



绿色方法合成纳米碳点及对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测

张艺, 邢晶晶, 孙思佳, 吴頔, 曾乐勇

引用本文:

张艺, 邢晶晶, 孙思佳, 等. 绿色方法合成纳米碳点及对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1249–1254.

ZHANG Yi, XING Jing-jing, SUN Si-jia, et al. Green Synthesis of Carbon Nanodots and Their Application in Specific Fluorescence Detection of Fe^{3+} [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1249–1254.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

壳聚糖碳点的水热法制备及其对金属离子的选择性研究

Hydrothermal Preparation of Chitosan Carbon Dots and Their Selectivity to Metal Ions

发光学报. 2019, 40(3): 289–297 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0289>

微波法制备掺氮碳点及其用作探针检测铁离子

Microwave Synthesis of Nitrogen-doped Carbon Dots and Its Application in Detection of Ferric Ions

发光学报. 2019, 40(6): 751–757 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194006.0751>

两亲性壳聚糖基聚合物碳点的合成及其在载药方面的应用

Synthesis of Amphiphilic Polymer Carbon Dots Fluorescence Materials from Octyl Chitosan and Their Applications in Drug Delivery

发光学报. 2018, 39(7): 915–922 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183907.0915>

$\text{Ag}@Fe_3O_4@C-CdTe@SiO_2$ 磁性荧光复合微球的制备与光学特征

Magnetic and Optical Properties of $\text{Ag}@Fe_3O_4@C-CdTe@SiO_2$ Hybrid Nanoparticles

发光学报. 2017, 38(3): 274–280 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173803.0274>

氧化锡量子点的合成及对抗坏血酸的灵敏传感研究

Synthesis of Tin Oxide Quantum Dots-based Fluorescence Probe for AA Sensitive Detection

发光学报. 2019, 40(12): 1554–1562 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194012.1554>

文章编号: 1000-7032(2020)10-1249-06

绿色方法合成纳米碳点及对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测

张 艺, 邢晶晶, 孙思佳, 吴 颀*, 曾乐勇*

(河北大学 化学与环境科学学院, 河北 保定 071002)

摘要: 以黄瓜为原料, 采用水热法合成了荧光纳米碳点, 实现了对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测。利用透射电子显微镜和 X 射线光电子能谱仪对纳米碳点的形貌和微结构进行了表征, 并利用荧光光谱仪对纳米碳点的荧光性能以及加入不同金属离子后的荧光强度变化进行了测量。结果表明, 合成的纳米碳点分散性良好, 尺寸约为 3 nm 左右。在 365 nm 紫外光激发下, 其发射峰位于 435 nm; 当反应温度为 200 °C、反应时间为 12 h 时, 纳米碳点的荧光性能最佳。 Fe^{3+} 的加入能猝灭纳米碳点的荧光, 而其他金属离子不会引起纳米碳点荧光强度和发射峰位置的改变, 表明绿色方法合成的纳米碳点实现了对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测。

关键词: 纳米碳点; 水热法; 黄瓜; 绿色合成; Fe^{3+} 荧光检测

中图分类号: 0613.71 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200174

Green Synthesis of Carbon Nanodots and Their Application in Specific Fluorescence Detection of Fe^{3+}

ZHANG Yi, XING Jing-jing, SUN Si-jia, WU Di*, ZENG Le-yong*

(College of Chemistry & Environmental Science, Hebei University, Baoding 071002, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wudi2137@126.com; zengly@hbu.cn

Abstract: Using cucumber as raw material, fluorescent carbon nanodots were synthesized *via* hydrothermal method, by which the specific fluorescent detection of Fe^{3+} was achieved. The morphology and microstructure of carbon nanodots were characterized by transmission electron microscope and X-ray photoelectron spectroscopy, and the fluorescent performance of carbon nanodots was measured by fluorescent spectroscopy. The results indicated that the prepared carbon nanodots showed good dispersity, and the average size was about 3 nm. When the reaction temperature was 200 °C and the reaction time was 12 h, the prepared carbon nanodots have the optimum fluorescent performance. Moreover, the introduction of Fe^{3+} can quench the fluorescence of carbon nanodots, but other metal ions can not change the fluorescence intensity and emission wavelength of carbon nanodots, which indicates that the prepared carbon nanodots achieve specific fluorescence detection towards Fe^{3+} .

