

黄色荧光碳点用于检测柠檬黄的研究

王光辉¹,于盼¹,郭建花¹,孟雅婷¹,成哲¹,邢剑波²,董川^{1*}

(1.山西大学 环境科学研究所,环境与资源学院,山西 太原 030006;

2.大同市生态环境评估中心,山西 大同 037006)

摘要:本文以4-硝基-1,8-萘二甲酸苷和苯丙氨酸为原料,通过一步水热法合成了黄色荧光碳点(Y-CDs)。该碳点的最佳激发为422 nm,最佳发射为547 nm,荧光量子产率达9.3%。柠檬黄可以通过内滤效应快速猝灭Y-CDs的荧光,以此构建了检测柠檬黄的荧光传感器,实现了目前最长发射波长荧光法检测。其线性范围为0.25 μmol/L~14.8 μmol/L,检出限为58 nmol/L,具有良好的选择性。该传感器已应用于汾河水样和饮料中柠檬黄检测,回收率为94.58%~101.99%。此外,Y-CDs还可用于制备Y-CDs/PVA复合材料作为荧光发光薄膜,呈现亮黄色固体荧光。以上结果表明,Y-CDs在环境检测和固体发光薄膜等领域表现出潜在的应用价值。

关键词:碳点;荧光传感器;柠檬黄;内滤效应

中图分类号:O657.3

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)01-0199-08

Study on Yellow Fluorescent Carbon Dots for Detection of Lemon Yellow

WANG Guanghui¹, YU Pan¹, GUO Jianhua¹, MENG Yating¹, CHENG Zhe¹, XING Jianbo², DONG Chuan^{1*}

(1. School of Environment and Resources, Institute of Environmental Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Datong Ecological Environment Assessment Center, Datong 037006, China)

Abstract: In this paper, yellow carbon dots (Y-CDs) were synthesized by one step hydrothermal method with 4-nitro-1,8-naphthalene diarboside and phenylalanine as precursors. The optimal excitation and emission wavelength of carbon dots are 422 nm and 547 nm, and the fluorescence quantum yield is 9.3%. Due to the inner filter effect (IFE), the fluorescence of Y-CDs was quenched significantly in the presence of lemon yellow. As a result, the fluorescence sensor for detection of lemon yellow was successfully constructed and the fluorescence detection method with good selectivity based on long-wavelength emissive carbon dots was realized. The linear range is 0.25 μmol/L~14.8 μmol/L, while the detection limit is calculated as 58 nmol/L. The sensor was applied to the detection of lemon yellow in beverage and Fenhe river samples, with recovery ranging from 94.58% to 101.99%. In addition, Y-CDs could also be used to prepare Y-CDs/PVA composites as fluorescent luminescent films, which showed bright yellow solid fluorescence. These results show that Y-CDs has potential application value in environmental detection and solid luminescent films.

Key words: carbon dots; fluorescence sensor; lemon yellow; IFE

0 引言

柠檬黄为3-羧基-5-羟基-(对苯磺酸)-4-(对苯磺酸偶氮)吡啶三钠盐,是一种人工合成

的橙黄色偶氮染料^[1],广泛用作涂料及文教用品的着色和各种食品基质中的添加剂,如蜂蜜、能量饮料和果冻等^[2]。然而,一些研究表明,人体一旦摄入过量柠檬黄可能会对健康产

收稿日期:2022-12-06;接受日期:2023-04-28

基金项目:国家自然科学基金(22274090)

作者简介:王光辉(1998-),男,山西原平人,硕士研究生,主要研究方向为环境分析检测。E-mail:1780360440@qq.com

*通信作者:董川(DONG Chuan),E-mail:dc@sxu.edu.cn

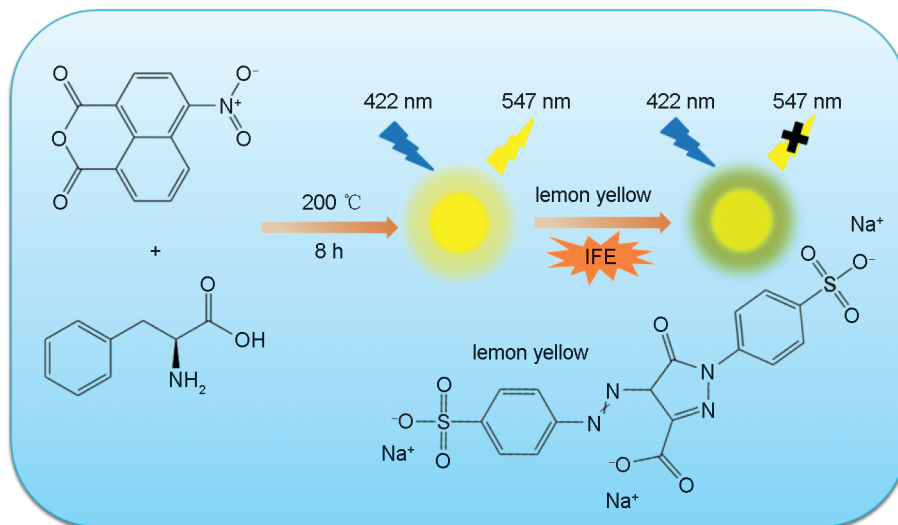
引文格式:王光辉,于盼,郭建花,等.黄色荧光碳点用于检测柠檬黄的研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(1):199-206. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023091

