高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
综合评述

固态发光碳点的发光机理、合成与应用研究进展

潘卓涵，艾　琳，卢思宇
（郑州大学化学学院平原实验室，郑州 450001）

摘要　碳点(CDs)作为一种光学性能优异的零维碳纳米材料，在光电器件及生物成像等领域得到了广泛的应用. 然而，固态CDs由于聚集造成的共振能量转移和π-π堆积会导致固态发光猝灭，极大阻碍了其在荧光粉或固态照明等方面的应用. 因此，研究人员探索了多种获得固态发光CDs的方式. 本文综合评述了CDs固态发光的机理和现阶段常用的合成策略，介绍了固态发光CDs最新的应用领域，最后指出了制备固态发光CDs面临的困难和挑战.

关键词　碳点；固态发光；荧光；余辉
中图分类号　O632　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20250081

Research Progress on the Mechanism, Synthesis and Application of Solid-state Luminescent Carbon Dots

PAN Zhuohan, AI Lin*, LU Siyu*
(*Pingyuan Laboratory*, *College of Chemistry*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract　As a 0-dimensional carbon nanomaterial with excellent optical properties, carbon dots (CDs) has been widely used in optoelectronic devices, biological imaging and other fields. However, due to the resonance energy transfer and π-π accumulation caused by the aggregation of solid CDs, the solid emission quenching has greatly hindered its application as phosphors. So the researchers explored a variety of ways to obtain solid-state luminescent CDs. In this paper, the mechanism, classification and research progress of solid-state luminescence CDs are reviewed, and the latest application fields of solid-state luminescence CDs are introduced. Finally, the difficulties and future challenges in the preparation of solid-state luminescent CDs are presented.

Keywords　Carbon dots; Solid state luminescence; Fluorescence; Afterglow

碳点(CDs)是一种尺寸小于10 nm的零维(0 D)碳纳米材料，自2004年被首次发现以来[1]，经过二十余年的发展，CDs由于具有优越的光电性能、良好的生物相容性及较低的毒性，且合成策略简单，在发光二极管(LED)照明、生物成像、太阳能聚光器和激光等方面得到了广泛的应用[2~5].

CDs的合成方法主要分为“自上而下(top-down)”法和“自下而上(bottom-up)”法两类[6]. “自上而下”法通常是通过电弧放电、激光刻蚀及电化学处理氧化石墨烯(GO)、石墨烯纳米片及碳纳米管(CNTs)

收稿日期：2025-03-31. 网络首发日期：2025-04-16.
联系人简介：卢思宇，男，博士，教授，主要从事碳点功能材料方面的研究. E-mail：sylu2013@zzu.edu.cn
艾　琳，女，博士，副教授，主要从事碳化聚合物点的表面修饰与二维组装方面的研究. E-mail：chaofenzi2015@163.com
基金项目：河南省优秀青年科学基金(批准号：252300421167)、河南省科技计划联合基金优势学科培育联合基金培育项目(批准号：242301420045)、国家自然科学基金青年基金(批准号：52103239)及国家自然科学基金(批准号：U24A2079)资助.
Supported by the Natural Science Foundation of Henan Province, China(No. 25300421167), the Science and Technology Plan Joint Fund of Henan Province, China(No. 242301420045), the National Natural Science Foundation of China Youth Fund(No. 52103239) and the National Natural Science Foundation of China(No.U24A2079).

等大型石墨烯结构获得CDs[7,8]，存在成本较高、荧光光致发光量子产率(PLQY)和产率较低等问题. “自下而上”法通常利用有机分子前体经碳化交联得到短聚合物链，短聚合物链进一步交联聚合生成更长的聚合物链，随着反应温度的升高和反应时间的延长，碳化程度增加，聚合物结构减少，碳核结构出现[9~11]. “自下而上”法合成的CDs表面有更多的官能团，因此具有发光性能可调控及发光性能优越的优点.

根据碳核和聚合物外壳的不同，CDs通常被分类为石墨烯量子点(GQDs)[12]、碳纳米点(CNDs)、碳量子点(CQDs)[13]和碳化聚合物点(CPDs). GQDs一般具有π共轭盘状结构，本质上是单层或几层纳米级粒径的石墨烯，通常由大的石墨烯结构切割而成；CNDs被定义为缺乏量子约束的准球形纳米颗粒；CQDs被定义为以sp^2碳和sp^3碳为碳核的准球形碳纳米颗粒，壳层由小官能团和聚合物链组成；CPDs的碳核由高度交联的刚性聚合物网络组成，高度碳化的CPDs的碳核含有共轭结构域，壳层由丰富的聚合物链、官能团和分散的组分组成，这些组分通常来自未完全碳化的前体.

目前的研究较多地集中在如何提升CDs溶液态的PLQY、诱导CDs在近红外区域的发光[14]及合成具有窄半峰宽[15]的CDs等方面. 作为一种具有优越发光性能的新兴材料，CDs在高浓度溶液或固态下表现出聚集诱导猝灭效应(ACQ)，这极大限制了CDs在固态照明等领域的应用. 现阶段用于合成固态发光CDs的基本思路大多是基于如何将CDs的发光中心分散开，避免由于发光中心的π-π堆叠或福斯特共振能量转移(FRET)导致的猝灭现象. 但目前如何合成性能可调控的固态发光CDs仍然面临困难，因此关于CDs固态发光的研究仍有较大发展空间. 本文从3个方面详细评述了CDs的固态发光机理研究进展，总结了固态发光CDs在防伪与信息加密、光电器件及生物成像治疗等方面的应用.

1 固态发光CDs的发光机理

1.1 碳核态发光

来自碳核共轭域的发光是CDs的本征发光，而共轭域的尺寸与发光带隙密切相关，通过增加碳核共轭域的尺寸，可以有效缩小其发光带隙. 2022年，Ding等[16]采用微波法一步合成了蓝、绿、绿黄、黄和红等5种光色的固态发光CDs. 仅通过调节反应中对苯二胺(*p*-PDA)的用量，就可以调控CDs的粒径和石墨氮含量，从而触发荧光发射波长从438 nm红移到633 nm，覆盖整个可见光谱(图1).

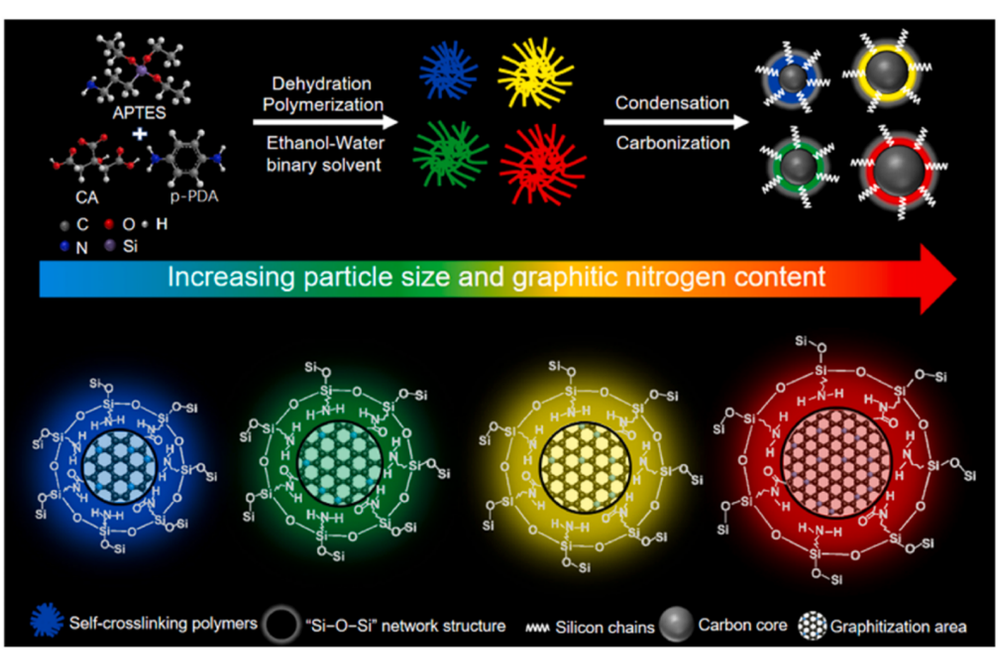


Fig. 1 Mechanism diagram of multicolor solid-state luminescent CDs[16]

Copyright 2023, Elsevier.

1.2 表面态发光

由于CDs表面含有羟基、羧基及氨基等丰富的官能团，可以在CDs表面形成缺陷态作为发光中心．这些缺陷态可以捕获电子-空穴对并辐射复合发光．由CDs表面官能团的电子跃迁主导的发光称为表面态发光[17,18]．表面态发光分为表面构型与杂原子掺杂两种类型．表面态发光可以通过改变表面官能团的种类进而影响CDs的发光效果．Lu等[19]对邻苯二胺CDs进行表面修饰，通过调节配体上氯原子的位置影响CDs的共面性和共轭度，从而改变其分子轨道能级[图2(A)]．Ding等[20]利用一步水热法合成了硫掺杂的CDs，未掺杂硫的CDs的发射波长为482 nm，硫掺杂CDs的发射波长为539 nm．这是由于硫的低电负性使其可以作为电子供体[图2(B)]．CDs的表面状态对其发光性能起着重要作用．不同的表面官能团是在合成过程中自然形成的，与各种分子前体有关，通常难以控制．可以利用电化学方法中阴极和阳极的氧化还原反应来构建差异化的表面态，在不将原子引入碳核的条件下实现CDs上特定的官能团调节．2023年，Zhang等[21]采用电化学方法增强CDs的表面—NH_2和C—S键修饰．原始CDs的PLQY仅为0.49%．在用氮和硫相关的表面基团进行表面功能化后，功能化的CDs表现出亮绿色荧光，PLQY可以提高到12.99%．此外，CDs的发射波长随着氨基的增加而红移，PLQY随C—S键含量的增加而增大[图2(C)]．除了采用空间位阻隔绝，引入适当的杂原子或具有弱电子耦合作用的官能团也会产生固态发光．

