

新型荧光碳点的一步法制备及细胞成像性能

范红婷¹, 徐佳彤¹, 齐春轩², 马恒昌¹

(1. 西北师范大学化学化工学院, 兰州 730070; 2. 宝鸡文理学院化学化工学院, 宝鸡 721013)

摘要 以1,8-萘二酐(NA)和1,2-邻苯二胺(OPD)为前驱体,采用一步水热法快速制备了一种新型荧光碳点.通过调控反应条件,合成了具有优异发光性能黄色荧光碳点 Y3-CDs.高分辨透射电镜(HRTEM)表征结果显示, Y3-CDs的平均粒径为2.6 nm,晶格间距为0.21 nm,对应的是X射线粉末衍射(XRD)谱图中42.88°处石墨烯衍射峰的(100)晶面.光电子能谱元素(XPS)分析结果表明,碳点中存在 sp^2/sp^3 杂化碳(C=C/C—C, 284.8 eV)、碳氮键(C—N, 286.5 eV)和羰基碳(C=O, 288.4 eV).进一步利用荧光光谱(FL)、紫外-可见吸收光谱(UV-Vis)和荧光寿命对Y3-CDs的发光性能进行了表征,其表现出不依赖于激发的发射行为,表明Y3-CDs为单一发射中心.红外光谱(FIR)和核磁共振波谱(NMR)揭示了更详细的碳原子和氢原子存在状态,¹H NMR表明所有氢原子存在于碳核表面,表现出邻位取代模式和偶联效应.¹³C NMR和DEPT 135谱图表明存在10种不同的叔碳原子.将Y3-CDs应用于细胞示踪及细胞成像,结果表明, Y3-CDs具有优异的细胞成像能力和抗光漂白性能,即使在连续照射180 min后, Y3-CDs仍保持强烈的荧光,可实现长时间HeLa细胞成像.同时,细胞共染实验表明, Y3-CDs具有优异的脂滴选择性成像能力,皮尔森相关系数为0.846.

关键词 碳点; 核磁共振分析; 抗光漂白; 细胞示踪; 脂滴成像

中图分类号 O657.3 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250166

One-step Preparation of Novel Fluorescent Carbon Dots for Cell Imaging

FAN Hongting¹, XU Jiatong¹, QI Chunxuan^{2*}, MA Hengchang^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract In this study, novel fluorescent carbon dots (CDs) were rapidly synthesized *via* a one-step hydrothermal method using 1, 8-naphthalic anhydride (NA) and 1, 2-phenylenediamine (OPD) as precursors. By optimizing reaction conditions, yellow fluorescent carbon dots (Y3-CDs) with superior luminescence performance were prepared. The particle sizes and morphology of the Y3-CDs were characterized by high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), revealing an average diameter of approximately 2.6 nm and an interlayer spacing of 0.21 nm. This spacing corresponds to the d-spacing of graphene (100) planes and is consistent with the diffraction peak observed at 42.88° in X-ray powder diffraction (XRD) analysis. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) confirmed the presence of sp^2/sp^3 hybridized carbons (C=C/C—C, 284.8 eV), carbon-nitrogen bonds (C—N, 286.5 eV), and carbonyl carbons (C=O, 288.4 eV). The optical properties of the Y3-CDs were further investigated using

收稿日期: 2025-06-13. 网络首发日期: 2025-08-05.

联系人简介: 马恒昌,男,博士,教授,主要从事有机功能材料方面的研究. E-mail: mahczju@hotmail.com

齐春轩,男,博士,副教授,主要从事手性发光材料方面的研究. E-mail: qichunxuan@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22165026)和2025年甘肃省高校研究生“创新之星”项目(批准号: 2025CXZX-275)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22165026) and the Innovative Star Project for Graduate Students in Gansu Province Universities 2025, China(No.2025CXZX-275).

fluorescence spectrometry (FL), ultraviolet-visible absorption spectroscopy (UV-Vis), and lifetime measurements. The fluorescence spectra exhibited non-excitation-dependent emission behavior, indicating a single emission center. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and nuclear magnetic resonance (NMR) provided detailed structural insights. Due to their high purity, the characteristic hydrogen (H) and carbon (C) atoms could be clearly resolved and analyzed. ^1H NMR results demonstrated that all H atoms were located on the surface of the carbon core, exhibiting *ortho*-substitution patterns and coupling effects. ^{13}C NMR and DEPT 135 spectra confirmed the presence of ten distinct tertiary carbon atoms. The cell-tracking and imaging performance of Y3-CDs were systematically evaluated. Results demonstrated that Y3-CDs possess excellent cell imaging capabilities and anti-photobleaching properties. Even after 180 minutes of continuous irradiation, Y3-CDs retained strong fluorescence, enabling long-term tracking of HeLa cells. Co-localization experiments further highlighted their selective lipid droplet imaging ability, with a Pearson's correlation coefficient of 0.846.

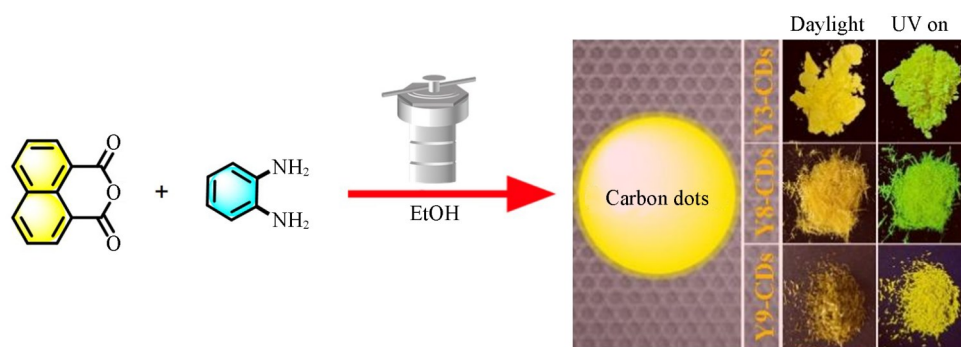
Keywords Carbon dots; NMR analysis; Anti-photobleaching; Cell tracking; Lipid droplet imaging

