

# 碳点材料在口腔医学领域的应用研究进展

王凯<sup>1,2,3</sup>, 危晶晶<sup>1</sup>, 黄姣<sup>1</sup>, 徐凌<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>重庆医科大学附属口腔医院, 重庆

<sup>2</sup>口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室, 重庆

<sup>3</sup>重庆市高等教育口腔生物医学工程重点实验室, 重庆

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月15日

## 摘要

碳点(Carbon Dots, CDs)是一种新型的碳纳米材料, 通常是粒径小于10 nm且表面富含羟基、羧基等官能团的零维碳基纳米颗粒。由于其独特的荧光性质、优良的生物相容性、低毒性、易于表面功能化修饰以及合成方法多样等优点, 碳点广泛应用于生物成像、靶向给药、骨组织工程及疾病诊断和治疗等领域。近年来, 碳点在口腔医学中的应用逐渐增多。本文综述了碳点及其复合材料在口腔医学各学科中的应用研究进展, 旨在为其在该领域的实际应用提供参考和思路。

## 关键词

碳点, 口腔医学, 抗菌, 抗感染, 组织再生

# Research Progress on the Application of Carbon Dot Materials in the Field of Oral Medicine

Kai Wang<sup>1,2,3</sup>, Jingjing Wei<sup>1</sup>, Jiao Huang<sup>1</sup>, Ling Xu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

<sup>2</sup>Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases and Biomedical Sciences, Chongqing

<sup>3</sup>Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Chongqing

Received: May 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2024; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Carbon Dots (CDs) are a novel type of carbon nanomaterial, typically characterized as ze-  
\*通讯作者。

ro-dimensional carbon-based nanoparticles with diameters smaller than 10 nm and surfaces rich in functional groups such as hydroxyl and carboxyl. Due to their unique fluorescence properties, excellent biocompatibility, low toxicity, ease of surface functionalization, and diverse synthesis methods, CDs have found extensive applications in fields such as bioimaging, targeted drug delivery, bone tissue engineering, and the diagnosis and treatment of diseases. In recent years, the application of CDs in oral medicine has increased significantly. This paper reviews the research progress on the application of CDs and their composites in various disciplines of oral medicine, aiming to provide references and insights for their practical application in this field.

## Keywords

Carbon Dots, Stomatology, Antibacterial, Anti-Infective, Tissue Regeneration

Copyright © 2024 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

碳点(Carbon Dots, CDs)是由离散的准球形纳米粒子构成的一种新型荧光碳纳米材料,粒径小于 10 nm,展示出广泛的应用前景[1]。CDs 最初是在 2004 年的单壁碳纳米管纯化过程中从荧光纳米颗粒的组分中发现的[2],直到 2006 年,这些碳纳米颗粒才被 Sun 等人命名为“碳点”[3]。CDs 可分为四类:石墨烯量子点(Graphene Quantum Dots, GQDs)、碳量子点(Carbon Quantum Dots, CQDs)、碳纳米点(Carbon Nanodots, CNDs)和碳化聚合物点(Carbonized Polymer Dots, CPDs) [4]。含碳结构的材料在一定条件下通过自上而下法或自下而上法均可合成 CDs,因此其来源非常广泛[3] [4]。碳点材料因其具有良好的生物相容性、水溶性、独特的荧光性质,且其表面极易被生物活性物质、金属离子、杂原子等多种物质进行钝化和功能化处理等优点[5]-[9],目前已广泛应用于离子检测[10]、分子探针[11]、生物成像[12]、生物传感[13]、骨组织工程[14]、药物载体和肿瘤治疗等[15]生物医学领域的应用研究中。基于这些优势,碳点在口腔医学领域的应用也逐渐增多,受到学者的广泛关注。本文综述了碳点材料在口腔医学各方面的应用及其作用,旨在为其在牙体牙髓病学、牙周病学、口腔癌治疗、颌面部骨缺损修复等领域的应用提供思路和帮助。

## 2. 碳点材料在牙体牙髓病学的应用(见表 1)

### 2.1. 抗菌抗感染

龋病和牙髓感染性疾病主要是由微生物及其生物膜引起的,严重威胁口腔健康[16] [17]。随着细菌抗菌药耐药性的增加,迫切需要开发简单安全、高效的抗菌方法,近年来,碳点材料因其独特的物理化学性质受到广泛关注。Ostadhossein 等学者[18]提出了一种“无抗生素”的策略,通过体内实验表明,工程簇状碳点纳米颗粒在酸性的生物膜环境中能够有效地抑制变形链球菌的生长,从而破坏和减少口腔生物膜的形成,同时不破坏口腔生态平衡。这一发现展示了碳点在无需抗生素的情况下,通过物理化学手段抑制细菌生长的潜力。Liu 等[19]报道了一种铜掺杂碳点(Cu-CDs),其在口腔环境中显示出较强的催化(过氧化氢酶样、过氧化物酶样)活性,能有效抑制变形链球菌的初始粘附和清除已定植的生物膜,且 Cu-CDs 不会产生活性氧来影响周围的口腔组织。该碳点对脂多糖和肽聚糖具有较强的亲和力,表明其对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌具有良好的抗菌能力,有助于防止伤口化脓性感染,促进伤口快速愈合,从而实现预防和治疗口腔疾病的目的。

