碳量子点的合成及其在染料敏化太阳能电池中的研究进展

周再阳,万才超*
(中南林业科技大学材料与能源学院,湖南 长沙 410004)

摘要:系统梳理了碳量子点(CQDs)的主要合成路径,包括水热法,激光烧蚀法以及近年来涌现的新型制备策略;详细总结了其性能调控手段,如表面功能化修饰、杂原子掺杂及复合结构构建等;并重点介绍了CQDs在染料敏化太阳能电池各个关键部件上的最新研究进展,旨在为该领域的研究者提供一份全面的参考,并对CQDs在未来能源转换技术中的发展方向进行展望。

关键词:碳量子点;光伏;染料敏化太阳能电池;光电转换
中图分类号:TQ127.11;TM914.4 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0086-07
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.016

Research progress on synthesis of carbon quantum dots and their application in dye-sensitized solar cells

ZHOU Zai-yang, *WAN Cai-chao**
(College of Materials and Energy, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: This paper systematically reviews the main synthesis routes of carbon quantum dots (CQDs), including hydrothermal methods, laser ablation, and novel preparation strategies that have emerged in recent years. It provides a detailed summary of performance regulation approaches, such as surface functionalization modification, heteroatom doping, and the construction of composite structures. Furthermore, the latest research progress on the application of CQDs in various key components of dye-sensitized solar cells is highlighted. This review aims to provide a comprehensive reference for researchers in this field and to offer an outlook on the future development directions of CQDs in energy conversion technologies.

Key words: carbon quantum dots; photovoltaics; dye-sensitized solar cells; photoelectric conversion

碳量子点(carbon quantum dots,CQDs)属于零维(0D)碳纳米材料,粒径通常小于10 nm。相较于石墨烯(graphene)、碳纳米管(carbon nanotube)等传统碳纳米材料,CQDs碳核多为sp^2/sp^3杂化碳结构,其表面接枝有大量羟基、羧基等活性官能团,且边缘与表面区域呈现出显著的无定形或石墨微晶相特征[1]。2004年,Xu等[2]在分离和纯化单壁碳纳米管(SWCNT)的过程中,偶然发现了具有荧光发射性能的碳纳米材料。Sun等[3]在2006年通过利用激光烧蚀技术对石墨粉进行表面钝化,制备出了荧光发射性能的纳米材料,并命名为碳量子点。

光伏技术在可再生能源体系中占据关键地位,预计未来25年内太阳能开发规模将快速增长[4]。其中,染料敏化太阳能电池(DSSCs)结构简单、制造成本较低,但在大规模应用过程中,面临着敏化剂吸光有限、电极导电性差、效率与稳定性不佳等问题。为应对上述问题,引入碳基催化剂以提升DSSCs的能源转化性能。CQDs因具有可调控的能带结构、宽光谱吸收以及优异的电子传输能力,被视为构建高性能光电器件的理想材料。目前,CQDs已被应用于DSSCs的多个核心部件,分别作为光阳极的修饰材料,贵金属铂对电极的替代物,以及作为共敏化剂,从3个方面提升了整体器件效率,降低了生产成本。

1 碳量子点的合成策略

CQDs的合成主要包括2条路径,如图1所示,即自上而下法和自下而上法。自上而下法以碳纳米管、石墨等宏观尺度的碳材料为前驱体,通过物理或化学方法剥离至纳米尺度,最终成功制备CQDs。与之相对,自下而上法则是以有机小分子或低聚物作为前驱体,通常经过缩合、聚合、碳化和钝化4个过程,最终成功形成CQDs[5-6]。不同合成方法对比优劣势以及应用场景如表1所示。

收稿日期:2026-01-09;**修回日期**:2026-09-13
作者简介:周再阳(2002-),男,硕士生;万才超(1992-),男,博士,教授,研究方向为生物质基功能材料,通讯联系人,wancaichaojy@163.com。

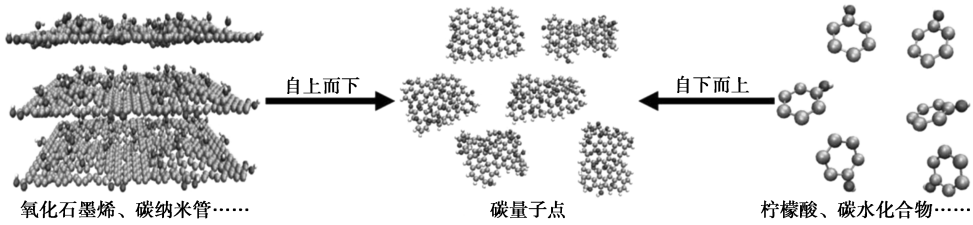


图 1　碳量子点合成路径

表 1　CQDs 主要制备方法的对比

方法类型	主要方法	优势	局限	适用场景
自上而下	弧光放电法[7-8]	反应快,结晶度高	设备昂贵,尺寸不均匀	实验室研究,光电材料
	激光烧蚀法[9-10]	纯度高,尺寸可控	设备昂贵,难以规模化	实验室研究,高纯度需求
	电化学法[11]	易掺杂,条件温和	产率较低,电解质残留	电化学相关应用
自下而上	化学氧化法	成本低,操作简单	有污染,产物不纯	工业制备,复合材料
	水热法[14-15]	成本低,易功能化	尺寸分布不均匀	大规模制备,生物应用
	模板法[16-17]	尺寸均一,结构可控	模板去除复杂,成本高	精密结构需求,光学器件
	微波辅助法[18-19]	反应快,能源效率高	易过热,形貌控制难	快速合成,荧光材料

