

分类号: Q819

学 号: 20222006049

密 级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



抗菌碳点的制备及其在食品保鲜膜中 的应用研究

学 位 申 请 人	马 好
指 导 教 师	石峰教授
申请学位门类级别	理学硕士
学 科、专 业 名 称	生物学
研 究 方 向	生物化学与分子生物学
所 在 学 院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2025 年 3 月

分类号: Q819

学 号: 20222006049

密 级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



抗菌碳点的制备及其在食品保鲜膜中 的应用研究

学 位 申 请 人	马 好
指 导 教 师	石峰教授
申请学位门类级别	理学硕士
学 科、专 业 名 称	生物学
研 究 方 向	生物化学与分子生物学
所 在 学 院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2025 年 3 月

**Preparation of Antibacterial Carbon Dots and its Application in Food
Preservative Film**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Natural Science

By

Ma Yu

(Biochemical and Molecular Biological)

Dissertation Supervisor: Prof. Shi Feng

March 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：马婷

时间：2025年5月22日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：马婷

时间：2025年5月22日

导师签名：石峰

时间：2025年5月22日

摘要

目的: 目前的食品包装薄膜虽然能起到保鲜作用, 但缺乏抗菌的功能, 导致薄膜不能最大限度地延长食品的保质期。因此, 本研究将抗菌碳点 (ACDs) 成功负载入壳聚糖-聚乙烯醇 (CS-PVA) 的成膜基质中, 制备 ACDs 抗菌复合薄膜。该复合薄膜旨在提升其对革兰氏菌的抗菌能力, 从而达到延长食物保质期的目的。

方法: (1) 采用水热法和微波法, 选择无毒前体合成生物基碳点 (LL-CDs) 和化学基碳点 (CU-CDs), 并通过调节反应的温度、时间、前体比例及微波强度等制备条件, 对碳点 (CDs) 进行优化, 通过表征分析 CDs 的形貌结构及光学性质; (2) 将不同浓度的 LL-CDs 和 CU-CDs 对 6 株常见的细菌进行培养, 测定抗菌性能及其最小杀菌浓度 (MBC)。对 CDs 处理前后的金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 细胞膜破损情况进行分析, 探究 LL-CDs 和 CU-CDs 的抗菌机理; (3) 制备三组 (CS-PVA、LL-CDs-CS-PVA 和 CU-CDs-CS-PVA) 复合薄膜, 对草莓和虾仁进行保鲜处理, 通过对膜的形态、官能团、抑菌圈大小、力学性能、透光率、含水率和水溶性等方面的分析, 综合评价该复合薄膜的各项性能。

结果: (1) 以甘草和咖啡酸为前体, 制备出粒径均一、荧光性能良好及表面富含官能团的 LL-CDs 和 CU-CDs。通过优化合成工艺发现, LL-CDs 的最佳合成条件为: 碳氮源摩尔比为 5: 4, 反应温度为 180°C, 反应时间为 8 h; CU-CDs 的最佳合成条件为: 碳氮源摩尔比 5: 4, 反应微波强度 450 W, 时间 4 min;

(2) 通过评估 LL-CDs 与 CU-CDs 对 6 株受试菌的抗菌活性, 揭示其作用机制依赖于物理性膜的破坏而非生化途径。结果表明, LL-CDs 对李斯特氏菌 (*Listeria monocytogenes*) 与 (*Bacillus subtilis*) 抑制效果最优 (MBC=25 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 且对金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 的活性强于大肠杆菌 (*E. coli*); CU-CDs 对 *E. coli* 与 *S. aureus* 具有显著杀伤力 (MBC=25 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 其对 *E. coli* 敏感性更高。25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 LL-CDs 与 CU-CDs 仅需 150 min 既能将 *E. coli* 和 *S. aureus* 全部杀灭。另外, CDs 作用于受试菌前后, 其活性氧 (ROS) 水平与乳酸脱氢酶 (LDH) 活性并未发生显著变化。然而, CDs 会对受试菌细胞造成直接损害, 通过诱导菌体内核酸与蛋白质大量泄漏, 破坏菌体表面结构, 使其出现塌陷并形成孔洞。不仅如此, CDs 深入细胞内部, 破坏 DNA 二级结构, 导致 DNA 降解, 最终达到杀死受试菌的目的;

(3) 复合薄膜是通过 CDs 与 CS-PVA 基质中的氢键发生作用, 实现力学性能、阻隔性能与靶向抗菌能力的综合提升。从扫描电镜 (TEM) 观察到, CDs 在基质中均匀分散并形成致密网络结构, CDs 的加入使薄膜的拉伸强度从 32.2 MPa 增至 34.6 MPa (LL-CDs-CS-PVA) 和 42.3 MPa (CU-CDs-CS-PVA)。同时, 复合薄膜的低透光率, 显著抑制了光氧化与水蒸气渗透。进一步抗菌性能研究表明, LL-CDs-CS-PVA 对 *E. coli* 具有最优的抑制效果, 抑菌圈直径达 26.55 mm, 而 CU-CDs-CS-PVA 则对 *S. aureus* 表现出更好的抑制效果, 抑菌圈直径达 29.35 mm;