**Table 1.** Application of carbon dot materials in Endodontics**表 1.** 碳点材料在牙体牙髓病学的应用

应用领域	第一作者/发表年份	碳点类型	合成方法	主要功能和结论
抗菌抗感染	Ostadhosseini [18], 2021	工程簇状碳点	水热法	通过酸性生物膜环境抑制变形链球菌，不破坏口腔生态平衡
抗菌抗感染	Liu [19], 2022	铜掺杂碳点(Cu-CDs)	水热法	显示催化活性，抑制生物膜形成，有助于防止伤口化脓性感染，促进伤口快速愈合
抗菌抗感染	Tang [20], 2022	岩藻多糖碳点(FDCDs)	水热法	诱导胞内和胞外活性氧的形成，改变细菌的通透性，对粪肠球菌及其生物膜具有良好的抑制作用
促进牙髓再生	Lu [23], 2022	二甲双胍碳点	水热法	上调成牙本质基因和蛋白质表达，促进 hDPSCs 的成牙本质向分化
促进牙髓再生	Liu [24], 2022	抗坏血酸/聚乙烯亚胺碳点(CDots)	水热法	激活自噬，促进细胞分泌细胞外基质，形成牙髓干细胞膜片，显示出较强成骨/成牙分化能力
促进牙髓再生	Cao [25], 2024	基于杜仲碳点(EUOCDs)的生物支架	水热法	促进细胞增殖，并增强了 hDPSCs 的血管生成能力和牙本质分化能力
改善树脂粘结	Chen [27], 2021	EDC 修饰石墨烯量子点	水热法	非共价键交联胶原，提高抗酶水解能力，增强树脂粘附持久性

持续根管感染(Persistent Endodontic Infections, PEIs)是最常见的牙体牙髓病变，可导致慢性根尖周炎、牙根吸收，甚至牙齿脱落。根管内的多种细菌尤其是粪肠球菌(*E. faecalis*)以及相关生物膜覆盖在根管中，侵入牙本质小管，是导致持续性感染和难治性根尖周炎的主要病因之一。近年来，针对 PEIs 的新型治疗方法不断涌现，其中碳点材料展现出较大的潜力。Tang 等[20]研究表明，岩藻多糖碳点(Fucoidan-Derived Carbon Dots, FDCDs)在体外可通过诱导胞内和胞外活性氧的形成，改变细菌的通透性，对粪肠球菌及其生物膜具有良好的抑制作用，与传统的根管消毒方法相比，FDCDs 的高渗透性使其能够深入到牙本质小管深处，进一步提高了抗菌效果，为持续根管感染的治疗提供了一种新的策略。

## 2.2. 促进牙髓再生

根管治疗虽为牙髓病和根尖周病的经典治疗方法，但因术后缺乏牙本质-牙髓复合体的再生，易导致牙体变脆。因此，牙髓再生成为牙髓破坏性疾病的理想治疗方法[21]。人牙髓干细胞(Human Dental Pulp Stem Cells, hDPSCs)因其良好的成牙本质潜能和可利用性而成为牙髓再生研究的热点[22]。Lu 等[23]制备的二甲双胍碳点在体外对 hDPSCs 具有良好的细胞相容性，能通过自噬上调 hDPSCs 的成牙本质细胞基因标记物如牙本质涎磷蛋白(Dentin Sialophosphorin, DSPP)、Runt 相关转录因子 2 (Runt Related Transcription Factor 2, RUNX2)等和蛋白质如牙本质基质蛋白(Dentin Matrix Protein 1, DMP1)的表达，从而促进 hDPSCs 的成牙本质向分化，为碳点材料应用于牙髓再生提供了理论基础。Liu 等[24]以抗坏血酸和聚乙烯亚胺为原料，通过水热法制备的碳点(CDs)，能够通过激活 PI3K/Akt/mTOR 通路介导的自噬，促进 hDPSCs 分泌细胞外基质，增强细胞粘附，形成完整的牙髓干细胞膜片，显示出较强的成骨/成牙分化能力，在牙本质-牙髓复合体和血管再生方面表现出明显优势。这些研究表明，自噬在促进 hDPSCs 成牙本质向分化上扮演了重要角色。

此外，部分研究基于碳点材料构建生物支架应用于牙髓再生同样取得了良好效果。例如 Cao 等[25]基于杜仲碳点(EUOCDs)和表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)构建了一种新型的 ECEs 纳米复合物，随后将其加载到明胶甲基丙烯酰胺基(GelMA)水凝胶上，结果表明该体系能促进细胞增殖，并增强 hDPSCs 的血

管生成能力和牙本质分化能力，展现出较好的临床应用价值。

### 2.3. 改善树脂粘结

树脂粘结剂在牙体微创修复中应用广泛，但提高树脂-牙本质粘结界面的耐久性和稳定性仍然是一个挑战，而提高胶原纤维的耐水解性关键研究方向之一[26]。Chen 等[27]采用 1-乙基-3-(3-二甲氨基丙基)碳二亚胺(1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl)carbodiimide, EDC)修饰石墨烯量子点，将其引入树脂-牙本质界面，实验表明修饰后的石墨烯量子点通过非共价键交联胶原，抑制胶原酶活性。虽然其抗酶解能力相对有限且不稳定，但与 EDC 结合后，通过与胶原纤维形成共价键，提高了抗酶水解能力，抑制了胶原纤维的水解，增强了树脂粘附持久性。这一研究为碳点材料在牙体牙髓病学中的应用开辟了新的领域。

## 3. 碳点材料在牙周病学中的应用(见表 2)

### 3.1. 抗菌抗感染

牙周炎是一种由牙菌斑引起慢性炎症性疾病，是全球第六大常见疾病，常常导致进行性牙槽骨吸收，引起牙齿松动和脱落，从而大大降低生活质量[28]。牙龈卟啉单胞菌(*P. gingivalis*)是一种革兰氏阴性厌氧菌，被认为是牙周炎的主要致病菌[29]。传统的牙周治疗手段如基础治疗和抗菌药物治疗有限，且依从性要求较高，因此，迫切需要开发更加便捷有效的抗牙周病菌方法。Ardekani 等[30]利用 *P. gingivalis* 的细胞内感染模型，通过将甲硝唑与纳米载体碳点相结合，实现细胞内递送抗生素，显著增强了该药物胞内抗菌的活性。这一研究表明，碳点不仅可以作为抗生素的有效载体，而且可以显著提高药物的治疗效果，尤其在难以直接作用的细胞内环境中表现出优势。欧燕珍等[31]合成的硒掺杂碳量子点，能够有效地清除  $H_2O_2$  诱导的细胞内活性氧产生，抑制 *P. gingivalis* 诱导的巨噬细胞炎症反应，减少  $H_2O_2$  对 MC3T3-E1 细胞成骨功能的损伤，显示了硒掺杂碳量子点在抗炎和促进细胞功能恢复方面的潜在应用价值。

