科学通报 2026 年 第 71 卷 第 17 期: 3844 ~ 3846
亮点述评
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

用于稳定光学和安全信息编码的双相近红外二区碳点

钱尼娜[1], 刘源[2*], 王柏扬[1*]

1. 安徽省先进催化与能源材料重点实验室, 光电磁功能配合物和纳米配合物安徽省重点实验室, 安庆师范大学化学化工学院, 安庆 261433
2. 河南工业大学化学化工学院, 郑州 450001
* 联系人, E-mail: liuyuan2020@haut.edu.cn; wangby@aqnu.edu.cn

Dual-phase NIR-II carbon dots for stable photonics and secure information encoding

Nina Qian[1], Yuan Liu[2*] & Boyang Wang[1*]

[1] *Anhui Provincial Key Laboratory of Advanced Catalysis and Energy Materials, Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Magnetic Functional Complex and Nano Complex, School of Chemistry and Chemical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 261433, China*
[2] *School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China*
* Corresponding authors, E-mail: liuyuan2020@haut.edu.cn; wangby@aqnu.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0549

在信息日益以不可见的方式进行编码、传输和保护的时代, 人们用来控制光的材料变得与数据本身同样重要[1]. 从安全身份识别到生物医学成像, 生成和操控人眼无法观测到的光的能力正在开辟新的技术前沿[2]. 其中, 近红外二区(near-infrared region II, NIR-II)材料因其独特的穿透生物组织、降低背景干扰和携带隐藏信息的能力而备受关注[3]. 尽管前景广阔, 但如何制造能够高效稳定地在该波长区域发光的材料仍然是一项持续的科学挑战[4]. 值得注意的是, 近期研究中提出的“双相NIR-II发光”策略以及“氢键调控固态发光”的概念, 为解决该领域长期存在的效率与稳定性难题提供了新的思路. 碳基荧光纳米材料因其在可持续性、结构可调性和化学稳定性方面的固有优势, 已成为下一代光子技术的理想候选材料[5]. 其中, 碳点(carbon dots, CDs)作为半导体量子点和有机染料等传统荧光材料的替代品而备受关注. 与这些传统体系相比, CDs具有低毒性、易于合成和表面化学性质多样等显著优势[6]. 然而, 尽管CDs在发光波长扩展研究中取得了快速进展, 波长可以达到接近800 nm, 但在NIR-II区域实现高性能发射仍然是一项重大挑战[7]. 相比于已报道的NIR-II有机染料或无机量子点体系, 现有CDs通常表现出发光效率较低、稳定性不足以及固态发光猝灭等行为, 这主要是由于其缺乏合理的设计策略、发射机制不明确以及固态发光性能差等, 严重限制了CDs在光子学、生物成像和信息安全等领域的实际应用.

CDs可控合成的其中一个核心难点在于其固有的结构复杂性. 其光学性质源于碳核态、表面官能团和类分子发光中心的共同作用, 这使得建立统一的结构-性质关系变得困难[8]. 尽管以往的研究已通过杂原子掺杂、分子前驱体工程或表面修饰等方法实现了近红外一区发射, 但大多数体系存在量子效率低、稳定性差或固态下聚集体引起的猝灭严重等问题[9]. 因此, 开发一种通用策略来构建在分散态和聚集态下均具有稳定性能的高效NIR-II发射CDs, 具有重要的基础研究和实际应用价值. 尤其需要指出的是, 溶液态发光更多用于表征材料本征光学性质, 而固态发光则直接决定其在器件、薄膜及实际应用中的可行性, 因此实现高效固态发光具有关键意义.