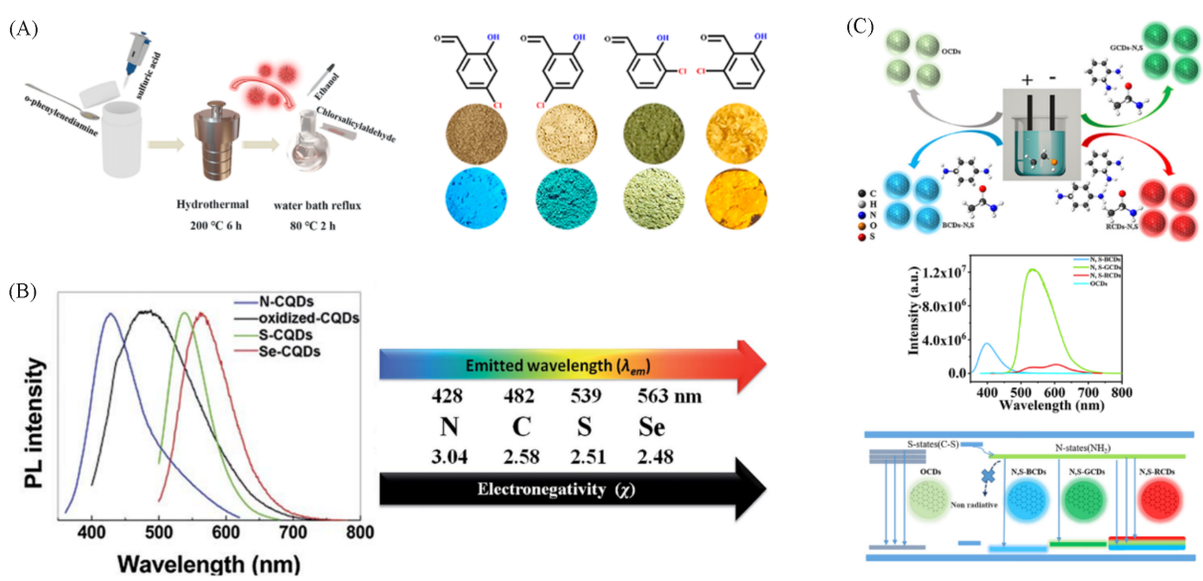


Fig. 2 Surface functional groups of CDs(A)[19], element doping of CDs(B)[20] and electrochemical methods to regulate PL for the functionalization of the surface of CDs(C)[21]

(A) Copyright 2023, American Chemical Society; (B) Copyright 2014, the Royal Society of Chemistry; (C) Copyright 2023, the Royal Society of Chemistry.

1.3 分子态发光

分子荧光团骨架通过共价键连接于CDs表面或核心会发出荧光[22,23]．2024年，Yang等[24]通过调节柠檬酸(CA)和聚乙烯亚胺(PEI)的比例，采用一步水热法合成了具有蓝、绿、黄和橙等4种光色的固态发光CDs，固态绝对PLQY分别为45%，16%，17%和12%．核磁共振波谱测试结果表明，CDs的光致发光中心是5-氧代-1,2,3,5-四氢咪唑-[1,2-α]-吡啶-7-羧酸(IPCA)衍生物，通过调整反应条件改变IPCA在CDs上的形成与分布，实现了固态发光的可调控性[图3(A)]．2023年，Tan等[25]以强氧化剂高碘酸钾(KIO_4)为催化剂，在室温条件下使邻苯二胺和4-二甲氨基苯酚在水溶液中进行5 min的环化反应．生成的有机分子2-(二甲氨基)吩嗪会进行动力学自组装生成超分子结构CDs，超分子结构J聚集体使CDs具有强烈的固态荧光(SSF)[图3(B)]．

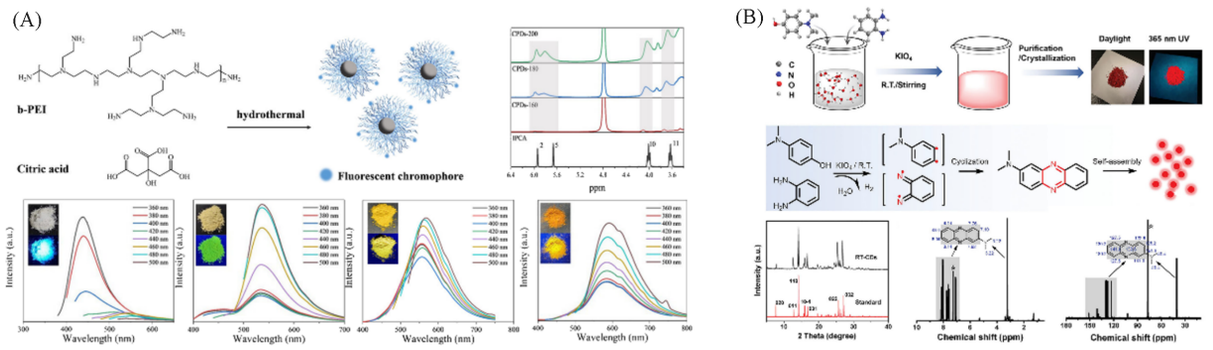


Fig. 3　Molecular state emission of IPCA(A)[24] and 2-(dimethylamino) phenazine(B)[25]

(A) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.; (B) Copyright 2023, John Wiley & Sons, Inc.

1.4　交联增强发光

交联增强发光(CEE)的本质是交联产生的固定效应，通过抑制发光中心的振动和旋转来增强发光[26]. 2022年，Yang等[27]通过调节共聚物中甲基的含量影响CDs的交联度，进而影响了CDs的PL特性[图4(A)]. 2022年，Lu等[28]选择聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(PAM)和正硅酸四乙酯(TEOS)作为基体来定制CDs的室温磷光(RTP)特性[图4(B)]. 3种不同的基质具有不同的官能团和侧链，从而产生不同的交联结构和固定功能. PVA中含有的大量羟基不仅可以与CDs表面的羧基反应形成共价交联结构，还可以通过非共价氢键限制分子振动与转动；PAM具有的酰胺基团同样可以与CDs发生化学交联，但缺少氢键的作用，交联效果低于PVA；TEOS水解产生的硅醇和二氧化硅(SiO_2)与CDs相互作用力较弱，因此CDs@TEOS的RTP增强效果远不如CDs@PVA和CDs@PAM.

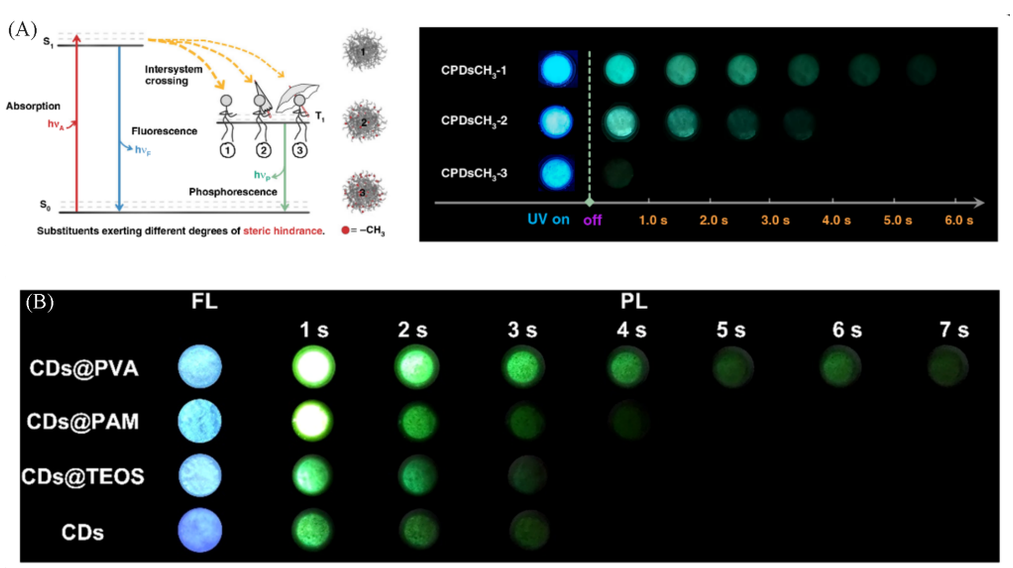


Fig. 4　Controlling the degree of crosslinking by the molecular structure of the precursor(A)[27] and the coating matrix(B)[28]

(A) Copyright 2022, Springer Nature; (B) Copyright 2022, John Wiley & Sons, Inc.

1.5　聚集诱导发光

2001年，Tang等[29]首次提出聚集诱导发光(AIE). CDs的聚集诱导发光是指CDs在低浓度下表现出微弱的荧光，然而在高浓度聚集状态下表现出荧光增强的现象. 这一现象归因于分子聚集产生的空间位阻限制了分子的振动与转动，导致能量的耗散主要以辐射跃迁的方式发生[30~32]. 在CDs聚集诱导发光的相关文献中，AIE效应通常由以下几种方式证明. 首先是通过不同比例良/不良溶剂混合物的荧光强度证明，随着不良溶剂的增加，CDs逐渐呈现出聚集状态，且荧光强度增强. 其次是以不同比例的甘油和水的混合物作为溶剂，随着甘油比例的增加，CDs呈现出荧光增强趋势. 此外，还可以利用不同

浓度的CDs溶液，倘若随着CDs浓度的升高，荧光强度表现出聚集增强的趋势，则说明其是AIE发光．现阶段合成具有AIE效应的CDs最常用的前体是二硫代水杨酸（DTSA）及其衍生物[33~37]，自2019年Yang等[38]首次利用DTSA合成AIE CDs[图5(A)]以来，由DTSA与胺类前体通过一步法合成具有AIE发光的抗自猝灭CDs的工作被大量报道．在这一反应中，通常用改变前体比例控制CDs中氮含量和控制sp^2结构域来获得多色固态发光CDs．此类CDs通常呈现出双峰发射，短波长蓝光区域的发射可能来自于碳核，红黄发射则来自于表面官能团．在低浓度状态下该类CDs基本呈现出溶液态的蓝色荧光，这可能是因为，在溶液中CDs表面官能团有较多的振动与转动非辐射耗散，所以在低浓度状态下呈现出蓝色的碳核态发光．Hu等[39]利用苯三甲酸和无水哌嗪采用一步微波法合成了具有高亮黄色固态发光的AIE CDs，固态荧光的PLQY为58.35%[图5(B)]．Ding等[40]利用邻苯二胺（oPD）与均苯四甲酸二酐（PMDA）通过一步微波法获得了AIE发光的全色千克级CDs，最高PLQY可达到55.3%[图5(C)]．发光红移是由于芳环数量增多引起的带隙减小导致的，AIE现象归因于表面羧基运动的抑制和非辐射速率的降低．现阶段常被用来合成AIE型CDs的前体以DTSA和苯羧酸、苯酚、苯胺类分子居多，但同样存在着发光相对较多地集中在短波长区域，长波长PLQY较低的问题．

