

基于聚集调控的多色碳纳米点荧光粉

赖晓南, 沈成龙, 单崇新

(郑州大学物理学院, 中原之光实验室, 郑州 450001)

摘要 以柠檬酸和尿素为原料, *N,N*-二甲基甲酰胺为溶剂, 采用溶剂热法制备了具有浓度依赖性的荧光碳纳米点. 用去离子水对碳纳米点原液进行不同倍数的稀释, 发现随着稀释倍数的增加, 碳纳米点之间的能量传递逐渐减弱, 其荧光颜色逐渐从红色转为蓝色, 发射强度逐渐增强. 使用层析分离技术研究了浓度对碳纳米点荧光发射特性的影响, 结果表明, 碳纳米点原液具有不同荧光颜色的碳纳米点组分, 碳纳米点之间的福斯特共振能量转移和吸收再发射的能量传递导致不同浓度碳纳米点溶液荧光发射的变化. 基于此, 以淀粉为限域基质, 通过调节基质中碳纳米点的浓度, 实现了多色碳纳米点荧光粉的精确调控. 研究结果为碳纳米点的光学调控提供了新思路, 为其在荧光标记和显示技术等领域的应用提供了可能性.

关键词 碳纳米点; 多色; 荧光; 聚集调控; 荧光粉

中图分类号 O613.71

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240407

Aggregation Regulation-assisted Multicolor Carbon Nanodots Fluorescent Phosphor

LAI Xiaonan, SHEN Chenglong*, SHAN Chongxin

(School of Physics and Laboratory of Zhongyuan Light, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract Carbon nanodots (CDs) with concentration-dependent fluorescence were synthesized with citric acid and urea as precursors in *N,N*-dimethylformamide through solvothermal strategy. The CDs solution was diluted with deionized water at various ratios. The energy transfer between the CDs particles gradually weakened when the dilution ratio increased, leading to a shift in fluorescence color from red to blue and an enhancement in emission intensity. A systematic investigation on the concentration effects on the fluorescence emission properties of CDs were conducted with a chromatography separation techniques, revealing that the as-prepared CDs solution contained the multicolor components and the fluorescence variations in CDs solutions were attributed to Förster resonance energy transfer and reabsorption energy transfer. Thus, the precise regulation of multicolor CDs phosphors was further achieved with the starch as confined matrix to regulate the energy transfer between CDs. These findings present a new strategy to regulate the optical properties of CDs and pave a new insight the applications of fluorescence labeling and display technology.

Keywords Carbon nanodots; Multicolor; Fluorescence; Aggregation regulation; Phosphors

随着现代科学技术的发展, 照明需求不断增加. 现代照明用的白光光电器件主要由紫外光、蓝光芯片及相应的复合荧光粉组成, 如由蓝光氮化镓芯片和相应的铬基黄色荧光粉组成的商用白光芯片. 目前, 商用荧光粉主要由含有重金属的无机化合物组成, 其制备过程存在环境污染及回收利用困难等

收稿日期: 2024-08-28. 网络首发日期: 2024-10-28.

联系人简介: 沈成龙, 男, 博士, 副研究员, 主要从事碳基功能纳米材料合成与应用方面的研究. E-mail: phyiclshen@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 62204223)、中国博士后科学基金(批准号: 2022TQ0307)和河南省自然科学基金(批准号: 222102310664)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.62204223), the China Postdoctoral Science Foundation(No.2022TQ0307) and the Natural Science Foundation of Henan Province, China(No.222102310664).

问题. 近年来, 随着纳米技术的发展, 基于有机发光材料的荧光粉已有大量报道^[1,2]. 然而, 有机发光材料存在制备方法复杂、纯化路径较多及成本昂贵等问题, 因此, 开发制备方法简单且成本低廉的荧光粉是一个重要课题^[3,4].

碳纳米点(Carbon nanodots, CDs)通常指由碳原子构成骨架且尺寸小于10 nm的粒子. 由于碳纳米点具有发光性质易调控、荧光量子产率高、生物相容性良好和表面易功能化的特性, 已成为荧光材料领域的研究热点^[5-7]. 目前, 碳纳米点被广泛应用于生物成像、光电器件、传感器和荧光探针等领域^[8-14]. 由于在碳纳米点的合成过程中会产生副产物, 其合成需要苛刻的化学反应条件以及复杂的提纯方法, 大批量合成碳纳米点荧光粉仍是一项巨大挑战.

本文采用溶剂热法制备了碳纳米点, 研究了其在不同浓度下的荧光发射性质^[15-17]. 研究发现, 随着稀释倍数的增加, 碳纳米点之间的能量传递逐渐减弱, 其荧光颜色逐渐从红色转为蓝色, 发射强度逐渐增强. 采用层析分离技术研究了浓度对碳纳米点荧光发射特性的影响, 结果表明, 碳纳米点原液具有不同荧光颜色的碳纳米点组分, 而碳纳米点之间的福斯特共振能量转移和发射再吸收引起的能量传递会导致不同浓度的碳纳米点溶液荧光发射的变化^[18-21]. 基于此, 利用淀粉作为限域基质, 通过调节基质中碳纳米点的浓度, 实现了多色碳纳米点荧光粉的精确调控^[22-26]. 研究结果为碳纳米点荧光粉在显示技术、生物成像和荧光探针等领域的应用奠定了基础, 并展示了聚集调控在多色荧光材料中的巨大潜力^[27,28].

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

柠檬酸(纯度99.9%)、尿素(纯度99.9%)、淀粉(纯度99%)和*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF, 纯度99%), 中国上海国药化学试剂有限公司. 所用试剂均未做纯化处理.