为了应对这些挑战, 卢思宇课题组开发了一种基于“核壳耦合”和“界面相互作用工程”的合理设计策略, 用于构建双相NIR-II发射CDs. 该方法选择富含氨基的高共轭芳香族分子作为前驱体, 以促进溶剂热处理过程中扩展π共轭碳核的形成. 同时, 通过精确控制反应条件, 保留表面的给电子官能团, 从而形成独特的核壳结构. 碳核作为缺电子受体, 而表面功能基团作为电子供体, 从而形成电荷转移激发态. 该合成

引用格式: 钱尼娜, 刘源, 王柏扬. 用于稳定光学和安全信息编码的双相近红外二区碳点. 科学通报, 2026, 71: 3844–3846
Qian N, Liu Y, Wang B. Dual-phase NIR-II carbon dots for stable photonics and secure information encoding (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3844–3846, doi: 10.1360/CSB-2026-0549

© 2026《中国科学》杂志社

是通过在强酸性条件下的一步溶剂热法实现的. 在此过程中, 前驱体经历脱水、碳化和聚合反应, 最终形成高度石墨化的碳核. 同时, 酸的存在不仅促进了碳化, 还促进了丰富的表面官能团的生成, 包括氨基和磺酸基. 这些官能团发挥双重作用: 它们增强了电子供体能力, 从而强化了电荷转移相互作用; 它们提供了氢键位点, 这对于调控聚集态下的分子间相互作用至关重要(图1(a)). 进一步地, 这种氢键网络能够有效限制分子振动并抑制非辐射跃迁, 从而在固态条件下仍保持高效发光, 这是实现"双相发光"的关键所在. 所制备CDs的光学性质展现出几个显著特征. 在溶液中, 该材料表现出延伸至近红外区域的强吸收, 并在激发后于920 nm附近出现明显的发射峰, 发射光谱进一步延伸至1000 nm以上, 进入NIR-II区域(图1(b)). 更重要的是, 荧光强度在较宽的浓度范围内保持稳定, 表明其具有优异的抗自猝灭能力. 定量测量表明, 其量子产率达到或超过许多先前报道的NIR-II碳基体系, 亮度得到了显著提升(图1(c))[10]. 同时, 在固态条件下, 该材料仍能保持接近960 nm的稳定发射, 这一特性显著区别于传统CDs体系中常见的聚集猝灭现象, 体现出其在实际器件应用中的独特优势.

双相发射、高稳定性和近红外二区(NIR-II)功能的结合使其能够应用于多种先进领域. 在信息安全领域, CDs可用作多级加密的发光油墨. 通过利用它们在紫外光和近红外光激发下不同的发光特性, 可以在单个系统中编码多层信息. 一个特别引人注目的例子是近红外二区快速响应(quick-response, QR)码的制备(图2(a~d)). 这些二维码在正常光照条件下不可见, 但可通过红外成像系统清晰地检测到. 值得注意的是, 即使被数毫米厚的生物组织覆盖, 编码信息仍然可读, 凸显了近红外二区光的深穿透能力(图2(e~g)). 这一特性表明其在生物医学传感、植入式设备和安全识别系统等领域具有潜在的应用价值. 此外, 这种兼具隐蔽性与可读性的光学响应, 为构建新一代信息加密与防伪体系提供了新的材料基础.

综上所述, 双相NIR-II发光CDs的开发为高性能光子材料的设计提供了一种新的范式. 通过整合核壳结构工程、电荷转移调控和氢键相互作用控制, 可以在液态和固态下实现高效稳定的发光. 这项工作不仅加深了对碳基体系中近红外