**Table 2.** Application of carbon dot materials in periodontology

**表 2.** 碳点材料在牙周病学中的应用

应用领域	第一作者/发表年份	碳点类型	合成方法	主要功能和结论
抗菌 抗感染	Ardekani [30], 2019	纳米载体碳点	水热法	实现细胞内递送抗生素，提高胞内抗菌活性，显著提高治疗效果
抗菌 抗感染	欧燕珍[31], 2022	硒掺杂碳量子点	水热法	清除活性氧，抑制炎症反应，减少成骨功能损伤
抗菌 抗感染	Liu [32], 2017	甲硝唑碳点	水热法	直接抑制 <i>P. gingivalis</i> 的生长，具有激发依赖发射特性，用于多色生物成像，实时跟踪 <i>P. gingivalis</i> 的致病机制
抗菌 抗感染	Liang [33], 2020	替硝唑碳量子点(TCDs)	水热法	生物膜渗透杀死 <i>P. gingivalis</i> ，抑制生物膜下细菌
抗菌光动力疗法	Pourhajibagher [34], 2019	石墨烯量子点/姜黄素, GQD-Cur 复合物	微波法	抑制牙周病原体活力，提高了抗菌光动力疗法的效率
促进牙周组织再生	Ren [36], 2021	二甲双胍碳点	水热法	促进 BMSCs 成骨分化，表现出成骨潜能，通过激活特定的信号通路来促进组织再生
促进牙周组织再生	Xin [37], 2024	褪黑素衍生碳量子点	水热法	调节细胞内活性氧，维持线粒体内稳态，抑制炎症，促进牙周组织再生
促进牙周组织再生	An [38], 2024	氧化石墨烯碳量子点	自上而下分解石墨	通过调节线粒体动力学促进了 hPDLSCs 的成骨分化

部分研究以抗菌药物为原料合成一系列新型碳点也显示出优异的抗菌性能,例如, Liu 等[32]以甲硝唑为原料,采用绿色简便的水热法成功合成了水溶性、无毒、高光致发光的碳点(CNDs-250)。该碳点不仅能直接抑制 *P. gingivalis* 的生长,还具有激发依赖发射特性,适用于多色生物成像,有望用于实时跟踪 *P. gingivalis* 的致病机制。Liang 等[33]采用水热法制备的亲水性替硝唑碳量子点(TCDs)在体外生物膜模型中通过生物膜渗透杀死 *P. gingivalis*,对生物膜下的细菌也具有显著的抑制作用,展示了独特的抗菌性能和优异的抑制生物膜形成的功能。这些为纳米级抗牙周病菌药物的制备提供了新的方法参考。

抗菌光动力疗法作为一种替代治疗方式在牙周炎和种植体周围炎的辅助治疗中也展现出前景。Pourhajibagher 等[34]将石墨烯量子点(GQD)与姜黄素(Curcumin, Cur)偶联,获得光激发的 GQD-Cur 复合物,展示了高效的牙周病原体抑制作用,提高了抗菌光动力疗法的效率,有望成为治疗牙周炎和种植体周围炎的有效途径。

### 3.2. 促进牙周组织再生

目前传统的治疗方法如龈下刮治和根面平整术、翻瓣术,激光治疗等虽可控制牙周炎症并减缓疾病的进展,但牙槽骨再生潜力有限,影响治疗效果并容易引起疾病复发[35]。因此,开发有效的牙周组织再生策略尤为重要。Ren 等[36]使用盐酸二甲双胍和柠檬酸制备了二甲双胍碳点(Metformin Carbon Dots, MCDs),其在体外炎症和正常环境下均表现出良好的生物相容性和促进成骨的潜能进一步研究发现,ERK/AMPK 通路可能参与了 MCDs 诱导骨髓间充质干细胞(Bone Marrow Stromal Cells, BMSCs)的成骨分化,这展示了碳点在牙周组织再生应用中的潜力,特别是通过激活特定的信号通路来促进组织再生。此外, Xin 等[37]从调节活性氧促进牙周组织再生角度上出发,制备具有高效清除活性氧能力的褪黑素衍生碳量子点(Melatonin-derived Carbon Dots, MT-CDs)。体内外实验表明,MT-CDs 可通过调节核因子红细胞 2 相关因子 2 (Nrf2)/血红素加氧酶-1 (HO-1)通路,有效调节细胞内活性氧,维持线粒体内稳态,从而抑制炎症的产生和牙槽骨的吸收,促进受损牙周组织组织的再生。

除了单独使用碳点,部分研究将碳点组装在水凝胶上,取得了不错的治疗效果。例如, An 等[38]制备的氧化石墨烯碳量子点可通过调节线粒体动力学促进人牙周膜干细胞(human Periodontal Ligament Stem Cells, hPDLSCs)的成骨分化,最终在体内 GelMA 水凝胶的辅助下促进了牙周骨再生。

综合上述研究可以看出,尽管不同类型的碳点在机制和应用上存在差异,但它们都展示了显著的促进牙周组织再生的潜力,展现出广阔的应用前景。

## 4. 碳点材料在口腔癌治疗的应用(见表 3)

口腔癌是头颈部常见的恶性肿瘤,其生长速度较快,具有较强的侵袭性及转移性,严重威胁人们的生命与健康,近年来,碳点纳米材料在口腔癌的诊断治疗中展现出巨大的应用前景。现有研究不仅展示了碳点在诊断中的高效成像能力,还揭示了其在多种治疗方法中的优势,如药物输送、光动力治疗和光热疗法等。