1.1　自上而下合成

1.1.1　弧光放电法

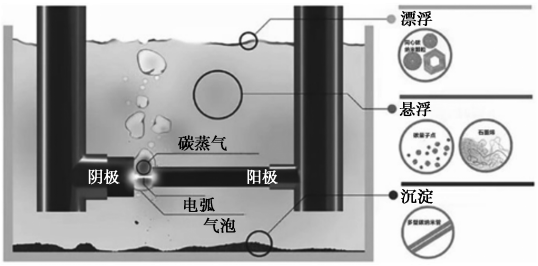
弧光放电法合成方法通常在封闭的反应器中进行,如图 2(a)所示,阴阳两电极以特定间距放置在反应器内,在施加高压的条件下产生等离子体,促使块状碳前驱体在阳极发生分解,随后在阴极表面自组装形成 CQDs[7-8]。该方法制备的 CQDs 晶格清晰,并且分散于电解液之中,但合成过程依赖高压条件,不利于大规模制备。随着研究的不断深入,合成体系已从传统气相电弧发展至气-液复合体系。有研究提出一种基于氩气-乙醇界面的脉冲电弧放电法,能够在微秒脉冲激励下实现常压、室温条件下快速合成。相较传统方法,可在常压常温下快速制备尺寸均匀、晶格清晰的 CQDs。

1.1.2　激光烧蚀法

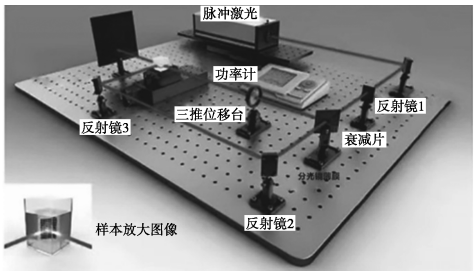
激光烧蚀法通常利用高能激光束聚焦照射碳前驱体表面,使其在极短时间内吸收高能量并迅速发生碳化,从而产生 CQDs[9]。该方法合成过程高效、粒径可控,但合成 CQDs 的荧光稳定性不足。随着研究技术不断的更新迭代,现在有研究提出双光束脉冲激光烧蚀法合成 CQDs,如图 2(b)所示,将一束脉冲激光分为 2 束正交激光,同时烧蚀碳布前驱体,所制备的 CQDs 的荧光发射峰位置不随激发波长而改变。相较传统方法,该法提高了合成效率与产量。

1.1.3　电化学法

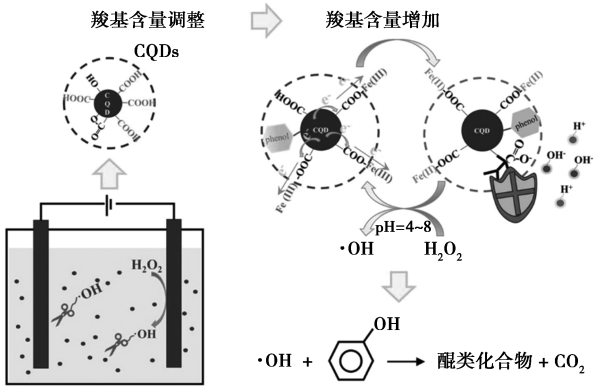
电化学法以碳棒、石墨等碳材料作为阳极,在电场作用下诱导碳前驱体发生电化学氧化或剥离,从而制备 CQDs[11]。该方法合成能直接调控 CQDs 表面形貌,但反应过程中常伴随副产物残留,且总体产



(a)弧放电法的原理示意图



(b)双光束脉冲激光烧蚀法原理示意图



(c)CQDs 表面—COO—与 Fe(Ⅲ)高效络合示意图

图 2　自上而下制备 CQDs

率较低。近期研究通过向电解液中加入 H_2O_2，在提高 CQDs 产率以及表面羧基含量的同时，减少了副产物的生成。相较于传统电化学法，该制备方法更加绿色环保。如图 2(c)所示，在类芬顿工艺中，表面丰富的羧基可通过—COO—Fe 键与 Fe(Ⅲ)高效络合，拓展了其在环境修复领域的应用。