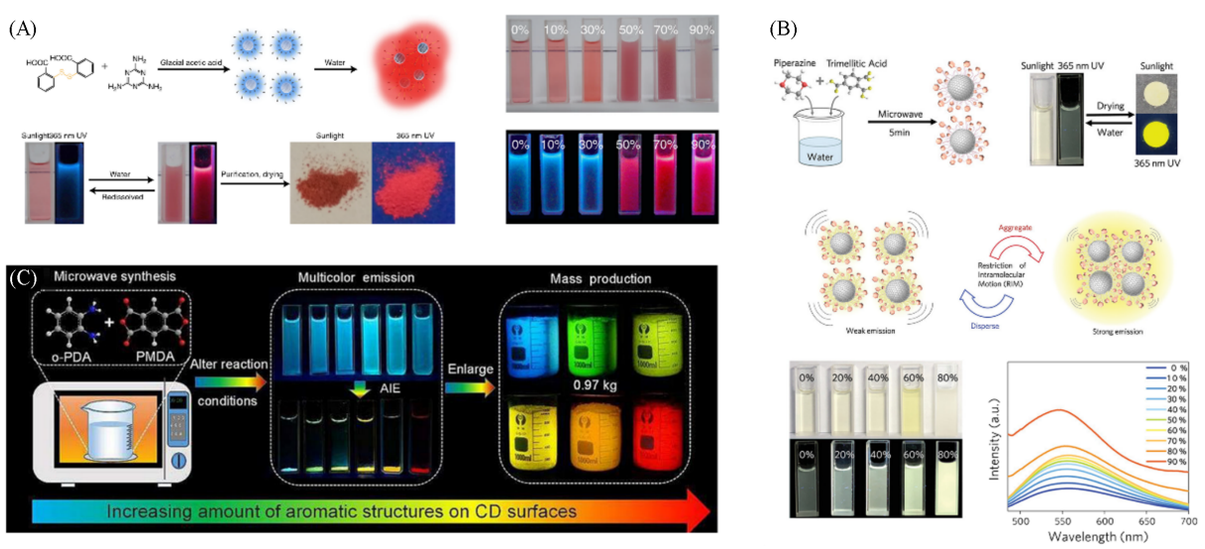


Fig. 5　Synthesis of AIE CDs using DTSA(A)[38], piperazine and trimellitic acid(B)[39], oPD and PMDA(C)[40] as diverse precursors

(A) Copyright 2019, Springer Nature; (B) Copyright 2023, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2023, Elsevier.

2　固态发光CDs的合成策略

CDs发光不仅包括荧光，还包括RTP和热激活延迟荧光（TADF），不同的发光行为与辐射跃迁过程中各种不同电子自旋态和路径相关．电子吸收外部能量从单线态基态（S_0）跃迁至单线态激发态（S_n），荧光是指当电子从单重态第一激发态（S_1）跃迁回到S_0时，多余的能量以荧光的形式发射出来，这一过程是在纳秒内发生的，涉及过程相对简单．RTP是单重态和三重态之间的光过程，激子从S_1系间窜跃（ISC）到三重态第一激发态（T_1），然后再回到S_0，多余的能量以RTP的形式释放，通常持续几微秒到几秒．此外，当T_1和S_1能级接近且T_1-S_1能级差（ΔE_{ST}）小于0.3 eV时[41]，会出现反系间窜跃（RISC）现象．由于自旋禁止的T_1-S_0跃迁，T_1态电子重新回到S_1态，最终回落到S_0态，表现出寿命在数百纳秒至数十毫秒范围内的TADF发射．RISC过程属于吸热过程，因此温度升高可以促进RISC的发生，该现象在视觉上表现出余辉发射，因此称之为TADF.

2.1　SSF CDs的合成策略

目前报道的大多数CDs均具有ACQ效应，即CDs在固态下的荧光严重减弱或猝灭的现象．CDs内

部发色团多为类平面芳环结构，在聚集状态下，强烈的π-π相互作用使得能级分裂成多个近乎连续的能带，因此能量很容易被非辐射运动消耗，从而导致荧光猝灭．这一问题严重限制了固态CDs在光电器件等方面的应用，因此如何开发具有SSF的CDs就格外重要．

目前有两种主要的方法来获得固态发射CDs．第一种方法是采用基质将合成的CDs进行包覆，避免CDs之间由于π-π堆积与FRET造成SSF猝灭现象．但这一策略同样存在着浓度诱导的聚集猝灭，因此第二种策略就是通过核壳调控合成抗自猝灭的CDs，碳核的共轭程度可以调节CDs的光色，表面生成的聚合物链可以将CDs的发光中心间隔开来．

2.1.1　基质包覆　避免ACQ的常用方法是将CDs分散到固态基质中．现阶段经常被用来实现CDs固态发光的基质通常分为有机、无机两大类，有机类基质通常包含聚合物类基质[如PVA、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)及聚(9-乙烯基咔唑)(PVK)等]和有机小分子基质(尿素、三聚氰胺及氰尿酸等)；无机类基质通常包含分子类基质[如硼酸(BA)]、SiO_2类基质[如TEOS、3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTES)及*N*-(*β*-氨乙基)-*γ*-氨丙基三甲氧基硅烷(KH-792)等]、多孔材料类基质[如分子筛及金属有机框架(MOF)等]及无机盐类基质(如NaCl及ZrCl等)．Chen等[42]将合成的黄光CDs分散到PVK基质中，发现增加PVK的比例可以使复合膜的发射波长从红色转向蓝色，PLQY从1.6%提高到15.2%[图6(A)]．2025年，Zhao等[43]通过真空加热的方法，由柠檬酸-尿素-氰尿酸-$CaCl_2$高效合成了CDs，经过氰尿酸封端的CDs表现出了优异的发光性能，在聚合物基质中的PLQY达到了100%[图6(B)]．大斯托克斯位移和出色的光稳定性使其成为理想的太阳能聚光器(LSC)材料．2024年，Zhao等[44]用柠檬酸、尿素、氯化钙和不同量的BA一步加热得到B-CDs[图6(C)]．加入的BA可与尿素结合，增强了反应中间体八元环结构物质的生成，提高了反应的选择性，且可通过改变加热温度和反应时间进行控制．形成的交联复合材料使CDs在基体内部分离良好，抑制了ACQ，从而在固态中获得

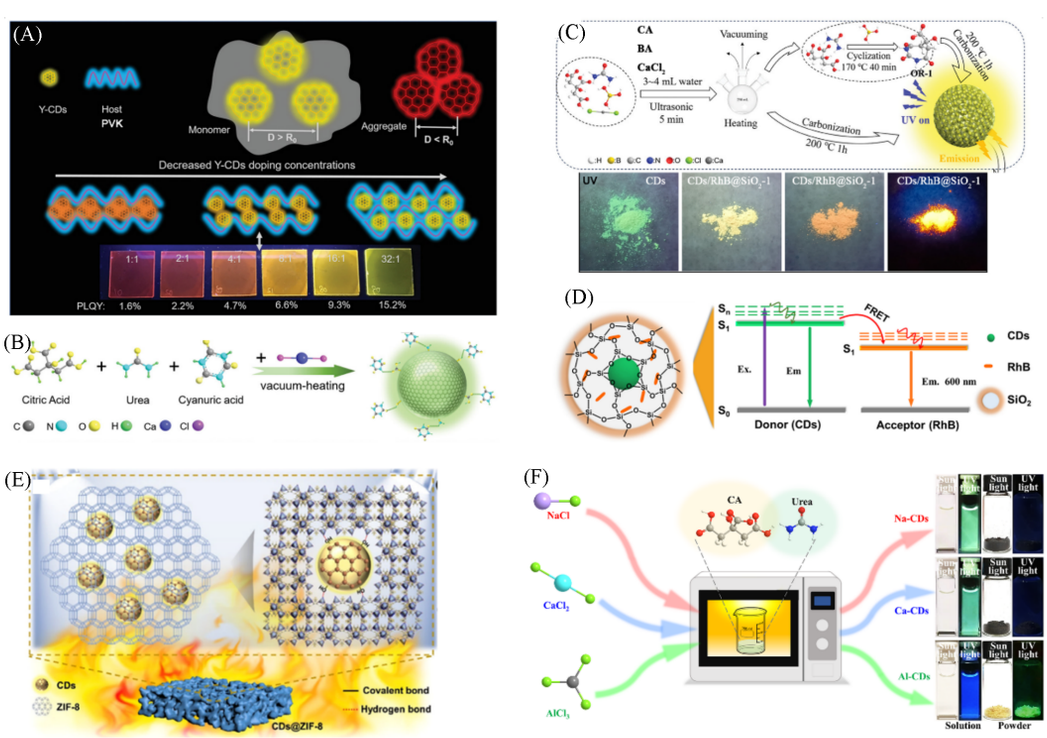


Fig. 6　Synthesis of SSF CDs coated with PVK(A)[42], cyanuric acid(B)[43], boric acid(C)[44], SiO_2(D)[45], ZIF-8 (E)[46] and inorganic salt(F)[47] matrix

(A) Copyright 2021, John Wiley & Sons, Inc.; (B) Copyright 2025, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.; (D) Copyright 2025, Elsevier; (E) Copyright 2024, Elsevier; (F) Copyright 2021, American Chemical Society.

了高达90%的PLQY. Gong等[45]利用间苯二酚和间苯二甲胺采用一步法合成了富含羟基的CDs，将罗丹明B(RhB)分子嵌入到SiO_2基体壳层中，形成复合核-壳体系CDs/RhB@SiO_2，实现了有效的FRET，获得了PLQY 57%的固态红光[图6(D)]. Yang等[46]利用CDs和沸石咪唑酸盐骨架-8(ZIF-8)之间的静电吸附作用，将CDs封装在ZIF-8中[图6(E)]. ZIF-8作为基质不仅避免了CDs之间的碰撞聚集，还与CDs之间形成氢键，提高了电子云的离域程度，从而使CDs@ZIF-8的PLQY提高到81.17%. Qu等[47]通过微波加热脱水工艺在柠檬酸和尿素中加入$AlCl_3$. 由于Al离子与N和O原子的强配位能力，在CDs表面形成了较强的空间位阻，不仅避免了绿色发光碳核的聚集，而且促进了从蓝色发光聚合表面到绿色发光碳核的高效能量转移，导致增强的绿色发射，固态PLQY为72.7%[图6(F)]. 然而对于高负载分数的固态发光复合材料来说，实现高PLQY是相当困难. 例如：聚合物基质中发光材料浓度降低其PLQY随之升高. 因此合成具有固态抗自猝灭的CDs就格外重要.