碳点在口腔癌诊断中的应用主要集中在其优异的成像性能上。Peng 等[39]以乙二胺、硝酸和甲酸为原料,采用微波法制备了两种新型碳点。这些 CDs 具有良好的水溶性和光致发光性能,在荧光显微镜下可清晰区分正常口腔组织和病理组织,成像效果优于传统的苏木精-伊红(HE)染色法,且操作简单,适用于快速检测口腔癌。此外, Sri 等[40]采用微波辅助热裂解法合成了良好生物相容性、光稳定性和高荧光性能的含氮、硫的新型两性离子碳点,其能快速地扩散进入细胞质,在 FaDu (人咽癌)和 Cal-27 (人舌癌)细胞中能有效成像,为早期癌症检测提供了一种可靠且快速的方法。

在治疗方面,碳点材料展示了多种优势。Samantara 等[41]将阿霉素(Doxorubicin, DOX)成功负载在具

**Table 3.** Application of carbon dot materials in the treatment of oral cancer  
**表 3.** 碳点材料在口腔癌治疗中的应用

应用领域	第一作者/ 发表年份	碳点类型	合成方法	主要功能和结论
诊断	Peng [39], 2019	乙二醇/硝酸/甲酸新型碳点	微波法	具有良好的水溶性和光致发光性能, 成像效果优于传统染色法, 适用于快速检测口腔癌
诊断	Sri [40], 2018	含氮、硫的新型两性离子碳点	微波辅助热裂解	快速扩散进入细胞质, 在癌细胞中能有效的成像, 为早期癌症检测提供了一种可靠且快速的方法
药物输送	Samantara [41], 2016	负载阿霉素碳点	水热法	更容易被癌细胞内化, 显示更强抑制效果, 为药物输送和癌症治疗提供新的可能性
光热疗法	Das [42], 2019	富氮中孔碳纳米球 (NCQD-HCS)	水热法	激光照射下诱导热消融效应, 显示出对口腔癌细胞的显著杀伤作用
光动力治疗	Li [43], 2020	硫掺杂碳点(S-Cds)	水热法	作为纳米光敏剂, 小剂量情况下具有良好的光动力治疗效果
光动力治疗	Kong [44], 2022	柠檬酸/乙二醇 CDs	水热法	光照下能诱发口腔鳞癌细胞系 Cal-27 和 UM1 中的活性氧的生成, 诱导癌细胞的凋亡, 提高口腔癌光动力治疗效率
光动力治疗	Nasrin [45], 2020	新型共轭碳点 (CDCF)	水热法	通过叶酸受体介导途径与癌细胞相互作用, 并在胞核内产生定位, 在光激发下, 增强了活性氧的产生, 提高了口腔癌光动力治疗的效率
直接杀伤癌细胞	唐琪[46], 2017	维生素 C 碳点	微波法	有效地抑制口腔鳞癌细胞的增殖, 并能诱导其自噬和凋亡
直接杀伤癌细胞	刘玉兰[47], 2018	抗坏血酸碳点	微波法	通过促进自噬对舌鳞癌细胞 Cal-27 发挥杀伤作用, 为舌鳞癌化疗提供新思路

有良好光致发光性能的 CQD 上, 形成的复合物更容易被癌细胞内化, 并具备优异的胞内 pH 触发释放能力, 显示出比裸 DOX 更强的癌细胞抑制效果。这为生物成像、药物输送和口腔癌症治疗提供了新的可能性。碳点在光动力治疗和光热疗法中的应用也备受关注。例如, Das 等[42]报道了一种富氮中孔碳纳米球 (NCQD-HCS), 在 980 nm 近红外激光照射下对人类咽鳞状细胞癌细胞诱导显著的热消融效应。Li 等人[43]合成了具有高单线态氧( $^1O_2$ )产率的硫掺杂碳点(S-Cds)作为纳米光敏剂, 体外实验结果表明, 小剂量 S-Cds 在光动力治疗中具有良好的安全性和治疗效果。Kong 等人[44]以柠檬酸和乙二醇为原料, 采用传统的水热法合成了 CDs, 研究发现这些 CDs 在光照下能诱发口腔鳞癌细胞系 Cal-27 和 UM1 中的活性氧生成, 诱导癌细胞凋亡。同样, Nasrin 团队[45]通过叶酸和姜黄素合成了新型共轭碳点(CDCF), 该碳点通过叶酸受体介导途径与癌细胞相互作用, 并在细胞核内产生定位, 在双光子激发下, 增强了活性氧的产生, 提高了口腔癌光动力治疗的效率。。

此外, 研究还显示碳点本身也具备直接杀伤口腔癌细胞的能力。例如, 维生素 C 碳点能够有效地抑制口腔鳞癌细胞的增殖, 并能诱导其自噬和凋亡, 而抗坏血酸碳点可通过促进自噬对舌鳞癌细胞 Cal-27 发挥杀伤作用[46] [47]。

综合上述研究可以看出碳点材料在口腔癌诊断和治疗中的多功能性和潜在优势。未来的研究应进一步探讨其具体机制和优化应用方法, 以提高诊断准确性和治疗效果。

## 5. 碳点材料在口腔颌面部骨缺损修复的应用

在口腔临床工作中, 由创伤、感染、畸形等所导致的颌骨缺损或骨量不足常常会影响治疗效果, 在

种植和义齿修复中尤为明显。骨组织工程通过结合种子细胞、支架材料和生长因子来促进骨组织再生[48]，碳点材料因其优异的物理和生物学特性在这一领域得到了广泛关注。Shao 团队[49]早在 2017 年就使用柠檬酸和乙二胺通过水热法制备了 CDs，其可通过活性氧介导的 MAPK 途径促进基质矿化，从而促进大鼠 BMSCs 的成骨分化。刘一戈等人[50]以庆大霉素和叶酸为原料合成了具有双重作用的碳点，这些碳点既能促进大鼠 BMSCs 的成骨分化，又能抑制细菌生长，有望应用于未来的口腔感染处的骨缺损再生。