光响应材料对生物成像^[1-3]、化学传感器^[4]和信息加密^[5]等领域的发展具有极其重要的意义。作为一种新型碳基纳米材料，荧光碳点(CDs)在近十年受到广泛关注，因其化学稳定性好、热学和光学性能优异、生物相容性出色以及毒性低而备受青睐^[6-8]。微小的尺寸使其能够轻易穿透细胞膜，进而实现病灶靶向成像^[9,10]。然而，大多数分子在细胞微环境中易出现光漂白现象^[11]，因此构建长时间细胞成像和抗光漂白性能的碳点仍然具有挑战性。

“自下而上”策略是制备CDs的典型方法^[12]，其碳、氮和氧来源广泛，如小分子^[13]、无机物^[14]、聚合物^[15]或生物质^[16,17]。目前，CDs的真实结构仍然难以精确分析，科学家们认为来自前体的官能团，如一COOH^[18]，—NH₂^[19,20]和—OH^[21,22]等分布于石墨烯的边缘或缺陷部位，在与外界刺激相互作用中发挥重要作用，但其真实情况仍需进一步认识。显然，在确定有机化合物的结构分析中，核磁共振波谱(NMR)分析被认为是最有效的方法。近年来，利用NMR分析CDs杂质、监测合成过程已有研究报道^[23,24]，但对于元素组成复杂、结构多样的碳材料，核磁共振波谱技术的应用仍非常有限。

脂滴是细胞内富含脂质的细胞器，为细胞内脂质储存和转运的动态细胞器，其与许多生理过程有关，如脂质代谢、蛋白质降解、膜形成、能量储存和信号转导等，这些发现明确了其不仅是作为中性脂质的储存场所，还有抑制代谢和调节基因表达等各种功能。更重要的是，脂滴的异常是许多疾病的关键生物标志物，如肥胖、癌症、脂肪肝、动脉粥样硬化和阿尔茨海默病^[25,26]。因此，开发脂滴特异性荧光探针以更好地满足实际需要具有重要意义。

本文采用一步水热法，以具有较大共轭结构的1,8-萘二酸酐和1,2-邻苯二胺为前驱体，快速制备了一种新型黄色荧光碳点Y-CDs(Scheme 1)。前驱体选择的主要原因如下：(1) 1,8-萘二酸酐和1,2-邻苯二胺为芳香结构骨架，这一特性有利于形成大量共轭的 sp^2 结构域；(2) 羧酸酐和氨基均为高反应活性官能团，可在分子内形成供电子与受电子(D-A)相互作用，使CDs具有良好的荧光性能。更重要的是，合成的碳点可以使用简单的柱层析技术进行分离纯化，有望通过核磁手段实现对其化学结构的精准分析。本文通过实验优化，确定了制备碳点的最佳反应条件，并合成了发光性能优异的



Scheme 1 Synthesis process and images of the synthesized Y-CDs under daylight and UV on

Y3-CDs. Y3-CDs的纯度高,在有机溶剂中溶解性良好,并可大规模生产.实验中利用核磁共振波谱分析并结合多种测试方法对其化学结构进行了研究;将其与HeLa细胞共孵育180 min后,Y3-CDs仍然表现出明亮的发光特性,表明该碳点具有良好的稳定性.细胞共染实验表明,Y3-CDs可实现脂滴选择性成像.本文研究结果为高性能荧光碳点的设计合成、结构分析及生物成像应用提供了一种新的思路.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

1,8-萘二酸酐(A. R. 级,纯度98%)、1,2-邻苯二胺(A. R. 级,纯度98%)、乙醇(EtOH,无水级)、乙酸乙酯(纯度99.8%)、石油醚(纯度99.8%)和200~300目硅胶,上海安耐吉化学公司.所用试剂未经进一步纯化处理.实验用超纯水由WP-UPT-40超纯水系统制备.

UV-3600 Plus型紫外-可见-近红外分光光度计(UV-Vis),日本Shimadzu公司;FluoproSEN S9003型稳态荧光光谱仪(FL),英国Gilden公司;C11347型绝对PL量子产率光谱仪(QY),日本Hamamatsu公司;FTS3000型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),美国Digilab公司;RFS100/S型傅里叶拉曼光谱仪(Raman),德国Bruker公司;D8-Advance型X射线粉末衍射仪(XRD),德国Bruker公司;ESCALAB Xi+XPS型光电子能谱仪(XPS),欧洲Thermo Fisher公司;FEI Tecnai G2 F30型场发射透射电子显微镜(TEM),美国FEI公司;AVANCE III 400和Ascend 600型核磁共振波谱仪(NMR),德国Bruker公司;TOKAI HIT and Nikon LU-N4共聚焦荧光显微镜(CLSM),日本Nikon公司.

1.2 实验过程

将1,8-萘二甲酸酐(0.198 g)和1,2-邻苯二胺(0.108 g)作为反应前驱体超声分散于10 mL无水乙醇中,移入50 mL反应釜中,采用一步水热法于180 °C反应4 h.待反应液自然冷却至室温后,得到黄色悬浮液,以10000 r/min转速离心4 min得到黄色固体,此过程重复3次,除去未反应的原料和溶剂.粗产物通过柱层析法进一步提纯(洗脱剂:石油醚/乙酸乙酯,体积比5:1),得到黄色粉末,产率95%.