JEOL JSM-IT100型透射电子显微镜(TEM), 日本电子株式会社; D8-Advanc型X射线衍射仪(XRD), 德国布鲁克AXS公司; Kratos AXIS Ultra DLD型X射线光电子能谱仪(XPS)和UV-3101PC型紫外-可见吸收光谱仪(UV-Vis), 日本岛津公司; Renishaw 1000型拉曼光谱仪(Raman), 英国Renishaw PLC公司; F-7000型荧光激发-发射光谱仪(PL), 日本日立高新技术公司.

1.2 碳纳米点的制备

碳纳米点采用溶剂热法合成. 首先, 将1 g柠檬酸和2 g尿素溶解于10 mL DMF中, 将溶液转移至高压反应釜中, 于60 °C反应12 h, 将反应釜冷却至室温, 得到棕色分散液即为碳纳米点原液. 在紫外光照射下该分散液发出红色荧光. 量取1 mL碳纳米点原液, 分别加入3, 15, 63, 255和1063 mL去离子水, 得到不同浓度的碳纳米点溶液.

1.3 碳纳米点的层析

将碳纳米点原液分散于DMF中, 加载至层析柱中, 以DMF为洗脱液, 逐步洗脱出在紫外灯下具有红、绿、蓝3种不同荧光颜色的碳纳米点溶液.

1.4 碳纳米点荧光粉的制备

取10 mL稀释后的碳纳米点溶液, 加入10 g淀粉, 超声混合均匀. 将混合物置于干燥箱中, 于80 °C干燥24 h, 得到在紫外灯下具有不同荧光色彩的荧光粉.

2 结果与讨论

2.1 碳纳米点的合成与结构表征

如图1(A)所示, 以柠檬酸和尿素为原料, DMF为溶剂, 采用溶剂热法制备了荧光碳纳米点. 碳纳米点原液在日光下呈不透明的褐色, 在365 nm紫外灯下发出橙红色荧光[图1(B)]. 向原液中加入大量水稀释后制样, 采用透射电子显微镜(TEM)对碳纳米点进行了形貌表征, 由图1(C)可见, 碳纳米点具有均匀的纳米尺寸的球形结构, 粒径分布范围较宽, 其尺寸为0~14 nm, 主要集中在6 nm附近. 采用

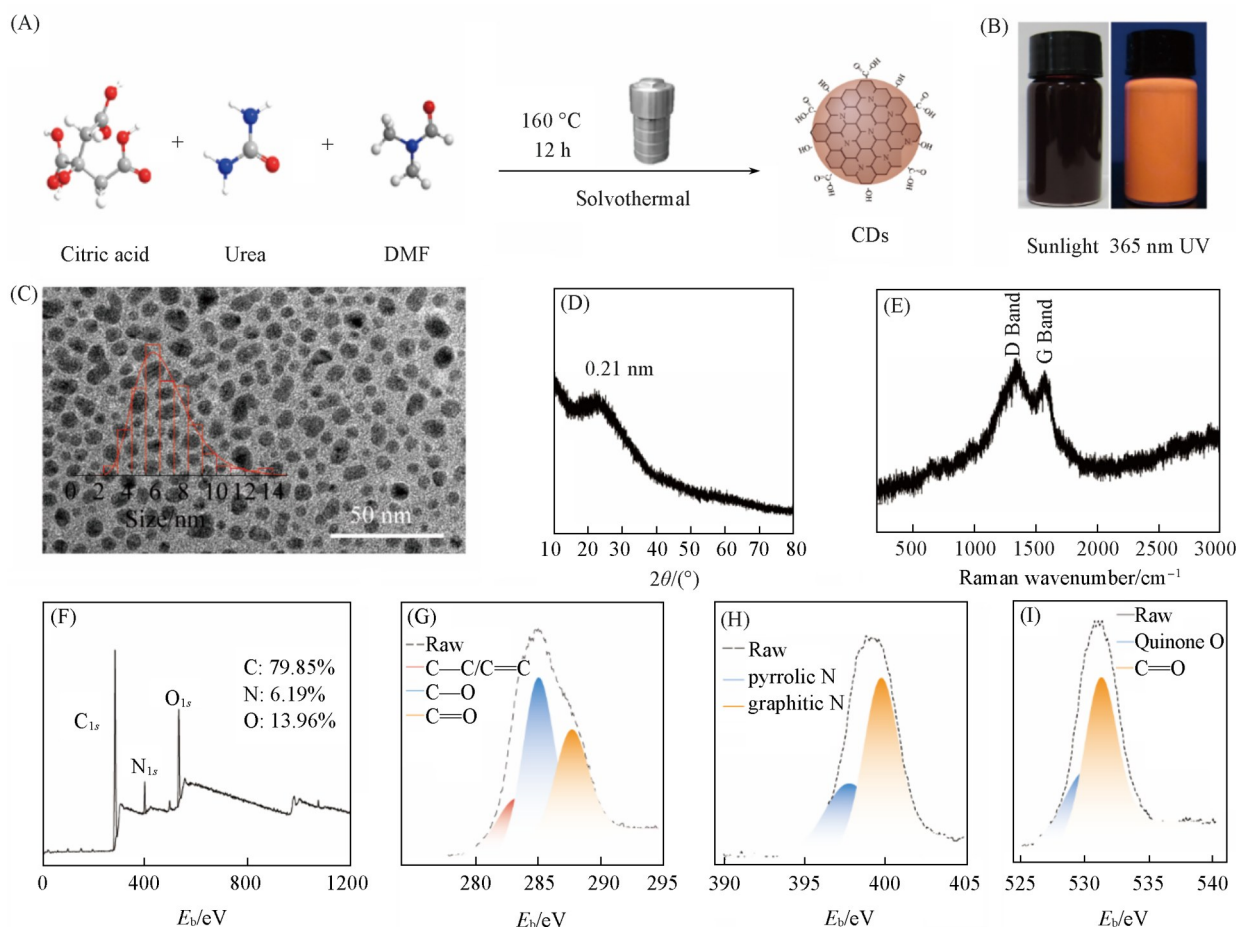


Fig. 1 Synthesis and characterization of the CDs

(A) Synthesis route of CDs; (B) photos of the CDs solution under sunlight and 365 nm UV lamp; TEM image (C), XRD pattern (D) and Raman spectrum (E) of CDs; (F) full XPS survey; high-resolution XPS spectra of C_{1s} (G), N_{1s} (H), and O_{1s} (I) of CDs, respectively. Inset of (C): size distribution of CDs.