生不利影响,轻则出现焦虑、腹泻、氧化应激和过敏反应,重则会损害肾脏和肝脏,干扰染色体和DNA合成,出现神经行为毒性和生殖毒性^[2-5]。国家规定饮料中柠檬黄的最大允许添加量为0.1 g/kg(国标GB2760-2014-21《食品添加剂使用标准》)^[6]。所以很有必要对食品及环境中柠檬黄的含量进行监测,确保人类食品安全。目前,已经开发出一些检测柠檬黄的方法,但是普遍存在一些缺点。液相色谱法^[7]仪器昂贵,要求专业人员操作且复杂,样品需进行前处理;毛细管电泳法^[8]准确性低,灵敏度和重现性差;电化学法^[9]耗时、选择性差,易受干扰等问题。然而,荧光法作为一种新的检测方法,具有选择性好、分析速度快和操作简便等优点。因此,荧光法在柠檬黄的快速检测中具有极大的应用前景。

碳点(CDs)作为一种新型的荧光纳米材料,具有独特的光学性质和良好的水溶性^[10],被广泛应用于分析传感、环境监测、光电传感和生物成像等领域^[11-12]。近年来,碳点尤其其在环境小分子物质,如金属离子、抗生素和染料色素的检测引起人们广泛的兴趣。目前已有报道,CDs可用于选择性检测环境或者食物中的柠檬黄,且取得了良好的效果。2015年,Xu等^[4]以芦荟为原料,通过水热法简便制备了生物质黄色荧光碳点,基于静态猝灭首次实现了荧光法检测柠檬黄,为检测柠檬黄提供了新方

向。随后,黄颖等^[13]以D-生物素为碳源合成了亮蓝色的硫、氮共掺杂量子点,成功用于柠檬黄和pH的荧光检测,扩展了碳点的应用范围。Yang等^[3]在芦荟为原料的基础上,通过Cl原子掺杂,改进了碳点的荧光性质,构建了基于荧光共振能量转移的柠檬黄检测方法,探索出柠檬黄猝灭荧光碳点的新机理。最近,Liu等^[2]以间苯二胺为唯一前驱体一锅合成了蓝色CDs,基于动态相互作用和内滤效应实现了柠檬黄检测。随着研究的不断深入,检测柠檬黄的荧光法不断增加,检测机理也不断扩展,取得了良好的效果。然而,芦荟等生物质材料所含成分不同,导致碳点在合成过程中不易控制,重复性差,进一步影响荧光法检测柠檬黄。此外,检测柠檬黄的荧光法一直处在蓝绿发射范围,不利于拓展其同时兼具生物成像或发光器件等领域的应用。所以,开发一种稳定、长波发射荧光法用于柠檬黄的检测具有重要的意义。

本文通过一步水热法制备了黄色荧光碳点(Y-CDs)。该碳点具有良好的光学稳定性和长发射波长。基于内滤效应,柠檬黄可以快速猝灭Y-CDs的荧光。因此,我们构建了一种荧光传感器来简便快速检测柠檬黄(如流程图1所示)。该荧光传感器的发射波长(547 nm)超过了荧光法检测柠檬黄中发射波长最长的521 nm^[6],成为目前检测柠檬黄中发射波长最长的荧光法。该方法用于汾河水和饮料样品的检



流程图1 Y-CDs的合成路径及检测柠檬黄的机理示意图

Scheme 1 Schematic diagram of the synthetic route of Y-CDs and the detection mechanism of lemon yellow

测,表现出良好的回收率,表明该方法可用于检测柠檬黄。此外,我们还拓展了该碳点的应用范围,制备了Y-CDs/PVA复合材料,该复合材料可以发射出亮黄色荧光,表现出良好的效果。结果表明,Y-CDs在分析检测和发光器件等方面表现出潜在的应用价值。

1 实验部分

1.1 主要试剂和仪器

试剂:苯丙氨酸、甘氨酸、谷胱甘肽、L-半胱氨酸、葡萄糖、柠檬黄、磷酸氢二钠和磷酸二氢钠等主要化学品购自阿拉丁试剂公司,均为分析纯;聚乙烯醇(质量百分数为97%)购自天津市北辰方正试剂厂;尿素和抗坏血酸(AR)购自北京伊诺凯科技有限公司;碳酸钠、碳酸氢钠和硫酸钠(AR)购自天津市恒兴化学试剂制造有限公司。实验用水均为超纯水。

仪器:FP8300型荧光分光光度计(JASCO,日本分光株式会社公司);Lambda 365型紫外-可见分光光度计(美国PerkinElmer公司);Tensor 27型傅立叶红外光谱仪(德国布鲁克公司);Millipore Simplicity型超纯水机(默克化工,中国上海);FE20型酸度计(瑞士梅特勒-托莱多公司)。

1.2 Y-CDs的制备

首先,称取0.02 g的4-硝基-1,8-萘二甲酸酐和0.04 g的苯丙氨酸混合于烧杯中,然后加入20 mL的超纯水,搅拌并超声使其完全溶解,接着将混合溶液转移到聚四氟乙烯高压反应釜。将其放置烘箱加热到200 °C,反应8 h,冷却到室温,用0.25 μm的微孔滤膜过滤后,使用300 Da的透析袋透析处理24 h,最后进行冷冻干燥,获得黄色固体粉末,放于-4 °C冰箱中冷藏备用。

