

生物质衍生碳点的研究进展

苏天妹*, 张 歆

浙江师范大学含氟新材料研究所, 浙江 金华

收稿日期: 2021年12月25日; 录用日期: 2022年1月8日; 发布日期: 2022年1月25日

摘 要

碳点(CDs)是近年来备受关注的一类新型纳米碳材料, 因其低生物毒性、良好的生物相容性、可调光致发光性和易修饰等优点而受到广泛应用。目前致力于研究利用成本低、环境友好和广泛可用的生物质资源来合成高质量的CDs。将低价值生物质转化为高价值碳材料CDs是减少资源浪费和实现可持续技术发展的有效途径之一。本文主要论述了以生物质为前驱体, 经过水热碳化、微波和热解碳化等简单的方法来合成CDs, 以及CDs在光学、能源和生物医学等领域的应用等相关内容。

关键词

生物质, 碳点, 荧光

Research Progress of Biomass-Derived Carbon Dots

Tianmei Su*, Xin Zhang

Institute of Advanced Fluorine-Containing Materials, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Dec. 25th, 2021; accepted: Jan. 8th, 2022; published: Jan. 25th, 2022

Abstract

Carbon dots (CDs) are a new type of nano-carbon materials that have attracted much attention in recent years. They are widely used because of their low biotoxicity, good biocompatibility, tunable photoluminescence and easy modification. At present, we are committed to research and use low-cost, environmentally friendly and widely available biomass resources to synthesize high-quality CDs. Converting low-value biomass into high-value carbon materials CDs is one of the effective ways to reduce resource waste and achieve sustainable technological development. This article

*通讯作者。

mainly discusses the synthesis of CDs using biomass as a precursor through simple methods such as hydrothermal carbonization, microwave and pyrolysis carbonization, as well as the application of CDs in the fields of optics, energy, and biomedicine.

Keywords

Biomass, Carbon Dots, Fluorescence

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

碳材料的基础研究和应用一直在化学、材料以及其他交叉学科中占据非常重要的地位。作为碳材料的新成员——碳点(CDs)更是由于其优异的性质受到了广泛关注。CDs 通常是指由 sp^2/sp^3 碳内核和外层的氧氮基团或者聚合物链组成的尺寸小于 10 nm 的新型零维碳基材料[1]。2004 年, Xu 等人[2]在使用电弧放电法分离单壁碳纳米管偶然发现了能够发光的荧光颗粒杂质。到 2006 年, Sun 等人[3]使用激光消融和聚乙二醇(PEG_{1500N})表面钝化的方法制备了荧光增强的纳米颗粒, 并把它命名为碳点(CDs)。从那之后, 关于 CDs 的研究报道逐渐增多, CDs 的优异性质也逐渐被挖掘和应用到各领域当中。近年来, 在 CDs 的合成、性质和应用方面取得了很大的进展。CDs 具有良好的光稳定性、良好的生物相容性、低毒性、优异的水溶性、可调谐的光致发光性、高量子产率和特殊的上转换性能。CDs 与生物分子功能化后, 具有较低的毒性和化学惰性, 因此可作为药物传递和生物成像的有效载体。另外该碳材料在传感器、光电子学和电化学发光方面也有很好的应用前景[4]。

但是很多人只注意 CDs 的性质和应用, 忽视了碳源的重要性。大自然提供了几乎无穷无尽的自然资源, 与芳香烃化合物等有毒有机分子相比, 生物质更安全、更便宜、更容易获得。因此生物质是制备 B-CDs 的良好碳源。由于成本低、环境友好等诸多优点, 近年来以生物质为碳源而衍生的 CDs 备受关注。其次, 含有杂原子的生物质更是制备 CDs 的最佳前体, 这有利于在合成过程中不需要外部添加杂原子的情况下就可以制备杂原子掺杂的 CDs [5]。

