

文章编号: 1000-7032(2026)06-0983-14

# 碳点/二氧化硅复合材料制备、发光性质及应用研究进展

覃锦兰<sup>1</sup>, 王钱崧<sup>2</sup>, 石昆衡<sup>3</sup>, 胡超凡<sup>3\*</sup>

(1. 广州工程技术职业学院 石油化工学院, 广东 广州 510075;

2. 广州从化区农业技术推广中心, 广东 广州 510900;

3. 华南农业大学 材料与化学工程学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 碳点(Carbon dots, CDs)因其独特的光学特性、优异的生物相容性以及易于功能化等优点而备受关注。然而, CDs在固态下易发生聚集诱导荧光猝灭, 并且在强酸强碱等苛刻环境中稳定性不好, 这极大地限制了其实际应用范围。将 CDs与二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)基质结合形成 CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料, 不仅能够将 CDs均匀分散在 SiO<sub>2</sub>基质中, 有效抑制非辐射跃迁, 显著提升其荧光量子产率及光、热、化学稳定性; 而且还能通过限域效应和界面相互作用, 诱导或增强 CDs的室温磷光发光特性。此外, 利用 SiO<sub>2</sub>的多孔性和可功能化表面, 为构建功能集成的智能复合材料提供了理想平台。鉴于 CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料在传感、生物成像、光电器件、信息加密和催化等领域的迅猛发展, 本文对其制备方法、发光性能优化机理及其应用领域进行了系统总结, 并对当前挑战和未来研究方向进行了探讨, 为该领域的后续研究提供理论依据和研究思路。

**关键词:** 碳点; 二氧化硅; 发光性质; 传感技术; 生物成像

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260043

CSTR: 32170.14.CJL.20260043

## Research Progress on Preparation, Luminescent Properties and Applications of Carbon Dots/Silica Composites

QIN Jinlan<sup>1</sup>, WANG Qiansong<sup>2</sup>, SHI Kunheng<sup>3</sup>, HU Chaofan<sup>3\*</sup>

(1. School of Petrochemical Engineering, Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510075, China;

2. The Agricultural Technology Extension Center of Conghua District, Guangzhou 510900, China;

3. College of Materials and Chemical Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

\* Corresponding Author, E-mails: thucf@scau.edu.cn

**Abstract:** Carbon dots (CDs) have attracted considerable attention due to their unique optical properties, excellent biocompatibility, and ease of functionalization. However, CDs are prone to aggregation-induced fluorescence quenching in the solid state and exhibit poor stability under harsh conditions such as strong acids and alkalis, which greatly limits their practical application range. The combination of CDs with a silica (SiO<sub>2</sub>) matrix to form CDs/SiO<sub>2</sub> composites not only uniformly disperses CDs in the SiO<sub>2</sub> matrix, effectively inhibits non-radiative transitions, and significantly improves their fluorescence quantum yield as well as photothermal and chemical stability, but also induces or enhances the room-temperature phosphorescence properties of CDs through confinement effects and interfacial interactions. In addition, the porosity and functionalizable surface of SiO<sub>2</sub> provide an ideal platform for constructing function-integrated intelligent composites. Given the rapid development of CDs/SiO<sub>2</sub> composites in fields such as sensing, bioimaging, optoelectronic devices, information encryption, and catalysis, this paper systematically summarizes their preparation methods, optimization mechanisms of optical properties, and application fields, and discusses the current challenges and future research directions, providing a theoretical basis and research ideas for subsequent studies in this field.

**Keywords:** carbon dots; silica; luminescent properties; sensing technology; bioimaging

收稿日期: 2026-02-05; 修订日期: 2026-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(52472160); 广东省自然科学基金(2025A1515010658)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52472160); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2025A1515010658)

## 1 引 言

碳点(Carbon dots, CDs)是一类尺寸小于10 nm的碳基荧光纳米材料,具有来源广泛、成本低廉、水溶性优异、光致发光(Photoluminescence, PL)性能可调、生物相容性好等优点,使其成为发光材料研究领域的热点<sup>[1-3]</sup>。CDs在生物成像<sup>[4-5]</sup>、化学传感<sup>[6]</sup>、催化<sup>[7]</sup>、光电器件<sup>[8-9]</sup>以及药物递送<sup>[10]</sup>等领域展现出广阔的应用前景。

然而,CDs的实际应用受到聚集诱导荧光猝灭(Aggregation caused quenching, ACQ)效应的限制。当CDs处于固态或高浓度溶液状态时,由粒子间相互作用引发的能量转移、表面电子跃迁以及碳核间 $\pi$ - $\pi$ 作用等非辐射过程,导致其荧光强度显著降低甚至完全猝灭<sup>[11]</sup>。此外,CDs的发光行为对pH、离子强度、温度和溶剂极性外部环境较为敏感,其光稳定性、热稳定性和化学稳定性均未达到理想状态<sup>[12]</sup>。这些固有缺陷严重限制了CDs在高性能固态发光器件、长效生物探针以及恶劣环境下传感领域的应用。

为解决上述问题,研究人员提出多种解决方案,其中一个有效方法是将CDs与惰性基质材料进行复合。二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )具有高透明度、优异的化学稳定性、良好的热稳定性、可精确调控的孔道结构以及成熟的制备工艺,使其成为封装或负载CDs的理想基质材料<sup>[13-14]</sup>。将CDs固载于 $\text{SiO}_2$ 基质中,可从物理层面上有效隔离各个CDs纳米颗粒,抑制ACQ效应,保持甚至增强其在固态下的发光性能<sup>[11]</sup>。更重要的是, $\text{SiO}_2$ 的刚性三维网络能够抑制CDs表面官能团的振动与转动,抑制非辐射失活通道。这一机制不仅有助于提升荧光量子产率,也为诱导并稳定CDs的室温磷光(Room-temperature phosphorescence, RTP)提供了有利环境<sup>[15-17]</sup>。此外,通过调控 $\text{SiO}_2$ 的形貌并对其表面进行氨基或羟基等功能化处理,还可赋予复合材料靶向识别、pH响应等特定功能<sup>[18-20]</sup>。

在这一研究背景下,越来越多的研究人员聚焦于CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料的可控制备方法、独特发光性能及其多元化应用的研究。本文旨在全面综述CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料研究进展(如图1),首先梳理两大类合成方法;随后分析 $\text{SiO}_2$ 基质对CDs发光性质的影响,包括其在固态荧光及RTP方面的作用;最后探讨该复合体系在传感检测、生物成像

与诊疗、光电器件、信息加密以及催化等前沿领域的应用。通过对现有研究的归纳与分析,为高性能CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料的设计与开发提供理论参考,并展望其未来发展方向与面临的挑战。

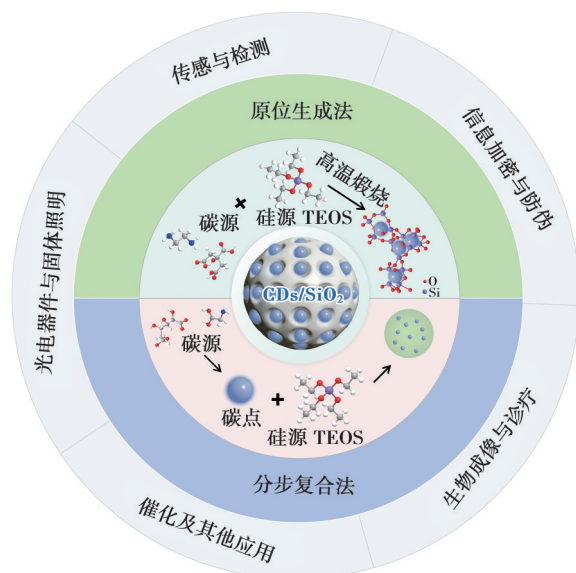


图1 CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料的制备方法及其应用研究

Fig.1 Preparation methods and application research of CDs/ $\text{SiO}_2$  composites

## 2 CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料制备方法

根据CDs与 $\text{SiO}_2$ 基质的合成顺序,制备CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料的方法大体可分为两大类:原位生成法和分步复合法。其中,原位生成法通常在同一反应体系中能同时生成或组装CDs与 $\text{SiO}_2$ 基质,如一锅溶剂热法<sup>[21]</sup>、Stöber溶胶-凝胶法<sup>[22]</sup>等,这类合成方法能充分发挥 $\text{SiO}_2$ 赋予CDs的卓越防护能力与功能化潜力,又能保留原始CDs的尺寸分布和光学特性;分步复合法则是先制备或修饰CDs,再通过后续反应实现与 $\text{SiO}_2$ 基质的稳定结合,如共价接枝法<sup>[23]</sup>。而分子印迹技术则是实现CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料特定功能化的有效技术手段<sup>[24]</sup>。

### 2.1 原位生成法

原位生成法是制备CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料的常用方法,主要特征是碳源与硅源(以及必要的结构导向剂或表面修饰剂)同步生成。例如,Zhang等<sup>[25]</sup>通过一步溶剂热反应,以柠檬酸作为碳源,与正硅酸乙酯(TEOS)和(3-氨基丙基)三乙氧基硅烷(APTES)水解产生的硅烷前驱体共同作用,实现了CDs的原位生成。退火处理后,成功制备了即使在400 °C高温下仍能保持优异光致发光性能的CDs/ $\text{SiO}_2$ 复合材料。Tang等<sup>[26]</sup>使用TEOS作为硅源、乙

二胺(EDA)作为碳源兼氮源,通过一步水热反应同步获得CDs与SiO<sub>2</sub>微球,最终形成内部包覆CDs的CPDs/SiO<sub>2</sub>复合微球,表现出超高的RTP稳定性。近年来,研究人员通过先合成具有规整孔道的介孔SiO<sub>2</sub>(M-SiO<sub>2</sub>),再将小分子碳源,如柠檬酸、葡萄糖、有机胺等渗入其孔道。后续经水热、微波或煅烧处理,使碳源在受限空间中碳化生成尺寸均一的CDs<sup>[21,27]</sup>,也属于原位生成法,如Hu等<sup>[21]</sup>在树枝状介孔SiO<sub>2</sub>(DMSNs)中原位生成磷掺杂CDs,所得DMSNs-BCDs的量子产率高达93.7%,在侧流免疫分析中显著提升了检测灵敏度。Qu等<sup>[27]</sup>以中空介孔SiO<sub>2</sub>(HMSiO<sub>2</sub>)为基质,通过无溶剂原位生长策略并结合尿素和磷酸实现具备可调控RTP性能的N,P-CDs@HMSiO<sub>2</sub>@Urea复合物制备。介孔结构不