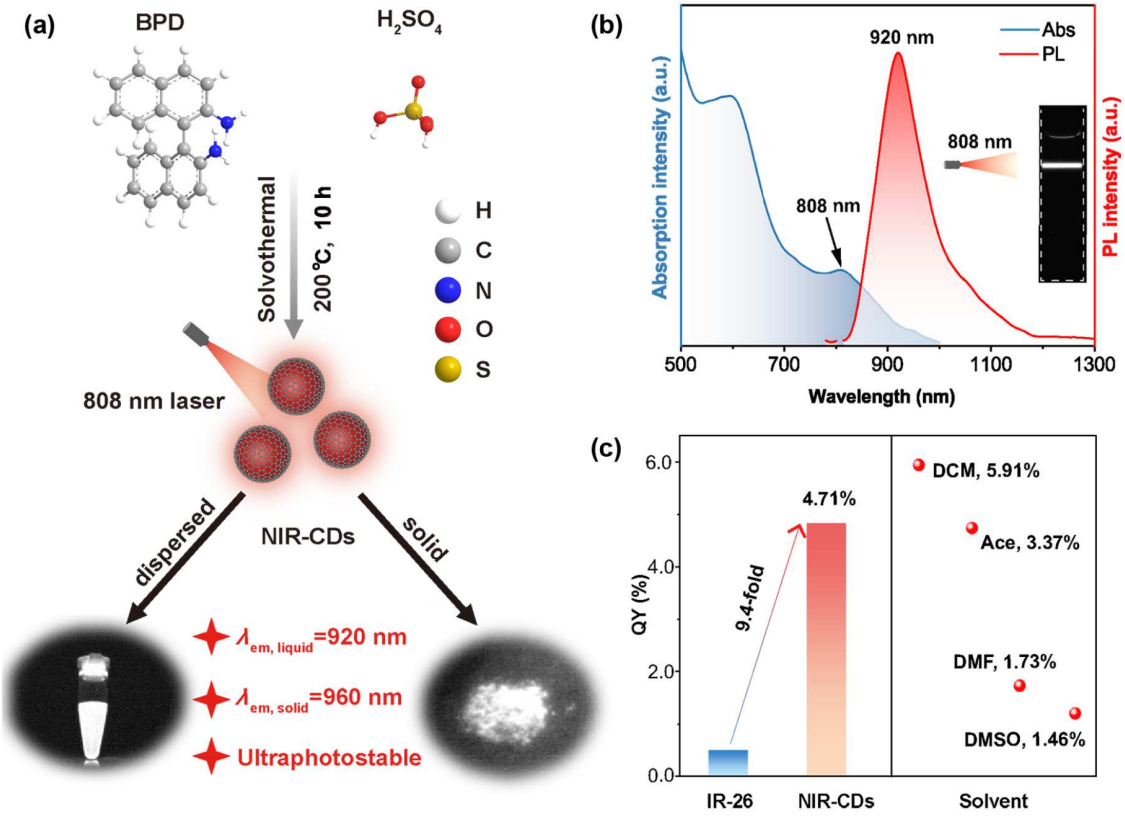


图 1 (网络版彩色)(a) 近红外CDs的合成. (b) 近红外CDs的归一化吸收光谱和光致发光光谱; 插图为808 nm激光激发下的光学照片. (c) 近红外CDs在不同溶剂中的相对量子产率. 图片使用Yu等人[10]的数据重新绘制

Figure 1 (Color online) (a) Synthesis of NIR-CDs. (b) Normalized absorption and photoluminescence (PL) spectra of NIR-CDs; the inset shows an optical photograph under 808 nm laser excitation. (c) The relative quantum yield (QY) values of NIR-CDs in different solvents. Redrawn using data provided by Yu et al.[10]