2.1.2 *核壳调控* CDs表面存在着大量的缺陷态，这些缺陷态会形成非辐射复合中心，从而产生PLQY低下的问题. 除了直接使用基质包覆CDs减小缺陷，还可以利用化学修饰调节CDs表面的官能团，不但能够降低载流子捕获概率，增强辐射复合，提高PLQY，而且可以调整CDs表面的能带结构，改变其光色. Wang等[48]利用苝和丙二胺搭配不同含量的浓硫酸获得了从黄到近红外4种多色固态发光CDs，其中Y-CDs的固态发光PLQY为67.70%. CDs的表面聚合物链可以有效抑制由于共轭碳核π-π堆积导致的荧光猝灭，而荧光发射的红移是由于sp^2碳核放大导致的带隙缩小[图7(A)]. 表面修饰可以通过调节杂原子掺杂或者调节表面构型来获得不同光色的CDs. Bi等[49]以CA为碳源，3-氟苯胺为F和N掺杂源，采用溶剂热法合成固体红色荧光CDs(λ_{em}=676 nm，PLQY=4.17%)[图7(B)]. sp^3杂化碳的C—F键破坏了sp^2杂化碳晶格的对称性. 同时，氟诱导的缺陷捕获激子，使得电荷优先聚集在缺陷周围，激子在缺陷处重新结合，产生红色SSF. 抗自猝灭CDs的获得势必使用有一定链长的前体合成足够的聚合物链来抑制sp^2碳核的π-π堆积. Lu等[50]利用席夫碱通过二步反应对由邻苯二胺前体衍生的CDs进行表面修饰，获得了从蓝到深红色的可调谐固态发光CDs[图7(C)]，配体不仅引入了空间位阻，避免了碳核的紧密堆积，而且不同构型的水杨醛配体不同程度上改变了CDs的能级结构，调节了CDs固态发光光色.

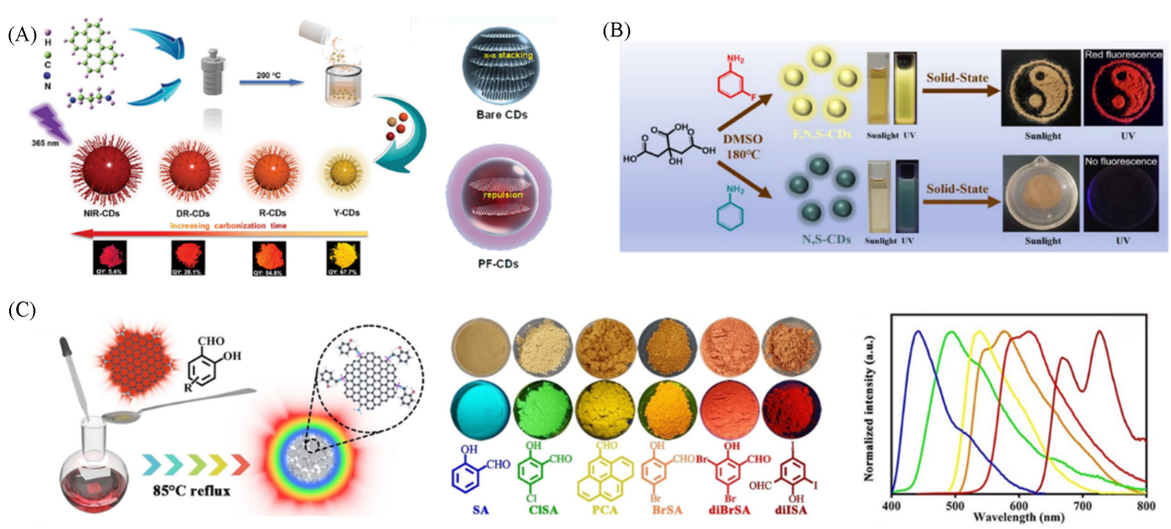


Fig. 7 Synthesis of SSF CDs by multicolor solid-state luminescent CDs(A)[48], heteroatom doping(B)[49] and regulation of surface ligand configuration(C)[50]

(A) Copyright 2022, John Wiley & Sons, Inc.; (B) Copyright 2021, Elsevier; (C) Copyright 2023, John Wiley & Sons, Inc.

2.2 固态RTP CDs的合成策略

CDs RTP与CDs荧光相比具有寿命更长与斯托克斯位移更大的优势，这使得它在光电器件、生物成像及信息加密等领域具有更广阔的研究潜力. 在RTP过程中，分子在吸收辐射后从S_0跃迁到S_1，但

并不直接回落到S_0. 相反，它经历ISC以达到T_1，然后通过辐射跃迁返回S_0. 与荧光相比，RTP中的T_1不能通过光子吸收直接从S_0填充；它必须经过*S-T*转换，这是一个被禁止的过程. 此外，三重态对水、氧和温度等因素很敏感，导致RTP的非辐射衰减. 因此考虑到RTP机制，CDs表现出有效的RTP需要两个因素，即促进单重态到三重态的ISC过程和抑制三重态的非辐射弛豫. 首先，引入重原子(Br或I)、羰基和具有孤对电子的杂原子(O，N，S和P等)可以促进自旋轨道耦合(SOC)，提高ISC的速率. 其次，通过将CDs嵌入到某些聚合物、三聚氰胺、明矾钾、沸石、SiO_2、氧化铝、尿素及PVA等基质中，CDs与基质之间的分子间相互作用或氢键可以在刚性环境中捕获CDs，有效抑制发色团的振动、旋转和碰撞，防止三重态激子的猝灭.

2.2.1 *自保护*RTP CDs 自保护RTP CDs的合成通常是基于CEE原理，在前体分子碳化交联过程中形成的聚合物链可以提供刚性环境，稳定RTP CDs的三重态激子. Shi等[51]利用缩二脲作为前体分子，结合磷酸一步水热法合成了从蓝光到红光具有激发依赖的RTP CDs，缩二脲前体在碳化交联过程中不但通过自掺杂生成多个发射中心，还构建了刚性的聚合物环境，促进了RTP的产生(图8).

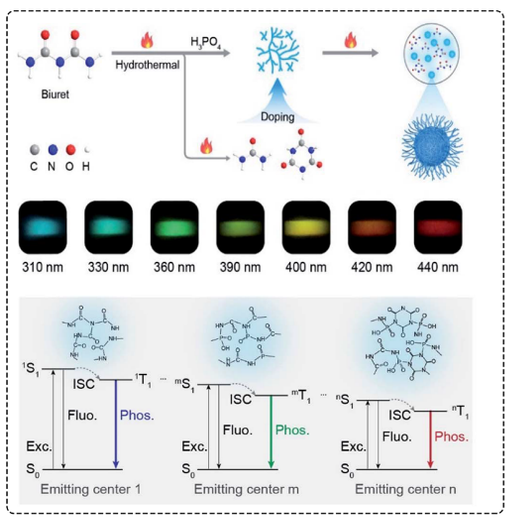


Fig. 8 Synthesis of self-crosslinking, matrix-free RTP CDs[51]

Copyright 2022, the Royal Society of Chemistry.

2.2.2 *基质辅助*RTP CDs 刚性基质与CDs间的各种作用力(共价键、氢键、金属键及离子键等)可以增强交联效果，并且由刚性基质带来的杂原子可以促进激发态电子的自旋轨道耦合(SOC)与ISC过程，从而导致RTP发射. 通常被用来合成RTP CDs的基质可以分为无机基质(BA，SiO_2及多孔材料等)和有机基质(聚合物基质及有机小分子等)两大类. 2025年，Dong等[52]通过选择不同共轭程度的缀合前体结合BA基质设计和制备了多色CDs基RTP材料. 随着前体中苯环和官能团数量的增加，所得到的CDs的光学带隙不断缩小，导致RTP的红移，从而在从蓝光到红光的范围内表现出优异的余辉性能[图9(A)]，其中的N-CDs具有较长的余辉寿命(880 ms)和超高的PLQY(81.13%). 2024年，Liu等[53]将稻壳通过一步水热法与TEOS混合形成SiO_2凝胶，然后煅

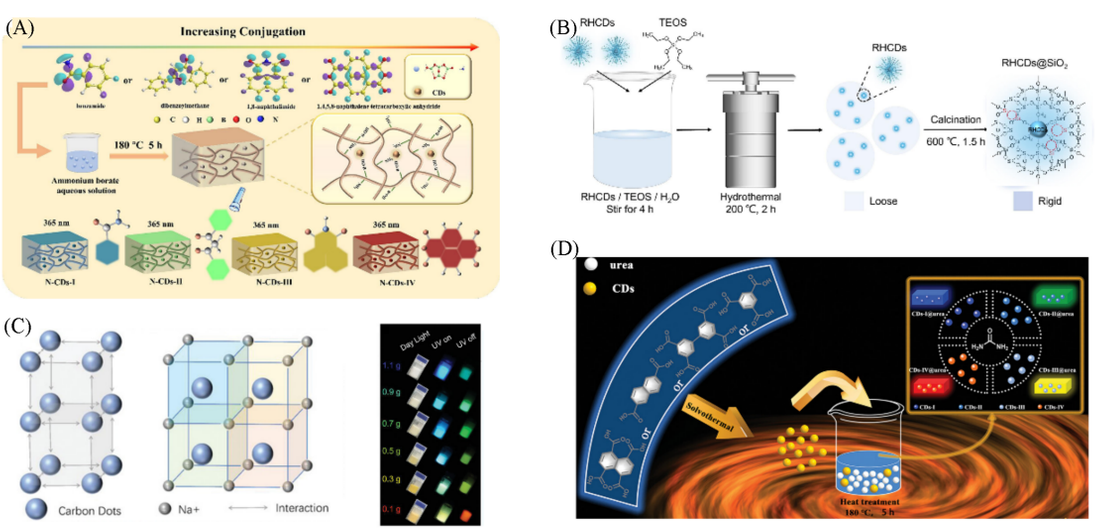


Fig. 9 Synthesis of RTP CDs from different matrices

Matrix: (A) Boric acid[52]; (B) SiO_2[53]; (C) NaOH[54]; (D) urea[55]. (A) Copyright 2025, Elsevier; (B) Copyright 2024, Elsevier; (C) Copyright 2023, John Wiley & Sons, Inc.; (D) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.

