60 µmol/L 作为 Hemin 的工 作浓度。

2.2 实验条件优化结果分析

图 4 为荧光生物传感器实验条件优化结果。 由图 4a)可知,传感器的荧光强度随反应时间的延 长而增强,直至 30 min 时趋于平缓,生成的 Gquadruplex 充分与 Hemin 结合,荧光变化趋于稳 定,因此选择 30 min 作为反应时间较适宜;由图 4b)可知,传感器的荧光强度随着反应温度的升高 呈先升高后降低的趋势,当反应温度为 25 ℃时, 荧光强度最高,这可能是因为较高的反应温度会 抑制 G-四链体/Hemin 复合物的活性,因此选择 25 ℃作为反应温度较适宜;由图 4c)和 d)可知, 传感器的荧光强度随 K⁺浓度和 pH 值的变化趋势 与反应温度基本一致,因此适宜的 K⁺浓度和 pH 值

2.3 选择性和灵敏度分析

图 5 为荧光生物传感器对不同金属离子的选择 性检测结果。由图 5 可知,与其他金属离子相比,该 荧光生物传感器对 Pb²⁺的选择性更高。图 6 为不同 质量浓度 Pb²⁺对荧光生物传感器荧光强度的影响。 由图 6 可知,荧光生物传感器的 Δ荧光强度随着 Pb²⁺质量浓度的增加而增强,在 0.1~5.0 μg/mL 范 围内,二者呈良好的线性关系,*R*² 为 0.998 0,检出 限为 0.063 9 μg/mL,结合表 2 本文方法与常用 Pb²⁺检测方法的比较结果可知,与其他常用 Pb²⁺检 测方法相比,该荧光生物传感器对 Pb²⁺的灵敏 度更高。



图 2 不同样品溶液的 CD 图和 AFS 图

· 75 ·









2.4 准确性分析

表 3 为荧光生物传感器和 ICP-MS 法对实际样品的检测结果。由表 3 可知,该荧光生物传感器的检测值与 ICP-MS 法的检测值较接近,表明荧光生物传感器的准确性良好,适用于金银花中 Pb²⁺的检测。与ICP-MS 法相比,本文构建的荧光生物传感器绿色环保、经济有效、操作简单,具有更为显著的优势。

3 结论

本文以葡萄柚皮为原料,采用水热法制备碳量 子点(G-CQDs)并对其进行表征分析。基于 Pb²⁺能特 异性激活 DNA(Pb-enzyme)及 G-四链体与 Hemin 结 合使 Hemin/G-CQDs 荧光恢复的原理,构建一种检测 金银花中 Pb²⁺的荧光生物传感器,优化其实验条件, 并对其检测性能进行分析。结果表明:该荧光传感器的适宜实验条件为 Hemin 浓度 60 μ g/mL、反应时间 30 min、反应温度 25 °C、K⁺浓度 10 mmol/L 和 pH 值 6.5,在此条件下,荧光生物传感器具有良好的选择性 和灵敏度,其线性范围为 0.1~5.0 μ g/mL, R^2 为 0.998 0,检出限为 0.063 9 μ g/mL,符合实际分析要 求,且实际样品分析再次验证了该荧光生物传感器的 准确性。

与传统检测方法相比,本文构建的荧光生物传 感器凭借其绿色环保、经济有效、高选择性、操作简 单等优势,在金银花 Pb²⁺检测和以葡萄柚皮衍生的 生物质材料开发方面表现出一定的应用价值,有望 为金银花产品品质与安全控制提供技术保障,进而 促进中药材产业的持续健康发展。





Fig. 4 Optimization results of experimental conditions for fluorescent biosensors





of Pb^{2+} on the fluorescence intensity of fluorescent biosensors

表 2 本文方法与常用 Pb²⁺检测方法的比较结果 Table 2 The comparison results of the method in this paper with commonly used Pb²⁺ detection methods

检测方法	检测范围/ (µg•mL⁻¹)	检出限/ (µg⋅mL ⁻¹)	参考文献
电致化学发光法	20.72~2072.00	0.009 1	[20]
比色法	2. 72~16. 52	0.2217	[21]
荧光法	0.1~5.0	0.063 9	本文

表 3 荧光生物传感器和 ICP-MS 法对 实际样品的检测结果

Table 3 Measurement results of actual samples using fluorescent biosensors and ICP-MS method

样已	荧光生物传感器	ICP-MS 法
个十月日	检测值/(μg⋅mL ⁻¹)	检测值/(μg•mL ⁻¹)
蒸馏水		0.002 3
普通金银花	0.498 3±0.016 4	0.521 1±0.001 5
被 Pb ²⁺ 污染的 金银花	2.674 1±0.023 2	2. 510 4±0. 001 1
••• ••• ••• •••		

注:一表示未检出。

参考文献:

- 王懿文,谢纯良,朱作华,等.黑曲霉固态发酵对金银 花多酚类物质释放及增效作用[J].食品研究与开发, 2023,44(22):23-29.
- [2] 王林,元丽娇,闵小莹,等.金银花及其提取物在畜禽 生产中的营养调节作用及应用前景[J]. 饲料研究, 2024(7):136-140.
- [3] 张松,刘晓媛,吴迪.6种药食同源中药材重金属及健 康风险评价[J].贵州师范大学学报(自然科学版), 2020,38(6):33-38.
- [4] MOHANRAJ P, BHUVANESHWARI S, SREELEKSHMIM S, et al. Bio-modified carbon paste electrode for the detection of Pb(II) ions in wastewater[J]. Water Scienge and Technology, 2019,80(11);2058-2066.
- [5] ZORER ÇELEBI, EKIN Z, SELÇUK ZORER Ö. Accumulation and tolerance of Pb in Some Bioenergy crops[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(2):591-596.
- [6] LIU X Q, LI D D, LI J G, et al. A novel MnOximpregnated on peanut shells derived biochar for high adsorption performance of Pb(II) and Cd(II):Behavior and mechanism [J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 34:102323.
- [7] FERNÁNDEZ Z H, VALCÁRCEL ROJAS L A, ÁLVAREZ A M, et al. Application of cold vapor-atomic absorption (CVAAS) spectrophotometry and Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry methods for cadmium, mercury and lead analyses of fish samples. Validation of the method of CVAAS [J]. Food Control,

2015,48:37-42.