X射线衍射(XRD)技术表征了碳纳米点的晶体结构,由图1(D)可见,在 $2\theta=25^\circ$ 附近存在一个宽而弱的衍射峰,对应于层间距为0.21 nm的石墨(001)晶面,表明碳纳米点在碳化后具有石墨相的晶核.碳纳米点的拉曼光谱如图1(E)所示,特征性D带(约 1350 cm^{-1})和G带(约 1580 cm^{-1})的出现表明碳纳米点具有典型的碳基材料特征.其中,D带反映了碳材料中碳原子产生的缺陷或无序结构,G带则对应碳原子的平面振动模式,两者的相对强度表明了碳纳米点的石墨化程度,较高的D带强度表明碳纳米点中存在较多的结构缺陷.为了研究碳纳米点的化学组成,采用X射线光电子能谱(XPS)对碳纳米点进行了分析,结果如图1(F)~(I)所示.XPS全谱显示,碳纳米点中主要含有碳(C),氮(N)和氧(O)元素,其中碳元素的比例(摩尔分数)最高,占79.85%,氧元素占13.96%,氮元素占6.19%.由高分辨率XPS谱图可见,碳纳米点表面存在C—C/C=C键,C—O键和C=O键[图1(G)]以及吡咯氮和石墨相氮[图1(H)],上述官能团与碳纳米点的荧光性质密切相关,特别是C=O键和C—O键[图1(I)]与碳纳米点的电子结构和光学性能显著相关.上述化学键的存在表明碳纳米点表面结构具有多样性,这为其发光特性提供了可能^[29].

2.2 碳纳米点荧光发射的浓度依赖性

将碳纳米点原液稀释,研究了碳纳米点溶液荧光发射的浓度依赖性.如图2(A)所示,用去离子水分别将原液稀释至4, 16, 64, 256, 1024和4096倍.图2(B)为原液在不同激发光下的发射光谱,在波长小于480 nm的激光激发下,碳纳米点原液的发射峰出现在约500 nm处,而在波长大于500 nm的激光激发下,碳纳米点原液的发射峰出现在约640 nm处,同时其发射光谱呈明显的激发依赖性.稀释的