烧得到RHCDs@SiO_2复合材料[图9(B)]. 借助SiO_2基体的高刚性3D网络结构以及稳定的Si—C和Si—O—C共价键实现了多重约束效应，从而获得了长达7.76 s的RTP寿命. 2022年，Shan等[54]通过在柠檬酸反应体系中加入不同量的强碱(氢氧化钠)，成功合成了sp^2/sp^3比例不同的3种CDs，得到了多色RTP[图9(C)]. 2024年，Lu等[55]以尿素为包覆基质，利用4种结构相似的有机前体，通过改变它们的共轭结构与表面官能团数目获得了从蓝色到红色4种光色的RTP发射[图9(D)]. 在RTP系统中引入具有不同电负性的杂原子不仅可以促进SOC，还可以通过改变最低三重态能级和能隙来改变分子内的电荷转移和分子的空间排列，从而构建专门的多色RTP系统.

对CDs赋予多重约束作用(共价键、离子键及氢键等)，构建刚性结构嵌入CDs，可限制其运动，减少非辐射损耗. 通过增强分子间的相互作用可以促进分子轨道重叠，形成有效的空间共轭并稳定构象，从而减少单重态与三重态激子衰减. 2024年，Lou等[56]通过复合基质(尿素与APTES)固定RhB的能量转移策略，获得了以600 nm为中心的明亮余辉发射，具有接近100%的发光效率. 但上述高PLQY的CDs均存在RTP寿命较短的问题[图10(A)]. 2025年，Deng等[57]采用简单的分子工程方法设计了NCDs，实现了高达48.50%的RTP PLQY和2.06 s的RTP寿命，肉眼可以观察到约22 s的余辉现象. 通过掺入—NH_2和C═O/C═N等官能团可促进CDs内高密度(n, π^*)构型的形成，这些官能团诱导的自旋轨道耦合可促进从单重态到三重态的高效ISC，并促进从三重态到基态的辐射复合[图10(B)].

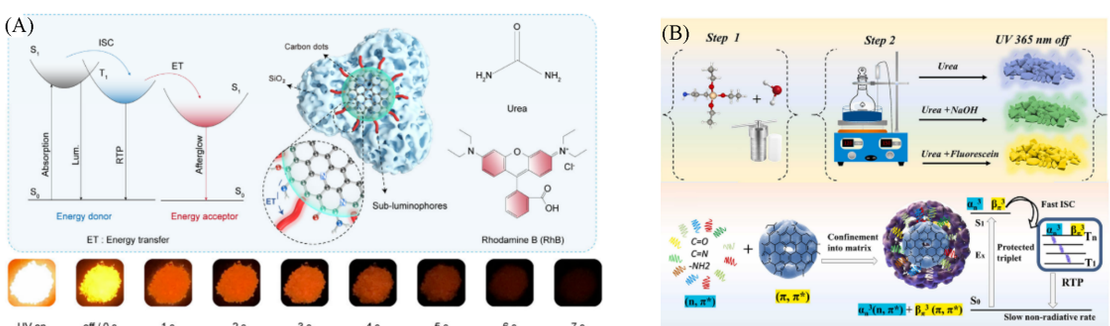


Fig. 10 Composite matrix(A)[56] and multiple functional groups(B)[57] provide multiple confinement effects to synthesize RTP CDs

(A) Copyright 2024, American Chemical Society; (B) Copyright 2025, Elsevier.

2.3 固态TADF CDs的合成策略

TADF材料可以用于光电器件、激光显示器、光催化和发光成像等领域. 可以通过精心设计CDs的给体-受体结构来促进分子内电荷转移(ICT)，进而缩小ΔE_{ST}和促进RISC过程，获得具有TADF性质的CDs. 例如，通过表面态策略引入吸电子基团与给电子基团[58,59]，使S_1和T_1能级之间的带隙减小，可促进RISC的发生. 2024年，Zhang等[60]利用电化学方法合成多色CDs并将其嵌入尿素基质中，从B-CDs/尿素、G-CDs/尿素到R-CDs/尿素，氨基(给体)和C═O(受体)含量逐渐增加，可以将ΔE_{ST}值调节在0.384~0.026 eV范围内，这有助于ISC和RISC，从而在室温下实现RTP到TADF的转变[图11(A)]. 2020年，Jeon等[61]利用石墨片与不同浓度比例的浓硝酸与浓硫酸混合制备了具有不同氧化程度的GQDs，进而实现了从RTP到TADF现象的转变. GQDs的氧化程度通过氧含量与sp^2碳的比例(γ_{OC})量化. 随着氧化程度增加，γ_{OC}从4.63%增至59.6%，ΔE_{ST}从0.365 eV逐渐减小至0.123 eV. 因氧化引入的C═O可以通过n-π^*跃迁增强自旋轨道耦合，促进ISC与RISC过程[图11(B)]. 2024年，Hu等[62]通过煅烧间苯二胺与氟化镁的混合物，制备出一系列多色TADF复合材料. 氟原子强烈的吸电子作用诱导了大量的自旋轨道耦合，减小了单重态与三重态的带隙，促进了RISC过程，从而提升了TADF的效率[图11(C)]. Sun等[63]使用不同羧酸取代位的苯二羧酸与苯三羧酸作为反应前体合成了6种不同的CDs，由邻位羧酸取代(如邻苯二甲酸)的原料合成的CDs(Pht-CDs，Hem-CDs及Ben-CDs)在合成过程中更易形成六元环状结构，进而增大分子共轭域，增强分子刚性并促进分子内电荷转移，显著减小ΔE_{ST}[图11(D)].

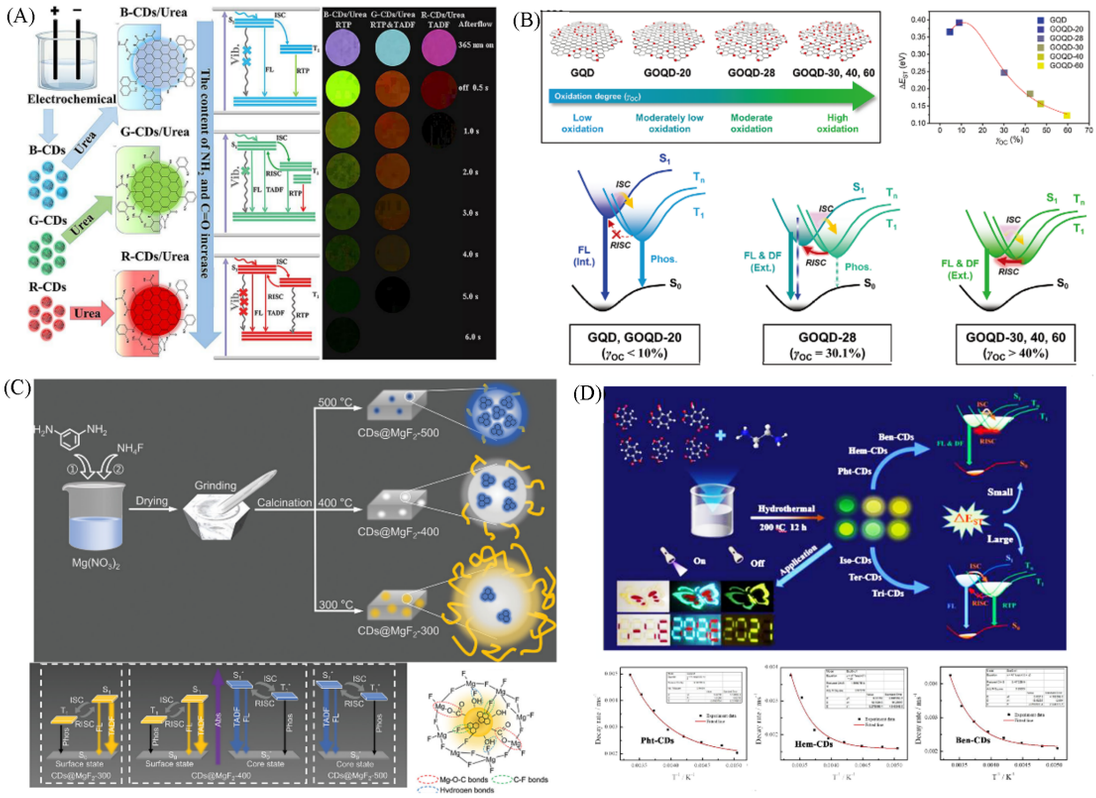


Fig. 11 “Top-down” method to adjust the content of the receptor functional group(A)[60] and the degree of oxidation of the surface functional group(B)[61] and “Bottom-Up” method for heteroatom doping(C)[62] and conjugate rigid structure(D)[63] to obtain TADF CDs

(A) Copyright 2024, Elsevier; (B) Copyright 2022, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2025, John Wiley & Sons, Inc.; (D) Copyright 2022, American Chemical Society.

3 应　　用

3.1 防伪与信息加密

随着科技的发展，一些老旧的防伪标识面临着易被仿造的风险，因此迫切需要开发新型的防伪材料．CDs作为一种具有优越发光性能的低毒性物质，在防伪材料领域具有巨大的应用潜力．Chen等[36]利用二硫代水杨酸合成的聚集诱导发光CDs在良溶剂中呈现出蓝光发射，但在聚集状态下呈现出多色SSF，因此可将其用作打印墨水进行防伪与信息加密[图12(A)]．利用RTP CDs在紫外灯开关状态下所

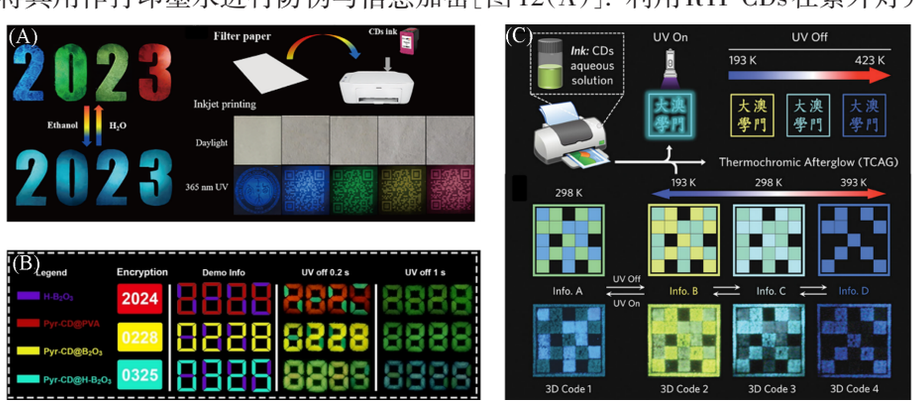


Fig. 12 CDs fluorescent inks for anti-counterfeiting printing(A)[36], time-resolved phosphorescent CDs(B)[64] and temperature-responsive CDs(C)[65] for information encryption

(A) Copyright 2024, Springer Nature; (B) Copyright 2025, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.

