

# 青花椒碳点荧光探针的制备及其对Cu<sup>2+</sup>的检测

易 鸣, 丁子幸, 马硕含, 沈颂章, 林美玉\*

海军军医大学军事药学国家级实验教学示范中心, 上海

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年4月26日; 发布日期: 2026年5月8日

## 摘 要

以青花椒为原料制备了荧光碳量子点(CDs), 在荧光激发和发射波长分别为315 nm、425 nm处, 荧光碳量子点可以用于样品中Cu<sup>2+</sup>的分析检测, 在pH = 7, 温度25°C条件下, 随着lg [Cu<sup>2+</sup>]的增加, CDs的荧光强度呈下降趋势, 其线性回归方程为 $\Delta F = 121.41 \lg c + 205.10$ , 线性范围为0.1 mmol/L~500 mmol/L, 相关系数 $r = 0.9971$ 。将此方法用于样品中Cu<sup>2+</sup>含量的测定, 回收率为99%~101%。

## 关键词

青花椒, 碳点, 荧光检测, Cu<sup>2+</sup>

# Preparation of Fluorescent Carbon Dots from *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. and Its Detection of Cu<sup>2+</sup>

Ming Yi, Zixing Ding, Shuohan Ma, Songzhang Shen, Meiyu Lin\*

National Demonstration Center for Experimental Military Pharmacy Education, Naval Medical University, Shanghai

Received: April 6, 2026; accepted: April 26, 2026; published: May 8, 2026

## Abstract

Fluorescent carbon dots (CDs) were prepared from *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. Under the excitation and emission wavelengths of 315 nm and 425 nm respectively, the CDs can be used for the analysis and detection of Cu<sup>2+</sup> in samples. At pH 7 and 25°C, the increase in lg [Cu<sup>2+</sup>] is directly proportional to the increase in the fluorescence intensity of CDs. The linear regression equation is  $\Delta F = 121.41 \lg c + 205.10$ , with a linear range of 0.1 mmol/L to 500 mmol/L and a correlation

\*通讯作者。

coefficient  $r = 0.9971$ . This method was applied to the determination of  $\text{Cu}^{2+}$  content in samples, with a recovery rate of 99% to 101%.

## Keywords

*Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc., Carbon Dots, Fluorescence Detection,  $\text{Cu}^{2+}$

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铜离子( $\text{Cu}^{2+}$ )是环境中常见的重金属离子,但过量累积会对水体和生态系统造成破坏,还可能通过食物链危害人体健康,因此建立灵敏、快速的  $\text{Cu}^{2+}$ 检测方法具有重要的环境监测与公共卫生意义。目前铜离子检测多依赖于分光光度测定法[1]、原子吸收光谱法[2]、电感耦合等离子体-原子发射光谱法[3]、电感耦合等离子体-质谱法等传统方法[4][5],以上方法虽灵敏度较高,但仪器昂贵、操作繁琐复杂,易受到共存离子干扰,且存在一定的环保与健康风险,难以广泛应用。

碳量子点(Carbon Dots, CDs)又称为碳纳米点、碳纳米晶和碳点[6]-[9],作为一类新型荧光碳基纳米材料,其具有光学性能优异、毒性低、生物相容性好及稳定性强等特点[10]-[12],在生物医药及分析检测领域展现出巨大的应用潜力[13]-[16]。中药碳点(Traditional Chinese Medicine-Carbon Dots, TCM-CDs)是以中药为碳源制备的 1~100 nm 尺寸的球形纳米碳基材料,相较于化学合成碳点,其展现出成本低廉、环境友好、制备工艺简单等优势[17]-[20]。本研究以青花椒为天然碳源,采用绿色合成工艺制备花椒 CDs,并基于  $\text{Cu}^{2+}$ 对花椒 CDs 的荧光猝灭效应,建立了定量检测  $\text{Cu}^{2+}$ 的分析新方法。该方法操作简便、成本低廉、环境友好,为  $\text{Cu}^{2+}$ 的监测提供技术支撑,同时也为中药碳点的应用提供新思路。