仅实现了CDs尺寸精确调控,还可通过孔壁官能团(如氨基)调节其表面的化学构型及光学性质<sup>[28]</sup>。

Stöber法是指在醇-水-氨体系中,对硅烷前驱体(如TEOS)进行水解-缩聚,使得SiO<sub>2</sub>在预制CDs表面均匀沉积。例如,Supianto等<sup>[22]</sup>以柠檬酸为碳源、APTES为氨基修饰剂与结构导向剂、TEOS为硅源,制备出单分散CND@SiO<sub>2</sub>纳米探针,用于肺癌标志物的荧光免疫分析,如图2(a)所示。Wu等<sup>[29]</sup>则利用TEOS与全氟辛基三乙氧基硅烷在氨水催化下共水解,合成POS-SiO<sub>2</sub>-CDs氟化纳米颗粒溶胶,该复合物可喷涂于PE薄膜形成兼具紫外-蓝光转换与超疏水自清洁性能的透明涂层。原位生成法具有普适性,几乎所有类型的CDs都可以通过该方法进行SiO<sub>2</sub>包覆<sup>[13-14,30]</sup>。

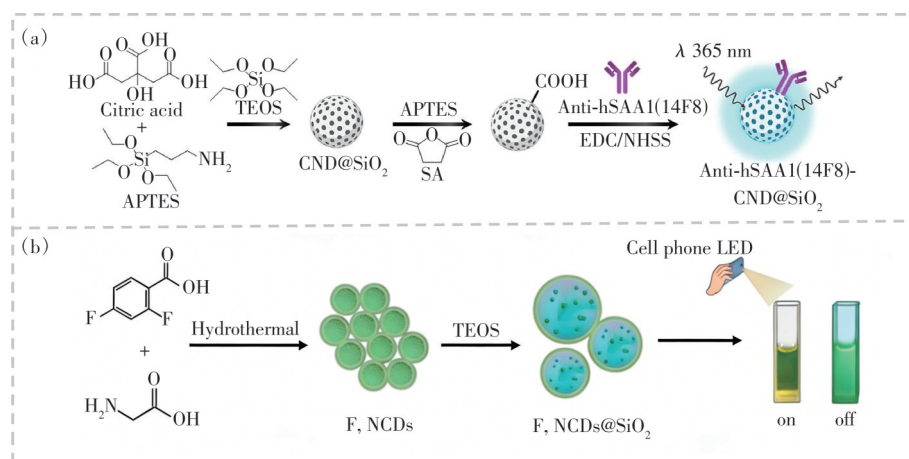


图2 CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料的合成方法。(a)原位生长法(Stöber法)合成CND@SiO<sub>2</sub><sup>[22]</sup>; (b)分步复合法(共价接枝法)合成F,NCDs@SiO<sub>2</sub><sup>[23]</sup>

Fig.2 Synthesis methods of CDs/SiO<sub>2</sub> composites. (a) *In-situ* growth synthesis of CND@SiO<sub>2</sub> using the Stöber method<sup>[22]</sup>. (b) Stepwise composite synthesis of F, NCDs@SiO<sub>2</sub> through the covalent grafting method<sup>[23]</sup>

## 2.2 分步复合法

分步复合法是实现多功能化CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料的一个有效途径,主要特征是先制备并分离CDs,在此基础上通过后续的化学反应或聚合过程实现CDs在SiO<sub>2</sub>基质上的稳定固定与功能化,典型代表是共价接枝法。

共价接枝法是通过稳定化学键将CDs稳固地锚定于SiO<sub>2</sub>表面或孔道内,能够有效抑制CDs泄漏并显著改善其RTP性能<sup>[17]</sup>。例如,Liao等<sup>[31]</sup>通过CDs与APTES修饰的树枝状介孔SiO<sub>2</sub>(DMSNs)反应,借助形成的Si—O—C和Si—C/N共价连接,固定CDs发光中心并隔离其于纳米孔内,从而获得水相RTP寿命达1.195 s的CD@DMSNs材料。Mo等<sup>[23]</sup>则先合成F,NCDs,再通过与TEOS生成F,

NCDs@SiO<sub>2</sub>纳米材料,通过氢键网络与共价键双重固定作用,制备出可见光激发的水相热活化延迟荧光(TADF)材料,如图2(b)所示。

分子印迹技术是一种对CDs/SiO<sub>2</sub>材料复合功能化的技术手段,通过原位合成或分步合成CDs/SiO<sub>2</sub>后,再通过模板分子诱导功能单体定向排列,聚合后移除模板,在聚合物中形成特异识别位点制得针对特定分子高选择性的光学探针<sup>[14]</sup>。例如,Liu等<sup>[24]</sup>以双酚A(BPA)为模板,制备出分子印迹涂层CDs,当复合材料再次接触BPA时引发荧光猝灭,实现高选择性检测。Cui等<sup>[32]</sup>通过微波辅助法从橙皮提取绿色CDs,再经反相微乳液技术包覆SiO<sub>2</sub>,最终制得分子印迹复合材料CD-MIPs。Chai等<sup>[33]</sup>以药物齐多夫定为模板,功能单体甲基丙

烯酸与 CDs 及交联剂在修饰 SiO<sub>2</sub> 微球表面聚合, 经洗脱形成特异识别腔的复合材料用作高效液相色谱(HPLC)固定相, 实现药物分子高效分离, 可实现对抗生素、核苷等复杂混合物的高效分离。

总体而言, 原位生成法和分步复合法各有优势。原位生成法在同一体系中同步生成 CDs 与 SiO<sub>2</sub>, 可快速形成具有物理限域和部分共价键合的致密或介孔结构, 抑制氧扩散和非辐射衰减, 从而增强 RTP。分步复合法则先获取结构和发光性质可控的 CDs, 再将其共价锚定或限域于 SiO<sub>2</sub> 中, 能够分别优化 CDs 发光中心和 SiO<sub>2</sub> 的形貌或界面键合, 保持其光学性的同时实现功能化多样化, 更有利于构建高选择性、多功能的传感与生物成像体系。

### 3 CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料的发光性质

CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料中的 SiO<sub>2</sub> 基质不仅充当稳定载体, 其独特的物理限域和界面化学效应还显著改善, 甚至诱导出 CDs 新的光学特性, 如克服 ACQ 效应以实现高效稳定的固态荧光<sup>[11]</sup> 以及通过刚性

限域和化学固定来激活长寿命的 RTP<sup>[34]</sup>, 从而极大地拓展了 CDs 在光学材料领域的应用潜力。

#### 3.1 固态荧光性能

将 CDs 封装于 SiO<sub>2</sub> 基质是克服其在固态或高浓度状态下 ACQ 效应的有效方法。当 CDs 从溶液中干燥形成固态时, 其富含  $\pi$  电子的共轭结构会发生  $\pi$ - $\pi$  堆积, 这会产生高效的非辐射能量传递路径, 导致荧光衰减甚至猝灭。而 SiO<sub>2</sub> 的三维网络结构起到物理隔离的作用, 将 CDs 均匀分散并固定在其骨架中, 阻断了导致猝灭的  $\pi$ - $\pi$  堆积, 从源头减少了 ACQ 的发生。Kwak 等<sup>[11]</sup> 将窄发射 CDs 封装在 SiO<sub>2</sub> 中, 保持了约 80% 量子产率并避免固态猝灭, 同时维持窄带发射特性, 固态发光情况如图 3(a) 所示。同理, Liu 等<sup>[6]</sup> 则将 CDs 锚定于介孔 SiO<sub>2</sub>, 通过 Si—O—C 等化学键限制表面发光官能团振动与转动, 减少分子内运动造成的非辐射耗散, 从而提高量子产率。界面电子云相互作用还可能引发聚集诱导发射增强效应。Zhang 等<sup>[28]</sup> 利用 CDs 与氨基功能化介孔 SiO<sub>2</sub> 之间的  $n \rightarrow \pi^*$  相

