

# Synthesis and Applications of Carbon Quantum Dots

Mingfu Ye<sup>1\*</sup>, Bingcai Chen<sup>1</sup>, Chao Fang<sup>1</sup>, Yanhong Wu<sup>2</sup>, Guochang Chen<sup>1</sup>, Xiangrong Kong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Hexian Development Institute of Chemical Industry, Anhui University of Technology, Maanshan Anhui

<sup>2</sup>Shandong Huayu University of Technology, Dezhou Shandong

<sup>3</sup>Beijing Building Materials Sciences Research Academy, Beijing

Email: yemingfu@ahut.edu.cn

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Carbon quantum dots (CQDs), a novel class of carbon nanomaterials, have received wide attention due to their strong quantum confinement effect and stable photoluminescence property. This article reviews the different synthetic methodologies to achieve good performance of CQDs. At the same time, the applications of CQDs are also reviewed in the article.

## Keywords

Carbon Quantum Dots, Nanomaterials, Preparation Methods, Applications

---

# 碳量子点的制备与应用

叶明富<sup>1\*</sup>, 陈丙才<sup>1</sup>, 方超<sup>1</sup>, 吴延红<sup>2</sup>, 陈国昌<sup>1</sup>, 孔祥荣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>安徽工业大学和县化工产业发展研究院化学与化工学院, 安徽 马鞍山

<sup>2</sup>山东华宇工学院, 山东 德州

<sup>3</sup>北京建筑材料科学研究总院有限公司, 北京

Email: yemingfu@ahut.edu.cn

收稿日期: 2017年7月10日; 录用日期: 2017年7月23日; 发布日期: 2017年7月26日

---

## 摘要

碳量子点(Carbon quantum dots, CQDs)是一种新型的碳纳米材料, 因其强的量子限域效应和稳定的荧

\*通讯作者。

光性能等一系列优异性能,吸引了化学、物理、材料和生物等领域科学家的广泛关注。本文主要综述了CQDs的不同合成方法及其应用。

## 关键词

碳量子点, 纳米材料, 制备方法, 应用

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当材料进入纳米尺度范围时,它们将会具有量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应和量子隧道效应等特性,从而表现出与普通块体材料迥异的物理化学性能,受到广大科研工作者的广泛关注[1]。其中,碳纳米材料成为绿色纳米技术中最具有研究活力和发展潜力的一类纳米材料。碳纳米材料形态多样且具备优异的导电性、良好的生物相容性、稳定的化学性能和大的比表面积等优势,在纳米电子学、光学、催化化学、生物医学以及传感器等领域中得到广泛应用[2]。碳量子点(carbon quantum dots, CQDs)于2004年由 Scrivens 课题组[3]在单壁碳纳米管的提纯过程中首次获得。2006年由 Sun 课题组[4]首次采用激光烧蚀法处理碳靶,将制得的表面钝化的强荧光纳米粒子正式命名为 CQDs。CQDs泛指一种粒径小于10 nm、具有石墨晶型或类金刚石结构的新型荧光碳纳米材料,是以碳为基本骨架、表面含有大量含氧基团的单分散类球形纳米颗粒[5] [6] [7]。它不仅继承了传统半导体量子点优良的光学性能,还弥补了该传统材料在细胞毒性、环境及生物危害性等方面的不足。除此之外,CQDs还因其具有良好的水溶性、化学稳定性及耐光漂白、易于表面功能化和大规模制备等特点,在体内外活体生物成像、药物传输、荧光标记、有机污染物降解、环境金属离子荧光探针、光解水制氢光催化剂及生物传感器和光电器件等方面具有重要应用潜力,引起科研工作者广泛关注[5] [6] [7]。本文综述了碳量子的合成方法及其在催化、光电领域的应用。

## 2. 碳量子点的制备

从材料学的角度分析,碳量子点的制备方法目前主要探索了两大类:自下而上法和自上而下法。自下而上的方法具体是指以小分子作为前驱体通过一系列的化学反应制备碳量子点,尽管理论上可以实现形貌可控,对碳量子点表面边界结构的修饰也比较便捷,但步骤太繁琐,对设备的要求也比较高,例如溶液化学法、微波法等。自上而下的方法的主体思路是通过物理或化学的方法将大尺寸的二维碳网平面结构切割成小尺寸的碳量子点。目前主要采用具有大尺寸的石墨烯薄片的原材料,水热法、电化学氧化法、激光刻蚀法都是自上而下的典型代表。自上而下的方法步骤相对简单,可以通过调节各自的反应参数达到对产物尺寸的调控,而对边界结构的控制通常是不容易实现的,导致其荧光性能难以严格调控。