随后，各种水凝胶复合碳点、杂原子以及金属离子掺杂碳点的研究显示了它们在体内外环境中优异的成骨能力[13] [51]。例如，Khajuria 等[52]以氮掺杂碳点(NCDs)与羟基磷灰石(HA)纳米颗粒为原料，通过水热共沉淀法制备了 NCDs-HA 纳米颗粒。体外细胞和斑马鱼颌骨再生模型实验表明，NCDs-HA 复合材料可通过增加碱性磷酸酶活性、钙沉积及成骨相关基因的表达，显著促进了成骨和骨再生，展示了其在骨再生治疗中的潜力。Geng 等[53]通过紫外光激活的光聚合反应将带负电荷的 GQD 包裹在 GelMA 水凝胶中，获得 3D 可注射 GQD/GelMA 水凝胶支架，在小鼠颅骨缺损模型中，GQD/GelMA 水凝胶支架显著加速了骨再生。这项研究表明，通过将碳点与生物材料结合，可以开发出具有高效成骨能力的复合材料，拓展了碳点在骨组织工程中的应用前景。

此外，CDs 还可作为纳米载体，负载基因或生长因子来促进骨修复。例如，Bu 等[54]使用微波辅助热解法制备的负载 miR-2861 的抗坏血酸-PEI 碳点，体外实验表明，它能有效地将 miR-2861 递送入 BMSCs，从而使 BMSCs 具有更强的骨再生能力，展示了碳点作为基因载体在骨修复中的潜力，为未来的临床应用提供了新的方向。

## 6. 其他应用

碳点在口腔种植、正畸和口腔黏膜病的治疗领域也展现出广泛的应用潜力。在临床正畸过程中，为了防止细菌附着在固定正畸托槽的表面，人们设计了多种抗菌涂层。然而，现有涂层存在结合力弱、耐药性差、细胞毒性高、持续时间短等问题。Wang 等[55]以和厚朴酚为碳源，采用水热法制备了表面带正电荷的蓝色荧光碳点(HCDs)。研究表明其对大肠杆菌和变形链球菌具有良好的持续抗菌能力。在聚多巴胺(Polydopamine, PDA)涂层的帮助下，HCDs 可共价修饰到正畸托槽表面，显示出优异的抗菌性能和良好的体外安全性，这种 PDA-HCDs 荧光涂层有望在口腔正畸领域得到广泛应用，解决了传统抗菌涂层的不足。

目前钛(Ti)种植体广泛应用于口腔种植科，然而细菌导致的种植体相关感染是导致种植失败的主要原因。赫东梅等[56]通过水热处理在 Ti 表面构建了 TiO<sub>2</sub> 纳米棒阵列(TiO<sub>2</sub>NR)，然后将 CDs 掺杂到 TiO<sub>2</sub>NR 表面上得到 C-TiO<sub>2</sub>NR。体内外实验都表明，C-TiO<sub>2</sub>NR 显示出良好的生物相容性以及优良的抗菌能力，未来有望应用于种植体周围炎的治疗上。

口腔念珠菌病是临床上常见的口腔黏膜病，Shaikh 等[57]通过溶剂热法从柑橘的果汁中合成胶体发光碳点，发现其在非常低的浓度下能有效地抑制了白色念珠菌生物膜的附着和形成。这一发现为治疗口腔念珠菌病提供了一种简单而有效的抗菌方法。Li 等[58]通过在自制的红发射碳点(CD)上涂上带正电的胍基(Gu<sup>+</sup>)，然后与抗真菌药物两性霉素 B (Amphotericin B, AmB)偶联，开发了一种治疗性纳米平台(CD-Gu<sup>+</sup>-AmB)。这种平台能够追踪抗真菌药物的渗透并干扰白色念珠菌对口腔上皮组织的侵袭，为口腔念珠菌病的早期干预提供了新的参考。

## 7. 总结与展望

综上所述，CDs 作为一种新兴碳基纳米材料，凭借其优异的生物相容性，以及抗菌、抗感染、抗肿瘤、促成骨的特性，在口腔医学各领域中展现出巨大的应用潜力。其卓越的性能为碳点材料在未来的口

腔临床应用奠定了坚实的理论基础,使其成为具有光明前景的候选纳米材料。然而,目前碳点材料在口腔医学领域的临床应用尚处于初步阶段。尽管 CDs 来源广泛、合成策略丰富,但不同原料、反应条件以及不同的功能化修饰都可能会对 CDs 的生物学性能产生影响,因此,有必要系统地探讨碳前驱体的选择及反应条件(如温度、时间、pH 值)对 CDs 性能的影响。针对口腔疾病的特点选择合适的碳点或其复合物,也需进一步研究和优化。其次,目前的研究主要集中在 CDs 及其复合材料的构建和应用上,而对其生物学效应相关的作用机制研究较少,未来研究应更加系统和深入地揭示碳点材料的作用机制,以便更精准地应用于口腔领域的疾病诊断和治疗。最后,目前碳点材料在口腔领域的研究大多仅局限于体外细胞水平和分子水平上,需要在体内建立相关的口腔疾病模型,以更加深入地探索其在口腔医学中的应用潜力。通过动物模型研究,能够更全面地评估碳点材料的安全性和有效性,为其临床转化提供更为坚实的证据。

总之,碳点材料在口腔医学中的应用前景广阔,但仍需大量的基础研究和临床研究来支持其最终应用于临床实践。随着研究的深入,碳点材料有望在口腔疾病的诊断和治疗中发挥重要作用,推动口腔医学的发展。