1.3 柠檬黄的荧光法检测

准确称取Y-CDs固体粉末配置成1 mg/mL的母液,移取50 μL母液于离心管,加入10 μL柠檬黄溶液(0.01 M),用PBS缓冲溶液(pH=7.4)稀释至2 mL。随后加入石英比色皿中进行上机测试并记录547 nm处的荧光发射强度。另外,加入不同浓度的金属离子或者常见小分子物质代替柠檬黄来研究Y-CDs的选择性。

所有测量均重复3次。

1.4 实际样品的检测

选择汾河水和添加柠檬黄的饮料为实际样品。佳得乐功能饮料购买自山西大学东山校区的天猫超市,汾河水取自山西省太原市汾河。佳得乐功能饮料用0.25 μm滤膜过滤后,用PBS缓冲溶液(pH=7.4)稀释十倍备用。汾河水直接用0.25 μm的滤膜过滤处理后,用PBS缓冲溶液(pH=7.4)稀释十倍备用。取上述溶液1.95 mL分别与50 μL Y-CDs母液混合均匀后,测试其荧光强度。所有测试均重复测量三次。

1.5 荧光薄膜的制备

将5 g聚乙烯醇添加到50 mL超纯水中,并在90 °C下剧烈搅拌,直到获得澄清溶液。适当冷却后,将聚乙烯醇溶液与(0、50、100、150和200 μL)的Y-CDs溶液混合至5 mL。混合均匀后,获得含不同体积百分数碳点(0%、1%、2%、3%和4%)的聚乙烯醇溶液。最后将聚乙烯醇混合溶液加入并铺满塑料数字模具,放入烘箱,60 °C下持续干燥24 h后获得了荧光薄膜。

2 结果与讨论

2.1 Y-CDs形貌结构的表征与分析

Y-CDs的尺寸和形貌特征通过透射电子显微镜(TEM)获得。如图1(a),合成的Y-CDs具有良好的分散性,没有聚集,呈现类球形结构。从图1(b)可以得知,碳点的平均粒径约为4.07 nm。元素分析表明Y-CDs由C(61.96%)、N(6.22%)、O(26.72%)和H(5.10%)四种元素组成(所含百分含量为质量分数)。图1(c)是红外光谱图,3 368 cm⁻¹处的宽峰归于O—H和N—H的伸缩振动^[14];2 356 cm⁻¹处的小尖峰是有关CO₂的杂峰,属于干扰峰;1 680 cm⁻¹和1 637 cm⁻¹处的吸收峰分别对应C=O和C—H/C=C的伸缩振动^[15];1 370 cm⁻¹和1 242 cm⁻¹处吸收峰分别归因于C—C和C—N/C—O的伸缩振动^[16]。

此外,对碳点进行了X射线光电子能谱(XPS)表征。如图1(d)所示,在278.0 eV、393.3 eV和523.7 eV处分别对应C 1s谱、N 1s谱和O 1s谱的特征吸收峰。高分辨率C 1s谱(图2(a))显示了三个峰,分别位于284.5 eV、