Key words: carbon nanodots; hydrothermal method; cucumber; green synthesis; Fe^{3+} fluorescent detection

1 引 言

纳米碳点是一种尺寸在 10 nm 以下的碳纳米

材料。作为一种新型的荧光碳纳米材料, 纳米碳点具有荧光性质易调控、光稳定性好、毒性低、表面易修饰等优点, 在传感检测、成像诊断等领域显

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51772074, U1732127)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51772074, U1732127)

示出潜在的应用前景^[1-5]。

常用的纳米碳点合成方法包括微波法和水热法^[6-7],其中水热法具有设备简单、产物石墨化程度高等优点,受到研究人员的青睐。研究表明,纳米碳点的发光性质与碳前体有关,氮元素掺杂或表面官能团修饰能有效提高纳米碳点的量子产率^[8-9]。一些含氮试剂,如尿素等可被用作氮源添加在反应物中制备氮元素掺杂的纳米碳点。孙再成等以柠檬酸为碳源、尿素为氮源合成了氮元素掺杂的蓝/绿/红三色发光纳米碳点,组装了白光 LED 器件^[10]。林恒伟等以邻/间/对苯二胺为反应物合成了不同发光性质的纳米碳点,并实现了对细胞的多色成像^[11]。尽管这些纳米碳点显示出优异的光致发光性质,但制备过程都均以化学试剂为反应物,成本高且会造成一定的毒性和污染。一些天然产物如水果、蔬菜中含有丰富的杂原子元素,是制备纳米碳点的理想碳前体^[12-16]。因此,以天然产物为原料,发展环境友好型的绿色合成方法对于降低纳米碳点的制备成本、毒性以及拓宽其应用具有重要的意义。

本文以黄瓜为原料,采用水热法合成了纳米碳点,并实现了对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测。采用透射电子显微镜 (TEM)、X 射线光电子能谱 (XPS) 和荧光分光光度计对纳米碳点的形貌、结构和荧光性质进行了表征,研究了反应温度和反应时间对纳米碳点发光性能的影响,利用纳米碳点的荧光猝灭性质实现了对 Fe^{3+} 的特异性检测。

2 实 验

2.1 试剂与仪器

原料与试剂:市售青皮黄瓜;不同金属盐,包括六水合氯化铁 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、六水合氯化钴 ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、无水氯化镉 (CdCl_2)、二水合氯化铜 ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、无水氯化镍 (NiCl_2)、硫酸汞 (HgSO_4) 和无水氯化铅 (PbCl_2) 等购自北京伊诺凯科技有限公司。

主要仪器:制备仪器:不锈钢反应釜 (30 mL)、榨汁机、烘箱、磁力搅拌器和高速离心机。表征仪器:TEM (FEI, Tecnai F20)、XPS (Kratos, AXIS Ultra DLD)、三用紫外分析仪 (上海金鹏, ZF-7) 和荧光分光光度计 (Hitachi, F-4600)。

2.2 纳米碳点的制备

以黄瓜为原料,采用水热法制备纳米碳点。

实验步骤如下:

(1)取市售青皮黄瓜 5 根,去离子水洗净,用榨汁机榨成汁。取黄瓜汁 20 mL,倒入反应釜,放置在烘箱中。保持反应温度为 200 °C,反应时间为 12 h。反应结束后,自然冷却至室温,将产物离心,取上清液用 0.22 μm 滤膜过滤处理,得到的纳米碳点(滤液)保存在 4 °C 冰箱中待用。

(2)各取黄瓜汁 20 mL(4 份),分别密封在反应釜中。改变反应时间分别为 4, 6, 8, 10 h 制备纳米碳点。反应结束后,自然冷却至室温,将产物离心,取上清液用 0.22 μm 滤膜过滤处理,得到的纳米碳点(滤液)保存在 4 °C 冰箱中待用。

(3)在步骤(2)中,保持反应时间为 12 h,改变反应温度分别为 120, 140, 160, 180 °C 制备纳米碳点。反应结束后,自然冷却至室温,将产物离心,取上清液用 0.22 μm 滤膜过滤处理,得到的纳米碳点(滤液)保存在 4 °C 冰箱中待用。