## 基金项目

重庆市科学技术局项目基金(立项编号: CSTB2022BSXM-JCX0047)。

## 参考文献

- [1] Ai, L., Yang, Y., Wang, B., Chang, J., Tang, Z., Yang, B., *et al.* (2021) Insights into Photoluminescence Mechanisms of Carbon Dots: Advances and Perspectives. *Science Bulletin*, **66**, 839-856. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.12.015>
- [2] Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H.J., Gearheart, L., Raker, K., *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>
- [3] Sun, Y., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Fernando, K.A.S., Pathak, P., *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>
- [4] Xia, C., Zhu, S., Feng, T., Yang, M. and Yang, B. (2019) Evolution and Synthesis of Carbon Dots: From Carbon Dots to Carbonized Polymer Dots. *Advanced Science*, **6**, Article 1901316. <https://doi.org/10.1002/advs.201901316>
- [5] Shoal, A., Markus, A., Zhou, Z., Liu, X., Cazelles, R., Willner, I., *et al.* (2019) Anti-VEGF-Aptamer Modified C-Dots—A Hybrid Nanocomposite for Topical Treatment of Ocular Vascular Disorders. *Small*, **15**, Article 1902776. <https://doi.org/10.1002/smll.201902776>
- [6] Zheng, M., Liu, S., Li, J., Qu, D., Zhao, H., Guan, X., *et al.* (2014) Integrating Oxaliplatin with Highly Luminescent Carbon Dots: An Unprecedented Theranostic Agent for Personalized Medicine. *Advanced Materials*, **26**, 3554-3560. <https://doi.org/10.1002/adma.201306192>
- [7] Yan, F., Jiang, Y., Sun, X., Bai, Z., Zhang, Y. and Zhou, X. (2018) Surface Modification and Chemical Functionalization of Carbon Dots: A Review. *Microchimica Acta*, **185**, Article No. 424. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2953-9>
- [8] Bajpai, V.K., Khan, I., Shukla, S., Kang, S., Aziz, F., Tripathi, K.M., *et al.* (2020) Multifunctional N-P-Doped Carbon Dots for Regulation of Apoptosis and Autophagy in B16F10 Melanoma Cancer Cells and *in vitro* Imaging Applications. *Theranostics*, **10**, 7841-7856. <https://doi.org/10.7150/thno.42291>
- [9] Li, X., Fu, Y., Zhao, S., Xiao, J., Lan, M., Wang, B., *et al.* (2022) Metal Ions-Doped Carbon Dots: Synthesis, Properties, and Applications. *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article 133101. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133101>
- [10] Farahmandzadeh, F., Salehi, S., Molaei, M., Fallah, H. and Nejadshafiee, V. (2023) CdS Semiconductor Quantum Dots: Facile Synthesis, Application as off Fluorescent Sensor for Detection of Lead (Pb<sup>2+</sup>) Ions and Catalyst for Degradation of Dyes from Water. *Journal of Fluorescence*, **33**, 1515-1524. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03157-8>
- [11] Liu, J.H., Li, D.Y., He, J.H., Yuan, D., Li, R.S., Zhen, S.J., *et al.* (2020) Polarity-Sensitive Polymer Carbon Dots Prepared at Room-Temperature for Monitoring the Cell Polarity Dynamics during Autophagy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 4815-4820. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b18934>
- [12] Jiang, Q., Liu, L., Li, Q., Cao, Y., Chen, D., Du, Q., *et al.* (2021) NIR-Laser-Triggered Gadolinium-Doped Carbon Dots for Magnetic Resonance Imaging, Drug Delivery and Combined Photothermal Chemotherapy for Triple Negative