## 2. 实验部分

### 2.1. 仪器与试剂

荧光分光光度计(日立 F-7000)、电热恒温鼓风干燥箱(上海捷呈实验仪器有限公司)、电子分析天平(梅特勒-托利多 ME204)。

青花椒(购于陕西省渭南韩城市)、硫酸铜、氨水、盐酸、氢氧化钠等均为分析纯,购于上海泰坦科技股份有限公司,实验用水为去离子水。

### 2.2. 实验方法

#### 2.2.1. CDs 的制备

准确称取 0.1 g 研磨后的青花椒粉(200~300 目)于 100 mL 烧杯中,加入 1 mol/L NaOH 溶液,在室温下搅拌使青花椒粉溶解,完全溶解后转移至 100 mL 容量瓶中,用水定容至刻度,混匀,放置后作为 CDs 储备液。

#### 2.2.2. CDs 的荧光检测

取适量制备好的 CDs 溶液于厚度为 1 cm 的比色皿中,设定激发波长和发射波长的狭缝宽度均为 5 nm,在激发波长 315 nm、发射波长 425 nm 处进行荧光光谱测定。

### 2.2.3. CDs 对 $\text{Cu}^{2+}$ 的检测

取 2 个 10 mL 容量瓶, 分别加入制备好的 CDs 1 mL, 其中 1 个容量瓶中加入 2 mL 一定浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液, 加水稀释至 10 mL, 在狭缝宽度 5 nm,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 315/425$  nm 的条件下, 利用荧光分光光度计, 测定 CDs 的荧光强度  $F_0$  以及加入  $\text{Cu}^{2+}$  体系的荧光强度  $F$ , 并计算  $\Delta F$  ( $\Delta F = F_0 - F$ ) 值。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. CDs 的荧光光谱

$\text{Cu}^{2+}$  与 CDs 作用的荧光光谱见图 1, 由图 1 可知, 青花椒 CDs 在 350~600 nm 范围内有荧光发射, 并且在 425 nm 处荧光最强。CDs 中加入  $\text{Cu}^{2+}$ , 体系的荧光会减弱, 表明  $\text{Cu}^{2+}$  对 CDs 荧光具有猝灭作用。推测猝灭原因是 TCM-CDs 表面富含的羟基、羧基、氨基等官能团与  $\text{Cu}^{2+}$  发生螯合反应, 形成稳定的 TCM-CDs- $\text{Cu}^{2+}$  配合物, 该配合物不具有荧光活性, 从而减弱了 CDs 的荧光发射, 推测二者的作用机制为静态猝灭[21]。

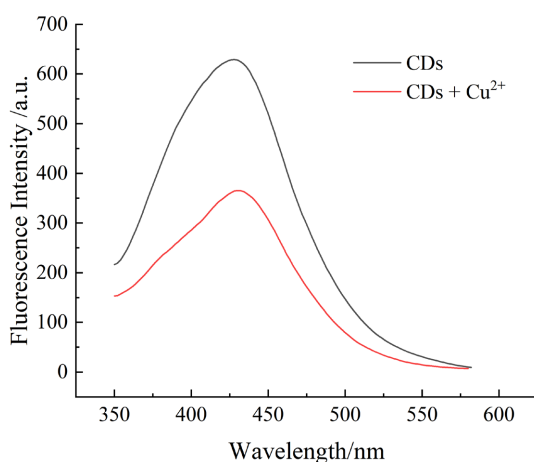


Figure 1. Fluorescence spectrum of  $\text{Cu}^{2+}$  interacting with CDs

图 1.  $\text{Cu}^{2+}$  与 CDs 作用的荧光光谱

### 3.2. 制备温度的优化

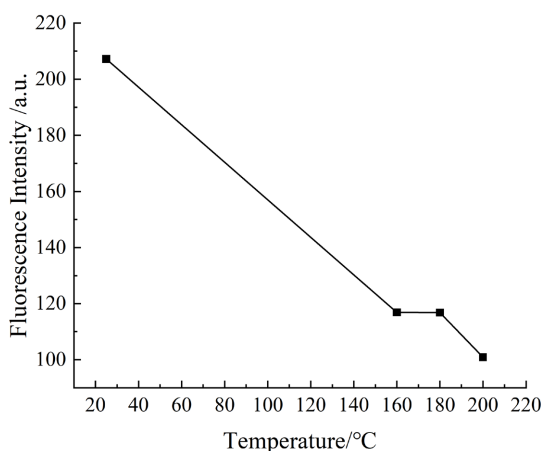


Figure 2. The influence of preparation temperature on the fluorescence intensity of CDs