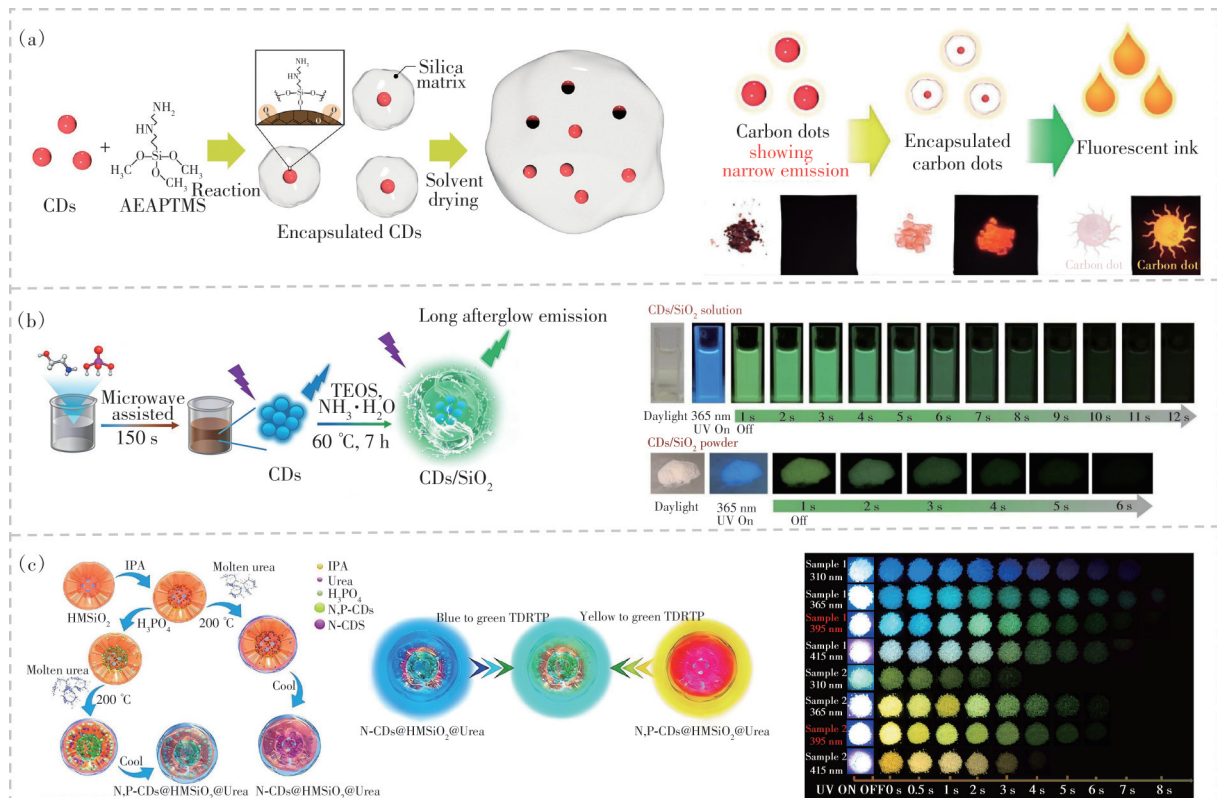


图 3 CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料的光学性质。(a) CDs 封装于 SiO<sub>2</sub> 基质机理及荧光发光性能<sup>[11]</sup>; (b) CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料合成示意图及水相、固态状态下的 RTP 性能<sup>[34]</sup>; (c) N-CDs@HMSiO<sub>2</sub>@尿素复合材料合成示意图及其多色 RTP 性能展示<sup>[27]</sup>

Fig.3 Optical properties of CDs/SiO<sub>2</sub> composites. (a) Schematic diagram of CDs encapsulated in SiO<sub>2</sub> matrix and fluorescence emission performance diagram<sup>[11]</sup>. (b) Schematic diagram of the synthesis of CDs/SiO<sub>2</sub> composites and RTP performance diagrams in aqueous and solid states<sup>[34]</sup>. (c) Schematic illustration of the synthesis of N-CDs@HMSiO<sub>2</sub>@urea composite and its multicolor RTP performance figure<sup>[27]</sup>

互作用,实现由蓝光到深红光的固态荧光发射。Miao等<sup>[35]</sup>和Huang等<sup>[36]</sup>研究表明,将CDs限域于介孔SiO<sub>2</sub>孔道内部可诱导其有序非 $\pi$ - $\pi$ 堆叠式聚集,抑制非辐射跃迁,使荧光强度提升数倍。致密的SiO<sub>2</sub>骨架还提供优异环境屏蔽,减少CDs受溶剂、pH、离子及氧气猝灭的影响<sup>[12]</sup>。Zhang等<sup>[25]</sup>在受限SiO<sub>2</sub>隔间中原位生成CDs,所得材料在400℃下仍保持初始荧光性能,并应用于可在205℃正常工作的高功率LED。Wu等<sup>[29]</sup>通过将CDs封装在含氟的SiO<sub>2</sub>中实现了超疏水自清洁。上述稳定性表现是CDs/SiO<sub>2</sub>作为稳定荧光探针及复杂环境应用的重要保障<sup>[22, 37]</sup>。

### 3.2 室温磷光(RTP)性能

RTP是一种源于三重态激子辐射跃迁的发光现象,由于具有寿命长、斯托克斯位移大等优势,可应用在生物成像、信息加密和传感等领域。然而,CDs自身的RTP通常较弱且易受水和氧气猝灭,复合SiO<sub>2</sub>是实现高效稳定RTP的常用方法。SiO<sub>2</sub>刚性网络可通过氢键及Si—O—C、Si—C/N等共价键固定CDs,抑制三重态激子非辐射失活<sup>[31, 38]</sup>。例如,Lou等<sup>[15]</sup>将碳化聚合物点(CPDs)在介孔二氧化硅(MSNs)中煅烧碳化,利用多重限域效应实现了寿命达3.07 s的RTP,荧光量子产率为22.93%。Tang等<sup>[39]</sup>采用APTES一步水热法合成CDs/SiO<sub>2</sub>微粒,获得能级差( $\Delta$ EST)约为0.141 eV的深蓝光RTP,同样是依赖Si—C键及刚性网络限制发光中心运动。致密SiO<sub>2</sub>还能阻隔氧气接触发光中心,使其在空气甚至水溶液中保持明亮RTP。例如,Sun等<sup>[34]</sup>成功制备出具有846.9 ms超长寿命和12.1%超高余辉量子产率的水溶性CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料,制备方法以及RTP发光如图3(b)

所示。杂原子(如N、B、P等)的掺杂可引入CDs的 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁,减小S<sub>1</sub>与T<sub>1</sub>的 $\Delta$ EST,提高系间窜跃(ISC)效率,从而增强RTP<sup>[38, 40-41]</sup>。Tang等<sup>[26]</sup>通过EDA和TEOS在水热条件下的交联与碳化制得超稳定超长RTP的CPDs/SiO<sub>2</sub>材料。一些体系还呈现TADF,即T<sub>1</sub>激子吸收热能回到S<sub>1</sub>并辐射跃迁,解释了超长寿命和高效率发光的来源<sup>[23, 34]</sup>。据报道,CDs/SiO<sub>2</sub>的发光颜色可由CDs和SiO<sub>2</sub>基质相互作用调控,实现多色发射和特定波长输出。例如,Bao等<sup>[42]</sup>在SiO<sub>2</sub>中共封装CDs与有机荧光染料制备出CD/荧光染料@SiO<sub>2</sub>复合体,CDs作为给体将吸收能量转移给受体染料,实现了多色余辉发射。因为SiO<sub>2</sub>基质的物理限域效应,它不仅抑制了聚集猝灭,还确保了CDs与染料间高效的Förster共振能量转移(FRET)。而Paul等<sup>[43]</sup>则在SiO<sub>2</sub>中共包覆CDs与稀土离子(Tb<sup>3+</sup>、Eu<sup>3+</sup>),通过SiO<sub>2</sub>基质的限域作用形成了高效的能量传递路径,使得CDs吸收的能量能够被Tb<sup>3+</sup>和Eu<sup>3+</sup>离子有效利用,最终通过调控不同发光中心的相对强度实现白光输出,通过调节激发波长实现蓝-绿-红三色发光,并可获得从暖白到冷白的可调光发射。此外,Qu等<sup>[27]</sup>利用无溶剂原位生长方法,通过HMSiO<sub>2</sub>刚性孔道稳定了高能级三重态激子,而P掺杂则有效调控了碳核的电子态,在HMSiO<sub>2</sub>中实现了从高能蓝光到低能绿光,以及从低能黄光到高能绿光的双向调控,如图3(c)所示。Chen等<sup>[44]</sup>通过将硅烷功能化的CDs限域在SiO<sub>2</sub>基质中,使得CDs与SiO<sub>2</sub>之间形成界面Si—C共价键从而改变CDs的表面电子态,诱导产生了多个具有不同衰减速率的磷光中心,获得了在不同波长激发下呈现从黄光到绿光动态变化的RTP。表1对近期不同方法制备

表1 CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料RTP性能对比

Tab. 1 Comparison of RTP performance for CDs/SiO<sub>2</sub> composites

碳点前驱体	硅基原料	制备方法	关键指标				应用	Ref
			RTP寿命	余辉发射峰/nm	荧光量子产率/%	余辉量子产率/%		
聚丙烯酸+乙二醇	介孔SiO <sub>2</sub> 纳米球	水热反应+高温煅烧	3.07 s	470	/	22.93	多级信息加密、细胞成像	[15]
乙二醇	正硅酸乙酯	一步水热法	1.26 s	520	12.62	/	荧光防伪	[26]
乙醇胺+磷酸	树枝状介孔SiO <sub>2</sub> 纳米颗粒	微波合成CDs+共价接枝法	1.195 s	520	30.7	15.99	生物成像、指纹、刑侦检测	[31]
乙醇胺+磷酸	正硅酸乙酯	微波合成CDs+溶胶-凝胶法复合	846.9 ms	510	17.2	12.1	长寿命防伪	[34]
3-氨丙基三乙氧基硅烷	3-氨丙基三乙氧基硅烷	一步水热法	0.81 s	430	10.34	/	蓝光防伪、信息加密	[39]
乙二醇+磷酸	正硅酸乙酯	水热合成CDs+溶胶-凝胶法复合+退火	~1.1 s	500	/	14.2	多色防伪编码、指纹识别	[42]
柠檬酸钠+1-[3-(三氧基硅基)丙基]脒	稻壳提取SiO <sub>2</sub>	水热硅烷功能化CDs+溶胶-凝胶法+煅烧	1.28 s	420,495,580	/	17.6	动态防伪、信息加密	[44]

的 CDs/SiO<sub>2</sub> 的 RTP 性能进行对比,形成了它们在 RTP 寿命、发射波峰和量子效率等关键指标上的差异与优势。

## 4 CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料的应用

### 4.1 传感与检测

高稳定性和抗干扰能力使 CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料成为理想的荧光或磷光探针,被广泛应用于检测环境或生物体系中的重金属离子(表 2)。例如, Kang 等<sup>[3]</sup>构建了 N-CDs@mSiO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>@BSA-AuNCs 比率荧光探针, mSiO<sub>2</sub> 将 N-CDs 与 AuNCs 物理隔离,提高了比率信号的稳定性,实现 Co<sup>2+</sup> 检测范围 2.00~200.00 μmol·L<sup>-1</sup>,检测限低至 0.74 μmol·L<sup>-1</sup>。Liu 等<sup>[6]</sup>利用嵌入介孔 SiO<sub>2</sub> 的 CDs,通过内滤效应(IFE)和静电相互作用,实现了对环境水中 Cr<sup>6+</sup> 的灵敏检测,氨基功能化的 SiO<sub>2</sub> 通过静电作用富集阴离子形态的 Cr<sup>6+</sup>,增强了内滤效应的传感效率,检测限低至 5 nmol·L<sup>-1</sup>。Huang 等<sup>[36]</sup>和 Guo 等<sup>[37]</sup>分别开发了基于 CDs@SiO<sub>2</sub> 的比率荧光探针,用于检测 Cu<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup>。对于阴离子, Liu 等<sup>[45]</sup>构建的 CDs@SiO<sub>2</sub> 磷光探针能够无背景荧光干扰地高选择性检测 F<sup>-</sup>,其传感机理为 F<sup>-</sup> 对 SiO<sub>2</sub> 保护层的选择性刻蚀,导致内部 CDs 暴露于水相而引起磷光猝灭。此外,该复合材料还可用于检测农药福美双<sup>[46]</sup>、三嗪类除草剂<sup>[46]</sup>和爆炸物苦味酸<sup>[47]</sup>等。结合分子印迹技术(MIP)可赋予超高选择性。Cui 等<sup>[32]</sup>和 Amiri 等<sup>[48]</sup>分别在 CDs 表面包覆了针对西替利嗪和头孢他啶的 MIP-SiO<sub>2</sub> 层,实现了对目标药物的特异性检测。对于生物小分子, Li 等<sup>[49]</sup>利用 MnO<sub>2</sub> 猝灭 CDs@SiO<sub>2</sub> 的磷光,并通过谷胱甘肽(GSH)还

