高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

高荧光量子产率的CO_2衍生红光碳点的制备及应用

郭　丹[1], 黄耿鸿[1], 白惠洁[1], 王亚玲[1], 曹广群[2], 刘　斌[1], 胡胜亮[1]
(1. 中北大学能源与动力工程学院, 2. 机电工程学院, 太原 030051)

摘要　以CO_2和三羟甲基丙烷三缩水甘油醚为起始原料, 通过环加成反应制备了具有五元环状碳酸酯结构的三羟甲基丙烷基五元环碳酸酯(TPTE). 在此基础上, 以TPTE和邻苯二胺为前驱体, 乙醇为溶剂, 采用溶剂热法合成了量子产率达38%的红色荧光碳点(R-CDs). 结构表征结果表明, 所得R-CDs的平均粒径为9.41 nm, 其碳核呈现高度石墨化特征, 表面富含羟基和氨基等活性官能团. 光学性能测试结果显示, 在乙醇溶液中R-CDs展现出明显的激发独立特性, 其荧光峰呈现三重峰, 峰位分别为599, 648和702 nm, 其最佳激发波长位于535 nm, 对应荧光寿命为6.46 ns. 通过理论计算与光谱分析证实, 该发光特性源于碳核内扩展的π共轭体系诱导的$\pi\rightarrow\pi^*$电子跃迁. 值得注意的是, 当与聚乙烯吡咯烷酮(PVP)复合时, R-CDs的紫外吸收和荧光发射特性未发生显著变化, 表明PVP基体与R-CDs间未产生明显的电子相互作用. 基于其优异的光学性能, 将R-CDs/PVP复合物作为荧光粉, 与360 nm紫外LED芯片集成构建了红光发光器件. 所制备LED器件的CIE色坐标(0.42, 0.21)精确落入红光区域, 展现出良好的单色性. 本研究通过将CO_2有效转化为功能化环碳酸酯前驱体, 实现了CO_2向高附加值碳材料的高效间接固定, 为温室气体资源化利用提供了创新思路. 这种集高量子产率荧光材料开发与碳减排技术于一体的研究策略, 在光电器件和绿色化学领域均具有重要应用价值.

关键词　碳点; 二氧化碳; 红光; 发光二极管
中图分类号　O613　　**文献标志码**　A　　doi: 10.7503/cjcu20250091

Preparation and Applications of CO_2-Derived Red-emissive Carbon Dots with a High Quantum Yield

GUO Dan[1], HUANG Genghong[1], BAI Huijie[1], WANG Yaling[1],
CAO Guangqun[2], LIU Bin[1*], HU Shengliang[1*]
(*1. School of Energy and Power Engineering*,
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract　A five-membered cyclic carbonate compound, tris(hydroxymethyl)propyl pentacyclic carbonate(TPTE), was synthesized using CO_2 and trihydroxymethylpropane triglycidyl ether as starting materials *via* cycloaddition reaction. Subsequently, red-emissive carbon dots(R-CDs) with a quantum yield of 38% were prepared through a

收稿日期: 2025-03-31. 网络首发日期: 2025-04-18.
联系人简介: 刘 斌, 男, 博士, 副教授, 主要从事荧光纳米材料方面的研究. E-mail: liubin@nuc.edu.cn
胡胜亮, 男, 博士, 教授, 主要从事新能源材料设计、制备与应用方面的研究. E-mail: hsliang@yeah.net
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52302051)、山西省应用基础研究计划项目(批准号: 202303021221115, 202203021221102)、国防基础科研计划项目(批准号: JCKY2023408C012)、山西省研究生实践创新项目(批准号: 2024SJ295)和中北大学研究生科技立项(批准号: 20242069)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52302051), the Foundational Research Project of Shanxi Province, China (Nos. 202303021221115, 202203021221102), the Defense Industrial Technology Development Program, China(No. JCKY2023408C012), the Graduate Innovation Project of Shanxi Province, China(No. 2024SJ295) and the Graduate Science and Technology Project of North University of China(No. 20242069).