2.3 荧光性能测试

将不同反应条件制备的纳米碳点配制成浓度相同的水溶液,各取 2 mL 加入比色皿中,利用三用紫外分析仪和荧光光谱仪观察和测量其荧光性能。

(1)荧光观察:将盛装纳米碳点溶液的比色皿放置在三用紫外分析仪 (254 nm、365 nm 和可见光) 中,改变激发光波长,观察溶液的荧光强弱,确定其最佳激发波长。

(2)荧光测量:将盛装纳米碳点溶液的比色皿放置在荧光光谱仪的样品槽,设定激发光波长为 365 nm,测量不同纳米碳点溶液的荧光发射光谱,确定制备纳米碳点的最佳反应条件。

2.4 Fe^{3+} 特异性荧光检测

(1) Fe^{3+} 的荧光检测:配制浓度为 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 240 $\mu\text{mol/L}$ 的 Fe^{3+} 的水溶液,各取 1 mL 加入到 1 mL 的纳米碳点溶液中 (Fe^{3+} 的最终浓度为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120 $\mu\text{mol/L}$)。设定激发光波长为 365 nm,分别测量加入不同浓度 Fe^{3+} 的纳米碳点溶液的荧光光谱,并绘制其荧光发射强度变化 ($\Delta F/F_0$) 与 Fe^{3+} 浓度的关系曲线。

(2)不同金属离子的荧光检测:配制浓度为 240 $\mu\text{mol/L}$ 的 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Hg^{2+} 和 Pd^{2+} 的水溶液,各取 1 mL 加入到 1 mL 的纳米碳点溶液中 (金属离子的最终浓度为 120 $\mu\text{mol/L}$)。

L)。设定激发光波长为 365 nm, 分别测量加入不同金属离子的纳米碳点溶液的荧光光谱, 并绘制其荧光发射强度变化 (F/F_0) 的柱状图。

3 结果与讨论

3.1 纳米碳点的荧光性能表征

以黄瓜为原料, 采用绿色方法合成了纳米碳点。首先, 采用三用紫外分析仪, 观察到在 365 nm 波长激发下, 纳米碳点的荧光最强。因此, 设定激发光波长为 365 nm, 采用荧光光谱仪研究了不同反应条件对纳米碳点发光性能的影响。当反应温度为 200 °C 时, 改变反应时间合成的纳米碳点的发射光谱如图 1(a) 所示, 可以发现随着反应时间的增加, 纳米碳点的荧光强度逐渐增强; 当反应时间为 10 h 和 12 h 时, 合成的纳米碳点的荧光性能最佳。当反应时间为 12 h 时, 改变反应温度合成的纳米碳点的发射光谱如图 1(b) 所示, 可以看出随着反应温度的升高, 纳米碳点的荧光强度逐渐增加; 当反应温度为 200 °C 时, 合成的纳米碳点的荧光性能最佳。因此, 当反应温度为 200 °C、反应时间为 12 h 时, 采用绿色方法合成

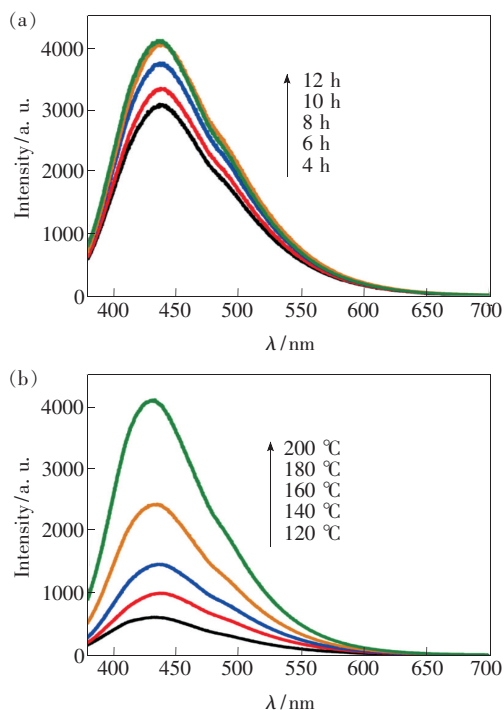


图 1 不同反应条件下制备的纳米碳点的荧光发射光谱。(a) 不同反应时间; (b) 不同反应温度。

Fig. 1 Fluorescence emission spectra of carbon nanodots synthesized under different conditions. (a) Different reaction time. (b) Different reaction temperature.