呈现出的荧光与RTP的光色差异，可将其应用于莫斯密码进行信息加密传递．2025年，Lu等[64]利用苊甲酸及其衍生物获得了一系列时间分辨RTP CDs，通过抓捕紫外灯关闭后特定时间下的信息，从而达到多重加密的目的[图12(B)]．由于部分CDs的RTP在温度改变的情况下会发生变色行为，因此可以利用CDs在不同温度下的RTP光色不同将其应用于防伪标识．2024年，Qu等[65]利用RTP CDs做出了“澳门大学”校徽与二维码，随着温度的升高，RTP呈现出从黄色到蓝色的变化[图12(C)]．

3.2 光电器件

CDs具有良好的发光性能，易制备且光学性能稳定，有望取代LED中传统昂贵的稀土基荧光粉和有毒金属基半导体量子点应用于照明领域．通常LED可分为光致发光LED与电致发光LED．利用CDs制备光致发光LED通常是将CDs与环氧树脂或PMMA等聚合物混合之后涂覆在GaN芯片上，利用芯片发射的光激发CDs．具有固态发光的CDs荧光粉可以与LED芯片结合[66]，获得多色LED灯泡，而且CDs通常具有较宽的发射带，也可用于制备高显色指数的白光LED[图13(A)]．还可以使用固态发光的CDs作为发射层构筑电致发光LED，并通过促进RISC产生高效的激子发射，以提高外量子效率(EQE)．Lu等[67]构筑了蓝光B-LED和DB-LED，两者的EQE均已超过7%[图13(B)]．具有长余辉发射的CDs可以在没有电源的情况下持续发光，可以将其用于应急设备[图13(C)]，例如安全逃生通道的指示标识[68]．

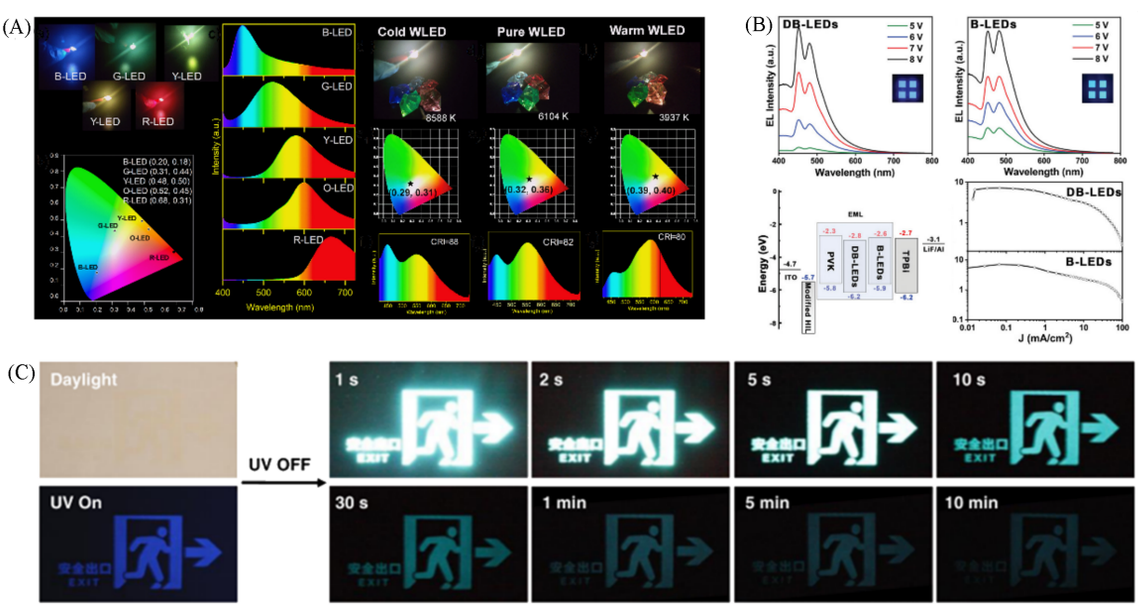


Fig. 13 CDs for photoluminescent LEDs(A)[66], electroluminescent LEDs(B)[67] and RTP CDs for emergency indicators(C)[68]

(A) Copyright 2022, Elsevier; (B) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2022, Springer Nature.

光合作用是调节植物的发芽、开花和加速茎叶生长的关键机体活动，光合作用主要是依靠植物色素在蓝光、红光、近红外光区域的吸收．目前商用的植物照明设备价格高昂且发光波段有限，无法完全覆盖植物的吸收区域．由荧光粉制备LED是目前最直接且成本较低的策略之一．Bi等[69]以邻苯二胺与乙酸为前体，采用一步水热法合成的UVB-CDs具有在308 nm深紫外区的固态发光，且固态PLQY达到20.25%[图14(A)]．将其旋涂到265 nm的LED芯片上获得了UVB LED，可以将对植物不友好的230~280 nm区域(UVC)的光转换为对植物友好的UVB区域(290~315 nm)的紫外线．他们将UVB LED应用于罗勒的生长，对照组暴露在UVC光下，实验组则选择UVB LED处理．10 d后无论是从植物外观来看，还是从植物中提取的光合色素的含量来看，都是UVB LED更适合促进植物的生长．Wang等[48]合成了具有高效固态红光发射的抗自猝灭CDs，其发射波长与植物色素(叶绿素A和B、红光吸收型光敏色素PR和远红光吸收型光敏色素PFR)的吸收波长相匹配，于是将其用于植物照明灯．实验分成白光、自然光和红光3组，7 d后可以观察到红光组的植物叶片比其余两组更大更饱满[图14(B)]．

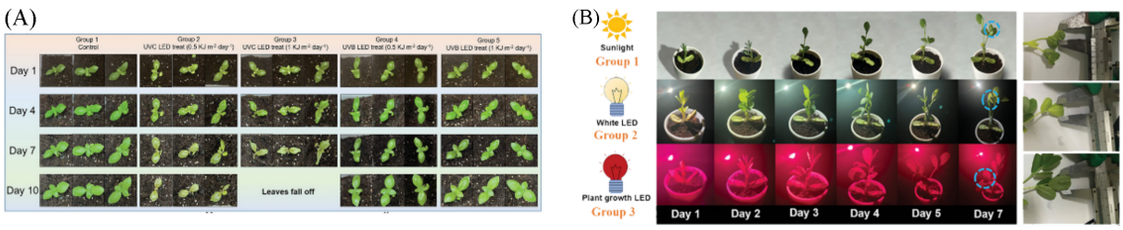


Fig. 14　Ultraviolet CDs(A)[69] and Red CDs(B)[48] for planting LED

(A) Copyright 2022, John Wiley & Sons, Inc.; (B) Copyright 2022, John Wiley & Sons, Inc.

LSC是Lambe等[70]于1976年提出的一种光学器件，在未来可能被应用于建筑玻璃，推动实现建筑一体化光伏. CDs作为一种优异的发光材料，可以捕获太阳光并将其转换成荧光，且具有成本较低、合成简单、环境友好的优点. 将CDs分散到聚合物基质中，通过旋涂附着在玻璃片上，其边缘的光伏电池可以吸收高强度的荧光，提升太阳能电池的光电转换效率(PCE). Gong等[45]通过简单的溶胶-凝胶法合成了一种新型的CDs/RhB@SiO_2复合核壳结构纳米颗粒，其中CDs为核心，嵌入SiO_2中的RhB形成壳层. 这些纳米颗粒被成功用于高性能LSC制造，PCE高达3.8%(图15).

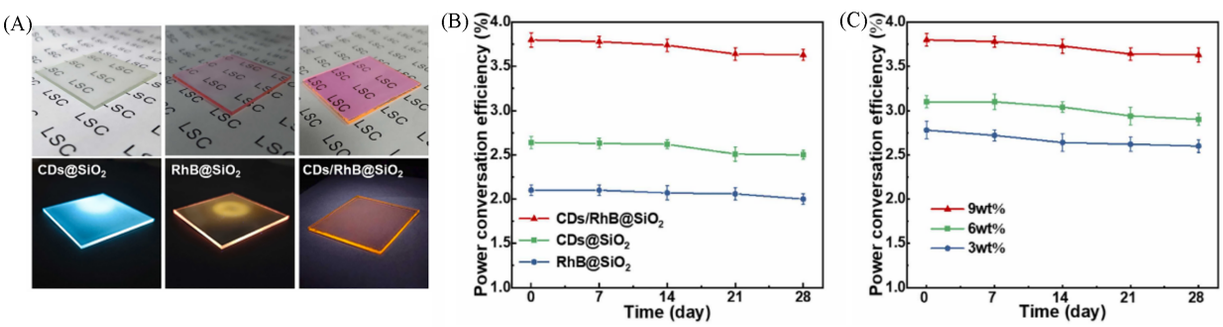


Fig. 15　CDs for LSC[45]

Copyright 2025, Elsevier.

3.3　生物医学领域

生物荧光成像可以在三维尺度上实现细胞和组织的实时可视化，具有无创、可视化、廉价、安全及快速等优点[71]. 通常，传统CDs在聚集状态下表现出发射强度显著下降甚至是猝灭的现象，极大地阻碍了CDs在生物成像方面的应用. 2024年，Li等[72]通过引入稀土元素合成了一种新型的AIE CDs[图16(A)]，在较低浓度下也可呈现出优良的成像效果且可靶向HeLa细胞，可以应用于斑马鱼长期成像，还对斑马鱼幼鱼的晶状体和消化系统具有特异性靶向. 2024年，Lu等[55]合成了一系列具有抗水猝灭性能的多色RTP CDs，其在被用于小鼠体内成像时呈现出不同的发光强度[图16(B)]. 然而在复杂的生物体环境中保持超长持续且高质量的余辉性能仍面临困难. 2024年，Shan等[73]开发了超长室温RTP CDs用于肿瘤成像，发现余辉信号具有良好的穿透性，在20 mm的组织深度仍然可以观察到余辉信号. 24 h后在小鼠肿瘤部位仍可以观察到强烈的富集且*p*-CDs可以通过代谢排除[图16(C)].