图 2. 制备温度对 CDs 荧光强度的影响

称取 0.1 g 青花椒粉 3 份, 置于烘箱中, 将温度分别控制在 160℃、180℃、200℃, 加热 20 min, 冷却后按 2.2.1.的方法制备 CDs, 按 2.2.2.的方法测定 CDs 的荧光强度  $F$ 。另称取 0.1 g 青花椒粉 1 份, 不进行高温热处理, 直接在室温条件下按 2.2.1.的方法制备 CDs, 按 2.2.2.的方法测定 CDs 的荧光强度。不同预处理温度对 CDs 荧光强度的影响结果如图 2 所示。由图 2 可知, 常温条件下制备的 CDs 荧光强度最高, 随着预处理温度升高, 荧光强度呈下降趋势。因此, 常温为制备青花椒基 CDs 的最佳温度。

### 3.3. 放置时间和 pH 值对 CDs 荧光强度的影响

#### 3.3.1. 放置时间的优化

为确定 CDs 溶液的最佳放置时间, 称取 0.1 g 青花椒粉 6 份, 按 2.2.1.的方法制备 CDs。将制备得到的 CDs 溶液分别静置 20、25、30、35、60、120 min, 随后按 2.2.2.的方法测定其荧光强度( $F$ ), 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 放置时间为 60 min 与 120 min 时, CDs 的荧光强度差别不大, 表明 CDs 溶液在放置 60 min 后已基本达到稳定状态, 综合考虑分析效率与实验成本, 选择 60 min 作为 CDs 制备的最佳放置时间。

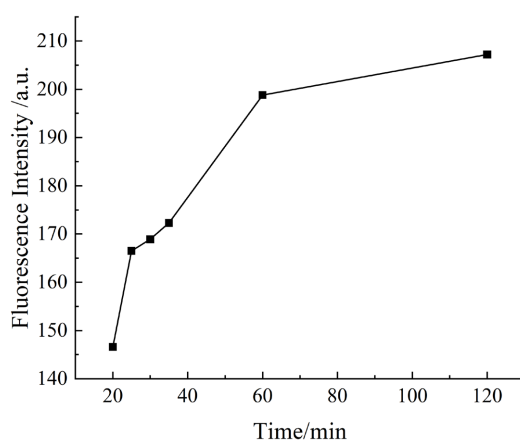


Figure 3. The influence of placement time on the fluorescence intensity of CDs

图 3. 放置时间对 CDs 荧光强度的影响

#### 3.3.2. pH 值的优化

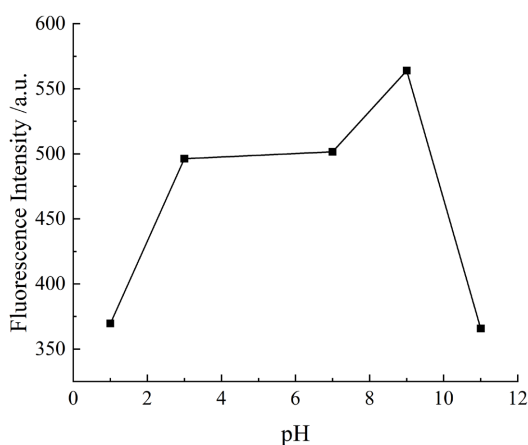


Figure 4. The influence of pH on the fluorescence intensity of CDs

图 4. pH 值对 CDs 荧光强度的影响

为考察 pH 值对 CDs 荧光强度的影响, 称取 0.1 g 青花椒粉 5 份, 按 2.2.1. 的方法制备 CDs。准确量取 CDs 溶液各 5 mL, 分别置于 25 mL 比色管中, 用 2 mol/L HCl 与 2 mol/L 氨水配制成 pH = 1、3、7、9、11 的缓冲体系, 定容至 25 mL。按 2.2.2 的方法测定各 pH 条件下 CDs 的荧光强度( $F$ ), 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, CDs 的荧光强度随 pH 值变化呈现先增大后减小的趋势, 在 pH = 9 时达到最大值。因此, 选择 pH = 9 作为 CDs 制备的最佳 pH 值。