1.2 自下而上合成

1.2.1 化学氧化法

化学氧化法是一种典型液相合成策略，通过硝酸、硫酸或高锰酸盐等强氧化剂解离小尺寸碳质前驱体，成功制备 CQDs[12]。该合成方法工艺流程简便，但存在催化剂难以回收，且所得产物的纯度有限。如图 3(a)所示，有研究提出通过选择性解聚木质素，再将富含纤维素与半纤维素的固体残留物水解，并将所得水解液作为前驱体，结合溶剂热法与化学氧化法合成自掺杂的 CQDs[13]。在木质素优先解聚和碳水化合物水解两步反应后，通过简单的过滤即可回收固体催化剂，同时也减少了固体副产物的残留，一定程度上解决了合成过程中副产物复杂、难以去除的问题。

1.2.2 水热法

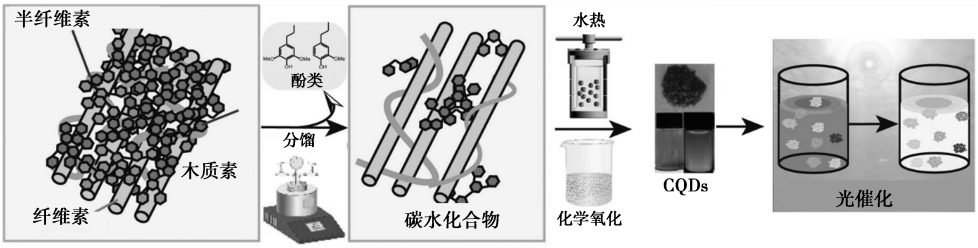
水热法是目前最常用的 CQDs 制备方法之一，如图 3(b)所示，该方法以糖类、有机酸等为前驱体，在高温高压的水热环境中，实现碳化、分子组装以及 CQDs 的表面功能化[14]。该制备过程简便，成本较低，但所获得的 CQDs 尺寸分布较宽，形貌均匀性有待提升。2022 年有研究表明，通过改变前驱体溶液填充体积，利用异相成核机制实现 CQDs 尺寸可控[15]。该方法阐明了成核与生长机理，为规模化、尺寸可控制备提供了工程化参数。

1.2.3 模板辅助法

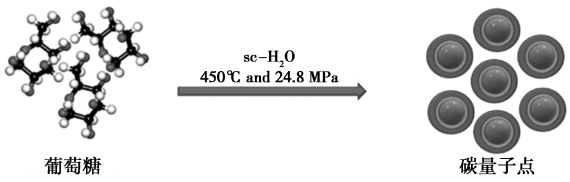
模板辅助法主要利用金属有机框架(MOFs)等具有高度有序纳米孔道的材料作为限域模板，引导碳前驱体在其内部进行可控碳化，从而制备尺寸均一、结构规整的碳量子点[16]。该方法凭借规则的孔道，能够实现对尺寸和结构的有效调控，但合成后需通过化学或物理方式去除模板。最近有研究提出一种创新策略，如图 3(c)所示，通过热解结合化学偶联的方式，将预先合成的 CQDs 与多孔模板材料 UIO-66-NH_2 共价结合，从而将传统意义上的牺牲型模板转化为功能性载体[17]。UIO-66-NH_2@CQDs 复合纳米材料具有 MOFs 的多孔结构，同时亲水性与稳定性也得到了显著提升。

1.2.4 微波辅助法

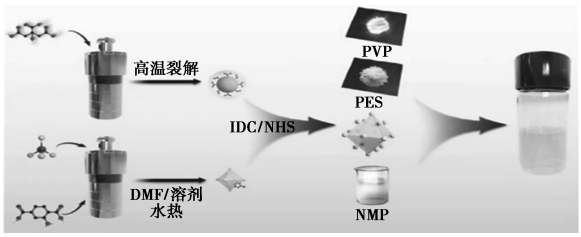
微波辅助法是一种高效的合成策略，利用电磁波的介电加热效应促使前驱体分子剧烈运动，从而