### 2.1. 水热法

水热法是一种低成本、环境友好并且无毒的从多种多样的前驱体中合成新型碳材料的方法。通常是由一种有机前驱体在高温下在水热反应釜中发生反应,用于水热反应制成碳量子点的前驱体种类很多,它们可以是壳聚糖、葡萄糖、柠檬酸、落叶松、香蕉汁、橘子汁、蛋白质等[8]-[13]。Mohapatra 课题组

[12]报道了以橘子汁为前驱体,通过一步水热反应制备碳量子点的方法,制备出的碳量子点有高达 26% 的量子产率。这些碳量子点的尺寸范围为 1.5~4.5 nm,由于光稳定性和低毒性常被用作生物成像。Liu 课题组[10]报道了进一步法制备氨基化荧光碳量子点的方法,水热反应条件是在 180℃ 下反应 12 h,制备的碳量子点可以直接用作新的生物成像剂。

## 2.2. 微波法

微波可以快速加热碳水化合物,因为设备要求低、反应时间短,所以不少研究者尝试用微波法来制备碳量子点。Yang 课题组[14]首先尝试采用微波法制备碳量子点(图 1),他们以糖类碳水化合物作碳源,将其溶于聚乙二醇(PEG-200),置于微波炉中加热反应一定时间,溶液颜色逐渐变深,加水稀释后获得具有荧光性能的碳量子点。微波加热时间的控制对碳量子点的粒径及其荧光性能影响显著,微波 5 min 得到的碳量子点粒径略小,量子产率为 3.1%,而微波 10 min 后获得碳量子点的粒径较大,荧光量子产率也相对较高。若反应中不加钝化剂聚乙二醇也可得到碳量子点,但其荧光性能非常弱。Pramanik 课题组[15]则使用 100 W 微波炉处理蔗糖与磷酸混合液,微波加热 220 s 后一步获得碳量子点。该碳量子点的平均粒径在 3~10 nm,紫外光激发下显示绿色荧光,通过荧光素的表面功能化处理可以提高碳量子点的最大荧光强度。Ghosh 课题组[16]直接用 PEG-200 和超纯水混合(V/V = 3: 1),经 900 W 的微波炉加热后制得碳量子点。

微波法制备碳量子点对选别要求非常低,而且合成周期短,因此有不少研究者尝试更换碳源来制备碳量子点,如 Lau 课题组[17]采用葡萄糖作唯一碳源, Sun 课题组[18]使用面粉等。微波法不足之处在于制得碳量子点的粒径分布不均匀,可控性较差。

## 2.3. 超声波合成法

超声可产生交替的高压和低压波,这种空化作用可产生短暂的高能环境,促使反应物发生化学反应,或者使大颗粒物粉碎。因此,部分研究者采用超声波法制备碳量子点。Kang 课题组[19]以活性炭为原料,加入双氧水,然后在 300 W 超声仪下超声处理 2 h,过滤除去无荧光的杂质,最后得到粒径在 5~10 nm 的碳量子点。同时该研究显示,控制超声时间可改变碳量子点的粒径和微观形貌。在后期研究中, Kang 课题组[20]选用葡萄糖作碳源,将葡萄糖分散于高纯水中,加入 50 ml 氢氧化钠溶液(1 mol·L<sup>-1</sup>)或盐酸(36~38 wt%),超声处理 4 h 后,经分离、纯化后获得粒径小于 5 nm 的碳量子点,其荧光量子产率为 7%。Kang 课题组[21]分别以单壁、多壁碳纳米管及石墨为原料,与硫酸与硝酸混合液(V/V = 3: 1)混合超声处理 30 min 后,在 80℃ 回流处理 24 h,经过滤、透析等分离手段,得到大小为 3~4 nm 的 CQDs。3 种 CQDs 具有相似的光学性质:在紫外可见光区具有较宽的吸收;当激发波长为 460 nm 时,具有最大发射强度,且最佳发射波长为 535 nm;在紫外光照下,制备的 CQDs 具有明亮的黄色荧光,量子产率约为 3.6%。

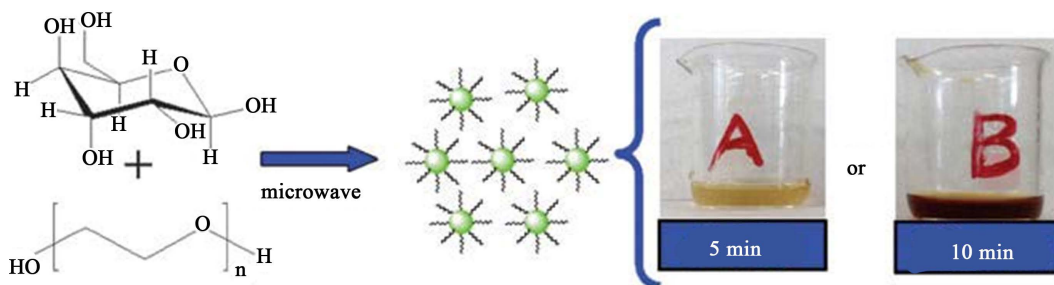


Figure 1. Carbon microwave quantum dots [14]