- [8] DASILVA E, DAVID A M, PEJOVI-MILI A. The quantification of total lead in lipstick specimens by total reflection X-ray fluorescence spectrometry [J]. X-Ray Spectrometry, 2015, 44(6):451-457.
- [9] BORGGRÄFE J, VICTOR J, ROSENBACH H, et al. Time-resolved structural analysis of an RNA-cleaving DNA catalyst[J]. Nature, 2022, 601(7891):144-149.
- [10] YUN W, CAI D Z, JIANG J L, et al. Enzyme-free and label-free ultra-sensitive colorimetric detection of Pb²⁺ using molecular beacon and DNAzyme based amplification strategy [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 80: 187–193.
- [11] LI Y Y, LI H D, FANG W K, et al. Amplification of the fluorescence signal with clustered regularly interspaced short palindromic repeats-Cas12a based on Au nanoparticle-DNAzyme probe and on-site detection of Pb²⁺ via the photonic crystal chip [J]. ACS Sensors, 2022,7(5):1572-1580.
- [12] RAVIKUMAR A, PANNEERSELVAM P, RADHAKRISHNAN K, et al. DNAzyme based amplified biosensor on ultrasensitive fluorescence detection of Pb (II) ions from aqueous system [J]. Journal of Fluorescence, 2017, 27(6):2101-2109.
- [13] DOLATI S, RAMEZANI M, ABNOUS K, et al. Recent nucleic acid based biosensors for Pb²⁺ detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 246:864–878.
- [14] HUO X Z, HE Y X, MA S Q, et al. Green synthesis of carbon dots from grapefruit and its fluorescence enhancement [J]. Journal of Nanomaterials, 2020, 2020: 8601307.
- [15] XIAO P, KE Y, LU J, et al. Photoluminescence immunoassay based on grapefruit peel-extracted carbon quantum dots encapsulated into silica nanospheres for p53 protein [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 139: 109-116.
- [16] 伍永梅,朱肖倩,方娇,等.基于改进G-四链体DNA 酶的电化学适配体传感器构建及卡那霉素高灵敏检测
 [J].轻工学报,2023,38(6):62-69.
- [17] DONG J T, O'HAGAN M P, WILLNER I. Switchable and dynamic G-quadruplexes and their applications [J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(17):7631-7661.
- [18] ZHENG X T, ANANTHANARAYANAN A, LUO K Q, et al. Glowing graphene quantum dots and carbon dots: Properties, syntheses, and biological applications [J]. Small,2015,11(14):1620-1636.
- [19] KUMARI B, KUMARI R, DAS P. Visual detection of G-quadruplex with mushroom derived highly fluorescent carbon quantum dots [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2018, 157:137-144.
- [20] ARHAM Z, KURNIAWAN K, ANHUSADAR L. High

electrochemical response of TiO₂@ C-dots nanocomposites as electrode modifiers for Pb (II) detection [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, 160:107466. [21] LI X H, ZHAO C X, LIN L L. Plasma-based instant synthesis of functionalized gold nanoparticles for colorimetric detection of lead ions [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 260:117849.

The construction of biosensor with carbon quantum dots as fluorescence signal and its application in detecting Pb²⁺ in honeysuckle

LI Haojia¹, HE Shihua¹, CAO Yize¹, GUO Xiyu¹, ZHU Youyu¹, ZHAO Weiqin^{1,2}, HUANG Chun¹

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land

and Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: Carbon quantum dots (G-CQDs) were prepared by hydrothermal method using grapefruit peel and fluorescence biosensor for Pb²⁺ detection was constructed in honeysuckle. The morphology, structure and optical properties of G-CODs were characterized by circular dichroism spectroscopy, transmission electron microscopy, ultraviolet-visible absorption spectroscopy and fluorescence spectroscopy. The experimental conditions of the fluorescent biosensor were optimized and its detection performance was analyzed. The results showed that the G-CQDs were spherical and uniformly distributed. The average particle size was 2. 41 nm, and the optimal excitation wavelength was 350 nm. The suitable experimental conditions for the fluorescence biosensor were as follows: Hemin concentration of 60 μ mol/L, reaction time of 30 min, reaction temperature of 25 °C, K⁺ concentration of 10 mmol/L and pH value of 6. 5. Compared with other metal ions (Ag⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺ and Hg²⁺), the fluorescence biosensor had higher selectivity for Pb²⁺, and its fluorescence intensity increased with the increase of Pb²⁺ mass concentration. In the linear range of 0. 1 ~ 5. 0 μ g/mL. Compared with the conventional method (ICP-MS method), the fluorescence biosensor had good accuracy, and had the advantages of green environmental protection, economical and effective, simple operation and so on.

Key words: fluorescent biosensor; carbon quantum dot; DNAzyme; G-quadruplex; honeysuckle; Pb2+

[责任编辑:王晓波]