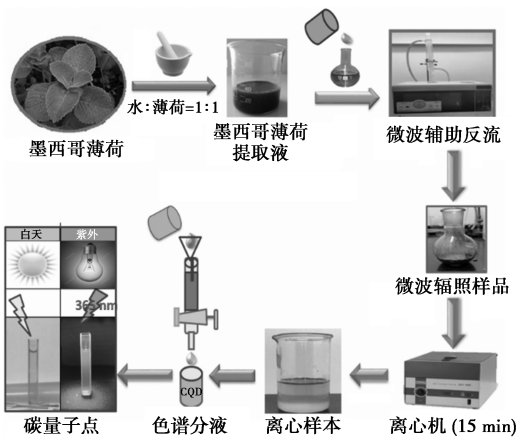
(a)解聚木质素和水解碳水化合物化学氧化合成 CQDs 示意图



(b)葡萄糖水热合成 CQDs 示意图



(c)UIO-66-NH_2@CQDs 复合纳米材料合成示意图



(d)墨西哥薄荷微波辅助回流合成 CQDs 示意图

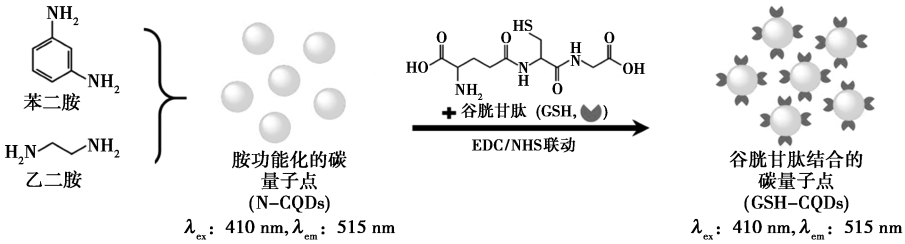
图 3 自下而上合成 CQDs

实现化学键断裂与重组,在短时间内快速制备 CQDs[18]。该方法反应时间短、能源效率高且操作简便,但在实际合成过程中需多步处理,以及表面修饰。如图 3(d)所示,Architha 等[19]采用墨西哥薄荷作为碳前驱体,直接一步微波辅助回流法碳化,形成可作为高选择性“Turn-off”荧光探针的 CQDs。

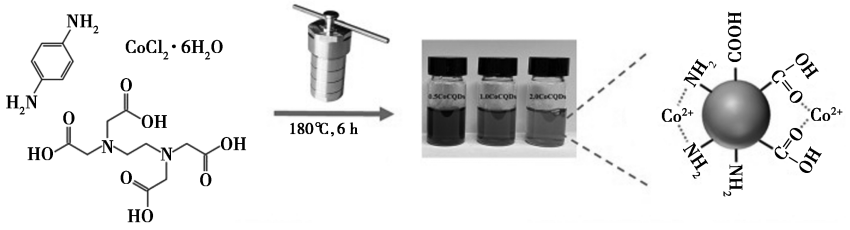
2　碳量子点的性能调控

CQDs 物理化学性质的优化依赖于对微观结构的精确调控,主要通过共价修饰、配位修饰及杂原子掺杂等策略实现。通过共价键、配位键或 π-π 相互作用在 CQDs 表面引入特定官能团,以精准调控光学性质与界面行为。例如,利用 CQDs 表面的氨基与其他聚合物上的羧基发生共价键耦合,使其对特定目标分子具有敏锐识别能力,表现优异的光学性能。如图 4(a)所示,谷胱甘肽通过共价修饰 N-CQDs 表面氨基,生成 GSH-CQDs,实现了对左旋多巴的高选择性、高灵敏度检测[20]。随着左旋多巴浓度的增加,传感器 GSH-CQDs 的绿色荧光逐渐熄灭,在 365 nm 紫外线照射下,溶液颜色也变为黄色。除共价键外,配位作用也是一种有效的修饰策略。如图 4(b)所示,Co^{2+}在高温水热条件下与 CQDs 表面的 O、N 原子配位,形成 Co—O 和 Co—N 配位键[21]。CoCQDs 通过两步电沉积法形成 NiCo@LDH 电极,在 5 A/g 电流密度下 6 000 次循环后保持率达 84.6%,表现出极佳的循环稳定性。上述表面修饰策略显著提升了 CQDs 的识别特异性、检测灵敏度及电化学稳定性。

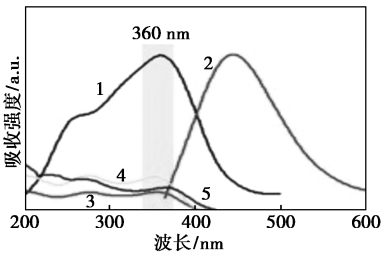
异原子掺杂则是通过引入氮、硼、硫等杂原子,可有效改变碳骨架的电荷分布,创建新的能级,从而精确调控带隙与表面化学性质。例如,Wang 等[22]利用葡萄糖作为碳源,乙二胺作为氮源,通过水热法制备了 N-CQDs。如图 4(c)所示,N-CQDs 基于内滤效应(IFE)对四环素(TC)、土霉素(OTC)和金霉素(CTC)实现了高灵敏度检测。除了上述单一原子掺杂,还有多原子的共掺杂。如图 4(d)所示,Riaz 等[23]利用抗坏血酸作为前驱体,过硫酸铵作为氮硫掺杂源,同样通过水热法合成了 N,S-CQDs。将 N,S-CQDs 运用在全天候太阳能电池的光阳极上,在黑暗条件下光电转换效率也高达 18.7%。杂原子掺杂可定向优化 CQDs 的带隙、表面态及电荷转移电阻,显著提升光电性能。