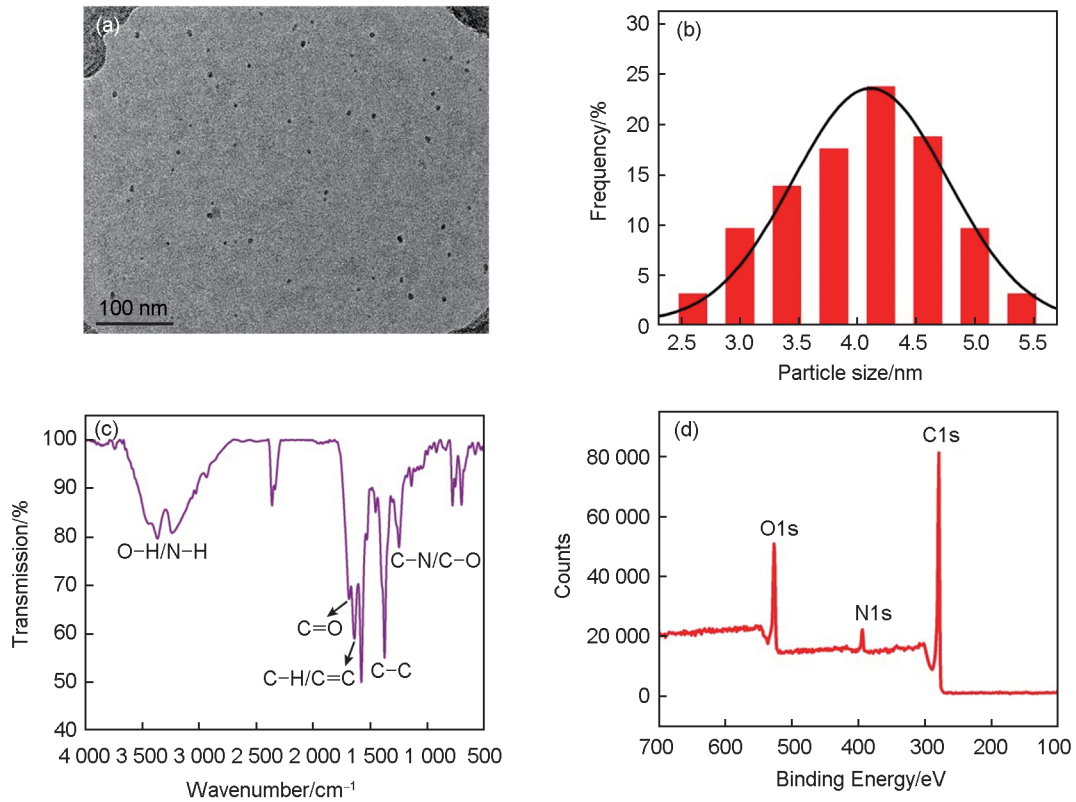


图1 Y-CDs的(a)TEM, (b)粒径分布图, (c)傅立叶红外光谱图, (d)XPS能谱

Fig. 1 (a) TEM, (b) diameter distribution images, (c) FT-IR spectra and (d) XPS spectrum of Y-CDs

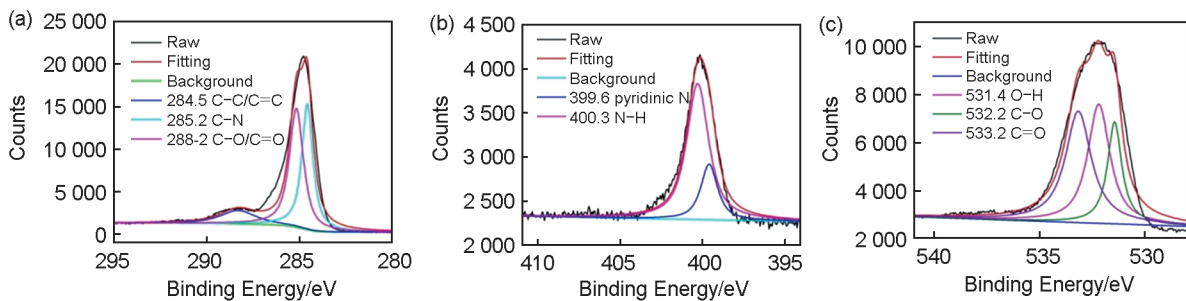


图2 Y-CDs的(a)C1s, (b)N1s, (c)O1s高分辨XPS能谱

Fig. 2 The high-resolution (a) C1s, (b) N1s and (c) O1s XPS spectrum of Y-CDs

285.2 eV 和 288.2 eV, 分别代表 C—C/C=C, C—N 和 C—O/C=O。N 1s 谱图(图 2(b))中有两个峰, 分别对应吡啶 N (399.6 eV) 和 N—H (400.3 eV)。O 1s 谱可以分解为三个峰(图 2(c)), 可归因于 O—H (531.4 eV), C—O (532.2 eV) 和 C=O (533.2 eV)。红外光谱和 XPS 图谱表明, Y-CDs 表面含有丰富的氨基和羟基, 增加了碳点的亲水性和稳定性。

2.2 Y-CDs 的光学性质表征及分析

荧光碳点的光学性质有荧光量子产率(QY), 紫外可见吸收, 荧光光谱(FL)和荧光稳

定性等。通过相对量子产率测定的方法来测定 Y-CDs 的荧光量子产率。以荧光素为参比, 测得 Y-CDs 的荧光量子产率为 9.3%。如图 3(a) 所示, Y-CDs 的紫外可见吸收光谱在 251 nm 和 432 nm 处分别存在特征吸收峰, 分别归因于芳香族苯环 sp^2 杂化的 $\pi-\pi^*$ 跃迁和 C=O 的 $n-\pi^*$ 跃迁。Y-CDs 的最佳激发和最佳发射波长分别为 422 nm 和 547 nm。图 3(b) 是不同激发波长状态下 Y-CDs 的发射光谱, 随着激发波长从 350 nm 到 490 nm 的过程中, 最佳发射波长从 540 nm 红移到 551 nm, 红移了 11 nm, 表明 Y-CDs 的最佳

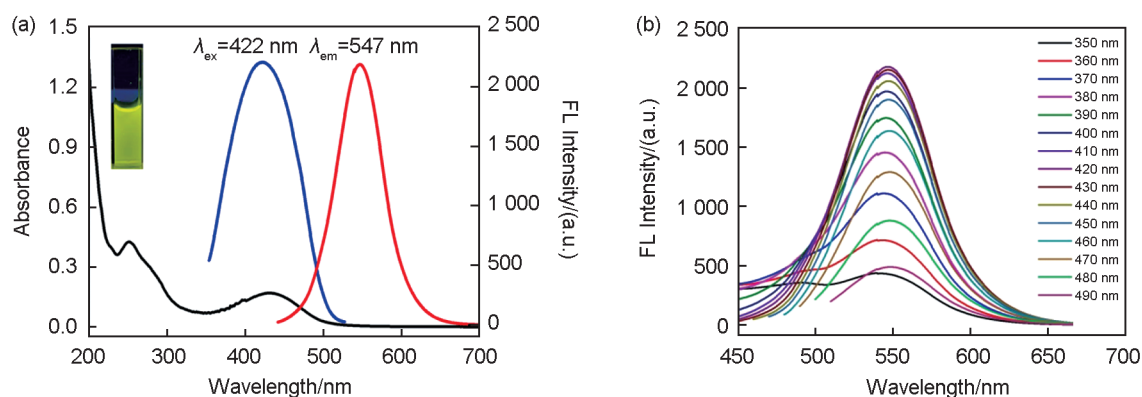


图3 (a)Y-CDs的紫外-可见吸收光谱、荧光激发和发射光谱,插图为紫外灯下的荧光图像;