原 MnO<sub>2</sub> 恢复磷光的原理,建立了检测 GSH 的无背景干扰方法。Zhao 等<sup>[50]</sup>则利用 CDs 和 QD@SiO<sub>2</sub> 构建的比率荧光试纸,实现了对维生素 C 的颜色分析。在免疫分析中,复合材料常作为荧光标记物用于侧流免疫层析试纸, SiO<sub>2</sub> 不仅提升了 CDs 的光稳定性和生物相容性,还提供了丰富的官能团用于高效偶联抗体。例如, Supianto 等<sup>[22]</sup>利用制备碳纳米点@SiO<sub>2</sub>(CND@SiO<sub>2</sub>)作为标记物,定量检测临床显著浓度下血清中的人血清淀粉样蛋白 A1(hSAA1),用于肺癌诊断。Wang 等<sup>[51]</sup>利用 CDs/SiO<sub>2</sub> 纳米球作为信号标签,对卵巢癌标志物糖类抗原(CA125)等物质进行检测,实现对卵巢癌的早期诊断。Shaat 等<sup>[52]</sup>则利用氨基功能化的 CDs/SiO<sub>2</sub> 与未扩增的丙型肝炎病毒(HCV)的 RNA 混合时产生的交联增强发射现象,采用 SiO<sub>2</sub> 表面为该交联过程提供了关键的反应界面,开发了直接检测临床样本中病毒 RNA 的新技术。因此, CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料充分利用了 SiO<sub>2</sub> 的物理限域效应来提升稳定性及激活磷光,并利用其多功能的界面构筑比率传感、实现高选择性识别,在传感与检测领域展现出巨大潜力。

### 4.2 生物成像与诊疗

Zhang 等<sup>[10]</sup>制备出多孔 SiO<sub>2</sub>-聚乙烯亚胺/绿色 CDs 复合材料(pSiO<sub>2</sub>-PEI/gCDs),通过谷胱甘肽裂解二硫键和 pH 诱导 PEI 溶胀,实现对肿瘤微环境的双重响应控释,同时利用 gCDs 进行荧光示踪。Shirani 等<sup>[19]</sup>合成一种由 CDs 封端的可负载吉西他滨(GEM)的智能胺介孔 SiO<sub>2</sub>(MSN-NH<sub>2</sub>)的载体(CDs/MSN-NH<sub>2</sub>@GEM),叶酸(FA)通过共价接枝到 CDs/MSN-NH<sub>2</sub>@GEM 的羧基上,形成(FA/CDs/MSN-NH<sub>2</sub>@GEM)复合材料,该材料具有强荧光发射和成像能力,可用于将有效载荷递送至肿瘤细胞,实现对肿瘤细胞的靶向递送。Kajani 等<sup>[20]</sup>开发了紫杉烷类 CDs 作为 pH 响应型门控剂, CDs 与药物阿霉素构成荧光共振能量转移(Fluorescence resonance energy transfer, FRET)对,通过监测荧光变化实现了药物释放的实时可视化。Sun 等<sup>[53]</sup>通过一锅微波加热合成 CDs-介孔 SiO<sub>2</sub> 纳米杂化材料(MSNs-CDs)多功能纳米材料,利用 SiO<sub>2</sub> 防止 CDs 的聚集,使其展现出稳定的多色与双光子成像能力。尤其在 RTP 成像中, SiO<sub>2</sub> 的刚性限域效应至关重要,如图 4(a)所示。Stepanov 等<sup>[54]</sup>将 Cu<sub>2-x</sub>S 核和红光发射的 CDs 结合在 SiO<sub>2</sub> 纳米结构中,实现

表 2 传感与检测应用实例

Tab. 2 Application examples of sensing and detection

应用范围	应用实例	Ref
离子和环境污染物检测	Co <sup>2+</sup> 离子检测	[3]
	Cr <sup>6+</sup> 离子检测	[6]
	Cu <sup>2+</sup> 离子检测	[36]
	Fe <sup>3+</sup> 离子检测	[37]
	F <sup>-</sup> 离子检测	[45]
	农药三嗪类除草剂	[46]
	苦味酸	[47]
药物和生物小分子检测	西替利嗪	[32]
	头孢他啶	[48]
	谷胱甘肽	[49]
	维生素 C	[50]
生物大分子与疾病标志物检测	肺癌标志物 hSAA1	[22]
	卵巢癌标志物 CA125	[51]
	病毒 RNA	[52]

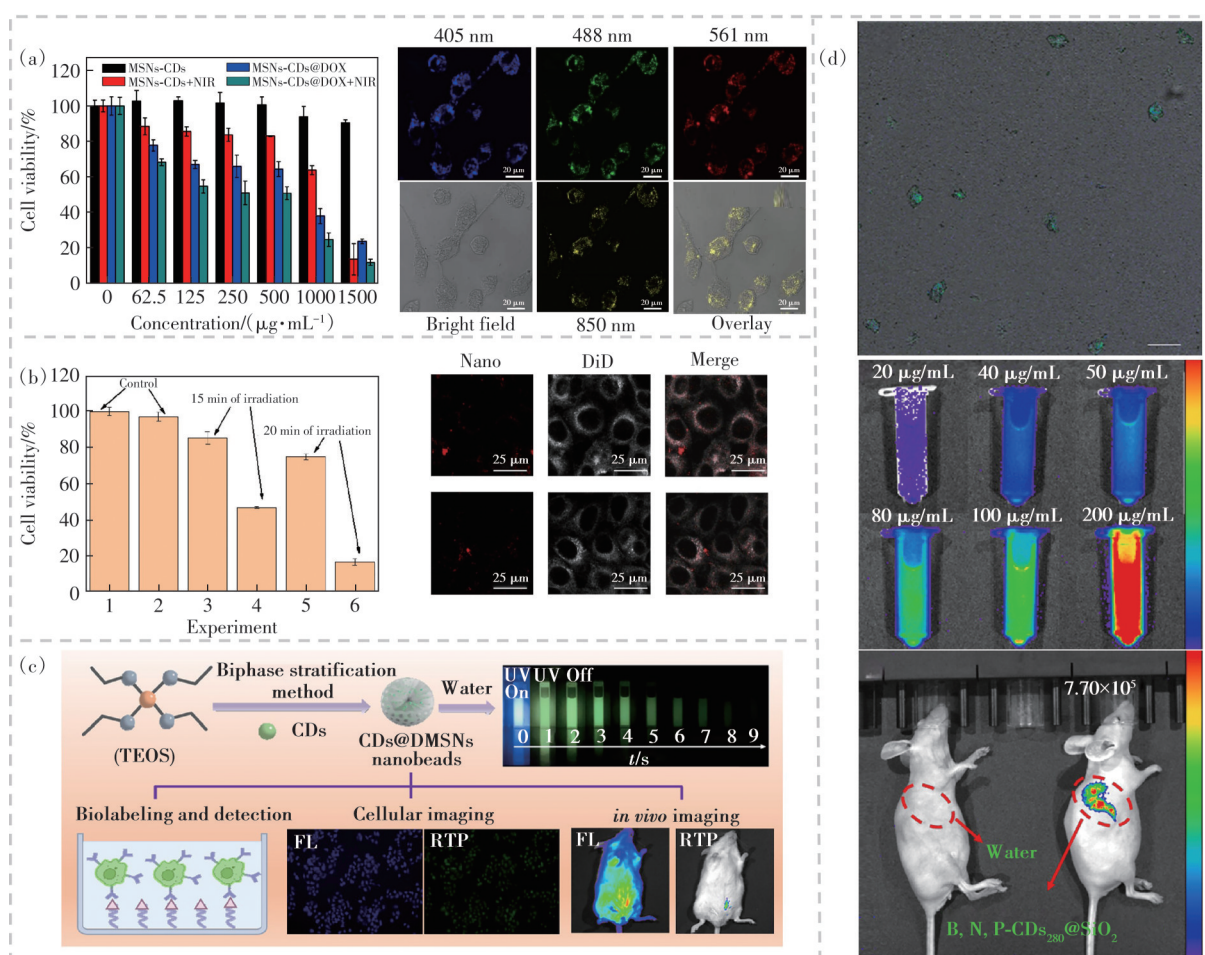


图4 生物成像与诊疗典型应用案例。(a)MCF-7细胞(人乳腺癌细胞)与MSNs-CDs纳米杂化材料的共聚焦激光扫描显微镜图像<sup>[53]</sup>;(b) $\text{Cu}_{2-x}\text{S}@$ 二氧化硅-氨基-CDs的细胞毒性分析及其共聚焦激光扫描显微镜图像<sup>[54]</sup>;(c)RTPCD@DMSN纳米微球的一锅法制备流程示意图及其在肿瘤细胞检测和细胞及体内生物成像中的多功能生物医学应用<sup>[31]</sup>;(d)荧光磷光合并图像、不同浓度B,N,P-CDs@二氧化硅水溶液的磷光图像以及分别对两只小鼠皮下注射水和B,N,P-CDs@二氧化硅溶液后的磷光成像<sup>[38]</sup>,圆圈标示注射位置