(a)谷胱甘肽共价修饰 N-CQDs

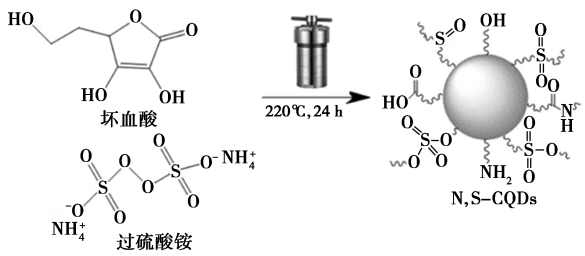


(b)Co^{2+}配位修饰 CQDs



1—EX;2—EM;3—TC;4—OTC;5—CTC

(c)N-CQDs 高效检测 TC/OTC/CTC 原理



(d)N,S-CQDs 合成示意图

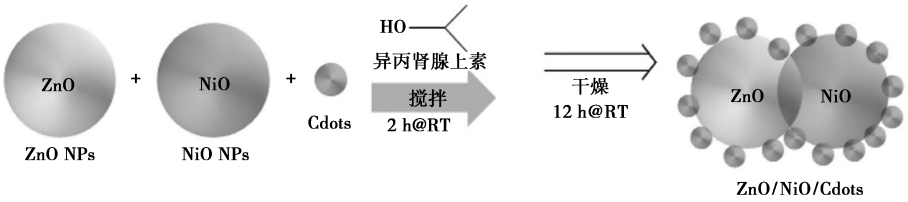
图 4　CQDs 的性能调控策略

3 碳量子点在染料敏化太阳能电池中的应用

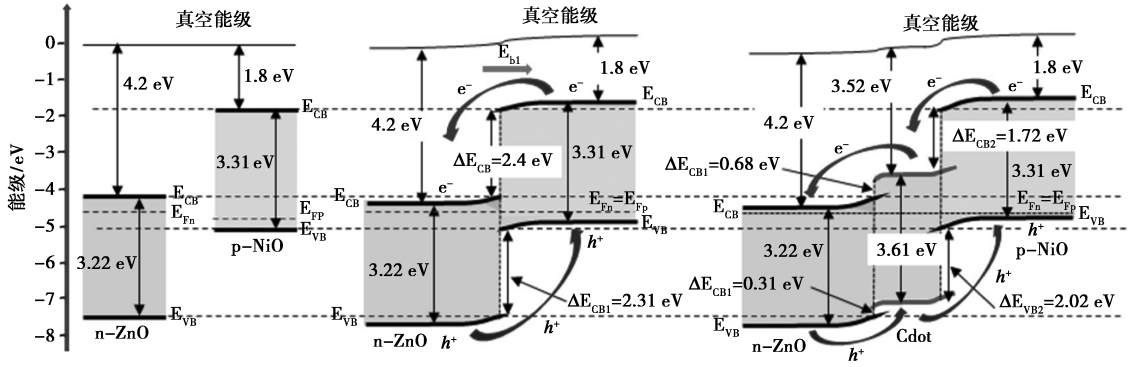
在大规模应用过程中发现，DSSCs 仍需要面临诸多长期存在的挑战，比如，敏化剂的光子吸收能力有限、光阳极电子提取效率低下、对电极导电性不足以及整体器件的效率与稳定性不佳等。为应对上述问题，引入碳基纳米材料构建高性能光电器件。CQDs 因能级可调、光吸收能力强，具备良好的电子激发与传输特性，被认为是光电子转移与能量存储领域极具潜力的新型材料[24]。正因为 CQDs 优异的光电特性，所以在 DSSC 的多个核心部件中得到了广泛应用，包括光阳极、对电极以及染料敏化剂。

3.1 碳量子点修饰光阳极

光阳极作为染料载体和电子受体，以及电子的传输通道，其性能直接决定了太阳能电池的光吸收与电子传递效率。为解决光阳极电子传输阻力大，电子-空穴对易复合的难题，如图 5(a)所示，Geleta 等[25]构建了 p-NiO/n-ZnO 异质结，并掺杂 CQDs 制备复合光阳极，用于提升染料敏化太阳能电池整体性能。如图 5(b)所示，CQDs 主要作为电荷传输桥接剂，建立了新的能级结构，显著降低了 n-ZnO 与 p-NiO 界面的电荷传输阻力，有利于光生电荷的分离与输运，同时也延长了电子寿命，抑制了电子-空穴复合，从而使电池的光电转换效率提升至 13.02%。



(a) ZnO/NiO/Cdot 纳米复合材料的合成方案



(b) ZnO/NiO/Cdot 能级桥接示意图

图 5 CQDs 修饰 DSSCs 光阳极

针对光吸收范围窄的难题，Sharif 等[26]采用不同浓度 CQDs 溶液浸渍 TiO_2 光阳极，成功构建了 CQDs/TiO_2 复合电极用于染料敏化太阳能电池。该研究通过构建 Ti—O—C 键引入中间能级，并在表面产生量子限域效应，从而显著降低 TiO_2 的带隙，有效拓宽了器件的光谱响应范围，扩展光吸收范围至可见光区，提升 DSSCs 的光电转换效率。