(b)不同波长激发状态下Y-CDs的荧光发射光谱

Fig. 3 (a) UV-vis absorption, fluorescence excitation and emission spectra of Y-CDs in aqueous solution, inset is a fluorescent image under an ultraviolet lamp; (b) At various excitation wavelengths, fluorescence emission spectra of Y-CDs

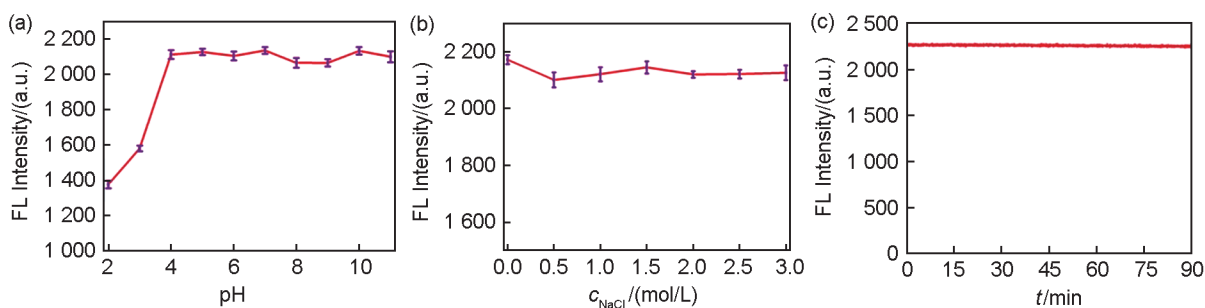


图4 (a)pH, (b)NaCl浓度和(c)氙灯持续照射90 min对Y-CDs荧光强度的影响

Fig. 4 Effects of (a) pH, (b) NaCl concentration and (c) Xenon lamp irradiation for 90 min on fluorescence intensity of Y-CDs

发射波长随激发波长的变化而发生移动,具有激发波长依赖性。这种现象归因于Y-CDs的表面缺陷和表面激发态的复杂性^[17]。

另外,我们还研究了pH、离子强度和氙灯照射时间对Y-CDs荧光强度稳定性的影响。如图4(a)所示,在pH为2~4的缓冲溶液中,Y-CDs的荧光强度减弱;在pH为4~11的区间内荧光强度保持稳定,具有良好的pH稳定性。Y-CDs对pH的响应可归因于表面发生了质子化及去质子化。在0~3 mol/L的NaCl溶液中,Y-CDs的荧光强度没有发生明显的变化(图4(b)),具有良好的离子稳定性。最后,将Y-CDs持续暴露于氙灯下90 min,Y-CDs的荧光强度几乎没有发生改变(图4(c))。这些实验表明Y-CDs具有良好的光学稳定性,有利于其在分析检测等方面的实际应用。

2.3 Y-CDs荧光检测柠檬黄

随着体系中柠檬黄浓度的增加,Y-CDs的荧光强度逐渐下降,甚至完全猝灭(图5(a))。

柠檬黄的浓度和猝灭效率 $(F_0-F)/F_0$ 在0.25~14.8 $\mu\text{mol/L}$ 的范围内具有良好的线性关系(图5(b)),检出限为58 nmol/L。为此,我们开发了一种基于Y-CDs检测柠檬黄的荧光传感器。在相同的条件下,按照实验步骤加入一些水体或饮料中可能存在的离子(Ba^{2+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-})和一些小分子物质,如甘氨酸(Gly)、色氨酸(Trp)、半胱氨酸(Cys)、精氨酸(Arg)、赖氨酸(Lys)、多巴胺(DA)、葡萄糖(Glu)、抗坏血酸(AA)、谷胱甘肽(GSH)、尿素(Urea)、甲基橙(GO)、碱性品红(Fuchsin basic)和茜素黄(AY),以此研究干扰物对Y-CDs荧光强度的影响。如图5(c)所示,只有柠檬黄可以明显地将Y-CDs的荧光猝灭,而其他物质和染料对Y-CDs的荧光强度无明显影响。从图5(d)可以看出,在其他物质干扰的条件下,并不会影响柠檬黄猝灭Y-CDs的荧光。同时,我们还对比了近年检测柠檬黄的荧光法。从表1中可以看