Fig.4 Typical application cases of bioimaging and theranostics. (a) The confocal laser scanning microscopy images of MCF-7 cells (human breast cancer cells) with MSNs-CDs nanohybrid materials<sup>[53]</sup>. (b) The cytotoxicity analysis and confocal laser scanning microscopy images of  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}@$ silica-amino-CDs<sup>[54]</sup>. (c) The one-pot preparation schematic of RTPCD@DMSN nanospheres and their multifunctional biomedical applications in tumor cell detection, as well as cellular and *in vivo* bioimaging<sup>[31]</sup>. (d) The merged fluorescence-phosphorescence images, phosphorescence images of aqueous solutions of B, N, P-CDs@silica with different concentrations, and phosphorescence images of two mice after subcutaneous injection of water and B, N, P-CDs@silica solution, respectively<sup>[38]</sup>. The injection sites are marked with circles

了光热/化学动力学协同治疗,如图4(b)所示。Liao等<sup>[31]</sup>通过一锅法制备CDs/DMSNs(树枝状介孔硅纳米颗粒),通过RTP探针实现了高灵敏度定量检测并在体内生物成像展示出良好的应用性,如图4(c)所示。Chen等<sup>[38]</sup>制备了在水溶液中具有较长寿命的磷光B,N,P-CDs@SiO<sub>2</sub>复合材料,表现出良好的生物相容性、低细胞毒性以及对细胞和生物体的磷光标记能力,如图4(d)所示。Liu等<sup>[55]</sup>利用中空SiO<sub>2</sub>/Cu掺杂CDs,通过协同光动力/化学动力学

法诱导免疫原性细胞死亡,还能分解H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>产氧以改善肿瘤缺氧。Chu等<sup>[56]</sup>开发了同时负载抗菌季铵盐、光疗CDs及气体前体碳酸氢盐,实现了化学、光热、光动力三重协同杀菌与促进伤口愈合。因此,CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料借助SiO<sub>2</sub>的多孔结构负载药物,其刚性网络通过限域效应激活长寿命磷光成像,并将其作为集成平台来构筑协同治疗体系;而CDs则同时作为光学探针、响应门控和治疗单元,实现了诊疗一体化。

### 4.3 光电器件与固态照明

CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料所具备的较高荧光量子产率以及优异的热稳定性,使其在固态照明,尤其是白光发光二极管(WLEDs)领域展现出重要的应用价值。Zhang等<sup>[9]</sup>制备了高效、球形且热稳定的蓝绿光的CDs@SiO<sub>2</sub>荧光复合物,SiO<sub>2</sub>基质将CDs均匀分散,有效抑制集ACQ现象发生,并通过表面钝化获得了高量子产率(>60%)和优异热稳定性,可作为无稀土荧光粉用于WLED上,如图5(a)所示。Paul等<sup>[43]</sup>通过将CDs与Tb<sup>3+</sup>、Eu<sup>3+</sup>共掺杂到

SiO<sub>2</sub>中,在SiO<sub>2</sub>基质中复合三基色发光,并通过调控CDs浓度实现色温从暖白到冷白的可调,获得了超稳定且色温可调白光,如图5(b)所示。Iwabayashi等<sup>[57]</sup>通过将CDs掺入二氧化硅玻璃(干凝胶)基质获得高透明、低光学损耗且机械增强的整体式荧光棒,成为下一代内窥镜的理想候选材料,如图5(c)所示。因此,SiO<sub>2</sub>的物理隔离可以用来抑制聚集猝灭以获得高量子产率,并利用其多功能基质与成型性来集成多色发光中心或构筑低损耗的整体式光学器件。

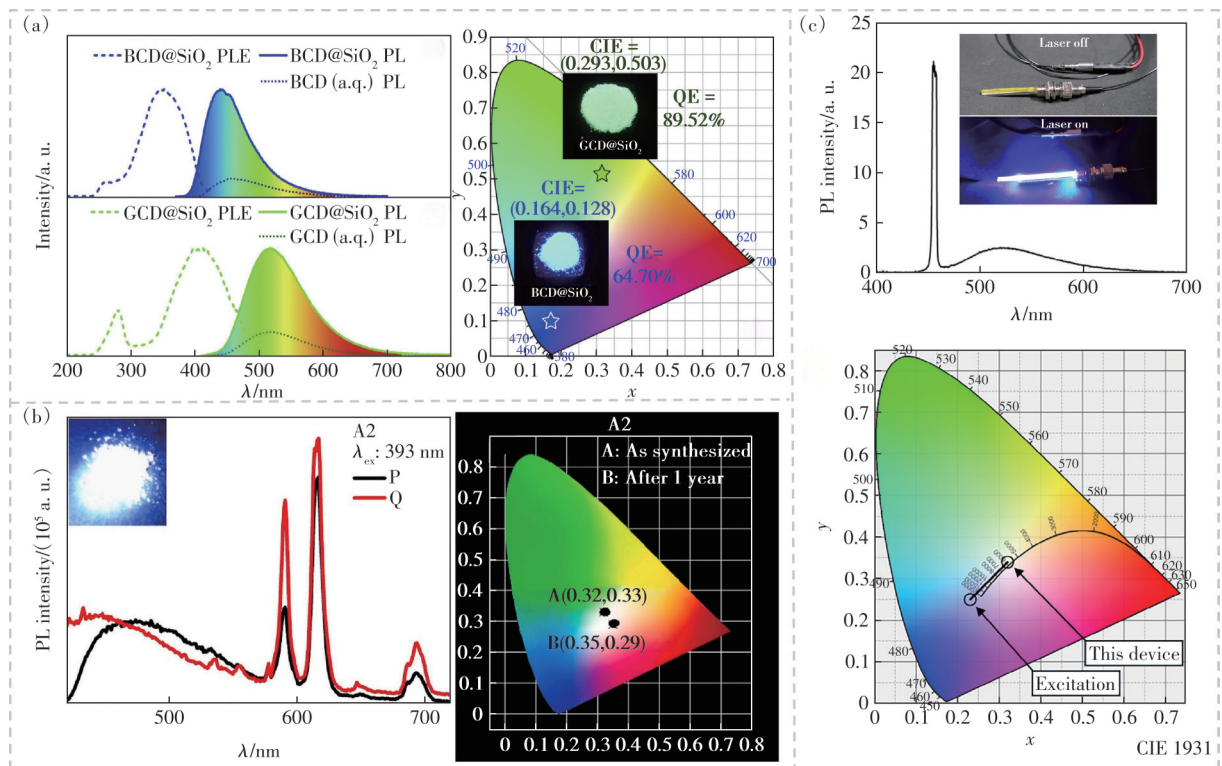


图5 光电器件与固态照明应用。(a)蓝光CDs@SiO<sub>2</sub>、绿光CDs@SiO<sub>2</sub>的激发和发光光谱,以及两种复合材料在CIE 1931色度图中的发射色坐标<sup>[9]</sup>; (b)掺Eu<sup>3+</sup>-Tb<sup>3+</sup>的CDs/SiO<sub>2</sub>基质合成时(P)及1年后(Q)的光谱对比以及A<sub>2</sub>合成时及1年后的CIE色度图<sup>[43]</sup>; (c)CDs/SiO<sub>2</sub>的波长转换元件单元示意图及其CIE色度图<sup>[57]</sup>

Fig.5 Applications in optoelectronic devices and solid-state lighting. (a) The excitation and emission spectra of blue-light CD@SiO<sub>2</sub> and green-light CD@SiO<sub>2</sub>, as well as the emission color coordinates of the two composites in the CIE 1931 chromaticity diagram<sup>[9]</sup>. (b) The spectral comparison diagrams of Eu<sup>3+</sup>-Tb<sup>3+</sup> doped CD@SiO<sub>2</sub> matrix during synthesis (P) and after 1 year (Q), as well as the CIE chromaticity diagrams of A<sub>2</sub> during synthesis and after 1 year<sup>[43]</sup>. (c) The schematic diagram of the wavelength conversion element unit of CD@SiO<sub>2</sub> and its CIE chromaticity diagram<sup>[57]</sup>

### 4.4 信息加密与防伪

基于CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料独特的RTP特性,可以开发出多重、动态、难以复制的高级防伪技术。由于长余辉特性使得信息在激发光源关闭后依然可见,这就是一级加密,再利用复合材料荧光和磷光对不同激发波长或不同发射寿命的磷光信号差异实现多维信息加密<sup>[27,44]</sup>,如图6(a)所示,Si-CDs@

SiO<sub>2</sub>复合材料实现了多波长激发与时间依赖性的动态室温磷光变色<sup>[44]</sup>。Hao等<sup>[17]</sup>制备了氮掺杂的N-CDs@SiO<sub>2</sub>的复合材料,SiO<sub>2</sub>通过共价键固定N-CDs,形成具备荧光和磷光双模态的材料,实现了激发时与激发后的多级信息加密,制备出高级防伪安全油墨,如图6(b)所示。Zhu等<sup>[58]</sup>提出了一种刺激响应型双发射荧光材料SP@SiO<sub>2</sub>-CDs