的纳米碳点具有最佳的荧光发射性能, 发射峰位于 435 nm。

3.2 纳米碳点的形貌和结构表征

采用 TEM 和高分辨 TEM 对纳米碳点 (反应温度为 200 °C 和反应时间为 12 h 条件下制备) 的形貌和微观结构进行了表征。图 2(a) 为纳米碳点的 TEM 图, 可以发现纳米碳点具有良好的分散性, 且尺寸分布均匀, 单个纳米碳点的尺寸约为 3 nm。图 2(b) 为纳米碳点的高分辨 TEM 图, 可以看到明显的晶格条纹, 表明纳米碳点具有良好的结晶性。

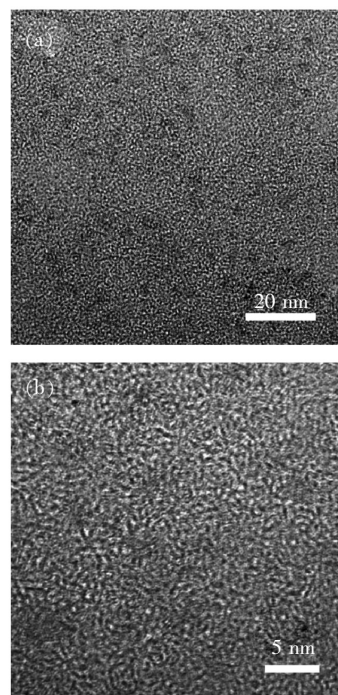


图 2 纳米碳点的 TEM 和高分辨 TEM 图。(a) TEM; (b) 高分辨 TEM。

Fig. 2 TEM and high-resolution TEM images of carbon nanodots. (a) TEM. (b) High-resolution TEM.

采用 XPS 技术对纳米碳点 (反应温度为 200 °C 和反应时间为 12 h 条件下制备) 的化学组分和结构进行了分析。图 3(a) 为纳米碳点的 XPS 全谱分布图, 可以看到属于 C 1s、N 1s 和 O 1s 的特征峰, 表明采用绿色方法合成了 N 元素掺杂的纳米碳点。通过分峰, 进一步分析了 C 1s、N 1s 和 O 1s 谱的价键结构, 如图 3(b)、(c)、(d) 所示。C 1s 谱可以分成 5 个单峰, 分别位于 284.7、285.8、286.4、288.1、292.7 eV, 对应于 C—C/C=C、C—N、C—O、C=O 和 $\pi-\pi^*$, 而位于 295.6 eV 的峰对应于钾离子的 $2p^{1/2}$, 可能来自黄瓜中含有的钾离子 (图 3(b))^[17]。