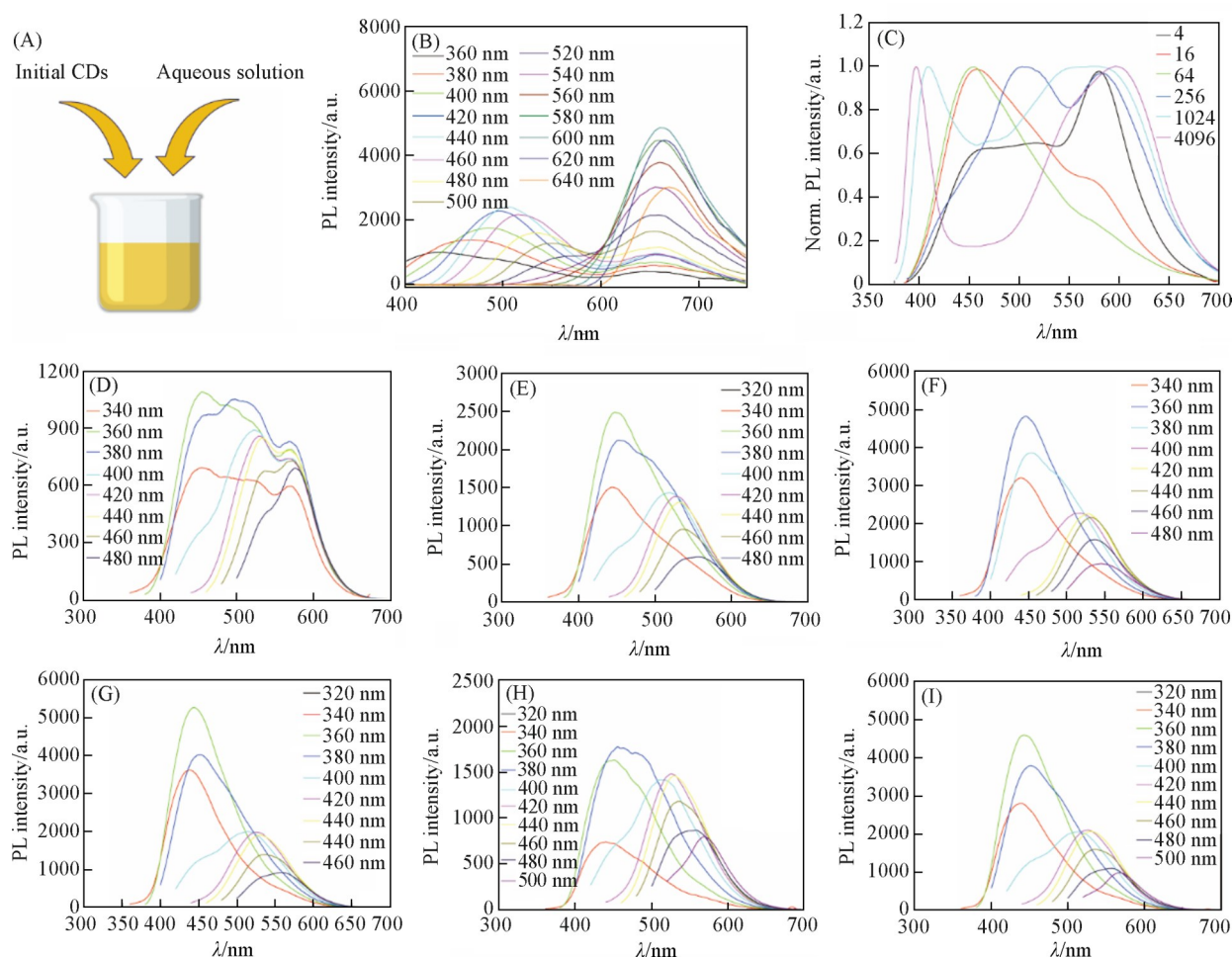


Fig. 2 Concentration-dependent fluorescent CDs solution

(A) Schematic illustration of the dilution for the CDs solution; (B) the fluorescence emission of the CDs solution under different excitation wavelength; (C) the fluorescence emission of the CDs solution after different dilution under 365 nm excitation; (D—I) the fluorescence emission of the CDs solution after different dilution under different excitation wavelength.

碳纳米点溶液表现出明显的浓度依赖性, 如图 2(C) 所示, 不同稀释倍数的碳纳米点溶液在 365 nm 紫外光激发下, 荧光光谱明显不同, 光谱中的长波长发射峰消失, 发射峰逐渐蓝移且半高宽变窄. 图 2(D)~(G) 为不同稀释倍数的碳纳米点溶液在 365 nm 紫外光激发下的荧光光谱, 随着碳纳米点溶液的稀释, 碳纳米点在紫外灯下逐渐从橙红色转变为天蓝色, 同时荧光强度不断增强. 稀释 4 倍的碳纳米点溶液荧光光谱[图 2(D)] 发射峰明显蓝移, 发射峰集中在 450 和 580 nm 附近; 稀释 16 倍和 64 倍的碳纳米点溶液荧光光谱[图 2(E) 和 (F)] 显示, 荧光发射峰位于 450 和 540 nm 附近; 稀释 256 倍的碳纳米点溶液荧光光谱[图 2(G)] 发射峰在约 450 和 530 nm 处; 稀释 1024 倍和 4096 倍的碳纳米点溶液荧光光谱[图 2(H) 和 (I)] 发射峰进一步蓝移至约 450 和 525 nm 处. 不同稀释倍数的碳纳米点溶液发射光谱均表现出明显的浓度依赖性^[30]. 同时, 通过改变温度(120 °C/200 °C)[图 S1 和 S2(见本文支持信息)] 和反应时间(8 h/4 h)[图 S3 和 S4(见本文支持信息)], 可制备出不同的碳纳米点. 在温度和时间不充足的条件下, 尽管碳纳米点原液发光性质不同, 但稀释的碳纳米点溶液均表现出一定的浓度依赖性, 其荧光发射峰随着稀释发生蓝移. 此外, 将 DMF 换为二甲基乙酰胺(DMAC) 和 H₂O 后, 得到的碳纳米点原液具有不同的荧光发射性质, 将碳纳米点原液稀释后, 其发光光谱表现出浓度依赖性[图 S5 和 S6(见本文支持信息)], 表明柠檬酸体系的碳纳米点荧光发射光谱的浓度依赖性具有普适性.

2.3 碳纳米点的纯化与表征

为了研究碳纳米点荧光发射的浓度依赖性, 对碳纳米点原液进行了分离提纯. 使用 DMF 为层析试

剂对碳纳米点原液展开后,在紫外灯下可观察到碳纳米点原液具有不同的荧光成分组成,通过层析柱分离后,可获得具有不同荧光颜色的成分[图3(A)].分离出在365 nm紫外灯下具有红色、绿色和蓝色荧光的3种碳纳米点,其在紫外灯下的发射峰分别位于450,550和650 nm附近.图3(C)为3种碳纳米点的紫外-可见吸收光谱.其中,蓝色碳纳米点的吸收光谱在350 nm附近表现出较强的吸收,该吸收带与碳纳米点的 $\pi-\pi^*$ 跃迁有关.绿色碳纳米点的吸收光谱在350和450 nm附近有明显的吸收带,其中350 nm处的吸收带对应于碳纳米点的 $\pi-\pi^*$ 跃迁,450 nm处的吸收带对应于碳纳米点的 $n-\pi^*$ 跃迁^[31].与蓝色碳纳米点相比,绿色碳纳米点的吸收带向长波长方向扩展,表明其具有略小的能隙.红色碳纳米点的吸收带在500~600 nm范围内,波长范围更宽,并在500 nm附近具有显著的吸收峰.红色碳纳米点的吸收范围最广,且在长波长区的吸收最强,表明红色碳纳米点的能隙最小.由红色、绿色和蓝色碳纳米点的TEM照片[图3(D)~(F)]可见,不同颜色的碳纳米点表现出不同的形貌特征.红色碳纳米点的颗粒尺寸较大(约4.5 nm),且形状较规则,表面呈较均匀的结构分布;绿色碳纳米点的颗粒尺寸中等,分布较均匀(约2.8 nm),表面较光滑;而蓝色碳纳米点颗粒尺寸较小(约2 nm),且具有较高的分散性.上述结果表明,碳纳米点表面的化学性质和尺寸的不同导致其可在层析过程中分离.图3(G)~(I)为3种碳纳米点在不同激发波长下的荧光发射光谱,红色碳纳米点在600~650 nm的激发波长范围内均在650 nm附近出现发射峰,绿色碳纳米点在500~550 nm的激发波长范围内均在550 nm附近出现发射峰,蓝色碳纳米点在450~500 nm的激发波长激发下的荧光发射峰出现明显变化,表现出显