3.2 碳量子点修饰对电极

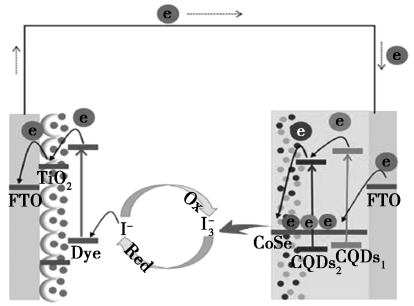
在 DSSCs 中，对电极具有双重功能：一是收集外电路电子，二是催化电解质离子还原，其性能直接影响电荷的转换效率。针对新型双面染料敏化太阳能电池中透明对电极存在的催化活性不足、电子收集能力弱等问题，如图 6(a)所示，Duan 等[27]将 2 种具有能级梯度的光活性碳量子点，利用电沉积的方法在透明 CoSe 对电极表面构建了 $CQDs_{12}$-CoSe 复合对电极。该结构在光照下有效提升了电极表面的电子密度，显著增强了对电解液中 I_3^- 还原的催化电流，同时降低了电荷转移电阻，最终实现了电池正面与背面光电转换效率的同步提升。同样，Zhang 等[28]采用硫掺杂碳量子点(S-CQDs)同时对 CoSe、RuSe 等多种透明对电极进行修饰。S-CQDs 的光生电子效应与其表面的 C-S 官能团产生协同作用，共同增强了对电极的催化反应动力学，如图 6(b)所示，显著降低了界面电荷传输阻抗，从而大幅提升了双面染料敏化太阳能电池的光电转换效率。

3.3 碳量子点作为 DSSC 中的敏化剂

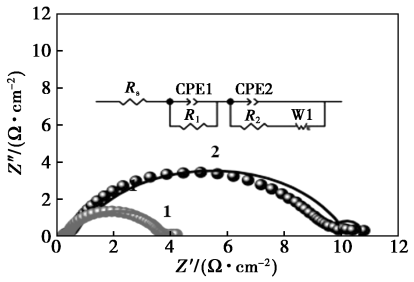
在 DSSCs 中，敏化剂的核心作用是吸光并产生电子-空穴对，进而将电子注入光阳极导带。目前主流钌(Ru)基敏化剂虽效率高，但依赖贵金属 Ru，成本高昂。CQDs 作为一种碳纳米材料，具有能级

可调、稳定性好、成本低等优势,被视为潜力显著的绿色敏化剂替代方案。

CQDs 具有宽光谱吸收能力,原因是碳核的 π-π 跃迁以及表面 C═O、C═N 等官能团的 n-π 跃迁,更为关键的是,CQDs 的能级结构能与 DSSCs 的对电极和光阳极的能级实现良好的匹配。上述章节已经叙述,氮掺杂碳量子点(N-CQDs)能够引入新的表面态、缩小带隙,同时增强可见光吸收并提高电子注入效率。其中,Shejale 等[29]的研究表明,如图 6(c)所示结构组成,当 N-CQDs 被用作 DSSC 的共敏化剂时,可在介孔 TiO_2 中为传统染料提供丰富的锚定位点,构筑导电网络以促进电荷传输。有效抑制了光阳极与电解质之间的界面复合。如图 6(d)结果所示,共敏化作用使得电池的光电转换效率提升至 8.75%,促进了其在光电转化领域的应用。