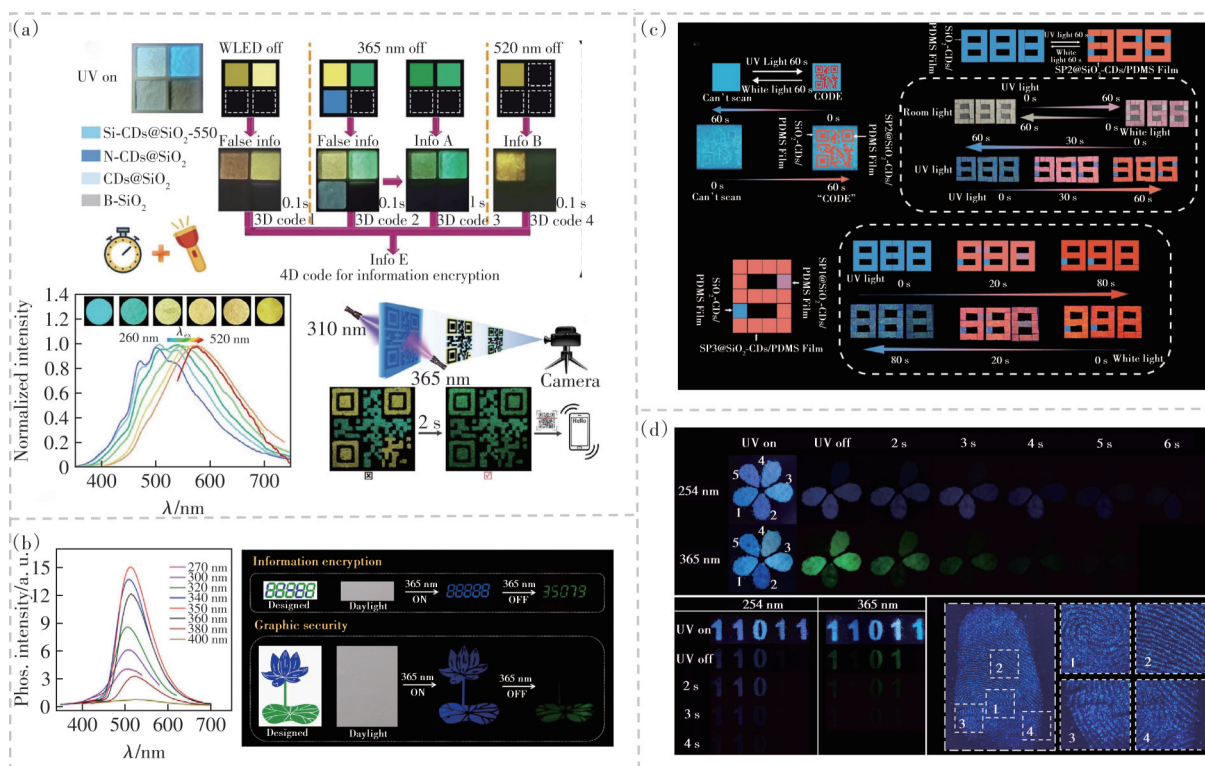


图6 信息加密与防伪应用。(a) Si-CDs@SiO<sub>2</sub>用于高级动态信息加密的3D和4D码、发光光谱和动态磷光解密流程及显示编程图案动态磷光解密的照片<sup>[44]</sup>; (b) N-CDs@SiO<sub>2</sub>发光光谱及其安全防护应用<sup>[17]</sup>; (c) SP@SiO<sub>2</sub>-CDs/PDMS薄膜在信息加密和防伪中的应用<sup>[58]</sup>; (d) (C-CPDs-MSNs)采用多级信息加密和指纹检测应用的先进防伪技术<sup>[15]</sup>

Fig.6 Applications in information encryption and anti-counterfeiting. (a) The 3D and 4D codes, emission spectra, dynamic phosphorescence decryption processes of Si-CDs@SiO<sub>2</sub> for advanced dynamic information encryption, as well as the photos of dynamic phosphorescence decryption of displayed programmed patterns<sup>[44]</sup>. (b) The emission spectra of N-CDs@SiO<sub>2</sub> and their applications in security protection<sup>[17]</sup>. (c) The applications of SP@SiO<sub>2</sub>-CDs/PDMS films in information encryption and anti-counterfeiting<sup>[58]</sup>. (d) The advanced anti-counterfeiting technology of (C-CPDs-MSNs) for multi-level information encryption and fingerprint detection applications<sup>[15]</sup>

(SP为螺吡喃),多孔SiO<sub>2</sub>为螺吡喃分子的光异构化提供了必要空间,并结合与CDs的FRET效应,实现了光响应的颜色与荧光双重动态变化。材料呈现出从黄色到粉色的光致变色现象,同时能实现从蓝白色到橙红色的双发射荧光转换,成功开发出动态防伪图案及多重编码系统,如图6(c)所示。Luo等<sup>[15]</sup>通过合成长寿命的碳化聚合物点-介孔SiO<sub>2</sub>纳米球(C-CPDs-MSNs),介孔坍塌和高温煅烧形成的致密SiO<sub>2</sub>网络与刚性Si—C键能有效保护磷光中心免受环境猝灭,所以该材料在恶劣条件下仍能保持稳定的磷光性能,并已成功应用于多级信息加密、指纹识别和细胞成像等领域,如图6(d)所示。Bao等<sup>[42]</sup>利用CDs与荧光染料在SiO<sub>2</sub>中的FRET效应, SiO<sub>2</sub>基质将作为供体的CDs与受体染料固定在能量转移所需的近距离内,从而实现了磷光颜色的调控,可用于多级信息加密。CDs/SiO<sub>2</sub>应用于信息加密与防伪这些技术远比传

统的荧光防伪更安全、更难破解。因此, SiO<sub>2</sub>的刚性网络可激活和保护RTP信号,并将其作为多功能平台来集成多重发光中心,从而实现多色多模态加密,最终材料应对复杂环境表现出高稳定性。

#### 4.5 催化及其他应用

Liu等<sup>[7]</sup>将Pd/N掺杂CDs固定在树枝状介孔SiO<sub>2</sub>中,作为高效催化剂用于4-硝基苯酚的加氢还原,该催化剂转换频率 $1461.8 \text{ mol} \cdot \text{mol}_{\text{Pd}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,比未改性的Pd@NMS材料高出8.1倍,如图7(a)所示。Wang等<sup>[59]</sup>利用Ce负载的SiO<sub>2</sub>进行催化臭氧氧化降解硝基苯, SiO<sub>2</sub>提供高比表面积和稳定性,而CDs和负载的活性组分则提供催化活性位点。此外,由于其良好的亲水性和化学稳定性,使得CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料被开发为高效液相色谱(HPLC)的固定相<sup>[60-61]</sup>,如图7(b)所示。Cai等<sup>[62]</sup>通过制备四乙烯胺共修饰硅胶固定相(Sil-TEPA/CDs),实现了12种核苷和核碱基以及11种氨基酸的高

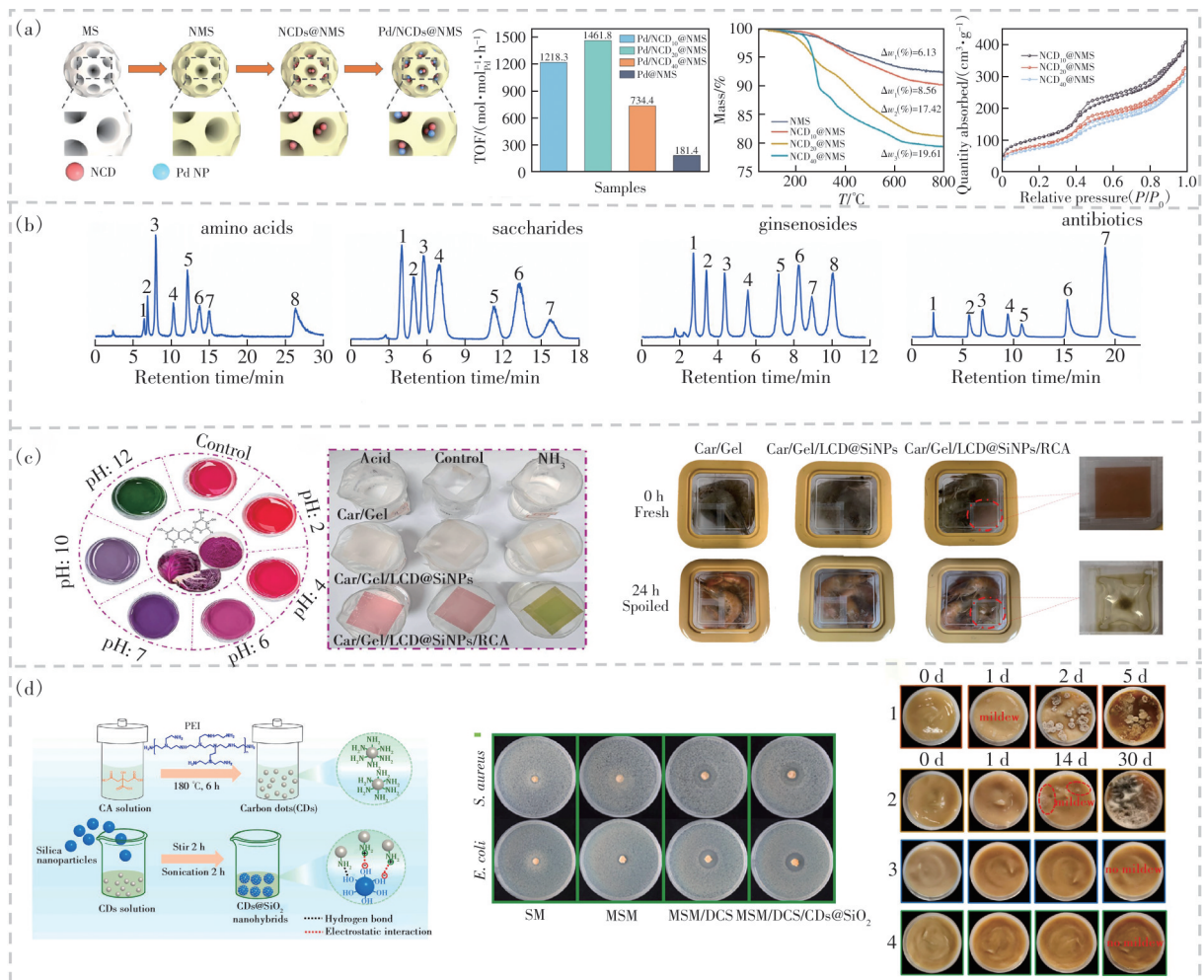


图7 催化及其他应用。(a) Pd/NCDs@NMS制备示意图、TOF(周转频率)值、TGA(热重分析)曲线、 $N_2$ 吸附-解吸等温曲线<sup>[7]</sup>;(b)氨基酸、糖类、人参皂苷及抗生素在硅胶-葡糖-非离子交换剂(Sil-Glc-NCDs)上的分离实验<sup>[61]</sup>;(c) Car/Gel/LCDs@SiNPs/RCA薄膜基指示剂薄膜在酸性和氨蒸气暴露下的变色现象,使用指示膜评估虾的新鲜度<sup>[63]</sup>;(d) MSM/DCS/CDs@SiO<sub>2</sub>粘合剂制备过程及其防霉性能研究<sup>[64]</sup>