图 1. 微波法制备碳量子点[14]

## 2.4. 溶剂热法

溶剂热法是以有机溶剂为反应介质，以某些有机小分子作为碳源，在一定的温度下进行反应制备 CQDs 的合成方法。Li 课题组[22]以蔗糖为前驱体，油酸为溶剂，通过溶剂热法宏量制备了单分散碳量子点的(图 2)，该方法制备简单，5 min 内即可完成，同时该法具有一定的普适性，如麦芽糖、鼠李糖等其他前驱体亦可通过该方法制备 CQDs。此外，该法制备的 CQDs 无需表面钝化，荧光量子产率高达 21.8%，且具有良好的光稳定性，已成功应用于细胞成像。Li 课题组[23]在加热回流乙二醇和三氯甲烷条件下，通过不同的加热时间成功制备出来具有多种颜色的 CQDs，并应用于 pH 值传感器。Giannelis 课题组[24]通过热分解低熔点分子一步合成表面修饰的亲油性或亲水性的 CQDs。该方法的优势在于可以精确控制 CQDs 的表面状态，通过仔细选择碳源分子以及表面修饰物的种类，对 CQDs 的形貌和物理性质进行控制。

## 2.5. 电化学法

电化学法主要是利用大体积的碳材料为前驱体碳源作为工作电极而制备碳量子点。2007 年 Ding 课题组等[25]首次开创性提出采用电化学氧化多壁碳纳米管(MWCNTs)法制备 CQDs，以 MWCNTs 为工作电极、铂丝为对电极、Ag/AgClO<sub>4</sub>为参比电极、四丁基高氯酸铵的乙腈溶液(0.1 mol·L<sup>-1</sup>)作为电解液，随着体系时间的增加，溶液逐渐由无色转变为深棕色。溶液经分离、纯化等得到了粒径为 2.8 ± 0.5 nm，荧光量子产率为 6.4%的碳量子点。Loh 课题组[26]考虑到离子液体的特性，用离子液体来替代有机溶剂，用辅助电化学法剥脱石墨电极合成了 CQDs。相比于 Ding 课题组[25]的工作，该方法相对环保，同时实验结果研究表明，只要简单改变离子液体与水的比例就可以合成不同形态的碳纳米材料，并可实现 CQDs 的荧光发射波长从紫外区到可见光区的调控。Lee 课题组[27]在电流强度为 10~200 mA·cm<sup>-2</sup>的条件下，NaOH/EtOH 为电解质，以石墨棒作为阳极、阴极，制备出粒径小于 4 nm 的 CQDs。在不同的电流强度下，合成出可以发射出蓝光、绿光、黄光和棕色光的四种不同粒径大小的 CQDs，该法制备的 CQDs 的量子产率为 12%。

## 2.6. 激光烧蚀法

Sun 课题组在以氩气作为载气的水蒸气(75 KPa, 900°C)的环境下激光烧蚀碳源制备 CQDs [4] [28]。制备的 CQDs 在硝酸中加热回流 12 h，通过连接简单的有机物如 PPEI-EI、PEG 1500 N 来达到表面的钝化 [28]。酸处理过的碳量子点能够发出明亮的荧光。Du 课题组[29]将碳材料悬浮分散于有机溶剂中，用激光照射该溶液即得 CQDs。通过选择有机溶剂，CQDs 的表面可以被改变以发射不同波长的光。通过可控实验，CQDs 表面的荧光来源于其表面连接的不同配体。Naoto 课题组[30]报道了一种简单的激光烧蚀法制备 CQDs，该方法用纳米碳作为初始材料，以简单的溶剂作为溶剂介质，称取 0.02 g 的纳米碳分散

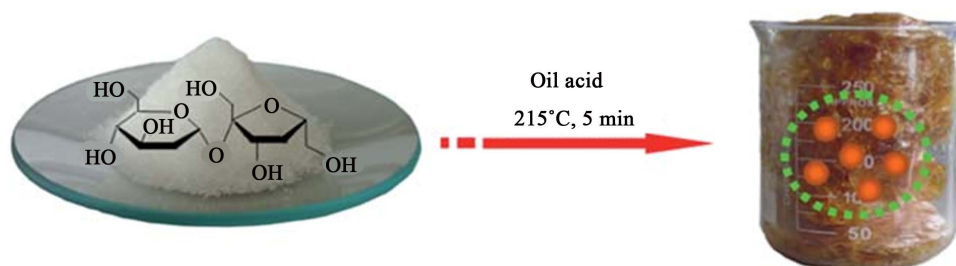


Figure 2. A diagram of the principle of carbon quantum dot (CQDs) based on sucrose [22]