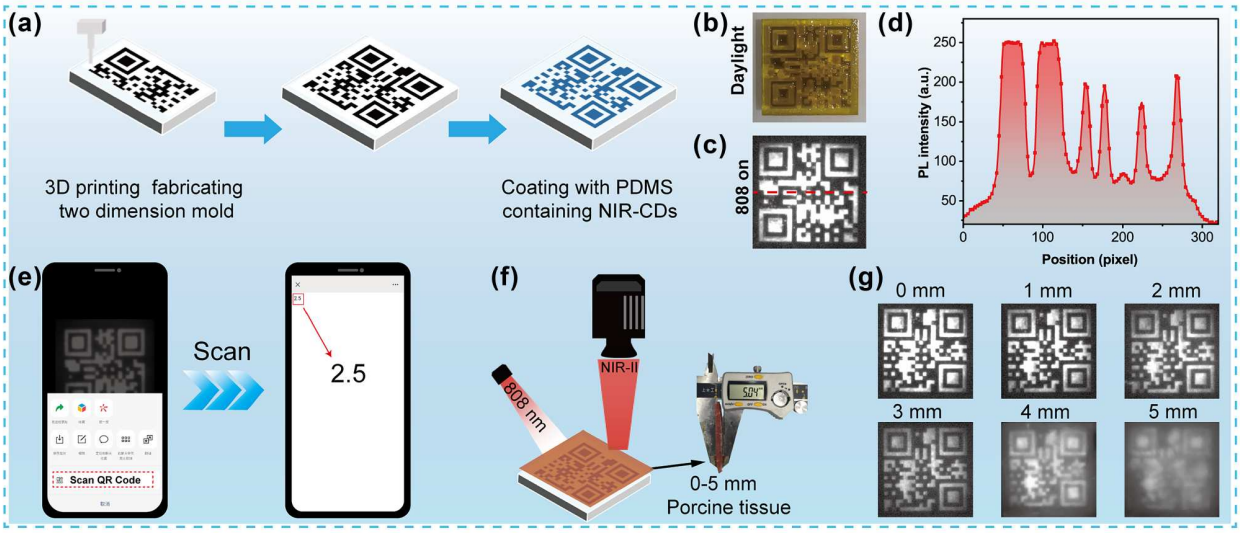


图 2 (网络版彩色)(a) 二维码的制作过程. 二维码在(b) 阳光和(c) 808 nm紫外光照射下的图像. (d) 图(c)中红线上的荧光强度分布. (e) 通过微信商业软件识别的二维码. (f) 二维码透射穿透深度测量装置示意图. (g) 覆盖二维码的不同厚度(0~5 mm)猪肉组织的荧光图像. 图片使用Yu等人[10]的数据重新绘制

Figure 2 (Color online) (a) The production process of QR code. Images of QR codes under (b) sunlight and (c) 808 nm irradiation. (d) The fluorescence intensity distributed on the red line in (c). (e) QR code identified by commercial WeChat software. (f) Schematic of the QR code transmission penetration depth measurement device. (g) Fluorescence images of pork tissues with different thicknesses (0–5 mm) covering a QR code. Redrawn using data provided by Yu et al.[10]

二区发光机制的理解, 而且为加密、成像和柔性光电子器件等领域的应用建立了一个多功能平台. 未来的研究将着重于进一步提高发光效率、拓展前驱体体系的范围以及探索更复杂的器件结构, 从而为下一代碳基光子技术的发展铺平道路. 然而, 该体系在发光效率进一步提升、结构可控性及通用合成策略方面仍存在一定挑战, 未来研究可围绕前驱体体系拓展、发光机理解析及器件构筑等方面展开, 从而推动近红外发光碳基材料向实际应用迈进.

参考文献

1 Zhang Y, Ma Y, Yang Y, et al. Heteroatom-doping and conjugation-extension enable ultrahigh-bright full-color carbon quantum dots for tunable liquid-state lasers and 3D printing. Adv Mater, 2026, 38: e03728
2 Shaked N T, Boppart S A, Wang L V, et al. Label-free biomedical optical imaging. Nat Photon, 2023, 17: 1031–1041
3 Chen H J, Colburn K, Liu P, et al. Towards fibre-like loss for photonic integration from violet to near-infrared. Nature, 2026, 649: 338–344
4 Li W, Yue D, Liu Y, et al. Rare earth-carbon dots hybrids: a critical review of synthetic pathways, energy transfer mechanisms, and advanced photonic applications. Coord Chem Rev, 2026, 558: 217775
5 Wang B, Lu S. The light of carbon dots: from mechanism to applications. Matter, 2022, 5: 110–149
6 Wang B, Waterhouse G I N, Yang B, et al. Advances in shell and core engineering of carbonized polymer dots for enhanced applications. Acc Chem Res, 2024, 57: 2928–2939
7 Yang M, Han Y, Bianco A, et al. Recent progress on second near-infrared emitting carbon dots in biomedicine. ACS Nano, 2024, 18: 11560–11572
8 Song H, Ru Y, Yu J, et al. Carbon dots: from fundamentals to frontier applications. Sci China Chem, 2026, 69: 539–618
9 Wang H, Ai L, Song H, et al. Innovations in the solid-state fluorescence of carbon dots: strategies, optical manipulations, and applications. Adv Funct Mater, 2023, 33: 2303756
10 Yu H, Ai L, Lu S. Customized NIR-II dual-phase carbon dots: elucidating the emission mechanism for smart photonic applications. Angew Chem Int Ed, 2026, e8078052