通过简单的制备提纯操作过程,对反应物摩尔比(5:1, 3:1, 1:1, 1:3和1:5)、反应时间(4, 6, 8和12 h)和反应温度(120, 150, 180和200 °C)等实验条件进行优化,确定了碳点构建的最佳反应条件,筛选条件见表1.

Table 1 Reports of the synthetic details

Sample	Molar ratio	Time/h	Temperature/°C
Y1-CDs	5:1	4	180
Y2-CDs	3:1	4	180
Y3-CDs	1:1	4	180
Y4-CDs	1:3	4	180
Y5-CDs	1:5	4	180
Y6-CDs	1:1	4	140
Y7-CDs	1:1	4	220
Y8-CDs	1:1	8	180
Y9-CDs	1:1	12	180

1.3 细胞培养和细胞成像

将HeLa细胞系置于35 mm的培养皿中并放在培养箱中,培养基为90%基础培养基(DMEM)+10%胎牛血清+1%抗生素(青霉素100 U/mL和链霉素100 μg/mL).待细胞贴壁后,加入一定浓度的染料进行孵育(1 mL细胞培养基中加入5 μL含染料的DMSO母液),置于荧光共聚焦显微镜下观察Y3-CDs的成像特点.

1.4 细胞共染

将HeLa细胞与Y3-CDs(5×10^{-6} g/mL)在细胞培养箱中共孵育30 min后,加入尼罗红(5×10^{-7} mol/L)

继续共孵育 30 min, 吸出培养基, 用 PBS 缓冲液轻轻冲洗细胞 3 次后, 用荧光共聚焦显微镜观察共染结果. Y3-CDs 所用激发波长为 405 nm, 收集 420 ~ 520 nm 波长范围的荧光; 尼罗红所用激发波长为 561 nm, 收集 580 ~ 680 nm 波长范围的荧光.

2 结果与讨论

2.1 碳点的合成及发光性能表征

碳点(Y-CDs)的合成路线如 Scheme 1 所示, 采用一步水热法通过改变反应条件, 合成了 9 种荧光碳点(见表 1). 发光性能测试结果表明, 无论在固态[见本文支持信息图 S1(A)]或者溶液[见本文支持信息图 S1(B)]中, 9 种碳点均具有宽的紫外吸收. 在图 1(A)所示的固态荧光测试中, Y3-CDs 表现出最优的发光性能. 基于反应条件调控和基本发光性能测试结果, 最终确定 1,8-萘二酸酐与 1,2-邻苯二胺反应的比例为 1:1, 反应时间 4 h, 反应温度 180 °C 为最佳合成条件. 为研究不同条件下所制备碳点的结构和光物理性能的变化, 筛选出 Y3-CDs, Y8-CDs 和 Y9-CDs 进行系统分析.

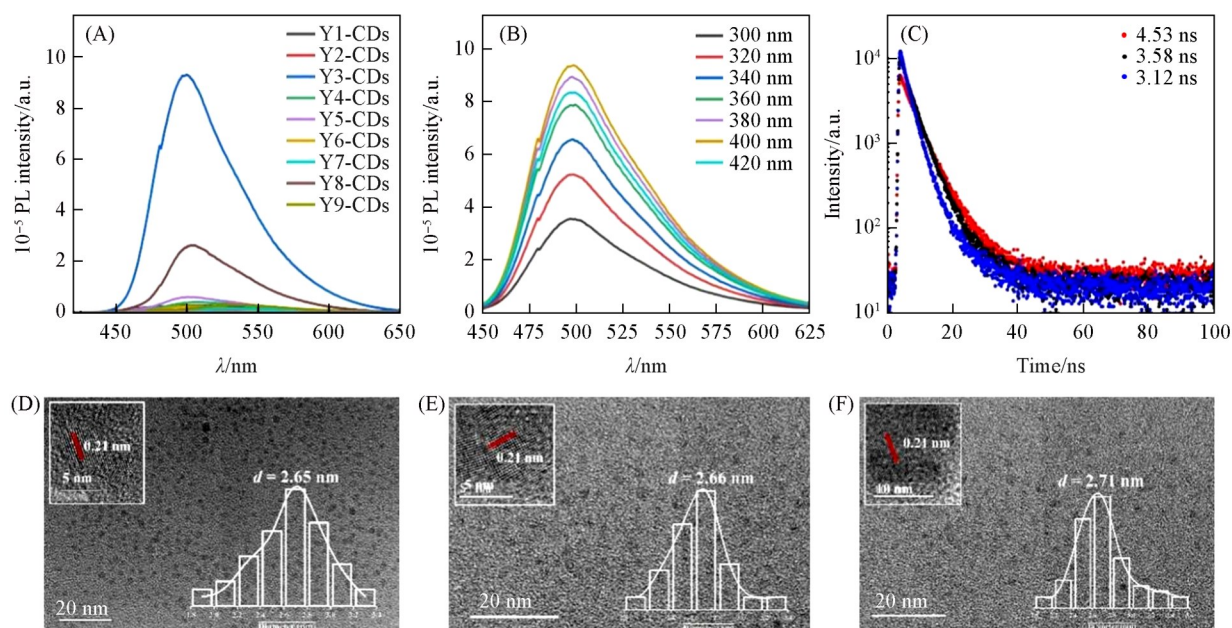


Fig. 1 PL properties and structure characterizations of Y-CDs

(A) PL spectra of nine different Y-CDs samples in powders ($\lambda_{\text{ex}}=400 \text{ nm}$); (B) PL spectra of Y3-CDs when excitation wavelength ranges from 300 nm to 420 nm; (C) decay spectra of Y3-CDs (red line), Y8-CDs (blank line) and Y9-CDs (blue line) under 365 nm light irradiation; TEM image of Y3-CDs (D), Y8-CDs (E) and Y9-CDs (F). Inserts of (D)–(F): size distributions (bottom right) and HRTEM images (top left) of Y3-CDs (D), Y8-CDs (E) and Y9-CDs (F).