Fig.7 Catalysis and other applications. (a) The preparation schematic, TOF (turnover frequency) values, TGA (thermogravimetric analysis) curves, and  $N_2$  adsorption-desorption isotherms of Pd/NCDs@NMS<sup>[7]</sup>. (b) The separation experiments of amino acids, saccharides, ginsenosides and antibiotics on Sil-Glc-NCDs (silica-glucose-nonionic exchanger)<sup>[61]</sup>. (c) The discoloration phenomenon of Car/Gel/LCDs@SiNPs/RCA film-based indicator films under exposure to acid and ammonia vapor, as well as the evaluation of shrimp freshness using the indicator films<sup>[63]</sup>. (d) The preparation process of MSM/DCS/CDs@SiO<sub>2</sub> adhesive and its mildew resistance study<sup>[64]</sup>

效分离。Bagri等<sup>[63]</sup>将从稻草中提取的SiO<sub>2</sub>纳米颗粒(SiNPs)负载的甘草根衍生CDs(LCDs)杂化纳米颗粒整合到卡拉胶/明胶(Car/Gel)聚合物共混基质中,并添加从红甘蓝中提取的花青素,设计了用于监测虾鲜度和延长保质期的智能活性包装膜,如图7(c)所示。Chen等<sup>[64]</sup>将氨基修饰的CDs功能化SiO<sub>2</sub>纳米颗粒(CDs@SiO<sub>2</sub>)和二醛壳聚糖(DCS)掺入大豆粕(SM)基质中,制备出一种有良好防霉性能的MSM/DCS/CDs@SiO<sub>2</sub>多功能有机-无机杂化粘合剂。因此,CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料在多

相催化、智能包装及先进材料等领域也展现出其独特的交叉学科价值。

## 5 结论与展望

在过去十年中,CDs/SiO<sub>2</sub>复合材料在结构设计、性能优化及应用开发方面均取得了显著进展。通过将CDs封装在SiO<sub>2</sub>基质中,可有效克服其固有的ACQ效应和稳定性不足问题,同时引发高效RTP等新的光学现象,为传感、精准生物诊疗、光电器件乃至信息加密等领域开辟了广阔的应用空间。

该领域研究虽然取得了一些进展,但也存在不少挑战。首先,当前多采用原位生成法或分步复合法合成,材料结构的精准调控不足。未来需要发展更精细的合成方法,并结合先进表征与理论计算,明确结构-性能关系。其次,对 CDs/SiO<sub>2</sub> 材料的 RTP 机制还缺乏深入研究,对于高量子产率、长寿命及近红外发射的 CDs/SiO<sub>2</sub>RTP 材料的合成也仍有待突破。再次,这类材料的生物安全评估也需要更多的实证,虽有研究证明其短期安全性,但在体内的长期稳定性、降解及慢性毒性方

面数据不足,应在细胞与动物模型中开展系统评估。总之,未来 CDs/SiO<sub>2</sub> 复合材料的研究将更加聚焦于精准结构合成、机理深化与性能突破。随着基础机理的厘清与制备技术的完善,其多功能特性有望在传感、生物成像、能源光电及防伪等更多实际场景中实现应用价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260043>

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 张思凡,梁亚川,刘凯凯,等. 水相室温磷光碳点进展 [J]. 发光学报, 2025, 46(2): 260-272.  
ZHANG S F, LIANG Y C, LIU K K, *et al.* Progress in water-soluble room-temperature phosphorescent carbon dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 260-272. (in Chinese)
- [ 2 ] SUN Y Q, ZHANG Y P, WEI A Q, *et al.* Mixed systems of quaternary ammonium foam drainage agent with carbon quantum dots and silica nanoparticles for improved gas field performance [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(19): 1590.
- [ 3 ] KANG C Y, LI Y Y, WANG X R, *et al.* Gold nanoclusters and amino-modified mesoporous silica-encapsulated carbon dot fluorescence nanosensors combined with LightGBM algorithm for ultra-fast detection of Co<sup>2+</sup> [J]. *Microchem. J.*, 2024, 206: 111610.
- [ 4 ] MOHAMMADINEJAD A, ABNOUS K, ALINEZHAD NAMEGHI M, *et al.* Application of green-synthesized carbon dots for imaging of cancerous cell lines and detection of anthraquinone drugs using silica-coated CdTe quantum dots-based ratiometric fluorescence sensor [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2023, 288: 122200.
- [ 5 ] 郑敏,刘坤梅,苏雅. 碳点在生物医学领域中的应用 [J]. 发光学报, 2021, 42(8): 1233-1244.  
ZHENG M, LIU K M, SU Y. Carbon dots for biomedical applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(8): 1233-1244. (in Chinese)
- [ 6 ] LIU M L, LI T T, ZHANG C, *et al.* Fluorescent carbon dots embedded in mesoporous silica nanospheres: a simple platform for Cr(VI) detection in environmental water [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2021, 415: 125699.
- [ 7 ] LIU W R, ZHU Y B, WANG J W, *et al.* Pd/N-doped carbon dots@dendritic mesoporous silica nanospheres: a highly efficient catalyst for the hydrogenation of 4-nitrophenol [J]. *Nano Res.*, 2024, 17(9): 7967-7974.
- [ 8 ] 禹珍珍,任正,李琮,等. 碳点基电致发光器件研究进展 [J]. 发光学报, 2024, 45(8) 1247-1265.  
YU Z Z, REN Z, LI Z, *et al.* Research progress of CDs-based electroluminescent devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(8): 1247-1265. (in Chinese)
- [ 9 ] ZHANG X G, SUN Z S, ZHU Z P, *et al.* High-efficient, spherical and thermal-stable carbon dots@silica fluorescent composite as rare earth-free phosphors for white LED [J]. *Ceram. Int.*, 2020, 46(10): 14706-14712.
- [ 10 ] ZHANG Q Q, LI X L, PENG L C, *et al.* Porous silica nanoparticles capped with polyethylenimine/green carbon dots for pH/redox responsive drug release [J]. *Inorg. Chem. Commun.*, 2021, 123: 108340
- [ 11 ] KWAK B E, YOO H J, KIM D H. Encapsulation of carbon dots in silica matrices offers narrow emission in the solid-state of printed fluorescent inks [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2021, 4(9): 9497-9507.
- [ 12 ] JO J H, HEO H S, LEE K. Assessing stability of nanocomposites containing quantum dot/silica hybrid particles with different morphologies at high temperature and humidity [J]. *Chem. Mater.*, 2020, 32(24): 10538-10544.
- [ 13 ] CAI S T, CHEN X, WANG S L, *et al.* Silica coating of quantum dots and their applications in optoelectronic fields [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2025, 36(6): 110798.
- [ 14 ] ORNELAS-HERNÁNDEZ L F, GARDUNO-ROBLES A, ZEPEDA-MORENO A. A brief review of carbon dots-silica nanoparticles synthesis and their potential use as biosensing and theragnostic applications [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2022, 17(1): 56.

- [ 15 ] LUO Y M, JIANG Q, LIU J K, *et al.* Mesoporous collapsing encapsulated carbon dots: direct evidence for the effect of multiple-confined interactions of silica on efficient long-lived phosphorescence [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 486: 150436.
- [ 16 ] CHAO T Y, WANG J J, DONG X Z, *et al.* Defects and structural limitation-induced carbon dots-silica hybrid materials with ultralong room temperature phosphorescence [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2022, 13(41): 9558-9563.
- [ 17 ] HAO C X, BAI Y F, ZHAO L, *et al.* Durable room-temperature phosphorescence of nitrogen-doped carbon dots-silica composites for Fe<sup>3+</sup> detection and anti-counterfeiting [J]. *Dyes Pigm.*, 2022, 198: 109955.
- [ 18 ] BAGRI F, PIRCHERAGHI G, RIAHI Z, *et al.* Multifunctional gelatin/polyvinyl alcohol composite films integrated with sulfur quantum dots and silica nanohybrid for active packaging of fruits [J]. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2025, 13(5): 118289.
- [ 19 ] SHIRANI M P, ENSAFI A A, REZAEI B, *et al.* Folic acid and carbon dots-capped mesoporous silica for pH-responsive targeted drug delivery and bioimaging [J]. *J. Iran. Chem. Soc.*, 2023, 20(9): 2257-2268.
- [ 20 ] KAJANI A A, MEHRGARDI M A. Fluorescence resonance energy transfer monitoring of pH-responsive doxorubicin release from carbon dots/aptamer functionalized magnetic mesoporous silica [J]. *Nanomedicine*, 2021, 16(8): 627-639.
- [ 21 ] HU J X, DING S N. *In situ* synthesis of highly fluorescent, phosphorus-doping carbon-dot-functionalized, dendritic silica nanoparticles applied for multi-component lateral flow immunoassay [J]. *Sensors*, 2023, 24(1): 19.
- [ 22 ] SUPIANTO M, LEE S H, JHUNG S H, *et al.* Fluorescent paper strip immunoassay with carbon nanodots@silica for determination of human serum amyloid A1 [J]. *Microchim. Acta*, 2021, 188(11): 386.
- [ 23 ] MO L Q, XU X K, LIU Z M, *et al.* Visible-light excitable thermally activated delayed fluorescence in aqueous solution from F, N-doped carbon dots confined in silica nanoparticles [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 426: 130728.
- [ 24 ] LIU G L, CHEN Z, JIANG X Y, *et al.* *In-situ* hydrothermal synthesis of molecularly imprinted polymers coated carbon dots for fluorescent detection of bisphenol A [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2016, 228: 302-307.
- [ 25 ] ZHANG H H, WU C D. Creation and stabilization of carbon dots in silica-confined compartments with high thermal stability [J]. *Chem. Commun.*, 2023, 59(12): 1665-1668.
- [ 26 ] TANG G Q, ZHANG K, FENG T L, *et al.* One-step preparation of silica microspheres with super-stable ultralong room temperature phosphorescence [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(28): 8680-8687.
- [ 27 ] QU J, ZHOU W X, ZHANG W, *et al.* Tunable time-dependent phosphorescent colors and evolution direction of solvent-free grown carbon dots within hollow mesoporous silica for dynamic information encryption [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 524: 169198.
- [ 28 ] ZHANG H Y, LI Q Y, WANG S, *et al.* Confining carbon dots in amino-functionalized mesoporous silica: n→π\* interaction triggered deep-red solid-state fluorescence [J]. *Nano Res.*, 2023, 16(3): 4170-4177.
- [ 29 ] WU C X, HE J H. Encapsulation of carbon dots in fluorine-containing silica nanoparticles towards UV-to-blue, superhydrophobic, and self-cleaning agricultural coatings [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2026, 715: 164427.
- [ 30 ] TAYAMA M, INOSE T, YAMAUCHI N, *et al.* Fabrication of gold-immobilized quantum dots/silica core-shell nanoparticles and their multimodal imaging properties [J]. *Part. Sci. Technol.*, 2022, 40(2): 252-260.
- [ 31 ] LIAO Z X, WANG Y H, LU Y, *et al.* Covalently hybridized carbon dots@mesoporous silica nanobeads as a robust and versatile phosphorescent probe for time-resolved biosensing and bioimaging [J]. *Analyst*, 2024, 149(5): 1473-1480.
- [ 32 ] CUI Y X, SU A X, FENG J Y, *et al.* Development of silica molecularly imprinted polymer on carbon dots as a fluorescence probe for selective and sensitive determination of cetirizine in saliva and urine [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2022, 264: 120293.
- [ 33 ] CHAI P J, GENG X H, ZHU R R, *et al.* Fabrication and application of molecularly imprinted polymer doped carbon dots coated silica stationary phase [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2023, 1275: 341611.
- [ 34 ] SUN X Y, HE W, LIU B. Water-soluble long afterglow carbon dots/silica composites for dual-channel detection of alkaline phosphatase and multi-level information anti-counterfeiting [J]. *Anal. Methods*, 2022, 14(47): 5001-5011.
- [ 35 ] MIAO X R, LIU J M, LI H C, *et al.* Facile fabrication of fluorescent composite sensor based on carbon dots/ mesoporous silica nanospheres for sensitive detection of Hg(II) in cells [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 2024, 148: 111434.
- [ 36 ] HUANG M Y, LI R X, ZHOU P, DUAN C. Carbon dots@silica-based dual-emission ratiometric fluorescent sensor for highly selective detection of Cu<sup>2+</sup> and thiram [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2025, 468: 116498.
- [ 37 ] GUO S T, LIANG L L, GUO Q Z, *et al.* Incorporating silicon-doped carbon dots into europium chelated silica microspheres