solvothermal method using TPTE and *o*-phenylenediamine as precursors and ethanol as the solvent. Structural characterization revealed that the obtained R-CDs exhibited an average particle size of 9.41 nm, with a highly graphitized carbon core and surface-rich hydroxyl and amino functional groups. Optical performance testing demonstrated that the R-CDs in ethanol solution displayed distinct excitation-independent characteristics, showing three-fingered emission peaks at 599, 648 and 702 nm under excitation at 535 nm, accompanied by a fluorescence lifetime of 6.46 ns. Theoretical calculations and spectroscopic analyses confirmed that these luminescent properties originated from extended π-conjugated systems within the carbon core inducing (π, π^*) transitions. Notably, when combined with polyvinylpyrrolidone (PVP), the ultraviolet-visible absorption and fluorescence emission characteristics of R-CDs remained essentially unchanged, indicating negligible electronic interactions between PVP matrices and R-CDs. Leveraging their excellent optical properties, R-CDs/PVP composites were employed as phosphors integrated with a 360 nm ultraviolet LED chip to fabricate red-emitting devices. The prepared LED exhibited CIE chromaticity coordinates of (0.42, 0.21), precisely falling within the red light region with high monochromaticity. Significantly, this research achieved efficient indirect fixation of CO_2 by converting it into functionalized cyclic carbonate precursors, providing an innovative approach for greenhouse gas valorization. This integrated strategy combining high-quantum-yield fluorescent material development with carbon reduction technology holds substantial application potential in optoelectronic devices and green chemistry.

Keywords Carbon dots; Carbon dioxide; Red-emissive; Light-emitting diodes

碳点(CDs)作为荧光材料家族的新成员，是一种粒径小于10 nm的发光碳纳米颗粒，自2004年被发现以来[1]，被广泛应用于生物成像、防伪和离子检测等诸多领域，并因其优异的光学性能、高稳定性、低成本及绿色环保等优点在发光器件中展现出巨大的应用前景[2~6]. 红光碳点(R-CDs)作为典型代表，因具有深层组织穿透性和长波长发射等核心优势，使其在生物医学和能源转换等领域具有不可替代性. 在活体成像中，R-CDs可以加深光的穿透，提高活体组织中的成像对比度[7]. 同时，R-CDs通常具有更好的光稳定性，在长期光照下不易猝灭，在发光二极管(LED)器件中备受青睐[8,9]. 此外，R-CDs的长波长发射能够有效提高单晶硅电池的转换效率[10]. 2017年，Ding等[11]通过加热无果肉柠檬汁的乙醇溶液合成了在水中具有28%量子产率的R-CDs，其在631 nm处表现出激发独立的发射特性. 2024年，Cao等[12]利用2,4-二氨基二苯胺和硫脲为原料，通过溶剂热反应制备了氮和硫共掺杂的R-CDs，其在613 nm处表现出强的红光发射，量子产率可达34%，并成功应用于指纹识别系统. 虽然目前已研究出多种R-CDs，但大多数R-CDs发射波长不足650 nm且量子产率较低[13~15]，多应用于离子检测[16]和植物光合作用[17]. 因此，开发具有高量子产率、大斯托克斯位移和长波长发射的R-CDs具有重要意义.

本文以CO_2为初始原料，通过与三羟甲基丙烷三缩水甘油醚进行环加成合成了三羟甲基丙烷基五元环碳酸酯(TPTE)，再将其与邻苯二胺作为原料，无水乙醇(EtOH)为反应溶剂，制备了量子产率高达38%的高效R-CDs. 通过一系列表征手段分析了其形貌结构、成分组成和光学性能，并选用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为分散介质制得R-Cds@PVP荧光粉，在360 nm紫外芯片激发下制备了红色LED器件，经测试，该红色LED器件具有优异的光学性能.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

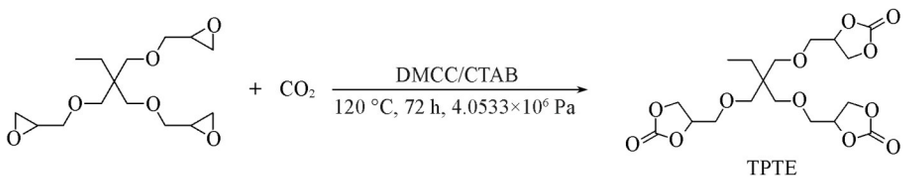
无水乙醇(EtOH)和二氯甲烷，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；邻苯二胺(分析纯)、三羟甲基丙烷三缩水甘油醚(纯度98%)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB，纯度99%)和聚乙烯吡咯烷酮(PVP)，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；锌钴双金属氰化络合物(DMCC)参照文献[18]方法合成.