2. 生物质衍生碳点(B-CDs)的制备方法

制备生物质衍生碳点有两种经典的途径, 分别为自上而下和自下而上的两种方法。由于原料的多样性, 我们可以得到不同性质和结构的 CDs。在自上而下途径中, CDs 的前体来自相对宏观的碳源被切割或分解成 CDs。自下而上方法需要将碳源在高温下聚合碳化成 CDs。相对而言, 自下而上的方法产品的收率更高, 并且在合成过程中方便引入杂原子掺杂提高 CDs 的性质。目前, 已经有报道各种使用简单、经济、尺寸控制或大规模合成获得高质量的 B-CDs 的方法[6]。在自下而上的途径中, 以生物质为碳源合成 B-CDs 的常用方法主要有水热碳化法、微波和热解碳化法等, 下面将介绍这三种制备方法。

2.1. 水热碳化法

高温高压的条件下, 对生物质材料直接进行水热化学降解碳化成 CDs, 这是一种很有前途的将生物质转化为新型碳材料的技术, 具有广泛的潜在应用。这项技术相对简单, 但是反应通常需要几个小时。目前, 已经报道了用竹叶[7]、稻壳[8]、草[9]和木瓜汁[10]等生物质作为碳源可制备水溶性荧光 B-CDs。

Ding 等人[11]以木质素为原料, 经氧化裂解步骤和芳香重熔两个步骤, 成功地将通常被认为是废物的生物质转化为高价值的石墨烯量子点(GQDs)。所得的水溶性单晶 GQDs 粒径为 2~6 nm, 表现出出色的光学性能(包括高量子产率、明亮的荧光、上转换性能和荧光长期稳定性)。另外还发现可以通过调节激发波长、pH 值和横向尺寸来调节荧光性质。Wang 等人[12]通过用铂催化剂对榴莲进行水处理, 以晶格取代方式制备 GQDs 中可控的硫掺杂。在晶格掺杂的硫原子的促进作用下, 不仅实现了良好的光/化学稳定性, 而且实现了超高量子产率。并且文章还证明了榴莲中小分子量(<1000 Da)的糖类是形成 GQDs 的主要碳源, 在脱硫过程中, 可以通过调整掺杂浓度实现可控的光致发光特性。目前, 以生物质为碳源进行水热碳化法制备的 B-CDs 粒径分布较为均匀, 但量子产率有待提高。

2.2. 微波法

传统加热反应容器内部存在温度梯度, 导致不完全反应以及副产物的形成。而与传统的加热相比, 微波辅助合成具有显著的优势, 是一种高效、省时的合成 CDs 的方法, 原位和瞬时加热可以显著提高产品的产量和质量。典型的反应过程, 天然产物溶解在溶剂中, 然后在微波室中加热溶液, 后续可以分离和纯化获得 CDs, 因而也常被应用于 B-CDs 的制备。Chandra 等人[13]通过一步微波辐射法将蔗糖和磷酸在 100 W 下大概处理 4 min 得到平均粒径为 3~10 nm, 很容易进入人体血细胞中富含红细胞的部分, 并且在紫外光照射下发出亮绿色荧光的 CDs。为了进一步提高合成材料的荧光性能, 使用不同的有机染料(如荧光素、罗丹明 B 和 α -萘胺)对其进行了功能化, 被各种有机染料官能化, 可以增加 CDs 的荧光性能并降低细胞毒性。Pires 等人[14]以丰富且低成本的原材料(腰果树的分泌物, 称为腰果胶)为原料, 采用基于溶液中解聚和固体中部分碳化两个步骤的新型微波辅助方法制备了 CDs, 平均粒径尺寸为 9 nm。该反应没有采用外部钝化或功能化, 获得了具有良好量子产率的光致发光纳米颗粒。CDs 表面无毒性和负电荷, 提高了水性体系的亲水性和稳定性, 表明其可用于体内成像。该合成简单、快速、成本有效, 并且基于完全绿色的程序。微波辐照是一种重要的支撑方法, 已广泛应用于化学合成领域。已经有许多关于用生物质作为碳源, 通过微波辐射制备 B-CDs 方法的报道。近年来, 微波辐射的使用频率更高, 但频率低于水热法[5]。