- Breast Cancer. *Journal of Nanobiotechnology*, **19**, Article No. 64. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00811-w>
- [13] Yang, M., Meng, Y., Liu, J., Yu, W. and Yang, B. (2018) Facile Synthesis of Mg<sup>2+</sup>-Doped Carbon Dots as Novel Bio-material Inducing Cell Osteoblastic Differentiation. *Particle & Particle Systems Characterization*, **36**, Article 1800315. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201800315>
- [14] Geng, B., Li, P., Fang, F., Shi, W., Glowacki, J., Pan, D., *et al.* (2021) Antibacterial and Osteogenic Carbon Quantum Dots for Regeneration of Bone Defects Infected with Multidrug-Resistant Bacteria. *Carbon*, **184**, 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.08.040>
- [15] Sun, Q., Wang, Z., Liu, B., Jia, T., Wang, C., Yang, D., *et al.* (2020) Self-Generation of Oxygen and Simultaneously Enhancing Photodynamic Therapy and MRI Effect: An Intelligent Nanoplatform to Conquer Tumor Hypoxia for Enhanced Phototherapy. *Chemical Engineering Journal*, **390**, Article 124624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124624>
- [16] Lebeaux, D., Ghigo, J. and Beloin, C. (2014) Biofilm-Related Infections: Bridging the Gap between Clinical Management and Fundamental Aspects of Recalcitrance toward Antibiotics. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **78**, 510-543. <https://doi.org/10.1128/membr.00013-14>
- [17] Lamont, R.J., Koo, H. and Hajishengallis, G. (2018) The Oral Microbiota: Dynamic Communities and Host Interactions. *Nature Reviews Microbiology*, **16**, 745-759. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0089-x>
- [18] Ostadhosseini, F., Moitra, P., Altun, E., Dutta, D., Sar, D., Tripathi, I., *et al.* (2021) Function-Adaptive Clustered Nanoparticles Reverse Streptococcus Mutans Dental Biofilm and Maintain Microbiota Balance. *Communications Biology*, **4**, Article No. 846. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02372-y>
- [19] Liu, M., Huang, L., Xu, X., Wei, X., Yang, X., Li, X., *et al.* (2022) Copper Doped Carbon Dots for Addressing Bacterial Biofilm Formation, Wound Infection, and Tooth Staining. *ACS Nano*, **16**, 9479-9497. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c02518>
- [20] Tang, S., Zhang, H., Mei, L., Dou, K., Jiang, Y., Sun, Z., *et al.* (2022) Fucoidan-Derived Carbon Dots against *Enterococcus faecalis* Biofilm and Infected Dental Tubules for the Treatment of Persistent Endodontic Infections. *Journal of Nanobiotechnology*, **20**, Article No. 321. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01501-x>
- [21] European Society of Endodontology (2006) Quality Guidelines for Endodontic Treatment: Consensus Report of the European Society of Endodontology. *International Endodontic Journal*, **39**, 921-930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01180.x>
- [22] Mozaffari, M.S., Emami, G., Khodadadi, H. and Baban, B. (2019) Stem Cells and Tooth Regeneration: Prospects for Personalized Dentistry. *EPMA Journal*, **10**, 31-42. <https://doi.org/10.1007/s13167-018-0156-4>
- [23] Lu, J., Li, R., Ni, S., Xie, Y., Liu, X., Zhang, K., *et al.* (2022) Metformin Carbon Nanodots Promote Odontoblastic Differentiation of Dental Pulp Stem Cells by Pathway of Autophagy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 1002291. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1002291>
- [24] Liu, L., Li, X., Bu, W., Jin, N., Meng, Y., Wang, Y., *et al.* (2022) Carbon Dots Enhance Extracellular Matrix Secretion for Dentin-Pulp Complex Regeneration through PI3K/Akt/mTOR Pathway-Mediated Activation of Autophagy. *Materials Today Bio*, **16**, Article 100344. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100344>
- [25] Cao, Y., Yang, M., Zhang, R., Ning, X., Zong, M., Liu, X., *et al.* (2024) Carbon Dot-Based Photo-Cross-Linked Gelatin Methacryloyl Hydrogel Enables Dental Pulp Regeneration: A Preliminary Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 22976-22988. <https://doi.org/10.1021/acsmami.4c03168>
- [26] Amaral, F.L.B., Colucci, V., Palma-Dibb, R.G. and Corona, S.A.M. (2007) Assessment of *in vitro* Methods Used to Promote Adhesive Interface Degradation: A Critical Review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, **19**, 340-353. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2007.00134.x>
- [27] Chen, W., Jin, H., Zhang, H., Wu, L., Chen, G., Shao, H., *et al.* (2021) Synergistic Effects of Graphene Quantum Dots and Carbodiimide in Promoting Resin-Dentin Bond Durability. *Dental Materials*, **37**, 1498-1510. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.07.004>
- [28] Pihlstrom, B.L., Michalowicz, B.S. and Johnson, N.W. (2005) Periodontal Diseases. *The Lancet*, **366**, 1809-1820. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(05\)67728-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(05)67728-8)
- [29] Jong, R.A. and van der Reijden, W.A. (2010) Feasibility and Therapeutic Strategies of Vaccines against *Porphyromonas gingivalis*. *Expert Review of Vaccines*, **9**, 193-208. <https://doi.org/10.1586/erv.09.156>
- [30] Ardekani, S.M., Dehghani, A., Ye, P., Nguyen, K. and Gomes, V.G. (2019) Conjugated Carbon Quantum Dots: Potent Nano-Antibiotic for Intracellular Pathogens. *Journal of Colloid and Interface Science*, **552**, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.05.067>
- [31] 欧燕珍. 硒掺杂碳量子点的体外抗氧化及抗炎性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C475K0m\\_zrgu4IQARvep2SAkaWjBDt8\\_rTOOnKA7PWSN5MI3rZEK6GibdSQy3DxiznhnnoEHbDhJQeJU\\_A69jlsq&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C475K0m_zrgu4IQARvep2SAkaWjBDt8_rTOOnKA7PWSN5MI3rZEK6GibdSQy3DxiznhnnoEHbDhJQeJU_A69jlsq&uniplatform=NZKPT)