由荧光测试结果可知, 随着反应时间的增加, 在相同激发波长下($\lambda_{\text{ex}}=400 \text{ nm}$), Y3-CDs, Y8-CDs 和 Y9-CDs 的荧光发射波长分别为 496, 504 和 539 nm, 出现明显的波长红移, 这一现象与透射电子显微镜所得碳点尺寸大小变化规律一致, 即随着碳点粒径的增大, 其发射波长向长波方向移动. 此外, 在改变激发波长后, 碳点的荧光发射波长未发生明显变化[图 1(B)、S1(C)和 S1(D)](见本文支持信息). 该结果与以往的研究报道^[27,28]完全不同(碳点由于存在复杂的发光团结构, 通常易发生激发依赖的荧光发射现象), 这可能是由于本文所制备的碳点尺寸分布窄所致.

2.2 碳点的光物理与结构性能

采用高分辨透射电子显微镜(HRTEM)、红外光谱(FTIR)、拉曼光谱(Raman)、荧光寿命分析、光电子能谱元素(XPS)和 X 射线粉末衍射分析(XRD)等方法对碳点的形貌, 结构和光物理性能进行了表征. HRTEM 图像显示, 碳点为均匀的球形纳米颗粒, Y3-CDs, Y8-CDs 和 Y9-CDs[图 1(D)–(F)]的晶

格间距均为0.21 nm^[29], 对应于石墨烯(100)晶面, 平均尺寸分别为2.65, 2.66和2.71 nm, 此结果与荧光表征数据一致, 即随着加热时间的延长, 碳点的尺寸变大, 出现荧光红移现象. 荧光寿命测试结果[图1(C)]表明, Y3-CDs具有比Y8-CDs和Y9-CDs更长的荧光寿命, 因此发光性能更优异. 碳点的高石墨化程度在拉曼光谱中得到进一步体现, 如本文支持信息图S2(B)所示, G带均位于约1580 cm⁻¹处, 其强度的主导地位使得碳点具有较好的结晶质量, 与sp²碳核的高结晶度是一致的. 通过XRD分析验证了3个碳点的结晶性能, 如图2(A)所示, 在2θ = 8° ~ 31°之间出现一系列尖峰, 说明碳点有很高的结晶度^[30]. 经计算得出2θ=42.88°处的d值为0.21 nm, 具体计算公式如下:

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

式中: d(nm)值为晶格间距; θ为XRD图中横轴坐标; n=1(表示为一级衍射); λ(nm)为X射线波长(λ=0.15406 nm). d值计算结果与HRTEM测定结果一致.

利用XPS光谱进一步测定了碳点中元素的组成和化学状态. 如图2(B)所示, Y3-CDs全光谱在285, 399和532 eV处呈现3个明显的峰, 可分别归属于C_{1s}, N_{1s}和O_{1s}的结合能, 对应的原子比分别为79.82%, 10.74%和9.44%. C_{1s}的高分辨XPS谱图中位于284.8, 286.5和288.4 eV的3个峰表明, 碳点中存在3种不同类型的碳[图2(C)], 可分别对应为C=C/C—C, C—N和C=O. N_{1s}分析表明, 碳点中存在吡啶氮(398.6 eV)和石墨烯氮(400.7 eV)[图2(D)]^[31]. 同时, O_{1s}谱图中2个峰位于531.7和532.9 eV, 证明C=O和C—O基团的存在[图2(E)]. Y8-CDs和Y9-CDs的XPS谱图分析结果(见本文支持信息图S3和图S4)与Y3-CDs一致. 图2(F)所示FTIR表明, 碳点上形成了几个具有代表性的官能团, 如N—C=O(1699 cm⁻¹), C=C(1450 cm⁻¹)和Ar—N(1352 cm⁻¹), 并且3种碳点都具有相同的代表性官能团[见本文支持信息图S2(A)]. 综上, 上述分析结果表明合成的碳点是一种高度结晶、石墨化和功能化官能团结合的碳材料.