2.3. 热解碳化法

热解是一种物质被热分解的反应过程, 将天然产物加热形成黑碳材料再从中分离和纯化得到 CDs。目前, 热解法已成为制备 B-CDs 的常用方法之一。Xu 等人[15]提出了一种简便且绿色的方法, 通过两步碳化过程从广泛可用的富含蛋白质的生物质前体大豆中同时合成用于超级电容器的荧光碳点和多孔活性炭。在第一个低温碳化步骤中获得了具有固有氮掺杂的荧光大豆 CDs, 而通过后续高温碳化不溶性残留物获得了具有互连微观结构的分级多孔碳。实现高比表面积所需的腐蚀性氢氧化钾相对较少, 并且氮掺杂的多孔碳具有高比电容。这项工作为充分利用生物质提供了一种完全独特的方式。Teng 等人[16]在温和条件下热解魔芋粉, 然后用乙醇和水进行简单提取 N-CDs。合成的 N-CDs 显示出低毒性和强荧光, 氮含量为 7.03%, 荧光产率为 22%。除了不同的激发波长、浓度和 pH 值外, PL 强度还可以通过用碱性氨基酸和不同分子量的非胺封端聚乙二醇进行表面钝化来改变。此外, 还研究了分别与 Fe^{3+} 和 L-赖氨酸结合用于细胞成像的“关-开”荧光行为。

3. 生物质衍生碳点(B-CDs)的应用

B-CDs 在生物医学领域具有特殊的应用, 因为具有良好的生物相容性和低毒性。这也意味着它们是环保的, 更适合大规模生产。下面列举了一些 B-CDs 的应用实例。如图 1, 它们用于生物成像、药物载

体和可用于人体的传感器。由于其独特的特性和简单的合成方法, 它们还在体外用于传感和电气用途。接下来, 将讨论 B-CDs 在传感、生物成像和催化方面的应用。

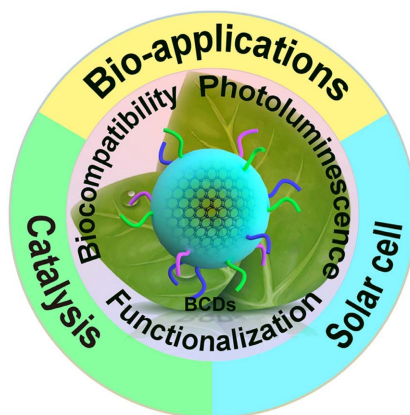


Figure 1. Excellent properties and applications of biomass-derived carbon dots [5]
图 1. 生物质衍生碳点的优异性质以及应用[5]

3.1. 传感

B-CDs 可以通过表面键合与金属离子反应形成新的电子 - 空穴复合。这一过程改变了荧光强度, 使得 B-CDs 作为可测量的响应信号[17]。高功能化的 CDs 容易与其他化学物质发生反应, 最终导致其光学性质的改变。此外, CDs 还具有发射光谱可调 and 光谱波段窄的特点, 使其成为特定传感应用的理想选择。