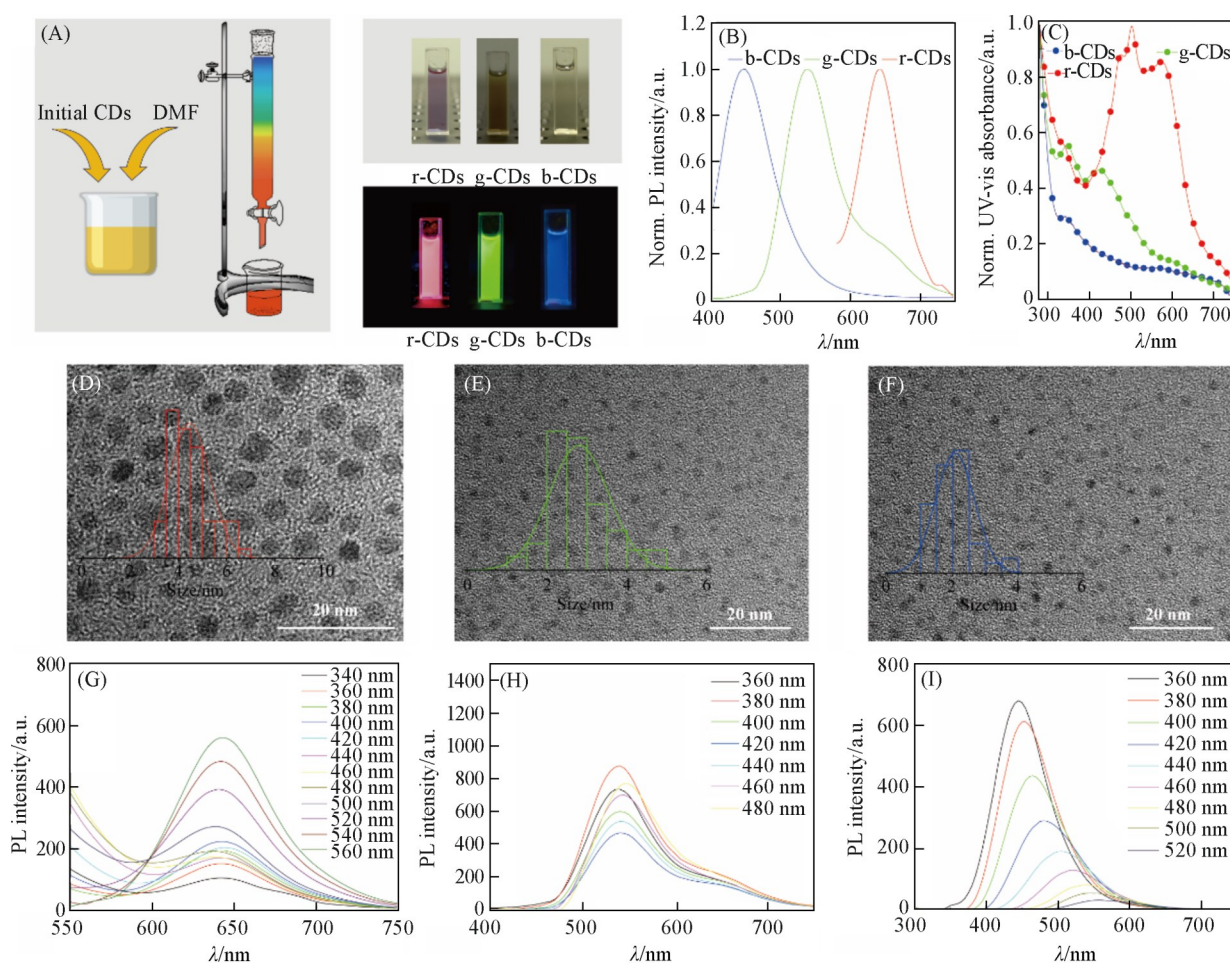


Fig. 3 Separation and characterization of the different CDs

(A) Separation of b-CDs, g-CDs and r-CDs with column chromatography; (B) fluorescence emission spectra of r-CDs, g-CDs and b-CDs under 365 nm excitation; (C) UV-Vis absorption spectra of r-CDs, g-CDs and b-CDs, (D–F) TEM images and the corresponding particle size distribution of r-CDs, g-CDs and b-CDs, respectively; (G–I) fluorescence emission spectra of r-CDs, g-CDs and b-CDs, respectively.

著的波长依赖性。推测在碳纳米点合成过程中的复杂化学路径导致产物具有复杂的荧光性质，从而使具有不同吸收和荧光发射的碳纳米点之间发生了能量传递，从而使碳纳米点具有浓度依赖性。