- [32] Liu, J., Lu, S., Tang, Q., Zhang, K., Yu, W., Sun, H., *et al.* (2017) One-Step Hydrothermal Synthesis of Photoluminescent Carbon Nanodots with Selective Antibacterial Activity against *Porphyromonas gingivalis*. *Nanoscale*, **9**, 7135-7142. <https://doi.org/10.1039/c7nr02128c>
- [33] Liang, G., Shi, H., Qi, Y., Li, J., Jing, A., Liu, Q., *et al.* (2020) Specific Anti-Biofilm Activity of Carbon Quantum Dots by Destroying *P. gingivalis* Biofilm Related Genes. *International Journal of Nanomedicine*, **15**, 5473-5489. <https://doi.org/10.2147/ijn.s253416>
- [34] Pourhajibagher, M., Parker, S., Chiniforush, N. and Bahador, A. (2019) Photoexcitation Triggering via Semiconductor Graphene Quantum Dots by Photochemical Doping with Curcumin versus Perio-Pathogens Mixed Biofilms. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **28**, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2019.08.025>
- [35] Chen, F., Zhang, J., Zhang, M., An, Y., Chen, F. and Wu, Z. (2010) A Review on Endogenous Regenerative Technology in Periodontal Regenerative Medicine. *Biomaterials*, **31**, 7892-7927. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.07.019>
- [36] Ren, C., Hao, X., Wang, L., Hu, Y., Meng, L., Zheng, S., *et al.* (2021) Metformin Carbon Dots for Promoting Periodontal Bone Regeneration via Activation of ERK/AMPK Pathway. *Advanced Healthcare Materials*, **10**, Article 2100196. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100196>
- [37] Xin, X., Liu, J., Liu, X., Xin, Y., Hou, Y., Xiang, X., *et al.* (2024) Melatonin-Derived Carbon Dots with Free Radical Scavenging Property for Effective Periodontitis Treatment via the Nrf2/HO-1 Pathway. *ACS Nano*, **18**, 8307-8324. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c12580>
- [38] An, N., Yan, X., Qiu, Q., Zhang, Z., Zhang, X., Zheng, B., *et al.* (2024) Human Periodontal Ligament Stem Cell Sheets Activated by Graphene Oxide Quantum Dots Repair Periodontal Bone Defects by Promoting Mitochondrial Dynamics Dependent Osteogenic Differentiation. *Journal of Nanobiotechnology*, **22**, Article No. 133. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02422-7>
- [39] Peng, X., Yang, H., Li, C., Zhang, Y., Chen, S. and Long, Y. (2019) Green and Orange Fluorescent Carbon Dots for Detecting Oral Cancer by Staining Tissue Sections. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **19**, 7509-7516. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16859>
- [40] Sri, S., Kumar, R., Panda, A.K. and Solanki, P.R. (2018) Highly Biocompatible, Fluorescence, and Zwitterionic Carbon Dots as a Novel Approach for Bioimaging Applications in Cancerous Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 37835-37845. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13217>
- [41] Samantara, A.K., Maji, S., Ghosh, A., Bag, B., Dash, R. and Jena, B.K. (2016) Good's Buffer Derived Highly Emissive Carbon Quantum Dots: Excellent Biocompatible Anticancer Drug Carrier. *Journal of Materials Chemistry B*, **4**, 2412-2420. <https://doi.org/10.1039/c6tb00081a>
- [42] Das, R.K., Panda, S., Bhol, C.S., Bhutia, S.K. and Mohapatra, S. (2019) N-Doped Carbon Quantum Dot (NCQD)-Deposited Carbon Capsules for Synergistic Fluorescence Imaging and Photothermal Therapy of Oral Cancer. *Langmuir*, **35**, 15320-15329. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03001>
- [43] Li, Q., Zhou, R., Xie, Y., Li, Y., Chen, Y. and Cai, X. (2020) Sulphur-Doped Carbon Dots as a Highly Efficient Nano-Photodynamic Agent against Oral Squamous Cell Carcinoma. *Cell Proliferation*, **53**, e12786. <https://doi.org/10.1111/cpr.12786>
- [44] Kong, T., Liu, T., Zhang, Y. and Wang, M. (2022) Carbon Dots with Intrinsic Theranostic Properties for Photodynamic Therapy of Oral Squamous Cell Carcinoma. *Journal of Biomaterials Applications*, **37**, 850-858. <https://doi.org/10.1177/08853282221116855>
- [45] Nasrin, A., Hassan, M. and Gomes, V.G. (2020) Two-Photon Active Nucleus-Targeting Carbon Dots: Enhanced ROS Generation and Photodynamic Therapy for Oral Cancer. *Nanoscale*, **12**, 20598-20603. <https://doi.org/10.1039/d0nr05210h>
- [46] 唐琪, 王丹丹, 布文旻, 等. 维生素 C 碳点对口腔鳞状细胞癌 KB 细胞增殖、自噬和凋亡的影响[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(4): 667-671, 857.
- [47] 刘玉兰, 孟琳, 唐琪, 等. 抗坏血酸碳点通过促进自噬杀伤舌鳞癌细胞[J]. 口腔医学研究, 2018, 34(1): 35-38.
- [48] Zhang, R., Hou, Y., Sun, L., Liu, X., Zhao, Y., Zhang, Q., *et al.* (2023) Recent Advances in Carbon Dots: Synthesis and Applications in Bone Tissue Engineering. *Nanoscale*, **15**, 3106-3119. <https://doi.org/10.1039/d2nr05951g>
- [49] Shao, D., Lu, M., Xu, D., Zheng, X., Pan, Y., Song, Y., *et al.* (2017) Carbon Dots for Tracking and Promoting the Osteogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells. *Biomaterials Science*, **5**, 1820-1827. <https://doi.org/10.1039/c7bm00358g>
- [50] 刘一戈, 王梓霖, 郭陟永, 等. 具有促进成骨及抗菌双重作用的新型碳点的制备及在感染性骨缺损中的应用评价[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2023, 21(1): 11-18.
- [51] Wang, B., Yang, M., Liu, L., Yan, G., Yan, H., Feng, J., *et al.* (2019) Osteogenic Potential of Zn<sup>2+</sup>-Passivated Carbon

- Dots for Bone Regeneration *in vivo*. *Biomaterials Science*, **7**, 5414-5423. <https://doi.org/10.1039/c9bm01181a>
- [52] Khajuria, D.K., Kumar, V.B., Gigi, D., Gedanken, A. and Karasik, D. (2018) Accelerated Bone Regeneration by Nitrogen-Doped Carbon Dots Functionalized with Hydroxyapatite Nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 19373-19385. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02792>
- [53] Geng, B., Fang, F., Li, P., Xu, S., Pan, D., Zhang, Y., *et al.* (2021) Surface Charge-Dependent Osteogenic Behaviors of Edge-Functionalized Graphene Quantum Dots. *Chemical Engineering Journal*, **417**, Article 128125. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128125>
- [54] Bu, W., Xu, X., Wang, Z., Jin, N., Liu, L., Liu, J., *et al.* (2020) Ascorbic Acid-Pei Carbon Dots with Osteogenic Effects as miR-2861 Carriers to Effectively Enhance Bone Regeneration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 50287-50302. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c15425>
- [55] Wang, Y., Ding, C., Ge, Z., Li, Z., Chen, L., Guo, X., *et al.* (2023) A Novel Antibacterial and Fluorescent Coating Composed of Polydopamine and Carbon Dots on the Surface of Orthodontic Brackets. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **34**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1007/s10856-023-06712-8>
- [56] 赫东梅. 钛植入体表面碳基纳米材料改性 TiO<sub>2</sub> 纳米棒阵列抗菌性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022.  
[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C475K0m\\_zrgu4lQARvep2SAkaWjBDt8\\_rTonKA7PWSN5MLKVu8E1yIhmHrmpExiaLRhmM8fvCS5ILRHTUsiMyDXZ&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C475K0m_zrgu4lQARvep2SAkaWjBDt8_rTonKA7PWSN5MLKVu8E1yIhmHrmpExiaLRhmM8fvCS5ILRHTUsiMyDXZ&uniplatform=NZKPT)
- [57] Shaikh, A.F., Tamboli, M.S., Patil, R.H., Bhan, A., Ambekar, J.D. and Kale, B.B. (2019) Bioinspired Carbon Quantum Dots: An Antibiofilm Agents. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **19**, 2339-2345. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16537>
- [58] Li, X., Huang, R., Tang, F., Li, W., Wong, S.S.W., Leung, K.C., *et al.* (2019) Red-Emissive Guanylated Polyene-Functionalized Carbon Dots Arm Oral Epithelia against Invasive Fungal Infections. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 46591-46603. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b18003>