图 2. 以蔗糖为原料制备碳量子点原理示意图(橙色圆点代表 CQDs) [22]



到 50 ml 的溶剂(譬如水、乙醇或丙酮)中, 超声分散之后, 取 4 ml 的悬浮液滴在玻璃槽中激光烧蚀, 激光采用 Nd: YAG 的脉冲激光与 532 nm 的二次谐波。经过激光烧蚀, 通过离心分离得到的上清液即为 CQDs。

## 2.7. 电弧放电法

首先采用电弧放电法的是 CQDs 的发现者 Scrivens 课题组。2004 年 Scrivens 课题组[3]在用电弧放电法制备单壁碳纳米管(SWCNTs)时, 先利用硝酸处理初产物烟灰, 再通过凝胶电泳分离 SWCNTs, 结果无意中发现在最先分离出来的材料在紫外灯照射下有荧光。在进一步的电泳分离后, 得到了三种荧光纳米材料, 使用 366 nm 的光源激发后, 这三种纳米材料分别显示蓝绿色, 黄色和橘红色荧光, 其中发射黄色荧光的纳米材料经检测, 其粒径在 0.96 nm 左右, 量子产率较低, 仅为 1.6%。2005 年 Mustelin 课题组[31]利用表面活性剂(十二烷基硫酸钠)溶液分散电弧放电法获得的酸氧化碳纳米管, 经过 5 min 超声处理, 最后离心分离制得碳量子点。2011 年 Sun 课题组[32]以纯石墨棒为碳源, 同样采用电弧放电法, 粗产物利用硝酸( $2.6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )回流处理 12 h, 通过透析提纯和离心分离, 最终获得碳量子点的粒径不大于 10 nm。而且试验发现, 在水溶液中, 通过氙灯照射, 碳量子点可将贵金属盐(如金或银)还原成单质, 从而形成碳量子点与贵金属核壳纳米结构。

综上所述, 各种不同的合成方法具有不同的优缺点: 电弧放电法相对比较复杂且不利于产物的收集; 激光烧蚀法合成过程复杂、所用仪器昂贵, 不够经济; 因此, 目前使用比较多方法的是水热法、微波法、超声法、溶剂热法等, 这几种方法合成过程比较简单、经济且绿色环保, 同时合成的 CQDs 荧光量子产率较高[2] [33]。

## 3. 碳量子点的应用

作为新型的“零维”碳纳米材料, CQDs 不仅具有良好水溶性和生物相容性等特点, 还拥有发光强度高、发光范围可调、双光子吸收截面大、光稳定性好、无光闪烁、易于功能化、价格便宜、易大规模合成等无可比拟的优势, 使其在生物成像、传感器、光催化、太阳能电池等领域有着良好的应用前景[34]。

### 3.1. 光催化材料

近几年, 作为有机合成更环保的绿色替代品, 光催化材料的发展已经引起了极大的关注。对光催化材料的兴趣一部分是来源于光是一种取之不尽用之不竭的资源。但是, 高能量的紫外光和短波长的可见光可能会破坏有机物结构。CQDs 溶液捕获长光并且实现能量转换的性质为它们用于有机合成中的光催化剂提供了极好的机会。事实上, 最近一项研究表明, 较小的 CQDs (1~4 nm)是高效的近红外驱动光催化剂, 它能够高效专一的把醇类氧化成醛类, 因为它们对  $\text{H}_2\text{O}_2$  具有高的催化活性和近红外光转换性[35]。另一方面, 用电化学方法剥蚀石墨制备的较大的 CQDs (5~10 nm)能够生成光生电子, 这一性质可以被用作可见光下酸催化来催化一系列有机转换[36]。Kang 课题组[37]报道了利用 AuNP-CQD 复合纳米材料的光化学性质制作高效、高选择性的环己烷绿色氧化剂。AuNP-CQD 复合纳米材料在可见光照射下, 氧化环己烷为环己酮, 在此过程中使用  $\text{H}_2\text{O}_2$  做氧化剂, 转换率为 63.8%, 选择性为 99.9%。鉴于其在纳米复合光催化材料多功能的设计, 这种做法应该引起更多的关注, 因为它可以为高性能的光催化剂和化学工业绿色合成路线提供一种更好的解决方案。