### 3.4. 反应时间和反应体系 pH 值的优化

#### 3.4.1. 反应时间的优化

为确定  $\text{Cu}^{2+}$  与 CDs 的最佳反应时间, 取 2 个 10 mL 容量瓶, 各加入 1 mL CDs 溶液。将 0.5 mol/L  $\text{CuSO}_4$  溶液稀释至 1 mmol/L, 向其中 1 个容量瓶中加入 2 mL 该稀释液, 另一个不加(作为空白对照), 均用蒸馏水定容至 10 mL。按 2.2.2 方法测定空白溶液的荧光强度( $F_0$ )和加入  $\text{Cu}^{2+}$  后溶液的荧光强度( $F$ ), 计算  $\Delta F = F_0 - F$ 。随后, 在反应时间为 5、10、15、20、25、30 min 时分别测定加入  $\text{Cu}^{2+}$  的溶液的荧光强度, 计算相应的  $\Delta F$ , 结果如图 5 所示。

由图 5 可知,  $\text{Cu}^{2+}$  对 CDs 具有明显的荧光猝灭作用。在 5~30 min 范围内, 反应时间对荧光猝灭程度( $\Delta F$ )的影响较小, 表明  $\text{Cu}^{2+}$  与 CDs 的反应速率较快, 可在较短时间内达到稳定状态。因此, 综合考虑响应速度与分析效率, 选择 20 min 作为  $\text{Cu}^{2+}$  与 CDs 的最佳反应时间。

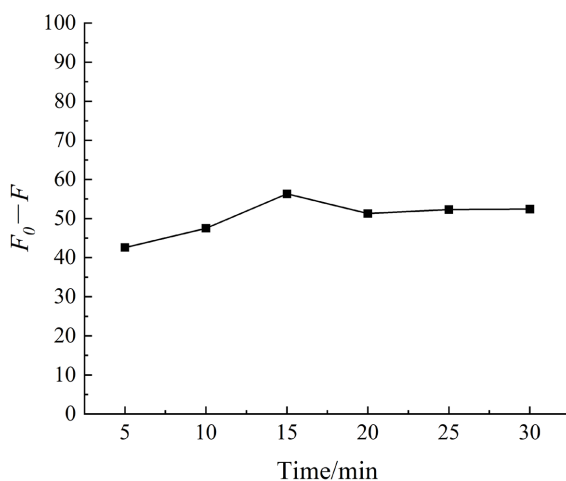
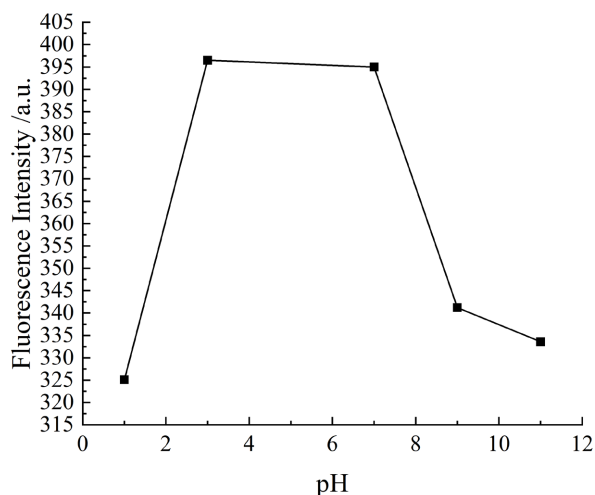


Figure 5. Effect of reaction time on the fluorescence quenching of  $\text{Cu}^{2+}$ -CDs system  
图 5. 反应时间对  $\text{Cu}^{2+}$ -CDs 体系荧光猝灭程度的影响