(4) 复合薄膜能有效对抗受试菌, 显著延长了草莓与虾仁的保质期。在 7 d 保藏期内, 相较于

对照组,复合薄膜处理组展现出更优的保鲜效果:处理组菌落总数(TVC)降至 3.48-4.43 log CFU/g,挥发性盐基氮(TVB-N)降至 11.32-12.55 mg/100g,显著低于对照组的 6.23 log CFU/g 和 25.56mg/100g;pH 值波动较小,草莓 pH 为 6.16-6.34,虾仁 pH 为 6.11-6.31;处理组失重率降低了 29.8-32.1%;处理组的草莓和虾仁,表面光泽、气味及整体接受度评分显著优于对照组 ($p<0.05$)。

结论: 研究表明,通过调节前体比例、合成温度、时间以及微波强度等合成工艺,能够有效改进 LL-CDs 和 CU-CDs 的荧光性能。LL-CDs 和 CU-CDs 在 MBC 为 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,LL-CDs 对 *S. aureus* 更为敏感, CU-CDs 则对 *E. coli* 表现出更高的敏感性。在相同处理条件下,CDs 杀灭 *S. aureus* 的效果不仅远超氨基青霉素,所需浓度也更低。具体而言,25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 LL-CDs 与 CU-CDs 仅需 150 min 既能将 *E. coli* 和 *S. aureus* 全部杀灭。此外,CDs 浓度越高、与细菌共培养时间越长,细菌数量下降越迅速。CDs 作用于受试菌前后,菌体内 ROS 水平与 LDH 活性无显著变化。但 CDs 会对受试菌细胞造成损害,通过诱导菌体内核酸和蛋白质大量泄漏,破坏菌体表面结构,使其塌陷并形成孔洞。随后,CDs 进一步深入细胞内部,破坏 DNA 二级结构,导致 DNA 降解,最终实现对受试菌的杀灭。将 LL-CDs 和 CU-CDs 负载于 CS-PVA 基质中制备复合薄膜,该薄膜借助紫外阻隔及物理屏障的多重作用机制,显著延长了草莓与虾仁的保鲜期,有效维持了草莓与虾仁的感官品质和营养品质。综上所述,LL-CDs 和 CU-CDs 在食品保鲜膜中展现出良好的应用潜力,本研究为 CDs 类保鲜薄膜在食品保鲜领域的进一步研究和开发提供了理论依据和技术支持。

关键词: 碳点; 抗菌机理; 壳聚糖-聚乙烯醇; 复合薄膜; 食品保鲜

Abstract

Objective: Although the current food packaging film can play a role in preservation, it lacks antibacterial function, resulting in the film cannot maximize the shelf life of food. Therefore, in this study, antibacterial carbon dots (ACDs) were successfully loaded into the film-forming matrix of chitosan-polyvinyl alcohol (CS-PVA) to prepare ACDs antibacterial composite films. The purpose of this composite film is to improve its antibacterial ability against Gram bacteria, to achieve the purpose of extending the shelf life of food.

Methods: (1) Bio-based carbon dots (LL-CDs) and chemical-based carbon dots (CU-CDs) were synthesized by hydrothermal method and microwave method using non-toxic precursors. The carbon dots (CDs) were optimized by adjusting the preparation conditions such as reaction temperature, time, precursor ratio and microwave intensity. The morphology and optical properties of CDs were analyzed by characterization. (2) Six strains of common bacteria were cultured with different concentrations of LL-CDs and CU-CDs, and their antibacterial properties and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined. The cell membrane damage of *S. aureus* before and after CDs treatment was analyzed to explore the antibacterial mechanism of LL-CDs and CU-CDs. (3) Three groups of composite films (CS-PVA, LL-CDs-CS-PVA and CU-CDs-CS-PVA) were prepared to preserve strawberries and shrimps. The properties of the composite films were comprehensively evaluated by analyzing the morphology, functional groups, inhibition zone size, mechanical properties, light transmittance, water content and water solubility of the films.

Results: (1) Using licorice and caffeic acid as precursors, LL-CDs and CU-CDs with uniform particle size, good fluorescence performance and rich functional groups on the surface were prepared. By optimizing the synthesis process, it was found that the optimal synthesis conditions of LL-CDs were as follows : the molar ratio of carbon to nitrogen source was 5:4, the reaction temperature was 180°C, and the reaction time was 8 h; the optimum synthesis conditions of CU-CDs were as follows: the molar ratio of carbon to nitrogen source was 5:4, the microwave intensity was 450 W, and the reaction time was 4 min.