JEOL JEM-F200型场发射透射电子显微镜(TEM)，日本JEOL公司；ALPHA 2型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，德国Bruker公司；Thermo Scientific ESCALAB 250Xi型X射线光电子能谱仪(XPS)，美国Thermo Fisher公司；A580型紫外-可见分光光度计(UV-Vis)，上海皓缇仪器有限公司；FS5型稳态瞬态

荧光光谱仪(PL)，英国爱丁堡公司；Horiba LabRAM HR Evolution型激光拉曼光谱仪(Raman)，日本Horiba公司；X-Rite PR655型光谱辐射计，美国Danaher公司.

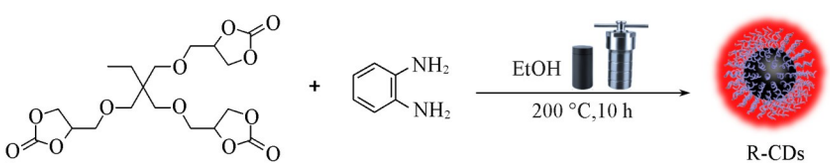
1.2 实验过程

1.2.1 TPTE的合成 参照文献[19]方法合成TPTE，合成路线见Scheme 1. 将20 g三羟甲基丙烷三缩水甘油醚、39.5 mg DMCC和830 mg CTAB加入100 mL不锈钢高压磁力搅拌反应釜中，加入磁子密封后打入4.0533×10^6 Pa CO_2，置于120 ℃油浴锅中反应72 h. 待反应结束后，自然冷却至室温，将未反应的CO_2释放，粗产物用二氯甲烷作为淋洗剂过硅胶柱，除掉体系中的催化剂，作为制备R-CDs的原料.



Scheme 1 Synthetic route of TPTE

1.2.2 R-CDs的合成 R-CDs的合成路线见Scheme 2. 将230 mg TPTE、150 mg邻苯二胺和10 mL无水乙醇加入30 mL聚四氟乙烯反应釜中，放入鼓风干燥箱中于200 ℃加热10 h后，自然冷却至室温，用0.22 μm微孔滤膜过滤掉大颗粒杂质，处理后的溶液通过旋转蒸发除去乙醇，最后在真空干燥箱中烘干直至恒重，得到R-CDs，放入冰箱中保存，备用.



Scheme 2 Synthetic route of R-CDs

1.2.3 LEDs的制备 将1.2 g PVP和5.0 mg R-CDs溶解在10 mL无水乙醇中，搅拌均匀并超声10 min，以确保R-CDs和PVP充分互溶. 通过旋转蒸发除去乙醇，并在真空烘箱中烘干直至恒重，最终制得PVP/R-CDs荧光粉. 将荧光粉与360 nm紫外线芯片结合，用环氧胶封装，最终制得红光LEDs.

2 结果与讨论

2.1 R-CDs的形貌和结构

图1示出了R-CDs的形貌图及结构表征数据. 图1(A)为R-CDs的TEM和高分辨TEM(HRTEM)照片，可见合成的R-CDs在乙醇溶液中分散均匀，无团聚现象，经统计其粒径主要分布在4.9~15.5 nm之间，平均粒径为9.41 nm[图1(B)]，与统计的该R-CDs的粒径主要分布区域一致. HRTEM显示R-CDs具有明显的晶格条纹，其晶面间距为0.21 nm，与石墨的(100)晶面数据一致[20]，表明在R-CDs的形成

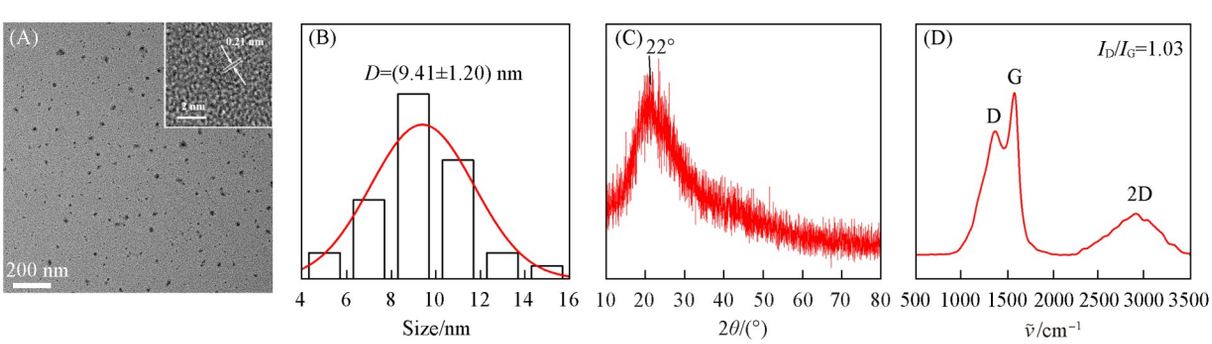


Fig. 1 TEM image(A), size distribution histogram(B), XRD pattern(C) and Raman spectrum(D) of R-CDs

Inset of (A): HRTEM image of R-CDs.