作为最受欢迎的光催化材料,  $\text{TiO}_2$  已经用于有机污染物的去除和水解制氢[38]。然而, 光催化效率最大的缺点在于不能充分的利用光源中的可见光部分。由于  $\text{TiO}_2$  的带隙在紫外区域(3.0~3.2 eV), 仅仅能够利用不到 5% 的太阳光。因此, 通过选择合适带隙的物质构造出基于  $\text{TiO}_2$  的纳米材料提高  $\text{TiO}_2$  的光催化性能是一种可行的途径。鉴于 CQDs 优异的光学性质, 特别是上转换荧光性质, 一种 CQDs 和  $\text{TiO}_2$  复

合的光催化材料有望能够高效的利用全光谱的太阳能。Lee 课题组通过降解亚甲基蓝试验,发现在可见光照射下 50 mg/L 的亚甲基蓝能在 25 min 内降解完,而相同试验条件下纯  $\text{TiO}_2$  仅仅降解了不到 5% [27]。

### 3.2. 光电领域应用

Ozin 课题组[39]通过硫酸脱水氧化  $\gamma$ -丁内酯一步合成富含羟基、羧基和磺酸基的 CQDs,并以 CQDs 作为  $\text{TiO}_2$  的增敏剂,在特定设备上的短路电流为  $0.53 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,填充因子为 0.64,开路电压为 0.38 V,总功率转换效率为 0.13%,而未敏化的  $\text{TiO}_2$  纳米晶的总功率转换效率仅有 0.03%。Wang 课题组[40]分别使用 1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐和 1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐作为离子溶液辅助电化学剥离法制备 CQDs,同时将合成的两种 CQDs 用于制备染料敏化太阳能电池,其能量转换效率分别达到 2.71%和 2.41%。Ma 课题组[41]是最早将 CQDs 应用于发光二极管(LED),该课题组以柠檬酸为碳源,制备出高荧光量子产率的 CQDs,该 CQDs 在 407 nm 光源激发下,可以实现对可见光区发射的全覆盖,将其应用于制备发白光的 LED,在电流密度为  $5 \text{ Ma}/\text{cm}^2$  时,该 LED 的最大外量子效率达到 0.083%。Lin 课题组[42]利用苯二胺的同分异构体在  $180^\circ\text{C}$  溶剂热法的条件下,制备出三基色的 CQDs (图 3),即:由对苯二胺制备出发红光的 CQDs、由邻苯二胺制备出发绿光的 CQDs、由间苯二胺制备出发蓝光的 CQDs,通过调节不同比例的三种 CQDs,制备出多种颜色的 PVA 膜,其为制备三基色的 CQDs 在 LED 上的应用提供了可能性。