2.4 碳纳米点荧光发射浓度依赖性的原理

为了探究碳纳米点荧光发射浓度依赖性的原理，对碳纳米点原液进行了表征。如图4(A)所示，高浓度碳纳米点水溶液的TEM照片表明，高浓度的碳纳米点可形成团簇。进一步表征了碳纳米点在稀释10倍和10000倍后的荧光光谱和荧光寿命。如图4(B)所示，两种碳纳米点溶液的发射光谱不同，575 nm处的荧光强度衰减谱表明，稀释10倍和10000倍的碳纳米点溶液的荧光寿命分别为1.54和7.07 ns [图4(C)]。上述结果表明，高浓度碳纳米点的非辐射路径增多。不同稀释倍数的碳纳米点的量子产率分别为0.12%，0.60%，0.96%，1.85%，6.27%和11.28%，逐渐增加的量子产率证明了碳纳米点之间强的能量传递[图S7(见本文支持信息)]。高浓度碳纳米点之间距离较近，可发生能量传递，从而增加非辐射跃迁的概率，导致寿命减少。结合前文中可层析分离不同荧光发射和吸收的碳纳米点的实验结果，推测碳纳米点的浓度依赖性源于不同光发射碳纳米点之间的能量传递^[32]。碳纳米点在不同浓度下具有不同的距离，因此可实现不同的能量传递方式[图4(D)]。如图4(E)所示，在高浓度溶液中具有不同光发射的碳纳米点距离较近，由于碳纳米点的吸收和发射光谱有部分重叠，不同碳纳米点之间可发生福斯特能量共振转移和荧光的吸收再发射，由于高浓度下碳纳米点的能量逐级传递，导致发出红色荧光。随着溶液的逐渐稀释，碳纳米点之间的距离增加，福斯特能量共振转移消失，溶液中主要以荧光的吸收再发射作用为主，此时碳纳米点呈混合色。随着进一步稀释，碳纳米点之间的相互作用进一步减小，溶液可表现出3种碳纳米点的荧光色彩。由于制备的碳纳米点原液是以蓝光碳纳米点为主，所以高倍稀释的碳纳米点溶液发出蓝色荧光。

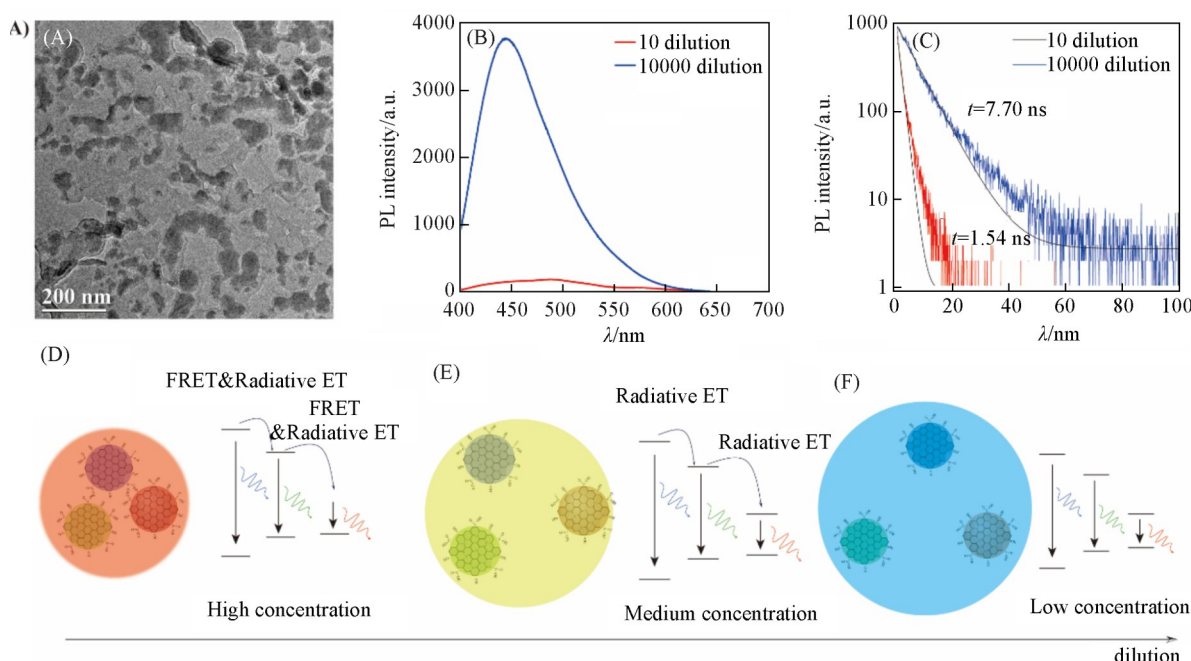


Fig. 4 Characterization and mechanism of the fluorescent CDs

(A) TEM image of the concentrated CDs solution; (B) fluorescence emission spectra of the $\times 10$ and $\times 10000$ diluted CDs solution under 365 nm excitation; (C) fluorescence decay of the $\times 10$ and $\times 10000$ diluted CDs solution under 365 nm excitation; (D—F) schematic illustration of the aggregated CDs under different dilution and the energy transfer mechanism between different CDs under different dilution.

2.5 碳纳米点荧光粉的制备与表征

基于上述结果，使用淀粉基质限域碳纳米点可获得具有不同光学性质的碳纳米点。将稀释后的碳纳米点溶液加入至淀粉中并超声混合均匀，常温下烘干即可获得碳纳米点荧光粉。如图5(A)~(F)所示，使用稀释4倍~4096倍的碳纳米点溶液制备的荧光粉颜色随着稀释倍数的增加由黄色逐渐变为绿