许多 B-CDs 已经被开发成为金属离子、阴离子和分子的直接荧光传感器。Gu 等人[18]通过简单、绿色、快速的微波方法合成了基于莲藕的氮掺杂 CDs, 而无需使用其他表面钝化剂。结果表明, 这些 CDs 具有许多突出的特性, 量子产率高达 19.0%, 对自来水中 Hg^{2+} 表现出色的灵敏度和选择性, 线性范围为 0.1~60.0 μM , 检测限为 18.7 nM, 可作为重金属离子检测探针的应用。结果表明, Hg^{2+} 对 CDs 的荧光猝灭是一个静态猝灭过程。此高选择性是由于 Hg^{2+} 比其他金属离子对 CDs 表面的羧基、羟基和氨基具有更强的亲和力和更快的螯合动力学。Liu 等人[7]通过水热法从竹叶中成功合成了高量子产率的 CDs。然后将制备好的 CDs 用支化聚乙烯亚胺封盖, 以进行灵敏和选择性的 Cu^{2+} 检测, 检测限低至 115 nM, 动态范围为 0.333~66.6 μM 。此外, 使用开发的荧光材料探针成功分析了河水, 证明了其良好的选择性和环境水样分析的巨大潜力。Yin 等人[19]使用甜椒作为碳前体来制备上转换和下转换荧光 CDs, 并且合成的 CDs 用作双读数测定传感器来检测 ClO^- 。两个连续的线性范围允许检测具有 0.05 mM 和 0.06 mM 低检测限的 ClO^- , 分别用于下转换和上转换荧光测量。在 ClO^- 存在下, CDs 表面作为还原基团的羟基被氧化。表面状态的变化导致上转换和下转换过程中的荧光猝灭。 ClO^- 通过下转换和上转换模式淬灭 CDs 荧光。 ClO^- 可以被认为是一种氧化剂来改变 CDs 的表面状态, 而其他干扰物则不能。但是, 大多数的 B-CDs 在作为传感器的应用过程中容易缺乏选择性, 受到这些具有较强荧光猝灭能力的金属离子会相互干扰的影响。因此, 未来的研究应该集中具有离子特异性的传感器的 B-CDs 合成上。

3.2. 生物成像

由于 B-CDs 比化学合成衍生的碳点具有更好的生物相容性, 更适合于生物医学应用。其他特性如小尺寸、高水溶性、光稳定性和耐光漂白等特性使其成为理想的生物成像应用[20]。Yang 等人[21]在温和的温度下对壳聚糖进行水热碳化制备了高度氨基功能化的荧光碳纳米粒子, 它们被应用于人肺腺癌 A549 细胞的生物成像, 在体外使用共聚焦显微镜测试显示其生物成像能力, 显示出低细胞毒性和优异的生物

相容性。结果表明, 光致发光点仅在细胞的细胞膜和细胞质区域观察到, 而在与细胞核相对应的中心区域非常弱, 这表明容易渗透到细胞中但没有进入细胞核。这一观察结果与之前关于活细胞与纳米材料相互作用的研究一致, 其中没有发生遗传破坏。结果进一步证实了材料的低细胞毒性。除了生物质 CDs 的生物相容性, 制备不同发射波长的 CDs 对生物成像也起着至关重要的作用。Jeong 等人[22]用芒果果作为碳源, 通过可控碳化处理合成 CDs, 表现出蓝色、绿色和黄色荧光, 可作为生物成像探针。将 CDs 注射到无胸腺裸鼠尾静脉, 观察其生物分布。结果表明, 生物分布具有大小依赖性, 小颗粒 CDs 能迅速排出体外。肝脏中可见大量体积较大的黄色发光 CDs, 膀胱中可见大量蓝色和绿色发光 CDs。通过体外成像和体内生物分布的结果, 生物相容性良好的 CDs 在生物领域显示出巨大的潜力。因此, 这些发现表明使用生物质制备荧光材料其在生物医学应用方面具有广阔的前景, 能够增强纳米技术用于人类疾病的诊断和治疗。

3.3. 催化

B-CDs 在光催化和电催化中都发挥着非常重要的作用, 包括在水性环境中催化降解有机化合物、催化燃料电池中使用的氧化还原反应以及通过分解水催化制氢等等。有机废物是对环境的主要威胁, 而有机污染物的光催化降解因其成本相对较低、操作简单且无二次污染而成为解决这一问题的有力方法。Wang 等人[23]通过一步酸辅助水热碳化处理法以葡萄糖为原料, 并将其嵌入碳基体中形成荧光 CDs。由嵌入碳基质中的荧光 CDs 组成具有成本效益的纳米颗粒碳催化剂, 在很宽的波长范围内具有出色的光致发光特性, 并且碳催化剂上的外部可见光或近红外照射可以产生电子以形成电子空穴碳催化剂表面的配对。这些静止的电子-空穴对将与吸附在基于 CDs 的碳催化剂表面的氧化剂/还原剂反应, 产生活性自由基, 用于还原 4-硝基苯酚和降解有机染料。此外, 在近红外辐射下, 碳催化剂局部温度升高可以提高有机分子与催化剂之间的电子转移速率, 从而明显提高碳催化剂对 4-硝基苯酚和 4-硝基苯酚的催化活性和染料分子的降解。这种具有优异性能和高效无金属光催化活性的 CDs 基催化剂是在可见光和近红外辐射下还原有机污染物的理想光催化剂。