#### 3.4.2. 反应体系 pH 值的优化

为考察反应体系 pH 值对  $\text{Cu}^{2+}$  检测的影响, 取 5 个 10 mL 容量瓶, 各加入 1 mL CDs 溶液。将 0.5 mol/L  $\text{CuSO}_4$  溶液稀释至 0.1 mmol/L, 向每个容量瓶中分别加入 2 mL 该稀释液。用 2 mol/L 盐酸和 2 mol/L 氨水配制 pH = 3、5、7、9、11 的缓冲溶液, 并分别用上述缓冲溶液定容至 10 mL。按 2.2.2 方法测定各溶液的荧光强度( $F$ ), 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 在 pH 3~7 范围内,  $\text{Cu}^{2+}$ -CDs 体系的荧光强度较高, 且该区间内荧光强度变化较为平缓。为减少极端 pH 对 CDs 稳定性的潜在影响, 同时兼顾操作简便性, 选择 pH = 7 (中性条件) 作为最佳反应 pH 值。

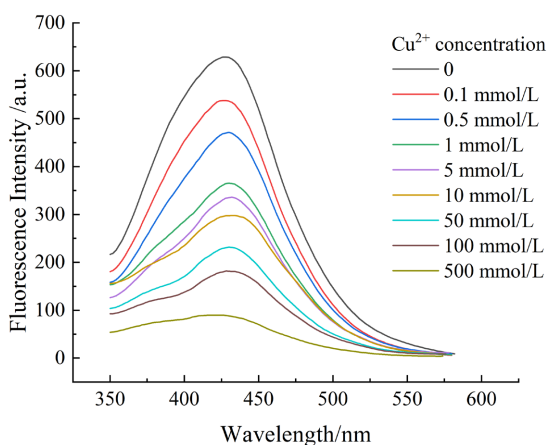


**Figure 6.** Effect of pH on the fluorescence intensity of  $\text{Cu}^{2+}$ -CDs system  
**图 6.** pH 对  $\text{Cu}^{2+}$ -CDs 体系荧光强度的影响

### 3.5. $\text{Cu}^{2+}$ 含量检测标准曲线的建立

取 9 个 10 mL 容量瓶, 各加入 1 mL CDs 溶液。将 0.5 mol/L  $\text{CuSO}_4$  溶液稀释成 0.1、0.5、1、5、10、50、100、500 mmol/L 系列浓度。依次取上述不同浓度的  $\text{CuSO}_4$  溶液各 2 mL, 分别加入到 8 个容量瓶中, 剩余 1 个容量瓶不加  $\text{CuSO}_4$  溶液(作为空白对照), 均用蒸馏水定容至 10 mL。室温下反应 20 min 后, 按 2.2.2 方法测定空白溶液的荧光强度( $F_0$ )和各反应体系的荧光强度( $F$ )。荧光光谱如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着  $\text{Cu}^{2+}$ 浓度由 0 增至 500 mmol/L, CDs 的荧光强度逐渐降低, 表明  $\text{Cu}^{2+}$ 对 CDs 的猝灭效应具有浓度依赖性。



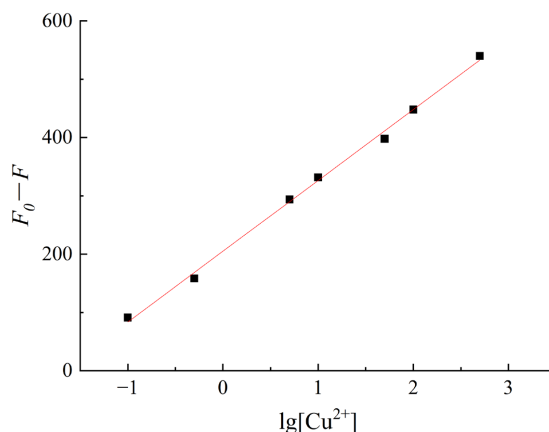
**Figure 7.** Fluorescence emission spectra of CDs after  $\text{Cu}^{2+}$  solutions with different concentrations were added  
**图 7.** 不同浓度  $\text{Cu}^{2+}$ 溶液加入后 CDs 的荧光发射光谱图

以  $\lg[\text{Cu}^{2+}]$ 为横坐标,  $\Delta F$  ( $\Delta F = F_0 - F$ )为纵坐标绘制标准曲线, 结果如图 8 所示。由图 8 可知,  $\text{Cu}^{2+}$ 浓度在 0.1~500 mmol/L 范围内时,  $\lg[\text{Cu}^{2+}]$ 与 CDs 的荧光强度变化值  $\Delta F$  之间呈良好的线性关系, 其线性回归方程为:

$$\Delta F = 121.41 \lg c + 205.10, r = 0.9971$$

其中,  $c$  为  $\text{Cu}^{2+}$ 浓度(mmol/L),  $r$  为相关系数。该结果表明, 基于 CDs 的荧光探针法可用于溶液中  $\text{Cu}^{2+}$