过程中经历了石墨化过程. XRD数据显示，在2θ=22°附近出现一个宽衍射峰[图1(C)]，对应的晶面间距为0.40 nm，表明R-CDs以无定形结构为主[21]. 图1(D)为R-CDs的拉曼光谱图，分别在1351和1568 cm^{-1}处出现2个峰，分别对应石墨烯结构的D峰和G峰，其中D峰和G峰的强度之比(I_D/I_G)为1.03，表明R-CDs中sp^2杂化无序组分含量与有序石墨化组分含量接近. 此外，在2225~3500 cm^{-1}处出现一个较宽的2D峰，表明R-CDs是由多层石墨烯结构组成[22]，进一步证明R-CDs的石墨化本质，与HRTEM和XRD表征结果相对应.

为进一步揭示R-CDs的表面化学结构，对其进行了FTIR和XPS表征测试. 图2(A)显示，在R-CDs中含有丰富的官能团，位于3349 cm^{-1}附近的吸收峰可归属于O—H和N—H的伸缩振动[23]，2871 cm^{-1}附近的吸收峰归属于C—H的伸缩振动，1785 cm^{-1}处的吸收峰归属于C═O的伸缩振动，1657 cm^{-1}处的吸收峰归属于C═N的伸缩振动，1502 cm^{-1}处的吸收峰归属于C═C的伸缩振动[24]，1100 cm^{-1}处的吸收峰归属于C—O的弯曲振动[25]；证明在R-CDs中含有胺基、羟基、羰基和醚键等结构. 图2(B)~(D)为R-CDs的XPS全扫描谱和高分辨谱图. 由图2(B)可见，在533，400和285 eV处出现3个特征峰，分别对应O_{1s}，N_{1s}和C_{1s}的结合能，说明R-CDs主要由C，N和O 3种元素组成. 通过XPS测试，得到R-CDs中C，N和O的质量分数分别为71.21%，9.39%和19.40%，证明R-CDs经历了高度的碳化过程. 图2(C)为高分辨C_{1s}谱，在284.8，286.3和290.9 eV处拟合成3个峰，分别对应C—C/C═C，C—O/C—N和C═O，其所占相对比例分别为38.08%，61.00%和0.92%. 图2(D)为高分辨N_{1s}谱，在399.5和401.6 eV处拟合成2个峰，分别对应吡咯氮和氨基氮[26]，其所占相对比例分别为82.97%和17.03%. 图2(E)为高分辨O_{1s}谱，在532.8和534.6 eV处拟合成2个峰，分别对应C═O和C—O[27,28]，其所占相对比例分别为95.44%和4.56%. 上述结果表明，TPTE和邻苯二胺在溶剂热条件下发生碳化，形成了氮掺杂的石墨化R-CDs纳米粒子，其具有共轭芳香结构，表面含有丰富的官能团，如羟基、氨基、羰基和醚键，这赋予了R-CDs良好的溶解性和发光性能.