Zhang 等人[24]通过简单的水热工艺, 使用干草作为唯一起始材料不使用任何合成化学品, 直接生产高质量的掺氮碳纳米点/纳米片聚集体(N-CAN), 实现 25.2% 的石墨碳产量的高产率。制造的 N-CNA 由三种类型的掺杂 N 组成, 吡啶: 吡咯: 石墨的比例为 2.6:1.7:1。实验结果表明, 对于氧化还原反应, N-CNA 在电催化活性、稳定性和抗交叉效应方面的性能优于或可与商业铂/碳电催化剂相媲美。理论研究进一步表明, 掺杂的吡啶-N 对于 N-CNA 优异的四电子氧还原反应电催化活性起着关键作用。考虑到 B-CDs 作为光催化剂主要展示其在水净化和能源领域的应用, 应该得到大规模应用。因此, 低成本和环境友好是 B-CDs 作为光催化剂的最大优势。

4. 总结与展望

B-CDs 具有低细胞毒性、低成本和优越的光学性能, 有望成为下一代绿色荧光纳米材料。水热碳化、微波、热解或电化学合成等合成方法对于避免碳质聚集和制备尺寸可控、均匀的 B-CDs 具有重要意义, 对其性能和应用具有重要意义。使用绿色生物质材料不仅可以将废弃物转化为更有价值的产品, 还可以降低生产成本, 帮助实现规模化生产 CDs 的可能性。同时, 使用绿色前体可以消除化学钝化 CDs 的需要, 因为绿色前体本身含有碳水化合物和蛋白质, 其官能团多种多样。然而, 复杂的生物质材料会导致 CDs 的异质性; 因此通常需要进一步研究分离、纯化和均质过程。近年来, 人们设计了许多低成本、高效、简单的 B-CDs 制备方法。然而, 高量子产率的 B-CDs 的报道仍然较少。此外, 提高灵敏度和选择性是一个挑战。另外基于 B-CDs 的探针有一定的局限性。例如, 随着激发波长的增加, B-CDs 的发射波段可以

向较长的波长转移, 而强度相对较低。因此, 如何合成具有良好红/近红外/上转换发射性能的生物物质 CDs, 以满足生物成像多功能应用的要求是一个重大的挑战[25]。B-CDs 的荧光特性已经在实际应用中得到了应用, 但目前还没有确切的理论来详细解释其机理。因此实验与理论的结合将成为未来研究的趋势, 希望在未来的研究中可以看到 B-CDs 有更多的性能和应用。