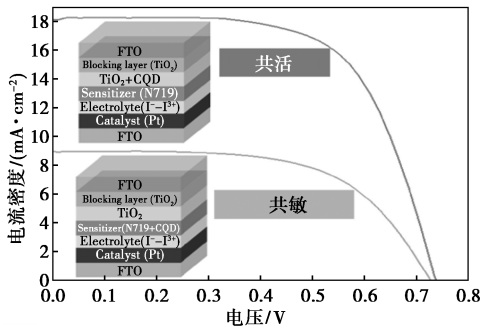


(a)CQDs12-CoSe 复合结构示意图

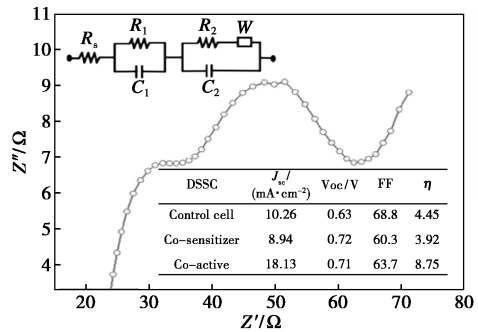


1—S-CQDs/CoSe CE;2—CoSe CE

(b)CoSe 和 S-CQDs/CoSeEIS 奈奎斯特对比图



(c)N-CQDs 分别为共敏材料与共活材料器件示意图



(d)N-CQDs 为共敏材料与共活材料性能对比图

图 6　CQDs 修饰 DSSCs 对电极以及作为共敏化材料

如表 2 所示,综合说明了碳量子点作为修饰材料,修饰 DSSC 的不同部件,均具有改善效果。

表 2　碳量子点修饰染料敏化太阳能电池不同组件的性能参数

功能组件	作用机理	短路电流/(mA·cm^{-2})	开路电压/V	填充因子(FF)	光电转化效率/%
光阳极	降低电子传输阻力[25]	4.75	—	—	13.02
	拓宽光谱响应范围[26]	17.06	0.76	0.56	7.23
对电极	降低电荷转移电阻[27]	13.143(背面)	0.697(背面)	0.71(背面)	6.55(背面)
		16.797(正面)	0.732(正面)	0.69(正面)	8.54(正面)
	增强催化活性[28]	11.2(背面)	0.735(背面)	0.69(背面)	5.69(背面)
		16.6(正面)	0.771(正面)	0.71(正面)	9.15(正面)
敏化剂	匹配器件能级[29]	18.13	0.74	0.65	8.75

4　结论和展望

系统梳理了 CQDs 的主要合成策略、性能调控手段及其在 DSSCs 中的应用进展。研究表明,CQDs 可通过多种方法合成,并借助表面修饰与杂原子掺杂实现光电性质的精准调控。在 DSSCs 中,CQDs 作为光阳极修饰剂、对电极材料或敏化剂,能有效拓宽光吸收范围、促进电荷分离与传输、抑制电子-空穴复合,从而显著提升器件的光电转换效率与稳定性,展现出作为低成本、环境友好型光电材料的巨大潜力。

未来研究需从以下 4 个方面推进碳量子点的实用化进程:首先,亟需开发绿色、低成本的规模化合成工艺,以突破产业化瓶颈。其次,应通过多元素共掺杂、核壳结构设计等策略,实现对碳量子点能带结构与表面态的精准调控。再者,需将其集成至钙钛矿电池、量子点敏化电池等新兴光伏体系,并借助原位表征与理论计算,深入揭示其在复杂界面中的电荷转移动力学。最后,应拓展碳量子点在柔性、透明

及叠层光电器件中的多功能应用,以推动其在清洁能源领域的实际转化。

参考文献

[1] Tian L,Li Z,Wang P,*et al*.Carbon quantum dots for advanced electrocatalysis[J].Journal of Energy Chemistry,2021,55:279-294.

[2] Xu X,Ray R,Gu Y,*et al*.Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments[J].Journal of the American Chemical Society,2004,126(40):12736-12737.

[3] Sun Y P,Zhou B,Lin Y,*et al*.Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence[J].Journal of the American Chemical Society,2006,128(24):7756-7757.

[4] Ghosh S,Yadav R.Future of photovoltaic technologies:A comprehensive review[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2021,47:101410.

[5] Desmond L J,Phan A N,Gentile P.Critical overview on the green synthesis of carbon quantum dots and their application for cancer therapy[J].Environmental Science:Nano,2021,8(4):848-862.

[6] Lee T,Won S,Park Y,*et al*.Oxygen-less carbon nanodots with an absolute quantum yield of 80% for display applications[J].ACS Applied Nano Materials,2021,4(3):2462-2469.

[7] Biazar N,Poursalehi R,Delavari H.Optical and structural properties of carbon dots/TiO_2 nanostructures prepared via DC arc discharge in liquid[C].AIP Conference Proceedings,AIP Publishing LLC,2018,1920(1):020033.

[8] Wang X,Feng Y,Dong P,*et al*.A mini review on carbon quantum dots:Preparation,properties,and electrocatalytic application[J].Frontiers in Chemistry,2019,7:671.

[9] Shorgar N,Bhati I,Jhalora P.Laser ablation synthesis of quantum dots[M].Quantum dots.Elsevier,2023:53-75.

[10] Pho Q H,Lin L L,Rebrov E V,*et al*.Process intensification for gram-scale synthesis of N-doped carbon quantum dots immersing a microplasma jet in a gas-liquid reactor[J].Chemical Engineering Journal,2023,452:139164.

[11] Rocco D,Moldoveanu V G,Feroci M,*et al*.Electrochemical synthesis of carbon quantum dots[J].Chem Electro Chem,2023,10(3):e202201104.

[12] Rasal A S,Yadav S,Yadav A,*et al*.Carbon quantum dots for energy applications:A review[J].ACS Applied Nano Materials,2021,4(7):6515-6541.

[13] Jia Z,Hu J,Lu P,*et al*.Carbon quantum dots from carbohydrate-rich residue of birch obtained following lignin-first strategy[J].Bioresource Technology,2024,408:131206.

[14] Khan Z M S H,Saifi S,Aslam Z,*et al*.A facile one step hydrothermal synthesis of carbon quantum dots for label-free fluorescence sensing approach to detect picric acid in aqueous solution[J].Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry,2020,388:112201.