N 1s谱可以分成两个单峰,分别位于 399.7 eV 和 401.4 eV,对应于吡咯氮和 N—H(图 3(c))^[18]。

O 1s谱可以分成两个单峰,分别位于 531.5 eV 和 533.2 eV,对应于 C=O 和 C—O(图 3(d))^[19]。

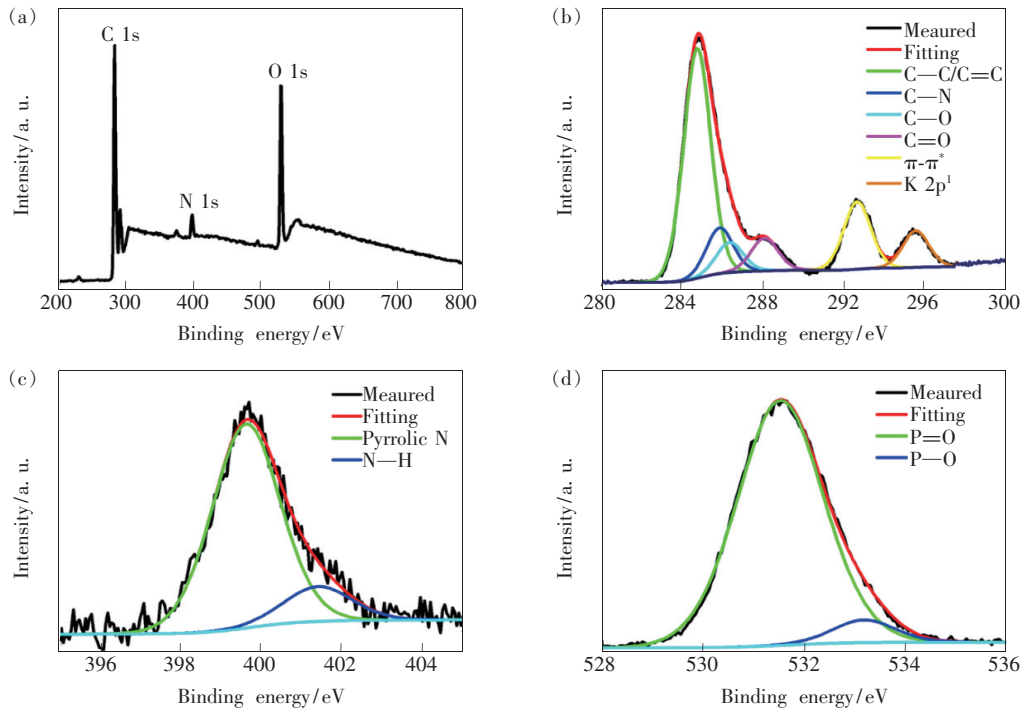


图 3 纳米碳点的 XPS 谱。(a)全谱;(b)C 1s 谱;(c)N 1s 谱;(d)O 1s 谱。

Fig. 3 XPS spectra of carbon nanodots. (a) Full spectrum. (b) C 1s spectra. (c) N 1s spectra. (d) O 1s spectra.

3.3 纳米碳点对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测

向纳米碳点(反应温度为 200 °C 和反应时间为 12 h 条件下制备)中加入不同浓度的 Fe^{3+} 溶液,测量了其荧光强度的变化。图 4(a)是加入不同浓度 Fe^{3+} 溶液的纳米碳点的发射光谱,可以看出随着 Fe^{3+} 浓度的增加,纳米碳点的荧光强度逐渐降低,但发射峰的位置不变,表明 Fe^{3+} 能够有效猝灭纳米碳点的荧光。当 Fe^{3+} 的浓度低至 10 $\mu\text{mol/L}$ 时,仍然可以观察到纳米碳点荧光强度的变化。此外,绘制了 Fe^{3+} 浓度与荧光强度变化之

间的关系曲线,并给出了线性拟合方程。如图 4(b)所示,当 Fe^{3+} 浓度处于 0 ~ 120 $\mu\text{mol/L}$ 范围内时, Fe^{3+} 浓度与纳米碳点的荧光强度衰减量呈线性关系。根据线性拟合方程,通过测量待测样品的荧光光谱,可以方便计算出待测样品中 Fe^{3+} 的大致浓度。结果表明, Fe^{3+} 对纳米碳点具有荧光猝灭效应,能够用于 Fe^{3+} 的半定量检测。

为了验证纳米碳点对 Fe^{3+} 检测的特异性,向纳米碳点(反应温度为 200 °C 和反应时间为 12 h 条件下制备)中加入同浓度、不同种类的金属离

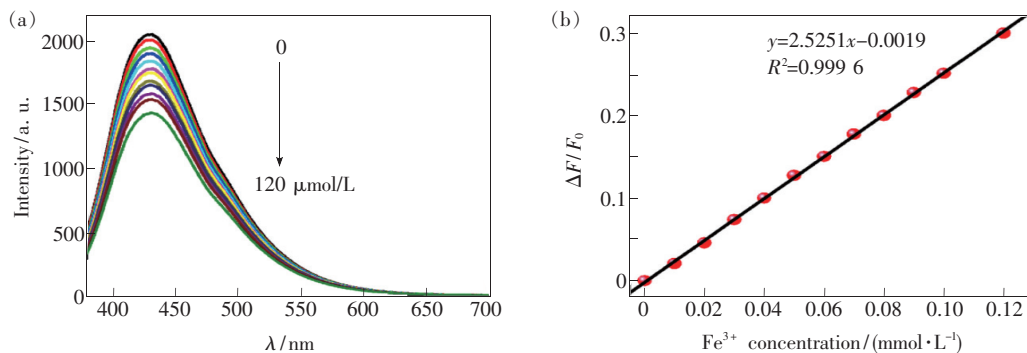


图 4 加入不同浓度 Fe^{3+} 的纳米碳点的荧光发射光谱和线性拟合曲线。(a) 荧光发射光谱;(b) 线性拟合曲线。

Fig. 4 Fluorescence spectra and linear fitting curve of carbon nanodots by adding Fe^{3+} in different concentrations. (a) Fluorescence spectra. (b) Linear fitting curve.