氧分子通常可以与激发三重态的电子结合生成具有高细胞毒性的单重态氧($^1O_2$)，可应用于光动力治疗(PDT)、声动力治疗(SDT)及抗菌领域. 已报道的大多数RTP CDs的发射均位于可见光区，紫外与近红外区域的RTP CDs很少. 众所周知，紫外光具有优异的抗菌作用，因此合成具有紫外区域发光的RTP CDs至关重要. Shan等[74]以三聚氰胺为前体合成了发射波长为342 nm的紫外荧光CDs，其PLQY为31.7%[图17(A)]. 此外，该CDs还显示出紫外RTP特性，RTP峰(348 nm)同样位于紫外区，寿命为15.83 ms. 他们选择金黄色葡萄球菌和沙门氏菌来评价CDs的抗菌性能，发现金黄色葡萄球菌和沙门氏菌在琼脂平板上自由生长和繁殖，而实验组几乎没有任何金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的细菌菌落持续存在. 在黑暗条件下用CDs处理的细菌数量持续增加，表明细菌失活是由发射的高能光子引起的. Pan等[75]合成了具有760 nm近红外荧光发射的p-n型CDs，其荧光最佳激发位于700 nm[图17(B)].

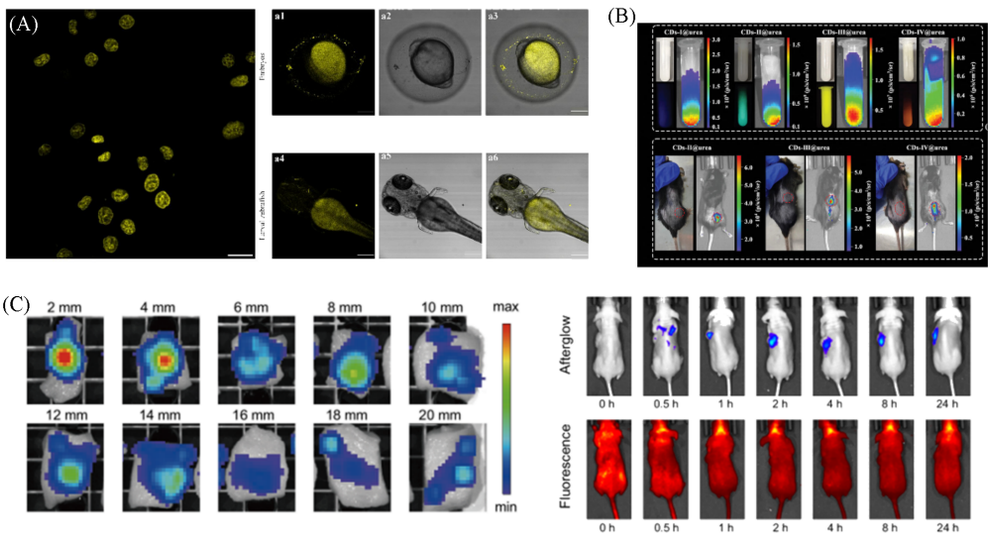


Fig. 16 AIE CDs for zebrafish imaging(A)[72], RTP CDs for *in vivo* imaging(B)[55] and long afterglow CDs(C)[73] for *in vivo* imaging in mice

(A) Copyright 2024, Elsevier; (B) Copyright 2024, John Wiley & Sons, Inc.; (C) Copyright 2024, Springer Nature.

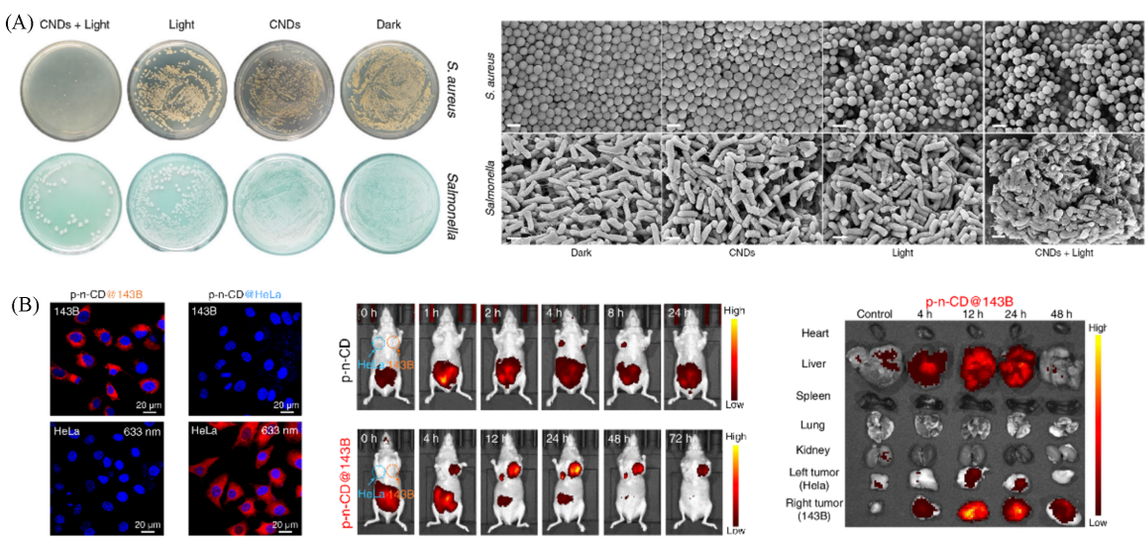


Fig. 17 RTP CDs for antimicrobial therapy(A)[74] and tumor SDT therapy(B)[75]

(A) Copyright 2022, Springer Nature; (B) Copyright 2022, Springer Nature.

p-n-CDs@PVA 薄膜在 778 nm 处表现出 RTP 发射，载流子寿命长达 185 ms. 首先评估了 p-n-CD@143B 的肿瘤特异性体外体内 NIR 成像能力，注射后 12~24 h 可在肿瘤组织中检测到最高的 NIR 荧光信号. 随后评估了 p-n-CD@CCM 进行精准肿瘤治疗的作用，在 16 d 内 p-n-CD@CCM+US 组小鼠体内的肿瘤显著缩小.

4 总结与展望

本文主要介绍了 CDs 的发光机理与固态发光的研究进展，以及固态发光 CDs 的应用. CDs 作为一种纳米碳材料，因具有良好的可调谐的发光性能和低毒性，在照明、生物成像与治疗等方面有巨大的应用潜力，且便于大规模制备. 本文从 SSF，RTP 与 TADF 3 个方面详细介绍了 CDs 发光机理与调节策略，这将为合成 CDs 的前体选择及杂原子掺杂策略等提供一些参考. 尽管 CDs 固态发光在近些年蓬勃发展，但仍面临如下困难：(1) 目前，SSF 发射和余辉发射均集中在短波长可见光区，红光乃至近红外

发光的CDs则少有报道，且存在PLQY过低、RTP寿命较短、难以做到发光可调的问题．如何选用适当的前体合成具有长波长发射的CDs、如何利用以往经验结合迄今发现的机理改善并实现在红光乃至近红外区域的PLQY可调仍需进行深入研究．（2）CDs固态发光的光谱通常具有比较宽的发射峰，这意味着CDs发光色纯度不够，难以准确呈现特定颜色，从而影响色彩还原，这对于CDs作为LED的应用是非常不利的．色纯度作为LED商业应用最重要的参数之一，如何设计简单、低成本的实验缩窄CDs发射的半峰宽尤为重要．（3）虽然基质辅助策略对于获得高PLQY的固态发光CDs具有一定优势，然而基质包覆的不均匀会造成不同区域CDs发光性能的差异，因此如何使用无基质策略合成抗自猝灭的SSF和余辉发射的CDs仍值得探究．