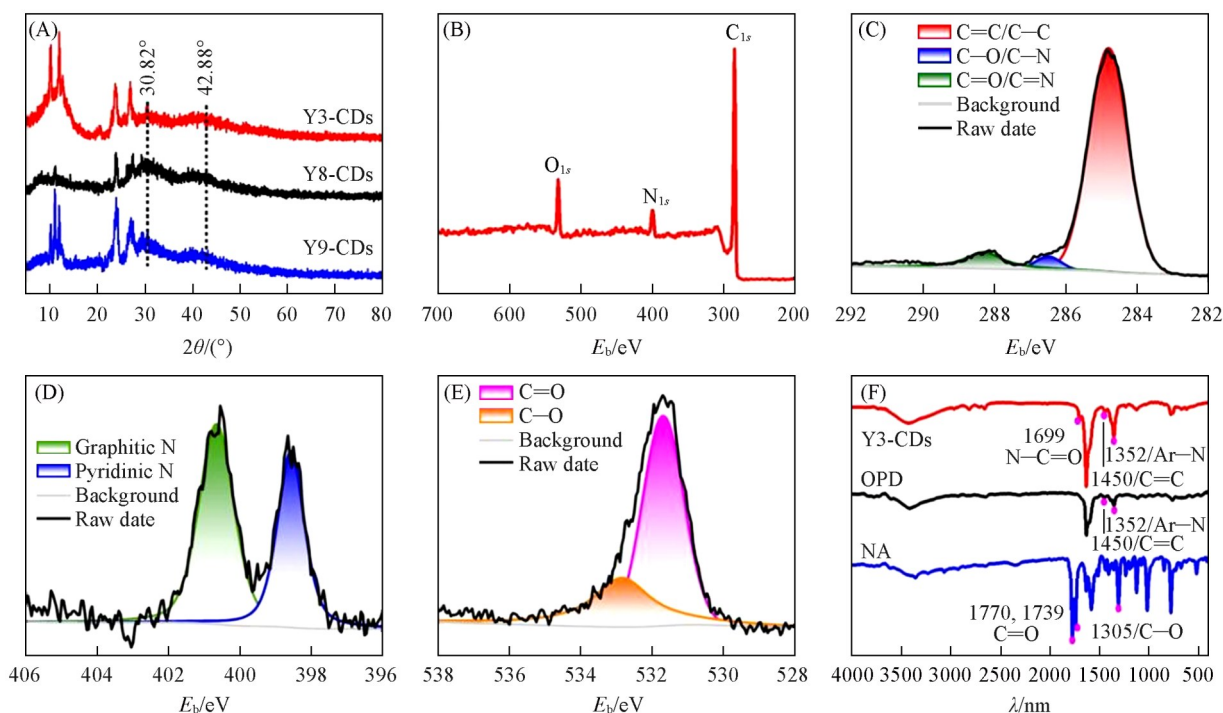


Fig. 2 XRD patterns of Y3-CDs, Y8-CDs and Y9-CDs(A), XPS spectrum of Y3-CDs(B), XPS spectra peaks of C_{1s}(C), N_{1s}(D) and O_{1s}(E) of Y3-CDs, FTIR spectra of NA, OPD and Y3-CDs(F)

2.3 碳点的核磁共振表征

碳点的分离提纯是影响其结构与性能表征的难点, 制备过程中产生的副产物难以通过常规方法完全去除. 目前, 诸多研究采用柱层析分离技术为碳点的纯化及结构解析提供了有力支撑^[32-34]. 为了获

取更多结构信息, 本文采用核磁共振(NMR)方法对Y-CDs及其前驱体进行了表征. 由图3可见, 与2种前驱体相比, Y3-CDs的化学位移发生了明显改变, 并移动至 δ 7.3~8.8处, 可归因于大共轭芳香结构的去屏蔽效应; 谱图中发现了7种H原子, 对应7个非常明显的峰簇; 此外, 部分峰簇裂分成双峰或多峰, 说明所有H原子均出现在碳核表面, 并被邻位取代且相互耦合, 因此其真实存在状态如图3所示.

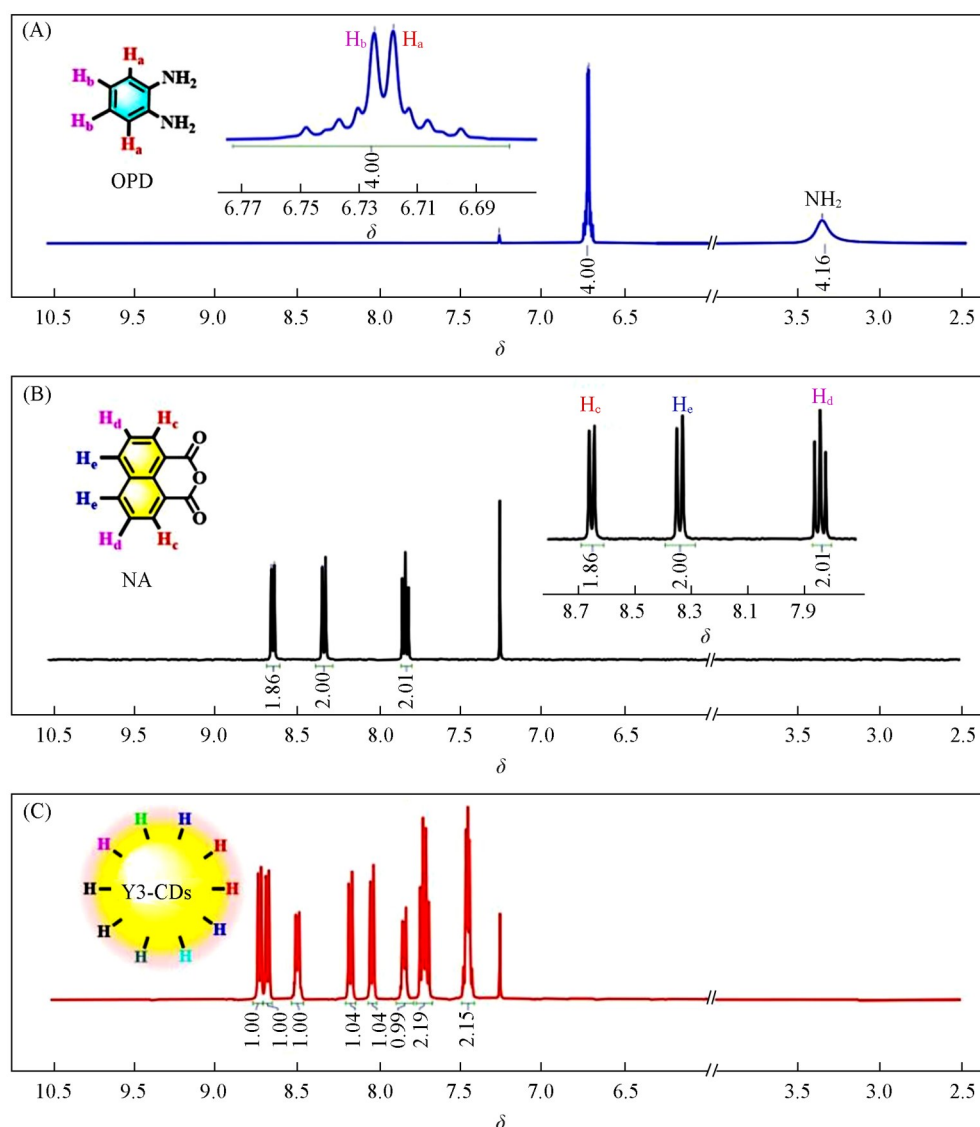


Fig. 3 ^1H NMR spectra of OPD(A), NA(B) and Y3-CDs(C) measured in CDCl_3 at room temperature

以往研究中前驱体的官能团, 如 $-\text{COOH}$ ^[18], $-\text{NH}_2$ ^[19,20], $-\text{OH}$ ^[21,22]等均接枝到石墨烯片的边缘或缺陷位置. 而本文中在Y3-CDs的 ^1H NMR谱图中未出现游离的 $-\text{NH}_2$ 峰, 这一结论与XPS表征结果[图2(D)]完全一致, 即只检测到吡啶氮和石墨氮, 而未发现氨基氮.