含量的定量检测。



**Figure 8.** CDs was used to detect the linear relationship curve of Cu<sup>2+</sup> concentration  
**图 8.** CDs 检测 Cu<sup>2+</sup>浓度的线性关系曲线

### 3.6. CDs 对样品中 Cu<sup>2+</sup>的含量测定

为了验证青花椒 CDs 荧光探针检测 Cu<sup>2+</sup>的准确性与适用性,本研究对模拟水样中的 Cu<sup>2+</sup>含量进行了检测。

分别取 Cu<sup>2+</sup>浓度为 2 mmol/L (样品 1)和 20 mmol/L (样品 2)的模拟水样,按 2.2.1 方法制备 CDs 溶液。另取 3 支 10 mL 容量瓶,各加入 1 mL CDs 溶液;向其中 2 支容量瓶中分别加入 2 mmol/L、20 mmol/L 样品溶液各 2 mL,并用蒸馏水定容至 10 mL;第 3 支容量瓶中不添加模拟水样(作为空白对照)。所有样品均在室温下放置 20 min 后,按照 2.2.2 方法分别测定其荧光强度(*F*)。根据 lg [Cu<sup>2+</sup>]- $\Delta F$  标准曲线方程,计算出样品中 Cu<sup>2+</sup>的荧光测定浓度。结果如表 1 所示。

由表 1 可知,利用青花椒 CDs 荧光猝灭法定量测定水溶液中 Cu<sup>2+</sup>的含量,具有较好的选择性、回收率与重现性。

**Table 1.** Results for the determination of Cu<sup>2+</sup> in the sample (n = 3)

**表 1.** CDs 对样品中 Cu<sup>2+</sup>的检测结果

检测样品	样品中[Cu <sup>2+</sup> ]/mmol/L	荧光强度 <i>F</i>	荧光测定[Cu <sup>2+</sup> ]/mmol/L	回收率/%	RSD/%
CDs	0	629.8	0	—	—
样品 1	2	388.7	1.981	99.05	1.54
样品 2	20	266.3	20.18	100.9	1.66

### 3.7. 青花椒温和碱解制备 CDs 的机理推测

青花椒主要成分包括木脂素、挥发油、生物碱及多糖等[22]-[24]。温和碱解形成 CDs 的机理推测是碱诱导选择性解聚-共轭芳香片段的预组织与碳化-表面自钝化的协同作用结果。青花椒粉加入 NaOH 溶液后,碱液渗透至颗粒内部,引起纤维组织溶胀与结构疏松;随后在碱催化作用下,OH<sup>-</sup>亲核进攻木脂素、多糖等组分中的酯键与醚键,实现选择性断键与骨架解构,促使大分子解聚并释放出酚类、芳香酸及含氮杂环等共轭芳香片段,为 CDs 碳核形成提供构建单元[25]。共轭芳香片段进一步发生协同反应,经疏水相互作用驱动的预组织及氧化缩合,逐步形成具有类石墨结构的碳核[26]。随后,体系中未完全降

解的多糖、反应生成的羧酸及酚类衍生物等，通过氢键与静电作用自发包覆在碳核表面，完成表面自钝化。该过程在温和碱解条件下，同步实现了大分子降解、碳核成核及表面自钝化，赋予 CDs 良好水溶性与荧光性能，为天然生物质绿色合成 CDs 提供了简易可行的路径。