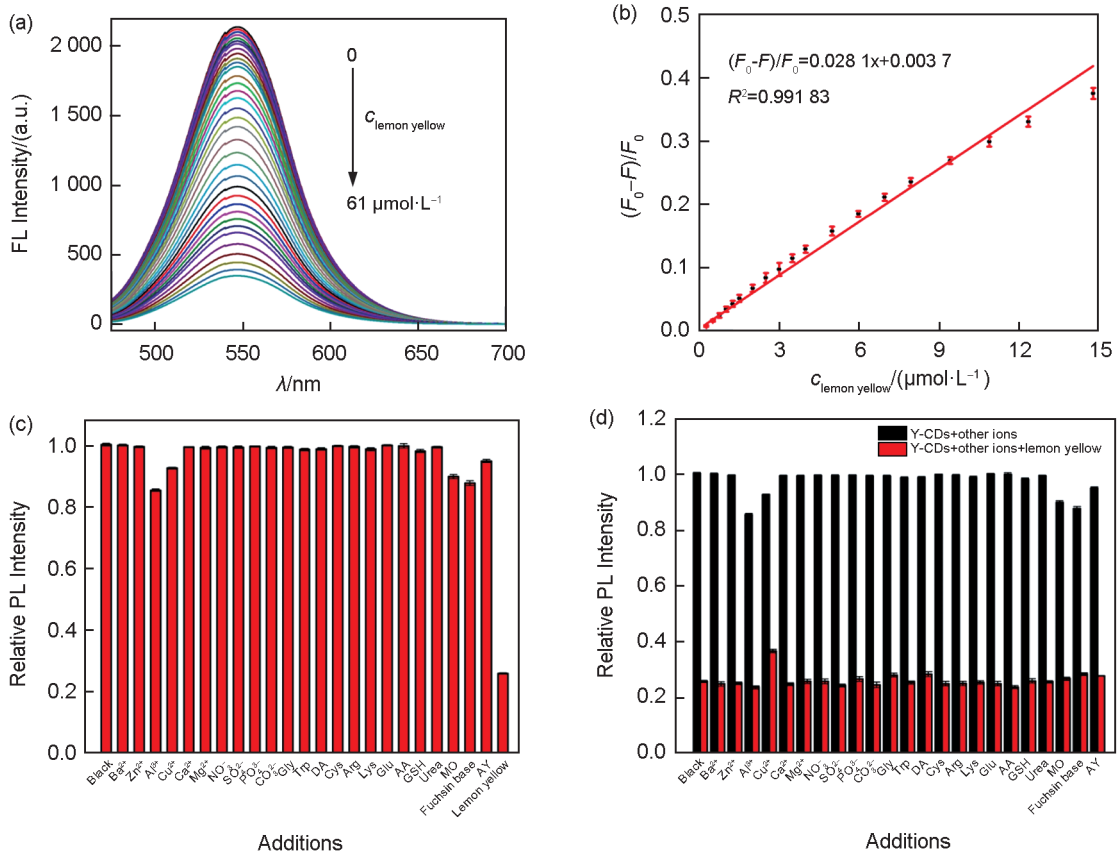


图5 (a) 不同浓度的柠檬黄对Y-CDs荧光强度的影响;(b) $(F_0-F)/F_0$ 与柠檬黄浓度之间的线性关系;(c) 选择性实验;
(d) 其他干扰物质存在时对柠檬黄猝灭Y-CDs荧光的影响

Fig. 5 (a) Fluorescence responses of Y-CDs toward various concentrations of lemon yellow; (b) Linear relationships between $(F_0-F)/F_0$ and concentrations of lemon yellow; (c) Selectivity experiment; (d) Effects of other interfering substances on the quenching of Y-CDs fluorescence of lemon yellow

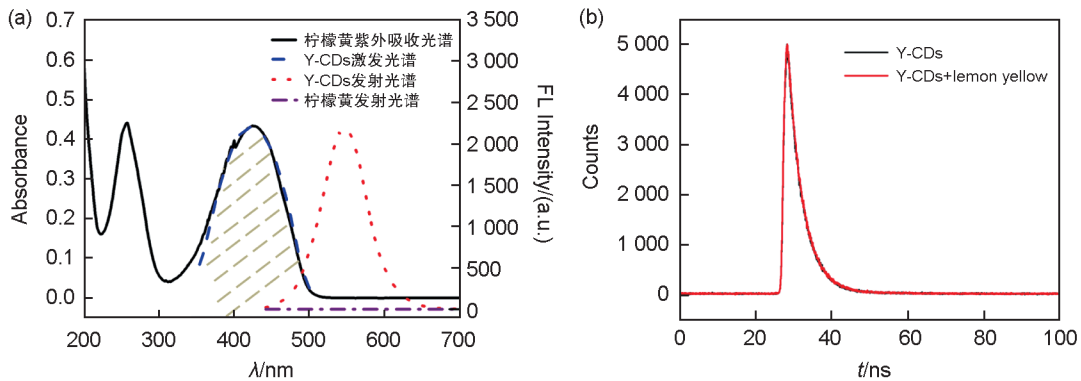


图6 (a) 柠檬黄的紫外可见吸收光谱和荧光发射光谱,Y-CDs的最佳激发光谱和最佳发射光谱;(b) 在加入柠檬黄前后Y-CDs的荧光寿命

Fig. 6 (a) UV-Vis and the emission fluorescence spectrum of lemon yellow, and the maximum excitation and emission fluorescence spectra of Y-CDs; (b) Fluorescent lifetimes of the Y-CDs before and after adding to lemon yellow

出,该方法具有较好的线性范围和最长的发射波长,成为目前检测柠檬黄中最佳发射波长最长的荧光法。以上结果表明,基于Y-CDs的荧光法可以选择性检测柠檬黄,并将其应用在实

际样品的分析。

2.4 检测机理的研究

为了进一步探究荧光猝灭的机理,测定了柠檬黄的紫外-可见吸收光谱、Y-CDs的荧光

表1 不同荧光方法检测柠檬黄的比较

Table 1 Comparison of different fluorescence methods for determination of lemon yellow