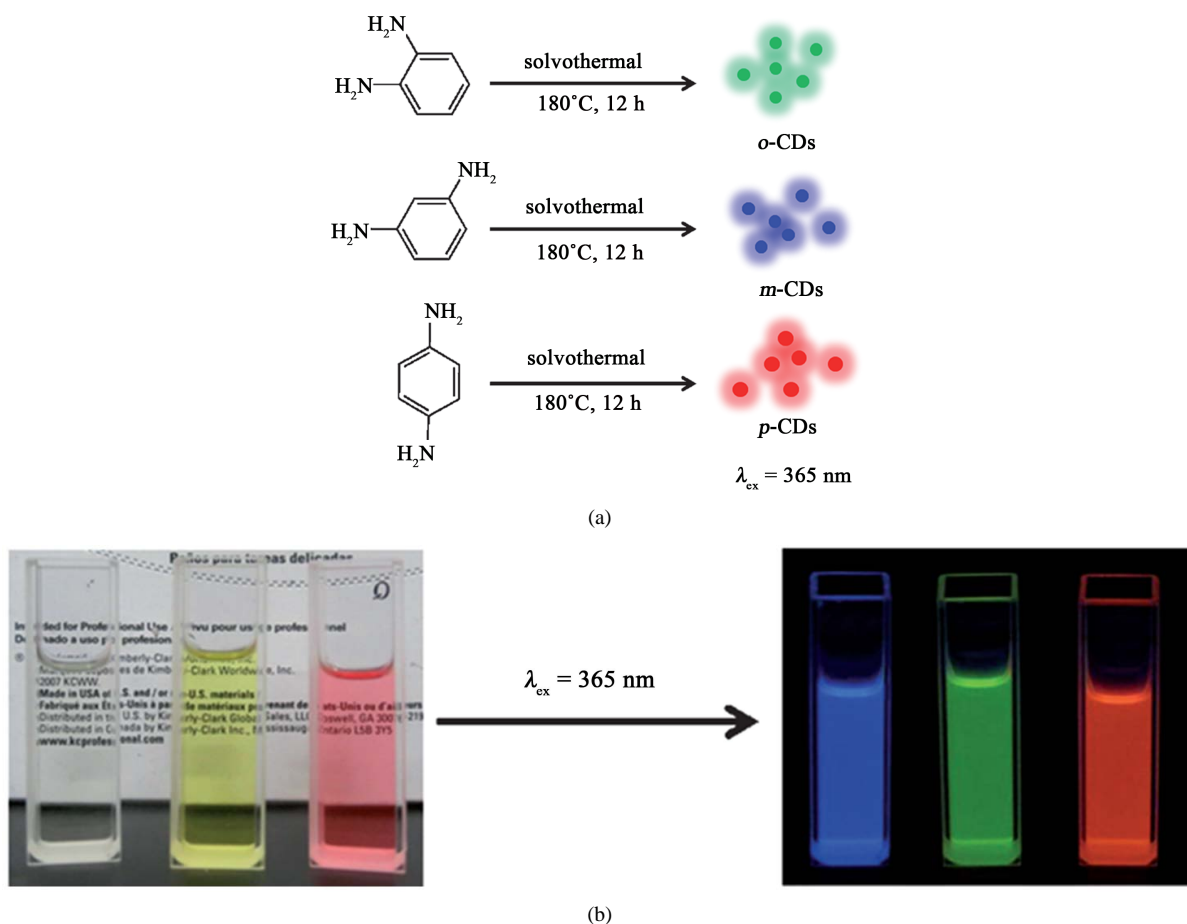


Figure 3. The preparation of trichromatic carbon quantum dots and full-color fluorescence films [42]

图 3. 三原色碳量子点及全色荧光薄膜的制备[42]

## 4. 结论与展望

自从2004年首次发现CQDs以来,人们发现了一系列简单、经济、高效的合成CQDs的方法。本文总结了最近几年碳量子点领域的进展,主要介绍了CQDs合成方法及其在催化、光电领域等方面的应用。尽管提出了一系列CQDs的合成方法,但是CQDs的合成还存在一定的缺点或限制,例如CQDs的量子产率一直相对较低,结构和尺寸的可控合成和大规模合成仍难以实现。因此,寻找一种简单、绿色、结构和尺寸可控的合成CQDs的方法对CQDs的机理研究和应用是至关重要的。相比于其他碳纳米材料,CQDs在很多领域(如压电、热电等)都还未涉及,因此,扩大CQDs在其他领域的研究应用,将会不断地推动CQDs的发展。总之,随着CQDs的合成与应用研究的不断深入,上述存在的问题将会不断地被解决,同时,其新的应用领域与新的性质也将会不断地被开发。

## 基金项目

安徽省自然科学基金项目(1608085QF156);国家自然科学基金项目(21376005);安徽工业大学研究生创新研究基金(2016005, 2016008);高校优秀中青年骨干人才国内外访学研修重点项目(gxfxZD2016053)。