#### 4. 结论

本研究以天然青花椒为碳源，成功制备了碳量子点(CDs)，系统优化并得到了最佳制备条件；同时考察了 pH 值和反应时间对 CDs 检测  $\text{Cu}^{2+}$  的影响，确立了最优的检测实验条件，建立了以 CDs 为荧光探针检测溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  含量的新方法。该方法采用绿色原料，操作简便且环境友好。实验结果表明，在 0.1 mmol/L~500 mmol/L 浓度范围内， $\text{Cu}^{2+}$  浓度的对数值(lgc)与荧光强度变化值( $\Delta F$ )呈现良好的线性关系，线性回归方程为  $\Delta F = 121.4 \lg c + 205.1$ ，相关系数  $r = 0.9971$ 。实际样品检测结果显示，该方法的回收率在 99%~101%之间，相对标准偏差(RSD)较小。相比于常规方法，本方法初步应用于水样中  $\text{Cu}^{2+}$  的检测具有准确度高、选择性好及检测速度快的优势。

此外，本研究验证了中药碳点(TCM-CDs)作为传统中医药理论与现代纳米技术融合载体的可行性。未来仍需进一步探究 CDs 与金属离子之间的相互作用机制，发掘更多的绿色中药碳源，并拓展其在更多领域的应用。

#### 基金项目

海军军医大学本科学员创新实践能力孵化基地项目(FH2024179)。

#### 参考文献

- [1] Prete, P., Iannaccone, D., Proto, A., Tobiszewski, M. and Cucciniello, R. (2023) Development and Validation of an Eco-Compatible UV-Vis Spectrophotometric Method for the Determination of  $\text{Cu}^{2+}$  in Aqueous Matrices. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **415**, 5003-5010. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04785-6>
- [2] Huang, Y., Peng, J. and Huang, X. (2019) Allylthiourea Functionalized Magnetic Adsorbent for the Extraction of Cadmium, Copper and Lead Ions Prior to Their Determination by Atomic Absorption Spectrometry. *Microchimica Acta*, **186**, Article No. 51. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-3101-2>
- [3] Kumamaru, T., Murakami, K., Nakata, F., Sunahara, H., Kiboku, M. and Matsuo, H. (1987) Determination of Copper and Lead by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry Combined with Suction-Flow On-Line Ion-Exchange Preconcentration. *Analytical Sciences*, **3**, 161-165. <https://doi.org/10.2116/analsci.3.161>
- [4] Zhang, Y., Hu, J., Li, C. and Hou, X. (2025) Iron and Copper Ions-Synergistically Enhanced Cobalt Photochemical Vapor Generation for Its Sensitive Detection by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Microchemical Journal*, **218**, Article 115229. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115229>
- [5] Li, B., He, M., Zhu, T., Yang, T., Hu, L., Zhang, X., et al. (2025) Analysis of Metal Ions in Exhaled Breath Using a Handheld Sampler Coupled to Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Science China Chemistry*, **68**, 3302-3308. <https://doi.org/10.1007/s11426-024-2526-1>
- [6] Kohli, H.K. and Parab, D. (2025) Green Synthesis of Carbon Quantum Dots and Applications: An Insight. *Next Materials*, **8**, Article 100527. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100527>
- [7] Stalikas, C.D. and Costa-Fernandez, J.M. (2025) From Quantum Dots to Carbon Dots and Beyond: Synthesis, Characterization, and (Bio)Analytical Applications. *Microchimica Acta*, **192**, Article 129. <https://doi.org/10.1007/s00604-025-06974-9>
- [8] Li, J., Jin, X., Liu, S., Lin, T., Zhang, C., Chen, Q., et al. (2025) A Ratiometric Fluorescent Probe Based on Carbon Dots and Quantum Dots for Glucose Detection. *Journal of Fluorescence*, **35**, 9413-9423. <https://doi.org/10.1007/s10895-025-04228-8>
- [9] Piasek, A., Zielina, M., Banach, M. and Pulit-Prociak, J. (2025) Exploring Barley Bran as a Precursor for Carbon Quantum Dots with Enhanced Fluorescence Characteristics. *Diamond and Related Materials*, **156**, Article 112421. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112421>
- [10] Tavan, M., Yousefian, Z., Bakhtiar, Z., Rahmandoust, M. and Mirjalili, M.H. (2025) Carbon Quantum Dots: Multifunctional Fluorescent Nanomaterials for Sustainable Advances in Biomedicine and Agriculture. *Industrial Crops and*