方法	线性范围/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	检出限/ ($\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	最佳发射 波长/nm	文献
C-dots	0.25~32.5	73	503	[4]
CDs	0.01~25	12.4	440	[2]
PDA NPs	1.5~45	0.55	521	[6]
CQDs	0.6~23.5	0.2	455	[18]
N,P-CDs	0.01~10	11.6	445	[19]
Y-CDs	0.25~14.8	58	547	This work

光谱和加入柠檬黄前后的荧光寿命。如图6(a)所示,柠檬黄在200 nm~500 nm之间具有较强的吸收带,且柠檬黄的吸收和Y-CDs的激发峰几乎重叠。据此,推测柠檬黄可能与Y-CDs之间发生内滤效应^[20]从而导致荧光猝灭。为了验证猝灭是否由内滤效应引起,测试了Y-CDs加入柠檬黄前后的荧光寿命。Y-CDs在加入柠檬黄前后的平均荧光寿命分别为5.66 ns和5.62 ns,由此看出加入柠檬黄前后的Y-CDs的荧光寿命几乎没有发生变化(图6(b))。因此,证实了柠檬黄猝灭Y-CDs的荧光很大可能是由于内滤效应导致的。

2.5 实际样品中柠檬黄的检测

验证此方法在复杂的实际应用环境中的可行性,Y-CDs被应用于测试汾河水和饮料中柠檬黄的检测分析。如表2所示,汾河水中没有检测出柠檬黄的存在,然后对水样进行了标准加入法回收率测试,回收率在94.58%~101.99%之间,相对标准偏差为2.77%($n=6$)。对于饮料,检测出柠檬黄的浓度为 $3.64 \mu\text{mol/L}\sim 3.91 \mu\text{mol/L}$,相对标准偏差为2.38%($n=6$)。上述结果表明,基于Y-CDs检测实际样品中柠檬黄的分析检测方法是有效可靠的。

2.6 荧光薄膜

为了证实Y-CDs作为荧光薄膜的适用性,选择聚乙烯醇制备Y-CDs/聚合物复合材料。图7是在日光和紫外光下具有不同体积分数Y-CDs(0~4%)含量的Y-CDs/PVA膜的照片。可以看出,制备的荧光薄膜取得了良好的成功,在紫外灯下发出亮黄色的荧光,且随着Y-CDs含量的增加,薄膜的荧光强度逐渐增强。由此,该Y-CDs在薄膜荧光和发光器件等领域具有一定的应用前景。

表2 汾河水和饮料中柠檬黄的测定

Table 2 Determination of lemon yellow in Fenhe river and beverages

实际样品	加入值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	相对标准偏差/ (%, $n=6$)
汾河水	5	4.73	94.58	2.77
		5.10	101.99	
		4.79	95.84	
		5.00	99.97	
		4.93	98.65	
饮料	无	3.64~3.91	无	2.38



图7 不同体积分数Y-CDs(0%、1%、2%、3%和4%)的PVA膜在日光和紫外光(365 nm)下的照片

Fig. 7 Photographs of PVA films with different volume concentrations of Y-CDs (0%, 1%, 2%, 3% and 4%) under sunlight and UV light (365 nm)

3 结论

本文通过水热法快速合成了亮黄色荧光碳点,该碳点具有良好的水溶性和稳定性。基于内滤效应,柠檬黄可以快速强烈地猝灭Y-CDs的荧光。据此,构建了目前发射波长最长的荧光传感器来检测柠檬黄,展现出良好的选择性和检测范围,并成功应用于汾河水和功能饮料中柠檬黄的分析检测。Y-CDs还制备了Y-CDs/PVA复合材料,该荧光薄膜发出亮黄色的荧光,表现出优异的光学性能。该工作为分析检测、食品安全和发光材料等领域提供了基础,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZOUGHI S, FARIDBOD F, AMIRI A, *et al.* Detection of Tartrazine in Fake Saffron Containing Products by a Sensitive Optical Nanosensor[J]. *Food Chem*, 2021, **350**: 129197. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129197.
- [2] LIU L F, SUN H J, XIAO L X, *et al.* Development of a Highly Sensitive Fluorescence Method for Tartrazine Determination in Food Matrices Based on Carbon Dots[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2021, **413**(5): 1485-1492. DOI:

- 10.1007/s00216-020-03118-1.
- [3] YANG X P, XU J, LUO N, *et al.* N, Cl Co-doped Fluorescent Carbon Dots as Nanoprobe for Detection of Tartrazine in Beverages[J]. *Food Chem*, 2020, **310**: 125832. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125832.
- [4] XU H, YANG X P, LI G, *et al.* Green Synthesis of Fluorescent Carbon Dots for Selective Detection of Tartrazine in Food Samples[J]. *J Agric Food Chem*, 2015, **63**(30): 6707–6714. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b02319.
- [5] 刘英姿, 张娟琨, 万雪, 等. 新型分子印迹敏感膜传感器直接快速检测饮料中的柠檬黄[J]. 天津科技大学学报, 2016, **31**(6): 21–26. DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20160001. LIU Y Z, ZHANG J K, WAN X, *et al.* A Novel Sensor for Fast and Direct Determination of Tartrazine in Soft Drinks Based on Molecularly Imprinted Film[J]. *J Tianjing Univ Sci Technol*, 2016, **31**(6): 21–26. DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20160001.
- [6] LIN L P, ZHENG Q L, CHEN Q S, *et al.* Preparation of Fluorescent Organic Nanoparticles via Self-polymerization for Tartrazine Detection in Food Samples[J]. *New J Chem*, 2022, **46**(10): 4756–4761. DOI: 10.1039/d1nj05176h.
- [7] 孙悦, 廖若宇, 刘新保, 等. 高效液相色谱法检测玉米面制品中柠檬黄色素的研究[J]. 粮食加工, 2021, **46**(6): 87–91. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1602.2017.10.039. SUN Y, LIAO R Y, LIU X B, *et al.* Study on Determination of Lemon Yellow Pigment in Corn Flour Products by HPLC [J]. *Grain Process*, 2021, **46**(6): 87–91. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1602.2017.10.039.
- [8] 石媚, 邝明哲, 沈辰谕, 等. 食品中柠檬黄快速检测方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, **48**(23): 352–359. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031859. SHI M, MANG M Z, SHEN C Y, *et al.* Advances in Rapid Detection of Tartrazine in Food[J]. *Food Ferment Ind*, 2022, **48**(23): 352–359. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031859.
- [9] 刘晓鹏, 丁子或, 贺全国, 等. 纳米 TiO₂/还原石墨烯复合修饰电极用于食品中柠檬黄的检测[J]. 包装学报, 2018, **10**(3): 25–33. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7100.2018.03.004. LIU X P, DING Z Y, HE Q G, *et al.* Detection of Tartrazine Based on TiO₂/Electrochemically Reduced Graphene Composites Modified Electrode[J]. *Packag J*, 2018, **10**(3): 25–33. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7100.2018.03.004.
- [10] DU F F, GUO Z H, CHENG Z, *et al.* Facile Synthesis of Ultrahigh Fluorescence N, S-self-doped Carbon Nanodots and Their Multiple Applications for H₂S Sensing, Bio-imaging in Live Cells and Zebrafish, and Anti-counterfeiting[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(39): 20482–20490. DOI: 10.1039/d0nr04649c.
- [11] SHARMA V, TIWARI P, KAUR N, *et al.* Optical Nanosensors Based on Fluorescent Carbon Dots for the Detection of Water Contaminants: A Review[J]. *Environ Chem Lett*, 2021, **19**(4): 3229–3241. DOI: 10.1007/s10311-021-01241-8.
- [12] DEVI P, SAINI S, KIM K H. The Advanced Role of Carbon Quantum Dots in Nanomedical Applications[J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, **141**: 111158. DOI: 10.1016/j.bios.2019.02.059.
- [13] 黄颖, 程正军. 一步水热法合成硫、氮掺杂碳量子点高效检测柠檬黄和pH[J]. 分析试验室, 2018, **37**(5): 589–593. DOI: 10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2018.0111. HUANG Y, CHENG Z J. One-step Hydrothermal Synthesis of Sulfur and Nitrogen Doped Carbon Dots for Efficient Detection of Citrine and pH[J]. *Chin J Anal Lab*, 2018, **37**(5): 589–593. DOI: 10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2018.0111.
- [14] SHANGGUAN J F, HUANG J, HE D G, *et al.* Highly Fe³⁺-selective Fluorescent Nanoprobe Based on Ultrabright N/P Codoped Carbon Dots and Its Application in Biological Samples[J]. *Anal Chem*, 2017, **89**(14): 7477–7484. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b01053.
- [15] WANG Z F, YUAN F L, LI X H, *et al.* 53% Efficient Red Emissive Carbon Quantum Dots for High Color Rendering and Stable Warm White-light-emitting Diodes[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(37): 1702910. DOI: 10.1002/adma.201702910.
- [16] 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]. *Sens Actuat B Chem*, 2017, **241**: 190–198. DOI: 10.1016/j.snb.2016.10.068.
- [17] CHUNG Y J, KIM J, PARK C B. Photonic Carbon Dots as an Emerging Nanoagent for Biomedical and Healthcare Applications[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(6): 6470–6497. DOI: 10.1021/acsnano.0c02114.
- [18] CHATZIMITAKOS T, KASOUNI A, SYGELLOU L, *et al.* Two of a Kind but Different: Luminescent Carbon Quantum Dots from Citrus Peels for Iron and Tartrazine Sensing and Cell Imaging[J]. *Talanta*, 2017, **175**: 305–312. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.07.053.
- [19] 刘凌飞, 孙慧娟, 崔义坤, 等. 氮磷掺杂碳点荧光探针用于食品中柠檬黄的快速检测[J]. 化学研究与应用, 2022, **34**(1): 188–198. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1656.2022.01.026. LIU L F, SUN H J, CUI Y K, *et al.* Fluorescence Probe Based on Nitrogen and Phosphorus Co-doped Carbon Quantum Dots for Tartrazine Detection in Food Stuffs[J]. *Chem Res Appl*, 2022, **34**(1): 188–198. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1656.2022.01.026.
- [20] DAI S J, HAO X L, FANG Z G, *et al.* Water Safety for Human Health: Detection of Pollutants by Blue-emission Carbon Quantum Dots via Three Modes in Different Polluted Water Bodies[J]. *Mater Sci*, 2022, **28**(1): 14–19. DOI: 10.5755/j02.ms.25054.