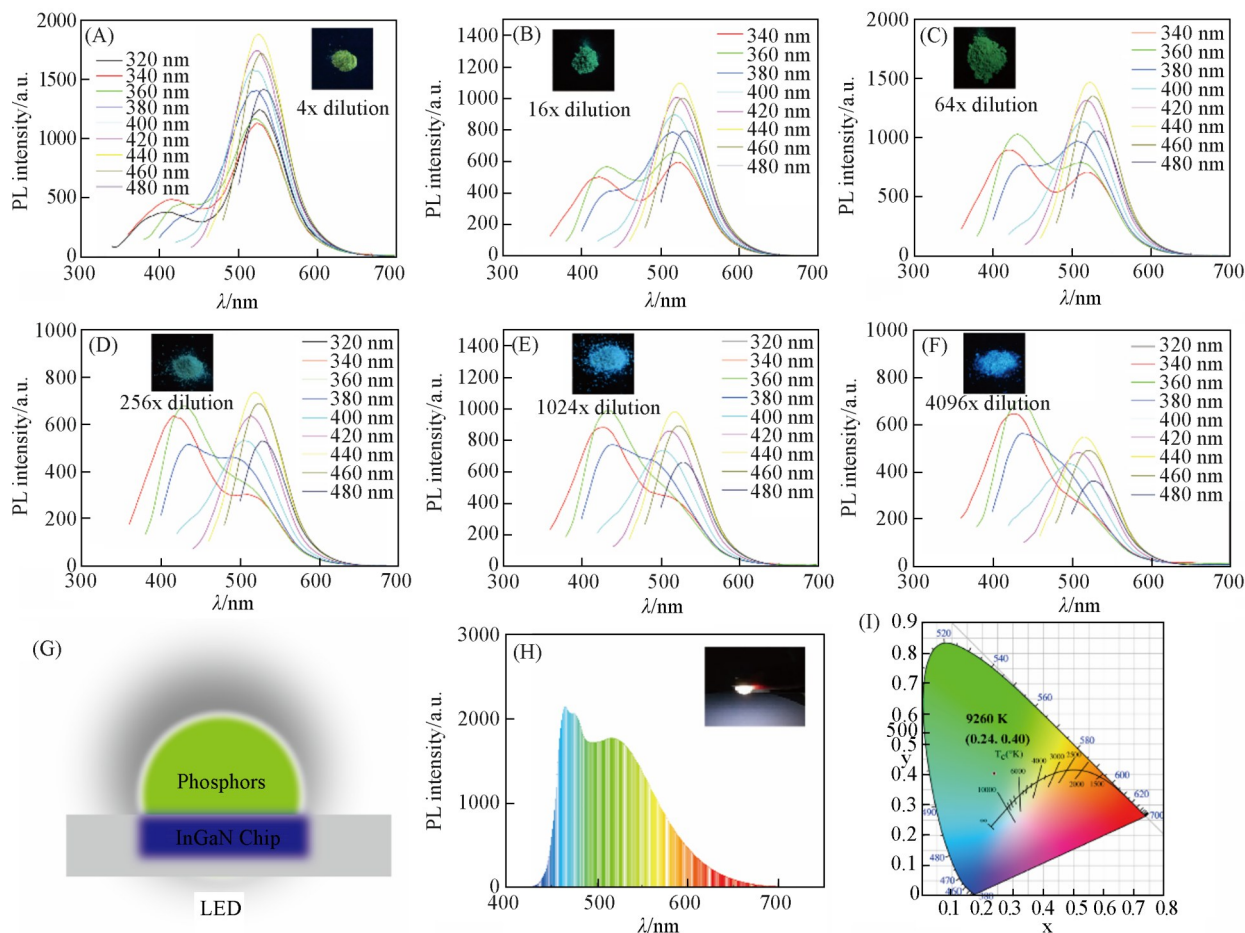


Fig. 5 Synthesis and characterization of the CDs phosphors

(A—F) The pictures of CDs phosphors under 365 nm UV light and fluorescence emission spectra of different CDs phosphors under different excitation; (G) schematic illustration of the structure of CDs-based LED; (H) the picture and normalized fluorescence emission spectra of CDs-based LED; (I) Commission Internationale de L' Eclairage (CIE) coordinate of the CDs-based LED.

色, 最后变为蓝色. 使用晶相显微镜观察了碳纳米点限域到淀粉基质中的图像[图 S8(见本文支持信息)], 发现限域后的碳纳米点粉末表现出较通透的晶体形貌, 其源于淀粉中的纤维素结晶. 在高浓度碳纳米点中, 纤维素结晶表现出碳纳米点的颜色, 表明碳纳米点已限域至晶体中. 图 S9(A)(见本文支持信息)为不同稀释倍数的碳纳米点荧光粉的归一化荧光发射光谱. 随着稀释倍数的增加, 荧光发射峰逐渐从约 530 nm 蓝移至 440 nm. 该结果表明, 随着碳纳米点荧光粉的稀释, 碳纳米点之间的聚集效应逐渐减弱, 导致荧光发射波长的显著变化. 图 S9(B)(见本文支持信息)为不同稀释倍数的碳纳米点荧光粉的国际照明委员会(CIE)色度图, 可见随着稀释倍数的增加, 碳纳米点的发射颜色从黄绿区域逐渐移动至蓝色区域. 尤其在高稀释倍数下, 碳纳米点的发射颜色集中在蓝色区域, 表明此时碳纳米点的聚集态已基本消失, 荧光发射由单个碳纳米点的本征发光性质主导. 图 5(A)~(F)为不同稀释倍数的碳纳米点荧光粉在不同激发波长下的荧光发射光谱. 可见, 随着激发波长的增加, 荧光发射峰逐渐红移, 但随着稀释倍数的增加, 荧光发射峰在相同激发波长下逐渐蓝移, 且发射强度降低. 随着激发波长的进一步增加, 荧光发射峰继续红移, 但在较高稀释倍数下, 发射强度显著减弱, 表明稀释倍数越高, 碳纳米点的聚集效应越小, 荧光发射的波长和强度越接近单个碳纳米点的本征发光特性. 在稀释 4 倍, 16 倍, 64 倍, 256 倍, 1024 倍和 4096 倍后, 碳纳米点荧光粉的荧光量子产率分别为 0.5%, 4.23%, 13.3%, 24%, 41.06% 和 40.5%, 逐渐增加的量子产率表明限域结构降低了碳纳米点之间的能量传递, 导致碳纳米点发光波长的蓝移[图 S10(见本文支持信息)]. 如图 5(G)和(H)所示, 使用碳纳米

点荧光粉作为蓝光发射芯片的发光介质可调控光发射电极的发光颜色, 碳纳米点基光发射电极表现出发光性能, 其发光色坐标位于(0.24, 0.40), 色温为9260 K[图5(I)].