[15] Nammahachak N,Aup-Ngoen K K,Asanithi P,*et al*.Hydrothermal synthesis of carbon quantum dots with size tunability via heterogeneous nucleation[J].RSC Advances,2022,12(49):31729-31733.

[16] Kong J,Wei Y,Zhou F,*et al*.Carbon quantum dots:Properties,preparation,and applications[J].Molecules,2024,29(9):2002.

[17] Feng H,Liu J,Mu Y,*et al*.Hybrid ultrafiltration membranes based on PES and MOFs@ carbon quantum dots for improving anti-fouling performance[J].Separation and Purification Technology,2021,266:118586.

[18] Kumar P,Bhatt G,Kaur R,*et al*.Synthesis and modulation of the optical properties of carbon quantum dots using microwave radiation[J].Fullerenes,Nanotubes and Carbon Nanostructures,2020,28(9):724-731.

[19] Architha N,Ragupathi M,Shobana C,*et al*.Microwave-assisted green synthesis of fluorescent carbon quantum dots from Mexican Mint extract for Fe^{3+} detection and bio-imaging applications[J].Environmental Research,2021,199:111263.

[20] Park S W,Kim T E,Jung Y K.Glutathione-decorated fluorescent carbon quantum dots for sensitive and selective detection of levodopa[J].Analytica Chimica Acta,2021,1165:338513.

[21] Chen Q,Pan H,Chen Z,*et al*.Cobalt coordinated carbon quantum dots boosting the performance of NiCo-LDH for energy storage[J].Journal of Colloid and Interface Science,2024,655:110-119.

[22] Wang C,Sun Q,Yang M,*et al*.Preparation of highly luminescent nitrogen-doped carbon quantum dots and their detection of tetracycline antibiotics[J].Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2022,653:129982.

[23] Riaz S,Khan F,Raza Z A,*et al*.N,S-doped carbon quantum dot for long persistence phosphor assisted all-weather solar cells[J].Materials Today Energy,2023,37:101375.

[24] Rasal A S,Chen Y H,Dehvari K,*et al*.Efficient quantum-dot-sensitized solar cells with improved stability using thixotropic polymer/nanoparticles-based gel electrolyte[J].Materials Today Energy,2021,19:100615.

[25] Geleta T A,Imae T.Nanocomposite photoanodes consisting of p-NiO/n-ZnO heterojunction and carbon quantum dot additive for dye-sensitized solar cells[J].ACS Applied Nano Materials,2021,4(1):236-249.

[26] Sharif N F M,Shafie S,Ab Kadir M Z A,*et al*.TiO_2 photoelectrode band gap modification using carbon quantum dots (CQDs) for dye-sensitised solar cells (DSSCs)[J].Key Engineering Materials,2022,908:265-270.

[27] Duan J,Zhao Y,He B,*et al*.Efficiency enhancement of bifacial dye-sensitized solar cells through bi-tandem carbon quantum dots tailored transparent counter electrodes[J].Electrochimica Acta,2018,278:204-209.

[28] Zhang Y,Zhao Y,Duan J,*et al*.S-doped CQDs tailored transparent counter electrodes for high-efficiency bifacial dye-sensitized solar cells[J].Electrochimica Acta,2018,261:588-595.

[29] Shejale K P,Jaiswal A,Kumar A,*et al*.Nitrogen doped carbon quantum dots as Co-active materials for highly efficient dye sensitized solar cells[J].Carbon,2021,183:169-175.■

(上接第 85 页)

[23] Zhang B,Huang S,Li Y,*et al*.Highly dispersed Cu on hollow spherical CeO_2:An efficient and stable catalyst for the RWGS reaction[J].Applied Catalysis B:Environment and Energy,2025,366:125003.

[24] Wang X,Xia W,Zhang Y,*et al*.Tailoring CeO_2 catalysts via oxygen vacancies and Ni loading:Boosting RWGS reaction performance and uncovering underlying mechanisms[J].Molecular Catalysis,2026,589:115615.

[25] Mordekovitz Y,Shelly L,Rosen B A,*et al*.Surface properties of Ca,Ti-doped CeO_2 and their influence on the reverse water-gas shift reaction[J].Journal of the American Ceramic Society,2021,104(5):2337-2347.

[26] Lu B,Kawamoto K.Preparation of mesoporous CeO_2 and monodispersed NiO particles in CeO_2,and enhanced selectivity of NiO/CeO_2 for reverse water gas shift reaction[J].Materials Research Bulletin,2014,53:70-78.

[27] Jiang H,Wang L,Wang C,*et al*.Accelerating reverse water gas shift reaction through synergistic CO_2 and H_2 activation on Ru-Fe-(VO-in-CeO_2) ternary catalytic centers[J].Nano Letters,2025,25(9):3579-3587.■