- Products*, **231**, Article 121207. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121207>
- [11] Yang, Z., Xu, T., Li, H., She, M., Chen, J., Wang, Z., *et al.* (2023) Zero-Dimensional Carbon Nanomaterials for Fluorescent Sensing and Imaging. *Chemical Reviews*, **123**, 11047-11136. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00186>
- [12] Sabui, P., Mallick, S., Singh, K.R., Natarajan, A., Verma, R., Singh, J., *et al.* (2022) Potentialities of Fluorescent Carbon Nanomaterials as Sensor for Food Analysis. *Luminescence*, **38**, 1047-1063. <https://doi.org/10.1002/bio.4406>
- [13] Lou, Y., Zhao, Y., Chen, J. and Zhu, J. (2014) Metal Ions Optical Sensing by Semiconductor Quantum Dots. *Journal of Material Chemistry C*, **2**, 595-613. <https://doi.org/10.1039/c3tc31937g>
- [14] Esteve-Turrillas, F.A. and Abad-Fuentes, A. (2013) Applications of Quantum Dots as Probes in Immunosensing of Small-Sized Analytes. *Biosensors and Bioelectronics*, **41**, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.09.025>
- [15] Costas-Mora, I., Romero, V., Lavilla, I. and Bendicho, C. (2014) An Overview of Recent Advances in the Application of Quantum Dots as Luminescent Probes to Inorganic-Trace Analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **57**, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.02.004>
- [16] Gao, W., Song, H., Wang, X., Liu, X., Pang, X., Zhou, Y., *et al.* (2017) Carbon Dots with Red Emission for Sensing of Pt<sup>2+</sup>, Au<sup>3+</sup>, and Pd<sup>2+</sup> and Their Bioapplications *in Vitro* and *in Vivo*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 1147-1154. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16991>
- [17] Zeng, M., Wang, Y., Liu, M., Wei, Y., Wen, J., Zhang, Y., *et al.* (2023) Potential Efficacy of Herbal Medicine-Derived Carbon Dots in the Treatment of Diseases: From Mechanism to Clinic. *International Journal of Nanomedicine*, **18**, 6503-6525. <https://doi.org/10.2147/ij.n.s431061>
- [18] Zhang, J., Zou, L., Li, Q., Wu, H., Sun, Z., Xu, X., *et al.* (2023) Carbon Dots Derived from Traditional Chinese Medicines with Bioactivities: A Rising Star in Clinical Treatment. *ACS Applied Bio Materials*, **6**, 3984-4001. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00462>
- [19] Guo, S., Tong, J., Liu, Y., Qin, D., Yan, J., Peng, H., *et al.* (2024) Synthesis of Eucommia Ulmoides-Derived Carbon Dots for Anti-Inflammatory and Accelerated Wound Healing. *International Immunopharmacology*, **143**, Article 113606. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2024.113606>
- [20] Wang, X., Wu, T., Yang, Y., Zhou, L., Wang, S., Liu, J., *et al.* (2023) Ultrasmall and Highly Biocompatible Carbon Dots Derived from Natural Plant with Amelioration against Acute Kidney Injury. *Journal of Nanobiotechnology*, **21**, Article No. 63. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01795-5>
- [21] 张涛, 施冲煜, 王青平. 中药衍生碳点的制备、表征方法及其药理作用研究进展[J]. 中草药, 2025, 56(6): 2224-2237.
- [22] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部) [S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 169-171.
- [23] 杨贺英, 罗彩萍, 彭婷, 等. 花椒生物碱富集纯化工艺优化及其成分分析[J]. 药学实践与服务, 2025, 43(2): 75-81.
- [24] 吴蓉蓉, 田书璿, 陈勇, 等. 青花椒生物碱类化学成分及生物活性研究[J]. 中草药, 2019, 50(6): 1305-1309.
- [25] Zhu, L., Wu, H., Yang, H., Shen, D., Hu, H. and Dou, M. (2024) Formation Mechanism of Lignin-Derived Carbon Quantum Dots: From Chemical Structures to Fluorescent Behaviors. *Bioresource Technology*, **413**, Article 131490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131490>
- [26] Gan, J., Chen, L., Chen, Z., Zhang, J., Yu, W., Huang, C., *et al.* (2023) Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Dots: Synthesis Processes, Properties, and Applications. *Small*, **19**, e2304066. <https://doi.org/10.1002/smll.202304066>