参考文献

- [1] Zhu, S.J., Song, Y.B., Zhao, X.H., Shao, J.R., Zhang, J.H. and Yang, B. (2015) The Photoluminescence Mechanism in Carbon Dots (Graphene Quantum Dots, Carbon Nanodots, and Polymerdots): Current State and Future Perspective. *Nano Research*, **8**, 355-381. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0644-3>
- [2] Xu, X.Y., Ray, R., Gu, Y.L., Ploehn, H.J., Gearheart, L., Raker, K. and Scrivens, W.A. (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>
- [3] Sun, Y.P., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Fernando, K.S., Pathak, P., Mezzani, M.J., Harruff, B.A., Wang, X., Wang, H.F., Luo, P.G., Yang, H., Kose, M.E., Chen, B., Veca, L.M. and Xie, S.Y. (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>
- [4] Tian, Z., Zhang, X.T., Li, D., Zhou, D., Jing, P.T., Shen, D.Z., Qu, S.N., Zboril, R. and Rogach, A.L. (2017) Full-Color Inorganic Carbon Dot Phosphors for White-Light-Emitting Diodes. *Advanced Optical Materials*, **5**, Article ID: 1700416. <https://doi.org/10.1002/adom.201700416>
- [5] Meng, W.X., Bai, X., Wang, B.Y., Liu, Z.Y., Lu, S.Y. and Yang, B. (2019) Biomass-Derived Carbon Dots and Their Applications. *Energy & Environmental Materials*, **2**, 172-192. <https://doi.org/10.1002/eem2.12038>
- [6] Liu, M.L., Chen, B.B., Li, C.M. and Huang, C.Z. (2019) Carbon Dots: Synthesis, Formation Mechanism, Fluorescence Origin and Sensing Applications. *Green Chemistry*, **21**, 449-471. <https://doi.org/10.1039/C8GC02736F>
- [7] Liu, Y.S., Zhao, Y.N. and Zhang, Y.Y. (2014) One-Step Green Synthesized Fluorescent Carbon Nanodots from Bamboo Leaves for Copper (II) Ion Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **196**, 647-652. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.02.053>
- [8] Wang, Z.F., Yu, J.F., Zhang, X., Li, N., Liu, B., Li, Y.Y., Wang, Y.H., Wang, W.X., Li, Y.Z., Zhang, L.C., Dissanayake, S., Suib, S.L. and Sun, L.Y. (2016) Large-Scale and Controllable Synthesis of Graphene Quantum Dots from Rice Husk Biomass: A Comprehensive Utilization Strategy. *ACS Applied Materials Interfaces*, **8**, 1434-1439. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10660>
- [9] Liu, S., Tian, J.Q., Wang, L., Zhang, Y.W., Qin, X.Y., Luo, Y.L., Asiri, A.M., Al-Youbi, A.O. and Sun, X.P. (2012) Hydrothermal Treatment of Grass: A Low-Cost, Green Route to Nitrogen-Doped, Carbon-Rich, Photoluminescent Polymer Nanodots as an Effective Fluorescent Sensing Platform for Label-Free Detection of Cu(II) Ions. *Advanced Materials*, **24**, 2037-2041. <https://doi.org/10.1002/adma.201200164>
- [10] Kasibabu, B.S.B., D'souza, S.L., Jha, S., Singhal, R.K., Basu, H. and Kailasa, S.K. (2015) One-Step Synthesis of Fluorescent Carbon Dots for Imaging Bacterial and Fungal Cells. *Analytical Methods*, **7**, 2373-2378. <https://doi.org/10.1039/C4AY02737J>
- [11] Ding, Z.Y., Li, F.F., Wen, J.L., Wang, X.L. and Sun, R.C. (2018) Gram-Scale Synthesis of Single-Crystalline Graphene Quantum Dots Derived from Lignin Biomass. *Green Chemistry*, **20**, 1383-1390. <https://doi.org/10.1039/C7GC03218H>
- [12] Wang, G., Guo, Q.L., Chen, D., Liu, Z.D., Zheng, X.H., Xu, A.L., Yang, S.W. and Ding, G.Q. (2018) Facile and Highly Effective Synthesis of Controllable Lattice Sulfur-Doped Graphene Quantum Dots via Hydrothermal Treatment of Durian. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 5750-5759. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16002>
- [13] Chandra, S., Das, P., Bag, S., Laha, D. and Pramanik, P. (2011) Synthesis, Functionalization and Bioimaging Applications of Highly Fluorescent Carbon Nanoparticles. *Nanoscale*, **3**, 1533-1540. <https://doi.org/10.1039/c0nr00735h>
- [14] Pires, N.R., Santos, C.M.W., Sousa, R.R., Paula, R.C.M., Cunha, P.L.R. and Feitosa, J.P.A. (2015) Novel and Fast Microwave-Assisted Synthesis of Carbon Quantum Dots from Raw Cashew Gum. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **26**, 1274-1282. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20150094>
- [15] Xu, M.M., Huang, Q.B., Sun, R.C. and Wang, X.H. (2016) Simultaneously Obtaining Fluorescent Carbon Dots and Porous Active Carbon for Supercapacitors from Biomass. *RSC Advances*, **6**, 88674-88682. <https://doi.org/10.1039/C6RA18725K>
- [16] Teng, X.Y., Ma, C.G., Ge, C.J., Yan, M.Q., Yang, J.X., Zhang, Y., Morais, P.C. and Bi, H. (2014) Green Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Dots from Konjac Flour with "Off-On" Fluorescence by Fe³⁺ and L-Lysine for Bioimaging.