实验中测定了前驱体分子ODP和NA及Y3-CDs的 ^{13}C NMR谱图. 如图4所示, Y3-CDs结构中有18种碳原子, 其中8种为季碳原子, 这是由于DEPT 135谱图中8个峰消失并保留10个峰, 可确认碳点中存在10种叔碳原子. 此外, Y3-CDs谱图中 δ 160.44对应的化学位移相较于NA (160.54)的 $\text{C}=\text{O}$ 向低场发生轻微位移, 此结果表明氮原子参与到碳核的形成过程, 因为 $\text{C}=\text{O}$ 可作为电子受体, 其强吸电子作用使氮原子上的电子云向 $\text{C}=\text{O}$ 基团偏移, 导致碳核中形成分子内D-A相互作用. 对比ODP和NA与Y3-CDs的谱图可知, 在Y3-CDs中无法检测到ODP和NA的碳出峰信号, 说明ODP和NA作为构建单元, 其碳原子完全集成到碳核中. 为排除碳点溶解性问题对液相核磁共振谱图产生的影响, 对Y3-CDs进行了固态核磁共振碳谱表征, 其谱图(见本文支持信息图S9)中清晰可见Y3-CDs的所有特征峰.

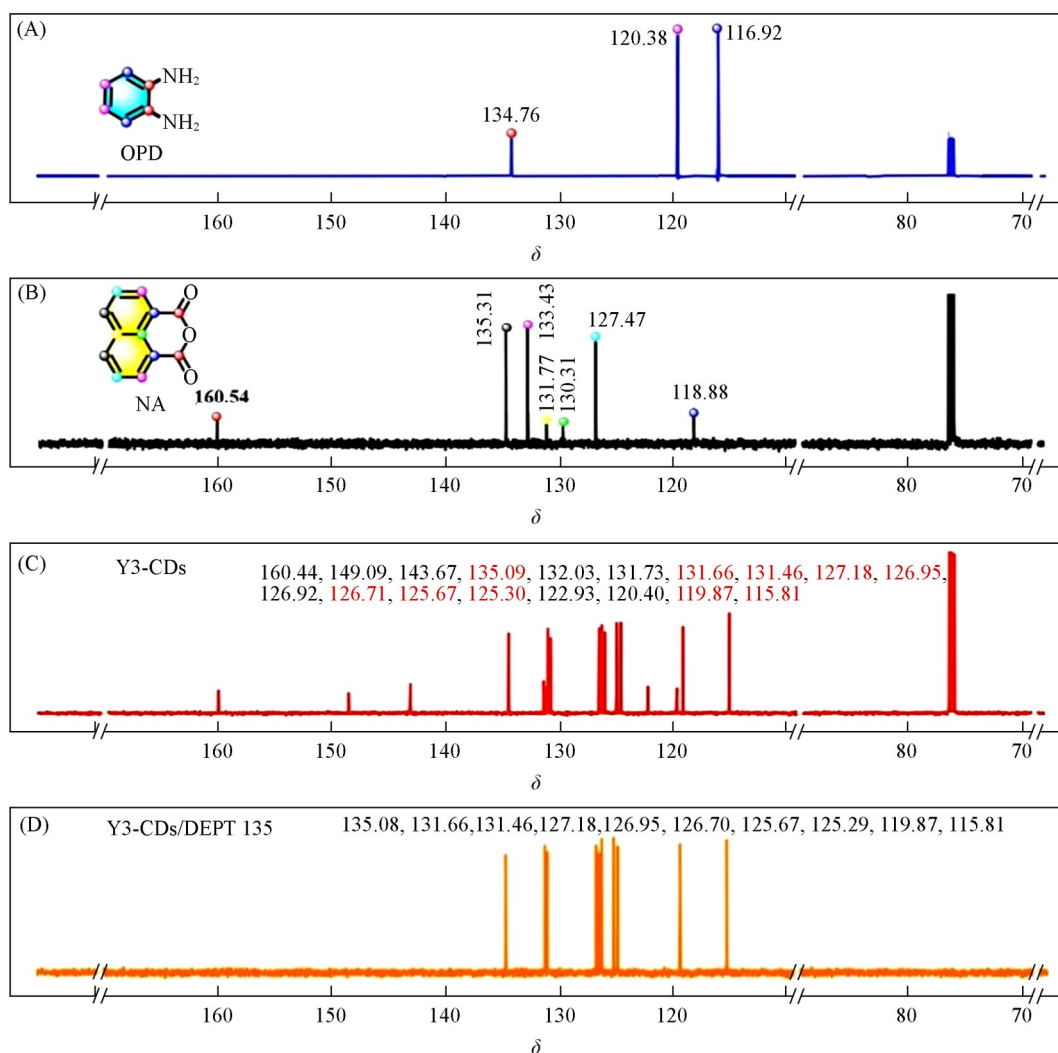


Fig. 4 ^{13}C NMR spectra of OPD(A), NA(B) and Y3-CDs(C) measured in CDCl_3 at room temperature, and DEPT 135 spectra of Y3-CDs measured in CDCl_3 at room temperature(D)

Y8-CDs(见本文支持信息图S5和S6)和Y9-CDs(见本文支持信息图S7和S8)的 ^1H NMR和 ^{13}C NMR谱图与Y3-CDs具有相似的氢元素、氮元素和碳核结构特点.