- for the ratiometric fluorescent and colorimetric detection of  $\text{Fe}^{3+}$  ions [J]. *Microchem. J.*, 2025, 218: 115194.
- [ 38 ] CHEN L, ZHAO S B, WANG Y, *et al.* Long-lived room-temperature phosphorescent complex of B, N, P co-doped carbon dots and silica for afterglow imaging [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2023, 390: 133946.
- [ 39 ] TANG G Q, WANG C C, ZHANG K, *et al.* Deep-blue room-temperature phosphorescent carbon dots/silica microparticles from a single raw material [J]. *Langmuir*, 2021, 37(45): 13187-13193.
- [ 40 ] LIU M X, LIU W Y, WANG H Y, *et al.* Single-atom copper-activated carbon dots@silica nanozymes with neutral-pH peroxidase-like activity and room-temperature phosphorescence for dual-mode glyphosate detection [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(25): 4812-4815.
- [ 41 ] KIPNUSU W K, DOÑATE-BUENDÍA C, FERNÁNDEZ-ALONSO M, *et al.* Nonlinear optics to glucose sensing: multifunctional nitrogen and boron doped carbon dots with solid-state fluorescence in nanoporous silica films [J]. *Part. Part. Syst. Charact.*, 2020, 37(6): 2000093.
- [ 42 ] BAO X, LIU Z X, TIAN Z, *et al.* Ultra-stable and long-lived multi-color room temperature phosphorescent carbon dot and silica composites for data encryption and anti-counterfeiting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 267: 120408.
- [ 43 ] PAUL T, PALAKULAM J J, UNNIKRIISHNAN N V, *et al.* Warm to cool tunable ultra-stable white light emissions from carbon dots - $\text{Tb}^{3+}$  -  $\text{Eu}^{3+}$  doped silica [J]. *Opt. Mater.*, 2023, 138: 113673.
- [ 44 ] CHEN J Y, TAN J Q, LIANG P, *et al.* Dynamic room temperature phosphorescence of silane-functionalized carbon dots confining within silica for anti-counterfeiting applications [J]. *Small*, 2024, 20(16): 2306323.
- [ 45 ] LIU M X, CHEN X B, LIU W Y, *et al.* Phosphorescence approach based on silica protected carbon dots for autofluorescence interference-free and highly selective detection of fluoride [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2024, 1287: 342102.
- [ 46 ] CHANSUD N, BUNKOED O. A magnetic molecularly imprinted polymer enhanced by incorporating nitrogen-doped graphene quantum dots and mesoporous silica for the selective extraction of triazine herbicides [J]. *Talanta*, 2026, 297: 128748.
- [ 47 ] WU H B, YANG L, SUN W, *et al.* Facile preparation of mesoporous silica coated nitrogen doped carbon dots for sensitive detection of picric acid [J]. *RSC Adv.*, 2022, 12(52): 33696-33705.
- [ 48 ] AMIRI A, FARIDBOD F, ZOUGHI S. An optical nanosensor fabricated by carbon dots embedded in silica molecularly imprinted polymer for sensitive detection of ceftazidime antibiotic [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2021, 408: 113111.
- [ 49 ] LI X Y, LIANG W Q, GAO Y W, *et al.* Employing phosphorescent carbon dots@silica for glutathione sensing with low background interference [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2024, 410: 135680.
- [ 50 ] ZHAO T T, ZHU C, XU S, *et al.* Fluorescent color analysis of ascorbic acid by ratiometric fluorescent paper utilizing hybrid carbon dots-silica coated quantum dots [J]. *Dyes Pigm.*, 2021, 186: 108995.
- [ 51 ] WANG Z X, DING S N. Duplex-immunoassay of ovarian cancer biomarker CA125 and HE4 based carbon dot decorated dendritic mesoporous silica nanoparticles [J]. *Analyst*, 2023, 148(3): 683-689.
- [ 52 ] SHAAT H, SHARAFELDIN M, MOSTAFA A, *et al.* Microfluidic-based fluorescence enhancement of silica-embedded carbon dots for direct detection and quantification of unamplified HCV RNA in clinical samples [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2025, 1333: 343396.
- [ 53 ] SUN S, ZHAO S, JIANG K, *et al.* A facile approach to carbon dots-mesoporous silica nanohybrids and their applications for multicolor and two-photon imaging guided chemo-/photothermal synergistic oncotherapy [J]. *ChemNanoMat*, 2020, 6(6): 953-962.
- [ 54 ] STEPANOV A, FEDORENKO S, KHOLIN K, *et al.* Silica-based nanoarchitecture for an optimal combination of photothermal and chemodynamic therapy functions of  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  cores with red emitting carbon dots [J]. *Front. Chem. Sci. Eng.*, 2023, 17(12): 2144-2155.
- [ 55 ] LIU M Y, ZHANG H, BAO Y J, *et al.* Immunogenic cell death induction and oxygenation by multifunctional hollow silica/copper-doped carbon dots [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(15): 18534-18550.
- [ 56 ] CHU X H, LIU Y H, ZHANG P, *et al.* Silica-supported near-infrared carbon dots and bicarbonate nanoplatfor for triple synergistic sterilization and wound healing promotion therapy [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2022, 608(Pt 2): 1308-1322.
- [ 57 ] IWABAYASHI H, OKADA K, FUKATSU A, *et al.* Carbon dot-doped silica xerogel phosphors excited by blue LEDs and

- LDs for the brilliant white lighting of endoscope tips [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2025, 12(11): 2401015.
- [ 58 ] ZHU J K, ZHAO H M, YANG Y H, *et al.* Photo-stimulus-responsive dual-emitting fluorescence of spiropyran-encapsulated carbon dots-functionalized silicon dioxide for dynamic information encryption [J]. *Sci. China Mater.*, 2024, 67(2): 680-689.
- [ 59 ] WANG Q H, JI Y Y, HU J Z, *et al.* Accelerated catalytic ozonation for aqueous nitrobenzene degradation over Ce-loaded silicas: active sites and pathways [J]. *Front. Environ. Sci.*, 2022, 10: 1040276.
- [ 60 ] BO C M, QUAN X Y, LI Y, *et al.* Polyvinylcaprolactam functional carbon dots on silica as green stationary phase for per aqueous liquid chromatography [J]. *Sep. Sci. Plus*, 2025, 8(9): e70121.
- [ 61 ] YUAN N, CHEN J, ZHOU H, *et al.* Nitrogen-doping to enhance the separation selectivity of glucose-based carbon dots-modified silica stationary phase for hydrophilic interaction chromatography [J]. *Talanta*, 2020, 218: 121140.
- [ 62 ] CAI T P, SUN X Y, CHEN J, *et al.* Tetraethylenepentamine-derived carbon dots and tetraethylenepentamine co-immobilized silica stationary phase for hydrophilic interaction chromatography [J]. *J. Chromatogr. A*, 2023, 1707: 464325.
- [ 63 ] BAGRI F, PIRCHERAGHI G, RIAHI Z, *et al.* Multifunctional carrageenan/gelatin nanocomposite film incorporating carbon dot-silica nanohybrid and anthocyanins from red cabbage for intelligent shrimp packaging [J]. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2025, 321(Pt 2): 146311.
- [ 64 ] CHEN S Q, LI X Y, BAI M Y, *et al.* Oyster-inspired carbon dots-functionalized silica and dialdehyde chitosan to fabricate a soy protein adhesive with high strength, mildew resistance, and long-term water resistance [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2023, 319: 121093.



覃锦兰(1988-),女,广西平南人,硕士,讲师,2014年于暨南大学获得硕士学位,主要从事碳点合成与发光性能研究。

E-mail: qinjinlan072@163.com



胡超凡(1984-),男,湖南桂东人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于暨南大学获得博士学位,主要从事碳基发光材料的制备与应用研究。

E-mail: thucf@scau.edu.cn