- Journal of Materials Chemistry B*, **2**, 4631-4639. <https://doi.org/10.1039/c4tb00368c>
- [17] Yan, Y.B., Gong, J., Chen, J., Zeng, Z.P., Huang, W., Pu, K.Y., Liu, J.Y. and Chen, P. (2019) Recent Advances on Graphene Quantum Dots: From Chemistry and Physics to Applications. *Advanced Materials*, **31**, 1808283.
- [18] Gu, D., Shang, S.M., Yu, Q. and Shen, J. (2016) Green Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Dots from Lotus Root for Hg(II) Ions Detection and Cell Imaging. *Applied Surface Science*, **390**, 38-42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.012>
- [19] Yin, B.D., Deng, J.H., Peng, X., Long, Q., Zhao, J.N., Lu, Q.J., Chen, Q., Li, H.T., Tang, H., Zhang, Y.Y. and Yao, S.Z. (2013) Green Synthesis of Carbon Dots with Down- and Up-Conversion Fluorescent Properties for Sensitive Detection of Hypochlorite with a Dual-Readout Assay. *Analyst*, **138**, 6551-6557. <https://doi.org/10.1039/c3an01003a>
- [20] Tejwan, N., Saha, S.K. and Das, J. (2020) Multifaceted Applications of Green Carbon Dots Synthesized from Renewable Sources. *Advances in Colloid and Interface Science*, **275**, Article ID: 102046. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102046>
- [21] Yang, Y.H., Cui, J.H., Zheng, M.T., Hu, C.F., Tan, S.Z., Xiao, Y., Yang, Q. and Liu, Y.L. (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>
- [22] Jeong, C.J., Roy, A.K., Kim, S.H., Lee, J.E., Jeong, J.H., In, I. and Park, S.Y. (2014) Fluorescent Carbon Nanoparticles Derived from Natural Materials of Mango Fruit for Bio-Imaging Probes. *Nanoscale*, **6**, 15196-15202. <https://doi.org/10.1039/C4NR04805A>
- [23] Wang, H., Zhuang, J.Q., Velado, D., Wei, Z.Y., Matsui, H. and Zhou, S.Q. (2015) Near-Infrared- and Visible-Light-Enhanced Metal-Free Catalytic Degradation of Organic Pollutants over Carbon-Dot-Based Carbocatalysts Synthesized from Biomass. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 27703-27712. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b08443>
- [24] Zhang, H.M., Wang, Y., Wang, D., Li, Y.B., Liu, X.L., Liu, P.R., Yang, H.G., An, T.C., Tang, Z.Y. and Zhao, H.J. (2014) Hydrothermal Transformation of Dried Grass into Graphitic Carbon-Based High Performance Electrocatalyst for Oxygen Reduction Reaction. *Small*, **10**, 3371-3378. <https://doi.org/10.1002/sml.201400781>
- [25] Liu, H.C., Ding, J., Zhang, K. and Ding, L. (2019) Construction of Biomass Carbon Dots Based Fluorescence Sensors and Their Applications in Chemical and Biological Analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **118**, 315-337. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.051>