子溶液,并测量了其荧光强度的变化。图 5(a) 是加入不同种类金属离子的纳米碳点的发射光谱,可以发现当金属离子的浓度均为 $120 \mu\text{mol/L}$ 时,

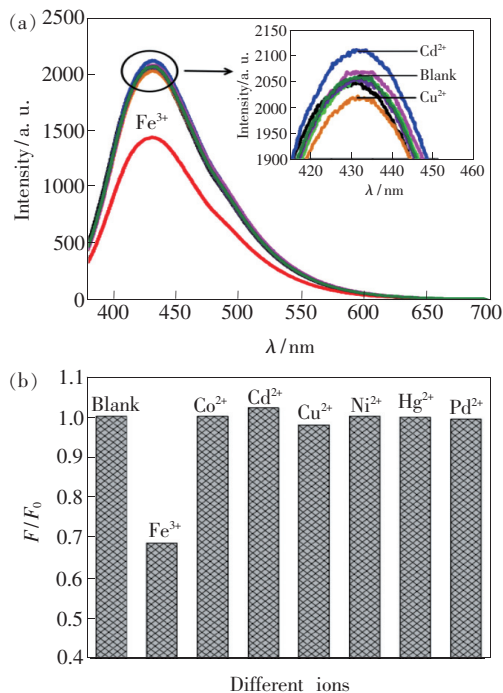


图 5 加入不同金属离子的纳米碳点的荧光发射光谱和荧光强度变化柱状图。(a) 荧光发射光谱;(b) 荧光强度变化柱状图。

Fig. 5 Fluorescence spectra and intensity change histogram of carbon nanodots by adding Fe^{3+} in different concentrations. (a) Fluorescence spectra. (b) Intensity change histogram.

纳米碳点的发射峰位置不变,只有加入 Fe^{3+} 后纳米碳点的荧光强度明显降低,加入其他离子后纳米碳点的荧光强度基本无变化(除了 Cd^{2+} 的略微增强和 Cu^{2+} 的略微减弱)。图 5(b) 的柱状图再一次清晰地显示了 Fe^{3+} 对纳米碳点的特异性荧光猝灭,这是由于 Fe^{3+} 和纳米碳点表面的羟基配位形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 导致纳米碳点发生聚集,碳点之间的距离缩短限制了其辐射跃迁的发生几率,而其他金属离子与羟基配位形成的氢氧化物的溶度积常数(K_{sp})远高于 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [20-21]。以上结果表明,利用纳米碳点的荧光性质对 Fe^{3+} 的检测具有特异性,可以实现对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测。

4 结 论

本文以黄瓜为原料,采用水热法实现了纳米碳点的绿色合成,并利用纳米碳点的荧光猝灭性质实现了对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测。结果表明,纳米碳点的尺寸约为 3 nm,是氮元素掺杂的纳米碳点;当反应温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、反应时间 12 h 时,纳米碳点的荧光性能最佳,激发和发射波长分别为 365 nm 和 435 nm。 Fe^{3+} 的加入能够有效猝灭纳米碳点的荧光,其最低检测限为 $10 \mu\text{mol/L}$;其他离子的加入不会改变纳米碳点的荧光强度和发射峰位置。上述结果表明,绿色方法合成的纳米碳点实现了对 Fe^{3+} 的特异性荧光检测,是一种潜在的金属离子快速检测试剂。

参 考 文 献:

- [1] SUN Y P, ZHOU B, LIN Y, *et al.*. Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2006, 128(24): 7756-7757.
- [2] LIM S Y, SHEN W, GAO Z Q. Carbon quantum dots and their applications [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44(1): 362-381.
- [3] ZHU S J, MENG Q N, WANG L, *et al.*. Highly photoluminescent carbon dots for multicolor patterning, sensors, and bioimaging [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, 52(14): 3953-3957.
- [4] ZHENG M, RUAN S B, LIU S, *et al.*. Self-targeting fluorescent carbon dots for diagnosis of brain cancer cells [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(11): 11455-11461.
- [5] LIU Y, TIAN Y, WANG Y F, *et al.*. Carbon-dot-based nanosensors for the detection of intracellular redox state [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(44): 7156-7160.
- [6] JIANG K, WANG Y H, GAO X L, *et al.*. Facile, quick, and gram-scale synthesis of ultralong-lifetime room-temperature-phosphorescent carbon dots by microwave irradiation [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2018, 57(21): 6216-6220.
- [7] DING H, WEI J S, ZHANG P, *et al.*. Solvent-controlled synthesis of highly luminescent carbon dots with a wide color gamut and narrowed emission peak widths [J]. *Small*, 2018, 14(22): 1800612-1-10.
- [8] 曲松楠, 孙铭鸿, 田震, 等. 氮掺杂碳点的合成与应用 [J]. *发光学报*, 2019, 40(5): 557-580.