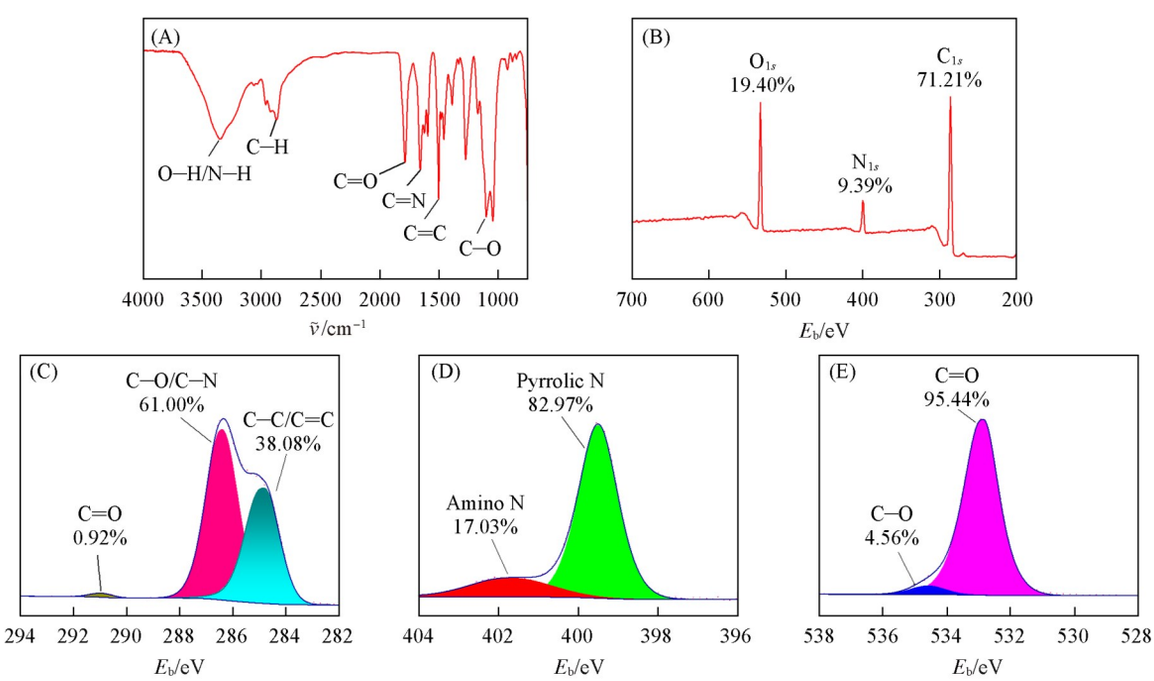


Fig. 2　FTIR(A), full scanned XPS survey(B), high-resolution C_{1s}(C), N_{1s}(D) and O_{1s}(E) spectra of R-CDs

2.2　R-CDs的光学性能

图3(A)为R-CDs乙醇溶液的UV-Vis吸收光谱、激发光谱(PLE)和480 nm激发下的PL发射光谱. UV-Vis吸收光谱显示，R-CDs在250~350 nm的紫外区和500~580 nm的可见光范围内有明显的吸收峰. 位于紫外区的吸收主要源于R-CDs中孤立苯环或者C═C的$\pi\rightarrow\pi^*$跃迁[29]. 在可见光区的吸收峰

位于535和575 nm，主要源于R-CDs中具有大π共轭结构的π→π*跃迁，且多峰吸收源于共轭结构的振动能级．PLE光谱显示，最佳激发波长位于535 nm，与UV-Vis吸收光谱中可见光区域的吸收峰对应，表明R-CDs的荧光源于R-CDs中大π共轭结构的π→π*跃迁．在480 nm波长的激发下，PL光谱呈现三重峰，分别位于599，648和702 nm，属于红光区域，与肉眼观察到的荧光颜色吻合[图3(A)插图]．其PL和PLE展示出的镜像对应关系，进一步证明了该三重峰源于大π共轭结构激发态的振动能级．图3(B)为R-CDs乙醇溶液在不同激发波长下的PL光谱，呈现明显的激发独立性，其最佳激发波长位于约540 nm处．R-CDs的绝对荧光量子产率高达38.1%，超过目前许多文献[30~33]报道的数值．进一步对R-CDs的荧光寿命进行了测试，如图3(C)所示，其荧光衰减曲线满足单指数曲线拟合，寿命为6.46 ns，表明R-CDs的发光中心源于单一发射位点．进一步对R-CDs的光稳定性进行了测试，结果如图3(D)所示，R-CDs在持续1 h的光照过程中呈现出良好的光稳定性．