参　考　文　献

[1] Xu X., Ray R., Gu Y., Ploehn H. J., Gearheart L., Raker K., Scrivens W. A., *J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, 12736—12737
[2] Wang B., Lu S., *Matter*, **2022**, *5*, 110—149
[3] Wang B., Cai H., Waterhouse G. I. N., Qu X., Yang B., Lu S., *Small. Sci.*, **2022**, *2*, 2200012
[4] 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*, 2210699
[5] Zhang Y., Song H., Wang L., Yu J., Wang B., Hu Y., Zang S., Yang B., Lu S., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*, 25514—25521
[6] Liu H., Zhong X., Pan Q., Zhang Y., Deng W., Zou G., Hou H., Ji X., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, *498*, 215468
[7] Sun Y., Zhou B., Lin Y., Wang W., Fernando K. A. S., Pathak P., Meziani M. J., Harruff B. A., Wang X., Wang H., Luo P. G., Yang H., Kose M. E., Chen B., Veca L. M., Xie S., *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, *128*, 7756—7757
[8] Zhou J., Booker C., Li R., Zhou X., Sham T., Sun X., Ding Z., *J. Am. Chem. Soc.*, **2007**, *129*, 744—745
[9] Yao X., Lewis R. E., Haynes C. L., *Acc. Chem. Res.*, **2022**, *55*, 3312—3321
[10] Wang H., Wang B., Bai J., Lu S., *J. Mater. Chem. A.*, **2024**, *12*, 22417—22441
[11] Wang B., Wei Z., Sui L., Yu J., Zhang B., Wang X., Feng S., Song H., Yong X., Tian Y., Yang B., Lu S., *Light Sci. Appl.*, **2022**, *11*, 172
[12] Shi L., Wang B., Lu S., *Matter*, **2023**, *6*, 728—760
[13] Zhu S., Song Y., Zhao X., Shao J., Zhang J., Yang B., *Nano Res.*, **2015**, *8*, 355—381
[14] Wang Y., Li X., Zhao S., Wang B., Song X., Xiao J., Lan M., *Coord. Chem. Rev.*, **2022**, *470*, 214703
[15] Xian Y., Li K., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*, 2201031
[16] Hu G., Wang Y., Zhang S., Ding H., Zhou Z., Wei J., Li X., Xiong H., *Carbon*, **2023**, *203*, 1—10
[17] Liu Z., Zou H., Wang N., Yang T., Peng Z., Wang J., Li N., Huang C., *Sci. Chi. Chem.*, **2018**, *61*, 490—496
[18] Bao L., Liu C., Zhang Z., Pang D., *Adv. Mater.*, **2015**, *27*, 1663—1667
[19] Liu T., Yin G., Song Z., Yu J., Yong X., Zhang B., Ai L., Lu S., *ACS Mater. Lett.*, **2023**, *5*, 846—853
[20] Yang S., Sun J., Li X., Zhou W., Wang Z., He P., Ding G., Xie X., Kang Z., Jiang M., *J. Mater. Chem. A.*, **2014**, *2*, 8660—8667
[21] Zhao Q., Wang X., Song Q., Zang Z., Fan C., Li L., Yu X., Lu Z., Zhang X., *J. Mater. Chem. C*, **2023**, *11*, 14439—14447
[22] Shan F., Zhang J., Liao C., Wang Z., Wang L., *Chin. Chem. Lett.*, **2023**, *34*, 108107
[23] He C., Xu P., Zhang X., Long W., *Carbon*, **2022**, *186*, 91—127
[24] Li R., Tao S., Liu J., Han X., Xia C., Yang B., *Small Struct.*, **2024**, *6*, 2400447
[25] Zheng M., Jia H., Zhao B., Zhang C., Dang Q., Ma H., Xu K., Tan Z., *Small*, **2023**, *19*, 2206715
[26] Zheng C., Tao S., Yang B., *Small Struct.*, **2023**, *4*, 2200327
[27] Tao S., Zhou C., Kang C., Zhu S., Feng T., Zhang S., Ding Z., Zheng C., Xia C., Yang B., *Light Sci. Appl.*, **2022**, *11*, 56
[28] Wang B., Sun Z., Yu J., Waterhouse G. I. N., Lu S., Yang B., *SmartMat*, **2022**, *3*, 337—348
[29] Luo J., Xie Z., Lam J. W. Y., Cheng L., Chen H., Qiu C., Kwok H. S., Zhan X., Liu Y., Zhu D., Tang B. Z., *Chem. Commu.*, **2001**, 1740—1741
[30] Wang X., Wan R., Tang Y., Sun S., Chen H., Li L., Chen J., Wei J., Chi Z., Li H., *Coord. Chem. Rev.*, **2025**, *531*, 216520
[31] Hu R., Leung N. L. C., Tang B., *Chem. Soc. Rev.*, **2014**, *43*, 4494—4562
[32] Wang H., Zhao E., Lam J. W. Y., Tang B., *Mater. Today*, **2015**, *18*, 365—377
[33] Ding L., Jin X., Gao Y., Wu J., Ai T., Zhou H., Chen X., Zhang X., Chen W., *Adv. Opt. Mater.*, **2023**, *11*, 2202349
[34] Wang Y., Zhou S., Pan S., Sun X., Zhou J., Li H., *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, *12*, 2301486
[35] Ding L., Jin X., Gao Y., Kang S., Bai H., Ma X., Ai T., Zhou H., Chen W., *Adv. Sci.*, **2024**, *11*, 2409345
[36] Ding L., Jin X., Gao Y., Kang S., Bai H., Ma X., Ai T., Zhou H., Chen W., *Nano Res.*, **2024**, *17*, 5680—5687
[37] Yang C., Hu J., Tan W., Si J., Hou X., *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, *13*, 2402638
[38] Yang H., Liu Y., Guo Z., Lei B., Zhuang J., Zhang X., Liu Z., Hu C., *Nat. Commun.*, **2019**, *10*, 1789
[39] Wan Z., Li Y., Zhou Y., Peng D., Zhang X., Zhuang J., Lei B., Liu Y., Hu C., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*, 2207296
[40] Ding H., Zhao R., Zhang Z., Yang J., Wang Z., Xiao L., Li X., He X., Xiong H., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *476*, 146405

[41] Dos Santos J. M., Hall D., Basumatary B., Bryden M., Chen D., Choudhary P., Comerford T., Crovini E., Danos A., de J., Diesing S., Fatahi M., Griffin M., Gupta A. K., Hafeez H., Hämmerling L., Hanover E., Haug J., Heil T., Karthik D., Kumar S., Lee O., Li H., Lucas F., Mackenzie C. F. R., Mariko A., Matulaitis T., Millward F., Olivier Y., Qi Q., Samuel I. D. W., Sharma N., Si C., Spierling L., Sudhakar P., Sun D., Tankelevičiūtė E., Duarte Tonet M., Wang J., Wang T., Wu S., Xu Y., Zhang L., Zysman-Colman E., *Chem. Rev.*, **2024**, *124*, 13736—14110
[42] Wang Z., Jiang N., Liu M., Zhang R., Huang F., Chen D., *Small*, **2021**, *17*, 2104551
[43] Wang L., Wang X., Zhao H., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 10.1002/adfm.202423422
[44] Wang L., Liu G., Wang M., Song Y., Jing Q., Zhao H., *Small*, **2024**, *20*, 2401812
[45] Li J., Zheng S., Zhao X., Vomiero A., Gong X., *Nano Energy*, **2025**, *134*, 110514
[46] Wang Z., Yan L., Hao Y., Zheng J., Yang Y., Liu X., *Chin. Chem. Lett.*, **2024**, *35*, 109430
[47] Zhao Y., He B., Liu E., Li J., Wang L., Chen S., Chen Y., Tan Z. A., Ng K. W., Wang S., Tang Z., Qu S., *J. Phys. Chem. Lett.*, **2021**, *12*, 4530—4536
[48] Xu B., Li J., Zhang J., Ning H., Fang X., Shen J., Zhou H., Jiang T., Gao Z., Meng X., Wang Z., *Adv. Sci.*, **2023**, *10*, 2205788
[49] Ding H., Xu J., Jiang L., Dong C., Meng Q., Rehman S. U., Wang J., Ge Z., Osipov V. Y., Bi H., *Chin. Chem. Lett.*, **2021**, *32*, 3646—3651
[50] Ai L., Song Z., Nie M., Yu J., Liu F., Song H., Zhang B., Waterhouse G. I. N., Lu S., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, *62*, 202217822
[51] Shi H., Niu Z., Wang H., Ye W., Xi K., Huang X., Wang H., Liu Y., Lin H., Shi H., An Z., *Chem. Sci.*, **2022**, *13*, 4406—4412
[52] You M., Li C., Zhang Z., Zhang Y., Li W., Zhang X., Zhuang J., Hu C., Dong H., Liu Y., Lei B., Zheng M., *Chem. Eng. J.*, **2025**, *505*, 159246
[53] Luo Y., Jiang Q., Liu J., Huang F., Liao X., Zhuang J., Hu C., Zheng M., Lei B., Liu Y., He J., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *500*, 156781
[54] Ding Z., Shen C., Han J., Zheng G., Ni Q., Song R., Liu K., Zang J., Dong L., Lou Q., Shan C. X., *Small*, **2023**, *19*, 2205916
[55] Ai L., Xiang W., Xiao J., Liu H., Yu J., Zhang L., Wu X., Qu X., Lu S., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*, 2401220
[56] Zhu J., Li C., Zhu Y., Hu J., Nan Y., Chen X., Liu K., Wang H., Shan C., Xu W., Lou Q., *Nano Lett.*, **2024**, *24*, 13307—13314
[57] Ahmed N., Abbas A., Qamar T. H., Hassan S. U., Jamali S. B., Deng L., *J. Alloys Compd.*, **2025**, *1013*, 178586
[58] Liu Z., Meng L., Jiang Y., Li C., Gu H., Zhao K., Zhang J., Meng H., Ren Y., *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, *147*, 3650—3661
[59] Zhang B., Li C., Wang H., Fang H., Feng R., Yu M., Li W., Chang Z., Bu X., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 10.1002/anie.202424593
[60] Zhao Q., Fan C., Bu H., Gao J., Li L., Yu X., Yang X., Lu Z., Zhang X., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *500*, 156704
[61] Park M., Kim H. S., Yoon H., Kim J., Lee S., Yoo S., Jeon S., *Adv. Mater.*, **2020**, *32*, 2000936
[62] Xin M., Chen X., Zhang L., Yang H., Guo D., Hu Y., *Small*, **2025**, *21*, 2407170
[63] Sun X., He W., Liu B., *J. Phys. Chem. C.*, **2022**, *126*, 3540—3548
[64] Zhang Y., Liu Y., Ren X., Kang Y., Ding S., Lu S., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*, e202421421
[65] Liu Y., Cheng D., Wang B., Yang J., Hao Y., Tan J., Li Q., Qu S., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*, 2403775
[66] Wang J., Zheng J., Yang Y., Liu X., Qiu J., Tian Y., *Carbon*, **2022**, *190*, 22—31
[67] Wang B., Wang H., Zhang B., Hu Y., Lu S., *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, *34*, 2404437
[68] Jiang K., Wang Y., Lin C., Zheng L., Du J., Zhuang Y., Xie R., Li Z., Lin H., *Light Sci. Appl.*, **2022**, *11*, 80
[69] Xu J., Liang Q., Li Z., Osipov V. Y., Lin Y., Ge B., Xu Q., Zhu J., Bi H., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*, 2200011
[70] Weber W. H., Lambe J., *Appl. Opt.*, **1976**, *15*, 2299—2300
[71] Wu J., Li Y., Qin H., Gao Y., Yang B., Sheng J., Zhang X., *Chem. Res. Chin.ese Universities*, **2024**, *40*(1), 145—152
[72] Kou X., Cong Y., Dong W., Li L., *Mater. Des.*, **2024**, *240*, 112855
[73] Zheng G., Shen C., Niu C., Lou Q., Jiang T., Li P., Shi X., Song R., Deng Y., Lv C., Liu K., Zang J., Cheng Z., Dong L., Shan C., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*, 2365
[74] Song S., Liu K., Cao Q., Mao X., Zhao W., Wang Y., Liang Y., Zang J., Lou Q., Dong L., Shan C., *Light Sci. Appl.*, **2022**, *11*, 146
[75] Geng B., Hu J., Li Y., Feng S., Pan D., Feng L, Shen L., *Nat. Commun.*, **2022**, *13*, 5735

(Ed.: W, K, M)