## 参考文献 (References)

- [1] 叶明富, 逯亚飞, 董琦, 等. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米材料的制备与应用[J]. 中国陶瓷, 2014, 50(12): 9-13.
- [2] 黄启同, 林小凤, 李飞明, 等. 碳量子点的合成与应用[J]. 化学进展, 2015, 27(11): 1604-1614.
- [3] Xu, X., Ray, R., Gu, Y., *et al.* (2004) Electrophoretic Analysis and Purification of Fluorescent Single-Walled Carbon Nanotube Fragments. *Journal of the American Chemical Society*, **126**, 12736-12737. <https://doi.org/10.1021/ja040082h>
- [4] Sun, Y.P., Zhou, B., Lin, Y., *et al.* (2006) Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence. *Journal of the American Chemical Society*, **128**, 7756-7757. <https://doi.org/10.1021/ja062677d>
- [5] Lim, S.Y., Shen, W. and Gao, Z. (2015) Carbon Quantum Dots and Their Applications. *Chemical Society Reviews*, **44**, 362-381. <https://doi.org/10.1039/C4CS00269E>
- [6] Tan, L.F., Huang, G.B., Liu, T.L., *et al.* (2016) Synthesis of Highly Bright Oil-Soluble Carbon Quantum Dots by Hot-Injection Method with N and B Co-Doping. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **16**, 2642-2657. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.10936>
- [7] Li, X.M., Rui, M.C., Song, J.Z., *et al.* (2015) Carbon and Graphene Quantum Dots for Optoelectronic and Energy Devices: A Review. *Advanced Functional Materials*, **25**, 4929-4947. <https://doi.org/10.1002/adfm.201501250>
- [8] 王莉, 吕婷, 阮枫萍, 等. 水热法制备的荧光碳量子点[J]. 发光学报, 2014, 35(6): 706-709.
- [9] 郭璇, 莫文轩, 刘旭亮, 等. 落叶松木粉水热炭化制备碳量子点及其性能研究[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(1): 109-115.
- [10] Yang, Y.H., Cui, J.H., Zheng, M.T., *et al.* (2012) One-Step Synthesis of Amino-Functionalized Fluorescent Carbon Nanoparticles by Hydrothermal Carbonization of Chitosan. *Chemical Communications*, **48**, 380-382. <https://doi.org/10.1039/C1CC15678K>
- [11] De, B. and Karak, N. (2013) A Green and Facile Approach for the Synthesis of Water Soluble Fluorescent Carbon Dots from Banana Juice. *RSC Advances*, **3**, 8286-8290. <https://doi.org/10.1039/c3ra00088e>
- [12] Sahu, S., Behera, B., Maiti, T.K., *et al.* (2012) Simple One-Step Synthesis of Highly Luminescent Carbon Dots from Orange Juice: Application as Excellent Bio-Imaging Agents. *Chemical Communications*, **48**, 8835-8837. <https://doi.org/10.1039/c2cc33796g>
- [13] Zhang, Z., Hao, J.H., Zhang, J., *et al.* (2012) Protein as the Source for Synthesizing Fluorescent Carbon Dots by a One-Pot Hydrothermal Route. *RSC Advances*, **2**, 8599-8601. <https://doi.org/10.1039/c2ra21217j>
- [14] Zhu, H., Wang, X.L., Li, Y.L., *et al.* (2009) Microwave Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoparticles with Electrochemiluminescence Properties. *Chemical Communications*, **45**, 5118-5120. <https://doi.org/10.1039/b907612c>
- [15] Chandra, S., Das, P., Bag, S., *et al.* (2011) Synthesis, Functionalization and Bioimaging Applications of Highly Fluorescent Carbon Nanoparticles. *Nanoscale*, **3**, 1533-1540. <https://doi.org/10.1039/c0nr00735h>
- [16] Jaiswal, A., Ghosh, S.S. and Chattopadhyay, A. (2012) One Step Synthesis of C-Dots by Microwave Mediated Carbazolization of Poly (Ethylene Glycol). *Chemical Communications*, **48**, 407-409. <https://doi.org/10.1039/C1CC15988G>