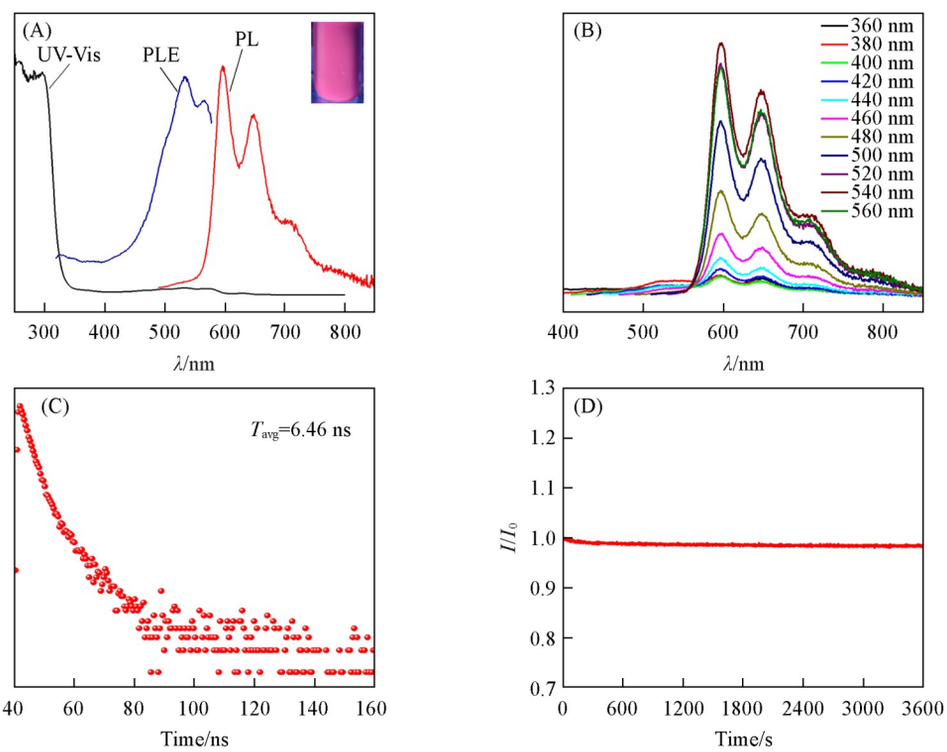


Fig. 3　UV-Vis absorption, PLE(λ_{em}=598 nm) and PL spectra(λ_{ex}=480 nm)(A), PL spectra under different excitation wavelengths(B), time-resolved PL curve(λ_{ex}=540 nm)(C) and photostability(D) of R-CDs in ethanol

(A) Inset: photographs of R-CDs ethanol solution under 365 nm UV light.

2.3　R-CDs在LEDs中的应用

基于R-CDs优良的光学性能，将其作为荧光粉材料应用于荧光粉转换型LED．将R-CDs分散于PVP中，制得固态发红光的R-CDs@PVP荧光粉，将其涂覆于玻璃片上，如图4(A)插图所示，在自然光照射下展现出明显的红光，且透明度较为可观，证明其具有优异的发光性能．同样，在360 nm紫外灯照射下也显示出强的红色荧光．为证明PVP对R-CDs的光学性能是否具有影响，进一步对R-CDs@PVP的UV-Vis光谱、PL光谱和荧光量子产率进行了测试．图4(A)为R-CDs@PVP的UV-Vis吸收光谱，在200~300 nm和520~570 nm光谱区间具有明显的吸收，这与R-CDs乙醇溶液的吸收光谱相对应，证明PVP未影响R-CDs的发光位点．图4(B)为R-CDs@PVP在不同激发波长下的PL光谱，同样呈现出激发独立性，发射峰位于591，627和700 nm，与R-CDs乙醇溶液的发射光谱基本一致，进一步证明PVP不影响R-CDs的发光位点．而其绝对荧光量子产率为15.23%，与在溶液中相比，其量子产率明显降低，这可能是由于R-CDs在PVP中部分聚集导致的猝灭．将荧光粉与360 nm紫外线芯片结合，用环氧胶封装，最终制成红光LEDs．图4(C)为红光LEDs的光谱图，可见，在紫外芯片照射下，该器件发出明亮的