与以往研究结果不同,本研究通过选择芳香原料的前驱体克服了传统碳点纯度难以控制的问题;避免了有机染料合成的繁琐过程;可协助碳材料以更“化学”的方法进行结构分析,即以核磁共振分析方法为辅助手段,并结合HRTEM, XPS, IR和Raman等方法,更准确深入了解碳点的真实化学结构.

2.4 碳点的细胞成像和脂滴共染

脂滴是储存脂质的细胞器,在许多生物代谢过程和疾病研究中起到重要作用.脂滴代谢异常与神经退行性疾病、癌症等密切相关. CDs已被证明是理想的生物成像和传感探针,因此,将碳点开发为对脂滴有良好靶向功能的荧光探针具有极其重要的研究价值.

为探究Y3-CDs在生物成像方面适用性,以HeLa细胞为模型细胞系进行生物实验评估了其在细胞成像分析中的应用.将Y3-CDs与HeLa细胞进行共孵育,并在荧光共聚焦显微镜下动态观察其进入细胞及抗光漂白能力.细胞成像结果如图5(A)所示,Y3-CDs具有强的细胞膜渗透性,在10 min内即可实现细胞快速穿透,经60 min连续共聚焦激光照射后,碳点仍保持高强度荧光(见本文支持信息图S10),并且当共孵育时间延长至180 min时,Y3-CDs仍保持非常优异的亮度,具有良好的抗光漂白能力.从细胞成像图像中还可发现Y3-CDs靶向积聚在脂滴上,并表现出明显的亮绿色荧光,通过与市售的脂滴靶向性染料尼罗红进行共染,发现Y3-CDs与尼罗红的红色荧光完美重叠,其皮尔森相关系数达到

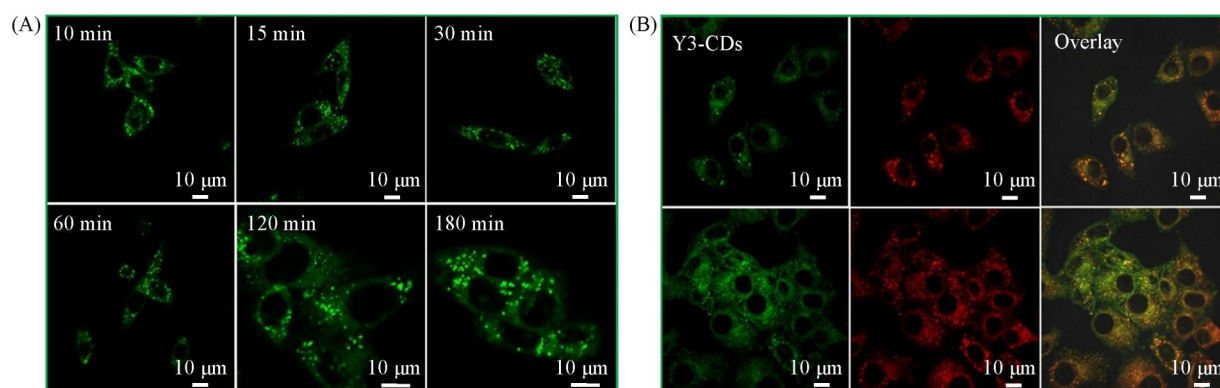


Fig. 5 Photos of long-time HeLa cell imaging by Y3-CDs within 10 min to 180 min(A) and confocal fluorescence imaging of Y3-CDs(5 $\mu\text{g/mL}$) incubated HeLa cells co-stained with Nile Red lipid stain (0.5 $\mu\text{g/mL}$)(B)

The Pearson's correlation coefficient is calculated as 0.846.

0.846[图5(B)]. 因此, Y3-CDs 是一种具有高度可视化成像能力的脂滴靶向探针, 在细胞成像中具有良好的应用潜力.

3 结 论

选用具有较大共轭结构的前驱体, 采用一步水热法快速合成了具有优异发光性能黄色荧光碳点, 结合核磁共振波谱分析及其它测试手段, 建立了一种更可靠的 CDs 结构分析方法, 从而实现 CDs 结构的深入了解, 以提供更详细的结构信息. 本工作不仅可以为合理设计特殊功能 CDs 提供一个通用的方法, 而且还能为开发亮度高、抗光漂白性能好及脂滴靶向能力优异的碳点提供有价值的借鉴.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20250166>.

感谢生态功能高分子材料教育部重点实验室与甘肃省生态环境高分子材料重点实验室的支持.