- [17] Tang, L., Ji, R., Cao, X., *et al.* (2012) Deep Ultraviolet Photoluminescence of Water-Soluble Self-Passivated Graphene Quantum Dots. *ACS Nano*, **6**, 5102-5110. <https://doi.org/10.1021/nl300760g>
- [18] Qin, X.Y., Lu, W.B., Asiri, A.M., *et al.* (2013) Microwave-Assisted Rapid Green Synthesis of Photoluminescent Carbon Nanodots from Flour and Their Applications for Sensitive and Selective Detection of Mercury(II) Ions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **26**, 12-14.
- [19] Li, H.T., He, X.D., Liu, Y., *et al.* (2011) Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoparticles Directly from Active Carbon via a One-Step Ultrasonic Treatment. *Materials Research Bulletin*, **46**, 147-151.
- [20] Li, H.T., He, X.D., Liu, Y., *et al.* (2011) One-Step Ultrasonic Synthesis of Water-Soluble Carbon Nanoparticles with Excellent Photoluminescent Properties. *Carbon*, **49**, 605-609.
- [21] Tao, H., Yang, K., Ma, Z., *et al.* (2012) *In Vivo* NIR Fluorescence Imaging, Biodistribution, and Toxicology of Photoluminescent Carbon Dots Produced from Carbon Nanotubes and Graphite. *Small*, **8**, 281-290. <https://doi.org/10.1002/sml.201101706>
- [22] Chen, B.S., Li, F.M., Li, S.X., *et al.* (2013) Large Scale Synthesis of Photoluminescent Carbon Nanodots and Their Application for Bioimaging. *Nanoscale*, **5**, 1967-1971. <https://doi.org/10.1039/c2nr32675b>
- [23] Nie, H., Li, M.J., Li, Q.S., *et al.* (2014) Carbon Dots with Continuously Tunable Full-Color Emission and Their Application in Ratiometric pH Sensing. *Chemistry of Materials*, **26**, 3104-3112. <https://doi.org/10.1021/cm5003669>
- [24] Bourlinos, A.B., Stassinopoulos, A., Anglos, D., *et al.* (2008) Surface Functionalized Carbogenic Quantum Dots. *Small*, **4**, 455-458. <https://doi.org/10.1002/sml.200700578>
- [25] Zhou, J.G., Booker, C., Li, R.Y., *et al.* (2007) An Electrochemical Avenue to Blue Luminescent Nanocrystals from Multiwalled Carbon Nanotubes (MWCNTs). *Journal of the American Chemical Society*, **129**, 744-745. <https://doi.org/10.1021/ja0669070>
- [26] Lu, J., Yang, J.X., Wang, J.Z., *et al.* (2009) One-Pot Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoribbons, Nanoparticles, and Graphene by the Exfoliation of Graphite in Ionic Liquids. *ACS Nano*, **3**, 2367-2375. <https://doi.org/10.1021/nn900546b>
- [27] Li, H.T., He, X.D., Kang, Z.H., *et al.* (2010) Water-Soluble Fluorescent Carbon Quantum Dots and Photocatalyst Design. *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 4430-4434. <https://doi.org/10.1002/anie.200906154>
- [28] Cao, L., Wang, X., Mezziani, M.J., *et al.* (2007) Carbon Dots for Multiphoton Bioimaging. *Journal of the American Chemical Society*, **129**, 11318-11319. <https://doi.org/10.1021/ja0735271>
- [29] Hu, S.L., Niu, K.Y., Sun, J., *et al.* (2009) One-Step Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoparticles by Laser Irradiation. *Journal of Materials Chemistry*, **19**, 484-488. <https://doi.org/10.1039/B812943F>
- [30] Li, X.Y., Wang, H.Q., Shimizu, Y., *et al.* (2011) Preparation of Carbon Quantum Dots with Tunable Photoluminescence by Rapid Laser Passivation in Ordinary Organic Solvents. *Chemical Communications*, **47**, 932-934. <https://doi.org/10.1039/C0CC03552A>
- [31] Bottini, M., Balasubramanian, C., Dawson, M.I., *et al.* (2006) Isolation and Characterization of Fluorescent Nanoparticles from Pristine and Oxidized Electric Arc-Produced Single-Walled Carbon Nanotubes. *Journal of Physical Chemistry B*, **110**, 831-836. <https://doi.org/10.1021/jp055503b>
- [32] Xu, J., Sahu, S.Q., Cao, L., *et al.* (2011) Carbon Nanoparticles as Chromophores for Photon Harvesting and Photoconversion. *ChemPhysChem*, **12**, 3604-3608. <https://doi.org/10.1002/cphc.201100640>
- [33] 孙墨杰, 赵志海, 陈红梅, 等. 碳量子点的合成研究进展与展望[J]. 化学通报, 2016, 79(6): 691-698.
- [34] 吴腾飞, 敖燕辉, 王沛芳, 等. 碳量子点的合成和应用[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 30-35.
- [35] Li, H.T., Liu, R.H., Lian, S.Y., *et al.* (2013) Near-Infrared Light Controlled Photocatalytic Activity of Carbon Quantum Dots for Highly Selective Oxidation Reaction. *Nanoscale*, **5**, 3289-3297. <https://doi.org/10.1039/c3nr00092c>
- [36] Li, H.T., Liu, R.H., Kong, W.Q., *et al.* (2014) Carbon Quantum Dots with Photo-Generated Proton Property as Efficient Visible Light Controlled Acid Catalyst. *Nanoscale*, **6**, 867-873. <https://doi.org/10.1039/C3NR03996J>
- [37] Liu, R.H., Huang, H., Li, H.T., *et al.* (2013) Metal Nanoparticle/Carbon Quantum Dot Composite as a Photocatalyst for High-Efficiency Cyclohexane Oxidation. *ACS Catalysis*, **4**, 328-336. <https://doi.org/10.1021/cs400913h>
- [38] Chen, X. and Mao, S.S. (2007) Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, **107**, 2891-2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
- [39] Mirtchev, P., Henderson, E.J., Soheilnia, N., *et al.* (2012) Solution Phase Synthesis of Carbon Quantum Dots as Sensitizers for Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 1265-1269. <https://doi.org/10.1039/C1JM14112K>
- [40] Xiong, H.Y., Zhang, X.H., Dong, B.H., *et al.* (2013) The Preparation of Carbon Dots/Ionic Liquids-Based Electrolytes and Their Applications in Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar. *Electrochimica Acta*, **88**, 100-106.
- [41] Wang, F., Chen, Y.H., Liu, C.Y., *et al.* (2011) White Light-Emitting Devices Based on Carbon Dots' Electroluminescence.



cence. *Chemical Communications*, **47**, 3502-3504. <https://doi.org/10.1039/c0cc05391k>

- [42] Jiang, K., Sun, S., Zhang, L., *et al.* (2015) Red, Green, and Blue Luminescence by Carbon Dots: Full-Color Emission Tuning and Multicolor Cellular Imaging. *Angewandte Chemie International Edition*, **54**, 5360-5363. <https://doi.org/10.1002/anie.201501193>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[japc@hanspub.org](mailto:japc@hanspub.org)