3 结 论

采用溶剂热法制备了荧光碳纳米点, 并通过层析分离和稀释, 研究了浓度对荧光性质的影响. 结果表明, 随着稀释倍数的增加, 碳纳米点的聚集效应减弱, 荧光发射从红移逐渐转为蓝移, 发射强度降低. 相关研究表明, 福斯特共振能量转移效应和碳纳米点的吸收再发射作用在碳纳米点聚集态调控中起关键作用. 本文研究结果为设计多色荧光材料提供了新思路, 并展示了碳纳米点在显示技术中的应用潜力.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20240407>.

参 考 文 献

- [1] Shi Y., Su W., Yuan F., Yuan T., Song X., Han Y., Wei S., Zhang Y., Li Y., Li X., Fan L., *Adv. Mater.*, **2023**, 35(44), 2210699
- [2] Li L., Dong T. J., *Mater. Chem. C*, **2018**, 6, 7944—7970
- [3] Xia C., Zhu S., Feng T., Yang M., Yang B., *Adv. Sci.*, **2019**, 6(23), 1901316
- [4] Ghosh D., Sarkar K., Devi P., Kim K. H., Kumar, P., *Renew. Sust. Energy Rev.*, **2021**, 135, 110391
- [5] Shen C. L., Lou Q., Liu K. K., Dong L., Shan C. X., *Nano Today*, **2020**, 35, 100954
- [6] Omar N. A. S., Fen Y. W., Irmawati R., Hashim H. S., Ramdzan N. S. M., Fauzi N. I. M., *Nanomaterials*, **2022**, 12(14), 2365
- [7] Ghaffarkhah A., Hosseini E., Kamkar M., Sehat A. A., Dordanihaghghi S., Allahbakhsh A., van der Kuur C., Arjmand M., *Small*, **2022**, 18(2), 2102683
- [8] Tan J., Li Q., Meng S., Li Y., Yang J., Ye Y., Tang Z., Qu S., Ren X., *Adv. Mater.*, **2021**, 33(16), 2006781
- [9] Lim S. Y., Shen W., Gao, Z., *Chem. Soc. Rev.*, **2015**, 44(1), 362—381
- [10] Zhang J., Chen X., Li Y., Han S., Du Y., Liu H., *Anal. Methods*, **2018**, 10(5), 541—547
- [11] Fan X., Su Y., Deng D., Lv Y., *RSC Adv.*, **2016**, 6(80), 76890—76896
- [12] Zhao W. B., Liu K. K., Song S. Y., Zhou R., Shan C. X., *Nanoscale Res. Lett.*, **2019**, 14(1), 130
- [13] Shen C. L., Su L. X., Zang J. H., Li X. J., Lou Q., Shan C. X., *Nanoscale Res. Lett.*, **2017**, 12(1), 447
- [14] Bao R., Wang C., Dong L., Shen C., Zhao K., Pan C., *Nanoscale*, **2016**, 8(15), 8078—8082
- [15] Lai S., Jin Y., Shi L., Zhou R., Zhou Y., An D., *Nanoscale*, **2020**, 12(2), 591—601
- [16] Song R. W., Shen C. L., Zheng G. S., Ni Q. C., Liu K. K., Zang J. H., Dong L., Lou Q., Shan C. X., *Nano Lett.*, **2023**, 23(24), 11669—11677
- [17] Yang H., Liu Y., Guo Z., Lei B., Zhuang J., Zhang X., Liu Z., Hu C., *Nat. Commun.*, **2019**, 10(1), 1789
- [18] Strauss V., Wang H., Delacroix S., Ledendecker M., Wessig P., *Chem. Sci.*, **2020**, 11(31), 8256—8266
- [19] Siddique A. B., Hossain S. M., Pramanick A. K., Ray M., *Nanoscale*, **2021**, 13(39), 16662—16671
- [20] Sk M. A., Ananthanarayanan A., Huang L., Lim K. H., Chen P., *J. Mater. Chem. C*, **2014**, 2(34), 6954—6960
- [21] Liu Y., Han S., *New J. Chem.*, **2018**, 42(1), 388—394
- [22] Chen P. C., Chen Y. N., Hsu P. C., Shih C. C., Chang H. T., *Chem. Commun.*, **2013**, 49(16), 1639—1641
- [23] Qu S., Zhou D., Li D., Ji W., Jing P., Han D., Liu L., Zeng H., Shen D., *Adv. Mater.*, **2016**, 28(18), 3516—3521
- [24] Kang C., Prodanov M. F., Gao Y., Mallek K., Yuan Z., Vashchenko V. V., Srivastava A. K., *Adv. Mater.*, **2021**, 33(49), 2104685
- [25] Ding H., Yu S. B., Wei J. S., Xiong H. M., *ACS Nano*, **2016**, 10(1), 484—491
- [26] Shen R., He T., Yao S., Zhang Y., Peng T., Tan W., Chen N., Yuan Q., *Small Methods*, **2024**, 8(12), 122400439
- [27] Zhu S., Song Y., Zhao X., Shao J., Zhang J., Yang B., *Nano Res.*, **2015**, 8(2), 355—381
- [28] Zheng M., Wang Y., Hu D., Tian M., Wei Y., Yuan J., *Aggregate*, **2024**, 5(6), e624
- [29] Dimos K., *Curr. Org. Chem.*, **2016**, 20(6), 682—695
- [30] Chen Y., Lian H., Wei Y., He X., Chen Y., Wang B., Zeng Q., Lin J., *Nanoscale*, **2018**, 10(14), 6734—6743
- [31] Mintz K. J., Zhou Y., Leblanc R. M., *Nanoscale*, **2019**, 11(11), 4634—4652
- [32] Zhong J., Zhu Y., Xing M., Li M., Wu R., Zhang L., Guan W., *Luminescence*, **2024**, 39(7), e4827

(Ed.: X, V, K)