- QU S N, SUN M H, TIAN Z, *et al.*. Synthesis and application of nitrogen-doped carbon dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(5):557-580. (in Chinese)
- [9] 王诗琪, 涂雨菲, 刘之晓, 等. 微波法制备掺氮碳点及其用作探针检测铁离子 [J]. *发光学报*, 2019, 40(6):751-757.
- WANG S Q, TU Y F, LIU Z X, *et al.*. Microwave synthesis of nitrogen-doped carbon dots and its application in detection of ferric ions [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(6):751-757. (in Chinese)
- [10] MIAO X, QU D, YANG D X, *et al.*. Synthesis of carbon dots with multiple color emission by controlled graphitization and surface functionalization [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(1):1704740-1-8.
- [11] JIANG K, SUN S, ZHANG L, *et al.*. Red, green, and blue luminescence by carbon dots: full-color emission tuning and multicolor cellular imaging [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54(18):5360-5363.
- [12] 王靖原, 张越诚, 马红燕, 等. 红枣碳量子点“关-开”型荧光探针检测芦丁的研究 [J]. *发光学报*, 2018, 39(4):600-607.
- WANG J Y, ZHANG Y C, MA H Y, *et al.*. Synthesized of carbon quantum dots from red dates and as a “off-on” fluorescence probe for high sensitive detection of rutin [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(4):600-607. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] LI L S, JIAO X Y, ZHANG Y, *et al.*. Green synthesis of fluorescent carbon dots from hongcaitai for selective detection of hypochlorite and mercuric ions and cell imaging [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2018, 263:426-435.
- [15] PACQUIAO M R, DE LUNA M D G, THONGSAI N, *et al.*. Highly fluorescent carbon dots from enokitake mushroom as multifaceted optical nanomaterials for Cr^{6+} and VOC detection and imaging applications [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2018, 453:192-203.
- [16] 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(31):17054-17060.
- [17] MATTEVI C, EDA G, AGNOLI S, *et al.*. Evolution of electrical, chemical, and structural properties of transparent and conducting chemically derived graphene thin films [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, 19(6):2577-2583.
- [18] GONG K P, DU F, XIA Z H, *et al.*. Nitrogen-doped carbon nanotube arrays with high electrocatalytic activity for oxygen reduction [J]. *Science*, 2009, 323(5915):760-764.
- [19] PRATO M, RIGODANZA F, ARCUDI F, *et al.*. Customizing the electrochemical properties of carbon nanodots by using quinones in bottom-up synthesis [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2018, 57(18):5062-5067.
- [20] FENG X, LI Y, HE X W, *et al.*. A substitution-dependent light-up fluorescence probe for selectively detecting Fe^{3+} ions and its cell imaging application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(35):1802833-1-8.
- [21] ZHU X W, ZHANG Z, XUE Z J, *et al.*. Understanding the selective detection of Fe^{3+} based on graphene quantum dots as fluorescent probes: the K_{sp} of a metal hydroxide-assisted mechanism [J]. *Anal. Chem.*, 2017, 89(22):12054-12058.



张艺 (1999 -), 女, 河北南和县人, 硕士研究生, 2020 年于河北大学获得学士学位, 主要从事纳米碳点的合成及应用的研究。
E-mail: 1466919053@qq.com



曾乐勇 (1981 -), 男, 河北新河县人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事磁/光响应型纳米材料制备及应用的研究。
E-mail: zengly@hbu.cn



吴嶝 (1984 -), 女, 辽宁抚顺人, 硕士, 实验师, 2010 年于东北林业大学获得硕士学位, 主要从事无机纳米材料制备及应用的研究。
E-mail: wudi2137@126.com