红光，荧光发射峰位于650 nm处．其色坐标(CIE)为(0.42，0.21)[图4(D)]，位于红光区域．

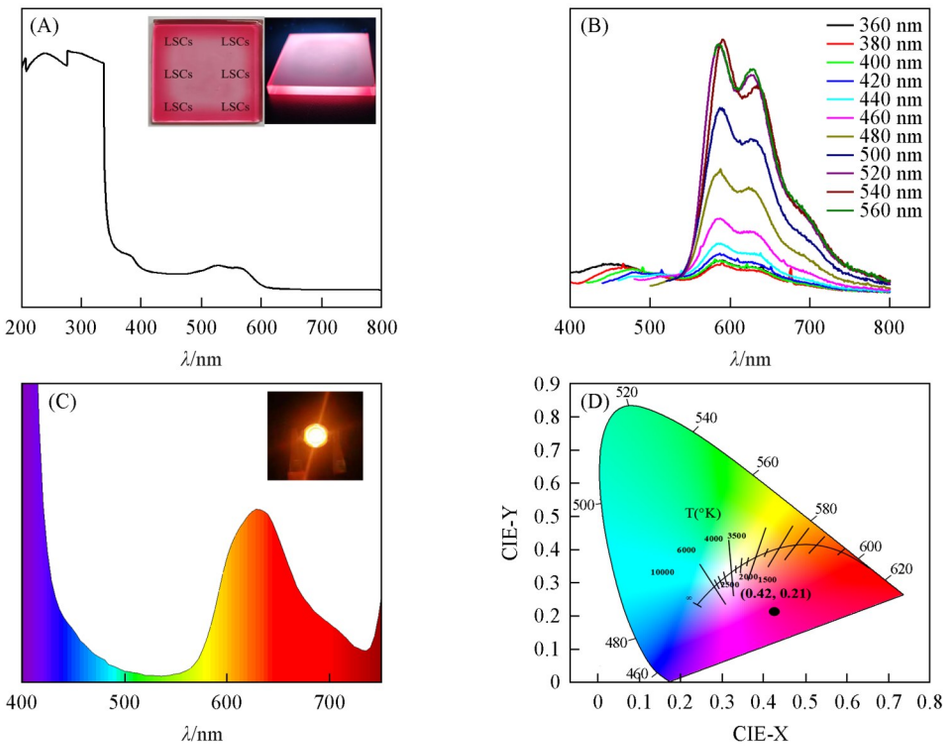


Fig. 4　UV-Vis absorption(A) and PL spectra under different excitation wavelengths(B) of R-CDs@PVP, electroluminescence spectrum(C) and CIE color coordinates(D) of red LEDs

(A) Inset: photograph of glass sheets coated with R-CDs@PVP in daylight and under 365 nm UV light, respectively; (C) inset: photograph of red LED.

3　结　　论

构建了基于CO_2资源化利用的高效R-CDs功能材料体系．首先，以CO_2和三羟甲基丙烷三缩水甘油醚为前驱体，经环加成反应制备出五元环状碳酸酯中间体TPTE；继而，采用溶剂热法合成了具有38.1%高量子产率的R-CDs．结构表征证实，R-CDs具有9.41 nm的纳米级粒径、高度石墨化的碳核结构及丰富的表面活性基团，其独特的激发独立荧光特性源于碳核内扩展π共轭体系诱导的$\pi\rightarrow\pi^*$跃迁机制．值得关注的是，通过与PVP基体有效复合，R-CDs保持了本征光学特性，并作为荧光粉构筑出CIE色坐标为(0.42，0.21)的LED器件．本研究将CO_2固定技术与功能碳材料制备相结合，不仅实现了温室气体向高附加值产品的转化，更构建了具有实际应用潜力的光电转换体系．这种融合绿色化学与先进材料设计的策略，为碳减排技术开发提供了新模式，在环境治理与光电器件领域展现出双重应用价值．

参　考　文　献

[1] Xu X. Y., Ray R., Gu Y. L., Ploehn H. J., Gearheart L., Raker K., Scrivens W. A., *J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*(40), 12736—12737
[2] Yang X., Li X., Wang B. Y., Ai L., Li G. P., Yang B., Lu S. Y., *Chin. Chem. Lett.*, **2022**, *33*(2), 613—625
[3] Zhang L. Y., Wang W., Jin P., Sun Z. G., Zhan Y., Jiang B. B., *Compos. Commun.*, **2025**, *53*, 102172
[4] Liu Y., Wang B. Y., Li Y. X., Li W. D., Lu S. Y., *Chin. Chem. Lett.*, **2025**, *36*(2), 110426
[5] Wang B. Y., Waterhouse G. I. N., Yang B., Lu S. Y., *Acc. Chem. Res.*, **2024**, *57*(19), 2928—2939
[6] Zhang Y. Q., Lu S. Y., *Chem*, **2024**, *10*(1), 134—171
[7] Zhou Z. J., Song J. B., Nie L. M., Chen X. Y., *Chem. Soc. Rev.*, **2016**, *45*(23), 6597—6626
[8] Wang Y. F., Wang K., Han Z. X., Yin Z. M., Zhou C. J., Du F. L., Zhou S. Y., Chen P., Xie Z., *J. Mater. Chem. C*, **2017**, *5*(37),