参 考 文 献

- [1] Chen P. Y., Zhang G. Y., Li J. G., Ma L. J., Zhou J. Y., Zhu M. G., Li S., Wang Z., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, 40(2), 293—304
- [2] Pearson S., Feng J., del Campo A., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(50), 2105989
- [3] Lai X. N., Shen C. L., Shan C. X., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, 46(6), 20240407(赖晓南, 沈成龙, 单崇新. 高等学校化学学报, **2025**, 46(6), 20240407)
- [4] Liu Y. P., Yang J. X., Hao Y. M., Qu S. N., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, 46(6), 20240070(刘钰鹏, 杨钧翔, 郝一鸣, 曲松楠. 高等学校化学学报, **2025**, 46(6), 20240070)
- [5] Ejeromedoghene O., Omoniyi A. O., Akor E., Alowakennu M., Samson K. A., Abesa S., Zhang Z. X., *Appl. Mater. Today*, **2024**, 37, 102088
- [6] Ren S. C., Lv H. X., Chen S., Zhou J., Chen S. Y., Chen J. X., Luo J. X., Guo Y. X., Wang H., Zhai J. J., Zhou Y. M., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(14), 20885—20900
- [7] Liu Y. Z., Li P. F., Sun Z. C., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, 46(6), 20250103(刘翼泽, 李鹏飞, 孙再成. 高等学校化学学报, **2025**, 46(6), 20250103)
- [8] Liu M. J., Hao X. L., Dai S. J., Wang S. Y., Wang Y., Zang H., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2023**, 39(2), 234—239
- [9] Pang L. F., Fang W. L., Zhang B., Xu Q. J., *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 321, 124743
- [10] Zhang H. Y., Li J. P., Li Y. Q., Tan K. X., Wang H., Yang M. Y., Ju Y. H., Liu Y., Wang G., Song X. F., Gu P., Xie X. M., Yang S. W., Ding G. Q., Zhou H. F., Fan X. Q., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(6), 2414817
- [11] Terracina A., Armano A., Meloni M., Panniello A., Minervini G., Madonia A., Cannas M., Striccoli M., Malfatti L., Messina F., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(31), 36038—36051
- [12] Liu H. X., Zhong X., Pan Q., Zhang Y., Deng W. T., Zou G. Q., Hou H. S., Ji X. B., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 498, 215468
- [13] Chen C. C., Xu Z. Q., Qiu J. M., Ye W. H., Xu X. K., Wang R. Z., Hu C. F., Zhuang J. L., Lei B. F., Li W., Zhang X. J., Hu G. Q., Liu Y. L., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2022**, 5(7), 9140—9149

- [14] Zhang Q., Li X. F., Xu Y. Z., Xu Z. X., Xu L. H., *J. Hazard. Mater.*, **2025**, *490*, 137845
- [15] Bhattacharya S., Phatake R. S., Barnea S. N., Zerby N., Zhu J. J., Shikler R., Lemcoff N. G., Jelinek R., *ACS Nano*, **2019**, *13*(2), 1433—1442
- [16] Yang L. J., Dai F., Tang H. T., Li M., An Y. B., Tan Y. B., Liu R. Y., Tan X. Y., Zhang W. X., Rizvi S. F. A., Zou J. J., Lu Z. X., Liu G., *Chem. Eng. J.*, **2025**, *513*, 162637
- [17] Shi X. F., Ma Q. L., Jia X. L., Wu Z. F., Yu C. H., Gao T., Xu W., Sun Z. N., Zhang J. W., Xiong H. M., Mao Y. Q., *Small Struct.*, **2025**, *6*(3), 2400435
- [18] Li L. Y., Wu J., Wu X., Li Z. J., Zhang X. M., Yan Z. K., Liang Y. Q., Huang C. S., Qu S. N., *Adv. Mater.*, **2025**, *37*(20), 2420068
- [19] Guo D. B., Hou Y. J., Xu Q., Wang B. Z., Zhang T. S., Cheng Q. S., Chen M. H., Huang L. X., Xing G. C., Qu S. N., *Light-Sci. Appl.*, **2025**, *14*(1), 163
- [20] Xia W. B., Wu Z. X., Hou B. Y., Cheng Z., Bi D. C., Chen L. Y., Chen W., Yuan H. Y., Koole L. H., Qi L., *Mater. Today Bio*, **2025**, *30*, 101428
- [21] Guo Z. S., Qi F. Z., Dong J., Xue J. T., Wang Y. L., Xu B., Liu G. N., Sun Y. Q., Li C. C., *Nano Lett.*, **2025**, *25*(1), 434—442
- [22] Li Y., Cai H., Bi H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*(6), 20240130(李燕, 蔡皓, 毕红. 高等学校化学学报, **2025**, *46*(6), 20240130)
- [23] Zheng X., Huang Y. S., Lv W., Fan J. Z., Ling Q. D., Lin Z. H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, *61*(35), e202207104
- [24] Wang L. M., Wu J., Wang B. Z., Xing G. C., Qu S. N., *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, *678*, 575—582
- [25] Mathiowetz A. J., Olzmann J. A., *Nat. Cell Biol.*, **2024**, *26*(3), 331—345
- [26] Walther T. C., Chung J., Faese R. V., *Annu. Rev. Cell Dev. Bi.*, **2017**, *33*, 491—510
- [27] Qin L. B., Song Y., Zhang Y. Y., Gao W., Meng X. Y., Bai Y. F., Geng K. X., Niu P. Y., Wang Y. R., Wu N., Bai, J. L., Ma J. L., Ren L. L., *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, *679*, 135—143
- [28] Mohandoss S., Palanisamy S., Priya V. V., Mohan S. K., Shim J. J., Yelithao K., You S. G., Lee Y. R., *Microchem. J.*, **2021**, *167*, 106280
- [29] Boukhalov D. W., Osipov V. Y., Murzalinov D., Serikkanov A., Bi H., *Carbon*, **2024**, *225*, 119101
- [30] Sun S. H., Lu K. Z., Li N., Dong Z. H., Yue M. B., Fu Q., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2024**, *7*(7), 7720—7730
- [31] Wang F. H., Dong X. Z., Zuo Y. J., Xie Z., Guan R. F., *Mater. Today Phys.*, **2024**, *41*, 101332
- [32] Guo G., Xia Y. S., *Anal. Chem.*, **2024**, *96*(13), 5095—5105
- [33] Zhao M. Z., Lin M. Y., Guo G., Xia Y. S., *Anal. Chem.*, **2024**, *96*(51), 20169—20178
- [34] Xu J. H., Liang Q. J., Li Z. J., Osipov V. Yu., Lin Y. J., Ge B. H., Xu Q., Zhu J. F., Bi H., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*(17), 2200011

(Ed.: L, V, K)