9629—9637
[9] Wang F. H., Wang K. X., Guan R. F., Zhang H., *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, *691*, 137416
[10] Han Y., Liccardo L., Moretti E., Zhao H. G., Vomiero A., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, *10*(33), 11827—11847
[11] Ding H., Ji Y., Wei J. S., Gao Q. Y., Zhou Z. Y., Xiong H. M., *J. Mater. Chem. B*, **2017**, *5*(26), 5272—5277
[12] Cao J. B., Chen R., Wang L. F., Xing H. M., Hu H. W., Yang X. D., Gu C. J., Tang S. Y., Chen D., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *491*, 152121
[13] Lukprang T., Preechaburana P., Amloy S., *Radiat. Phys. Chem.*, **2024**, *223*, 111941
[14] Yong Z. H., Sun W. J., Kang S. W., Zhu X. Y., Wang M., Kang C. R., Ding M., *Acta Photonica Sin.*, **2024**, *53*(7), 0753312-10
(雍哲浩, 孙文洁, 康守旺, 朱欣悦, 王敏, 康聪瑞, 丁锳. 光子学报, **2024**, *53*(7), 127—136)
[15] Wang F. H., Dong X. Z., Zuo Y. J., Xie Z., Guan R. F., *Mater. Today Phys.*, **2024**, *41*, 101332
[16] Lu H. Z., Xu S. F., Liu J. Q., *ACS Sens.*, **2019**, *4*(7), 1917—1924
[17] Wang Y. H., Xie Z. M., Wang X. H., Peng X., Zheng J. P., *J. Nanobiotechnol.*, **2021**, *19*(1), 260
[18] Zhang X. H., Wei R. J., Zhang Y. Y., Du B. Y., Fan Z. Q., *Macromolecules*, **2015**, *48*(3), 536—544
[19] Liu B., Chu B., Wang Y. L., Hu L. F., Hu S. L., Zhang X. H., *Green Chem.*, **2021**, *23*(1), 422—429
[20] Nakamuta Y., Toh S., *Am. Mineral.*, **2013**, *98*(4), 574—581
[21] Erdal N. B., Adolfsson K. H., Pettersson T., Hakkarainen M., *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2018**, *6*(1), 1246—1255
[22] Lee T., Min S. H., Gu M., Jung Y. K., Lee W., Lee J. U., Seong D. G., Kim B. S., *Chem. Mater.*, **2015**, *27*(11), 3785—3796
[23] Branca C., D'Angelo G., Crupi C., Khouzami K., Rifici S., Ruello G., Wanderlingh U., *Polymer*, **2016**, *99*, 614—622
[24] Nandiyanto A. B. D., Oktiani R., Ragadhita R., *Indones. J. Sci. Technol.*, **2019**, *4*(1), 97—118
[25] Annamalai K., Annamalai A., Ravichandran R., Jeevarathinam A., Annamalai P., Valdes H., Elumalai S., *New J. Chem.*, **2023**, *48*(1), 216—227
[26] Feng M. N., Zhou M. J., Zhang W. J., Shi G., He Y. J., Qiao X. G., Pang X. C., *Polym. Chem.*, **2024**, *15*(38), 3916—3924
[27] Yu Y. Z., Li W., Huang Y. X., Yang H. X., Lv C. Y., Yan H. X., Lin D., Jiao S. C., Hou L. L., Wu Z. L., *Small*, **2024**, *20*(29), 2309577
[28] Li Y. Q., Wan S. J., Liang W. C., Cheng B., Wang W., Xiang Y., Yu J. G., Cao S. W., *Small*, **2024**, *20*(31), 2312104
[29] Yang G. C., Wu C. L., Luo X. J., Liu X. Y., Gao Y., Wu P., Cao C. X., Saavedra S. S., *J. Phys. Chem. C*, **2018**, *122*(11), 6483—6492
[30] Yang X., Sui L. Z., Wang B. Y., Zhang Y. Q., Tang Z. Y., Yang B., Lu S. Y., *Sci. China Chem.*, **2021**, *64*(9), 1547—1553
[31] Cheng Z. Y., Wu S. G., *Adv. Sustain. Syst.*, **2025**, *9*(2), 2400663
[32] Vadia F. Y., Jha S., Mehta V. N., Park T. J., Malek N. I., Kailasa S. K., *J. Photoch. Photobio. A*, **2025**, *458*, 115948
[33] Nelson D. J., Vasimalai N., John S. A., Sethuraman M. G., *J. Fluoresc.*, **2024**, *35*(2), 1139—1150
[34] Cai W., Zhang T., Xu M., Zhang M. R., Guo Y. J., Zhang L. P., Street J., Ong W. J., Xu Q., *J. Mater. Chem. C*, **2019**, *7*(8), 2212—2218

(Ed.: L, V, K)