(2) By evaluating the antibacterial activity of LL-CDs and CU-CDs against 6 strains of tested bacteria, it was revealed that the mechanism of action depended on the destruction of physical membranes rather than biochemical pathways. The results showed that LL-CDs had the best inhibitory effect on *Listeria monocytogenes* and *Bacillus subtilis* (MBC=25 µg/mL), and the activity against *S. aureus* was stronger than that of *E. coli*. CU-CDs had a significant killing effect on *E. coli* and *S. aureus* (MBC=25 µg/mL), and it was more sensitive to *E. coli*. 25 µg/mL LL-CDs and CU-CDs could kill both *E. coli* and *S. aureus* within 150 min. In addition, there was no significant change in the level of reactive oxygen species (ROS) and lactate dehydrogenase (LDH) activity before and after the action of CDs on the tested bacteria. However, CDs can

cause direct damage to the cells of the tested bacteria, by inducing a large leakage of nucleic acids and proteins in the bacteria, destroying the surface structure of the bacteria, causing it to collapse and form holes. Not only that, but CDs also penetrate the cells, destroy the secondary structure of DNA, lead to DNA degradation, and ultimately achieve the purpose of killing the tested bacteria.

(3) The composite film achieves the comprehensive improvement of mechanical properties, barrier properties and targeted antibacterial ability through the interaction between CDs and hydrogen bonds in CS-PVA matrix. It was observed by scanning electron microscopy (TEM) that CDs were uniformly dispersed in the matrix and formed a dense network structure. The addition of CDs increased the tensile strength of the film from 32.2 MPa to 34.6 MPa (LL-CDs-CS-PVA) and 42.3 MPa (CU-CDs-CS-PVA). At the same time, the low transmittance of the composite film significantly inhibits photooxidation and water vapor permeation. Further antibacterial performance studies showed that LL-CDs-CS-PVA had the best inhibitory effect on *E. coli* with an inhibition zone diameter of 26.55 mm, while CU-CDs-CS-PVA showed better inhibitory effect on *S. aureus* with an inhibition zone diameter of 29.35 mm.

(4) The composite film can effectively resist the tested bacteria and significantly prolong the shelf life of strawberries and shrimps. During the 7-day storage period, compared with the control group, the composite film treatment group showed better preservation effect : the total number of colonies (TVC) of the treatment group decreased to 3.48-4.43 log CFU/g, and the volatile base nitrogen (TVB-N) decreased to 11.32-12.55 mg/100g, which was significantly lower than the control group 6.23 log CFU/g and 25.56 mg/100g; the pH value fluctuated little, the pH of strawberry was 6.16-6.34, and the pH of shrimp was 6.11-6.31. The weight loss rate of the treatment group decreased by 29.8-32.1%; the scores of surface gloss, odor and overall acceptance of strawberry and shrimp in the treatment group were significantly better than those in the control group ($p < 0.05$).

Conclusion: The results show that the fluorescence properties of LL-CDs and CU-CDs can be effectively improved by adjusting the precursor ratio, synthesis temperature, time and microwave intensity. When the MBC of LL-CDs and CU-CDs was 25 $\mu\text{g/mL}$, LL-CDs were more sensitive to *S. aureus*, while CU-CDs showed higher sensitivity to *E. coli*. Under the same treatment conditions, the killing effect of CDs on *S. aureus* was not only much higher than that of ampicillin, but also the required concentration was lower. Specifically, the bactericidal efficacy of LL-CDs against *S. aureus* was higher than that of *E. coli*, while the bactericidal efficacy of CU-CDs against *E. coli* was more significant. In addition, the higher the concentration of CDs and the longer the time of co-culture with bacteria, the faster the number of bacteria decreased. There was no significant change in ROS level and LDH activity in the bacteria before and after CDs treatment. However, CDs can cause damage to the cells of the tested bacteria by inducing a large leakage of nucleic acids and proteins in the bacteria, destroying the surface structure of the bacteria, causing it to collapse and

form holes. Subsequently, CDs further penetrate the cells, destroy the secondary structure of DNA, lead to DNA degradation, and ultimately kill the tested bacteria. LL-CDs and CU-CDs were loaded into CS-PVA matrix to prepare composite films. The film significantly prolonged the shelf life of strawberries and shrimps, and effectively maintained the sensory quality and nutritional quality of strawberries and shrimps by means of multiple mechanisms of ultraviolet barrier and physical barrier. In summary, LL-CDs and CU-CDs show good application potential in food preservative films. This study provides a theoretical basis and technical support for the further research and development of CDs preservative films in the field of food preservation.

Key words: Carbon Dots; Antibacterial Mechanism; Chitosan-Polyvinyl Alcohol; Composite Film; Food Preservation

目录

摘要.....	I
Abstract	III
中英文缩写对照表.....	X
第 1 章 绪论.....	1
1.1 食品保鲜的重要性和现状.....	1
1.2 CDs 的概述.....	2
1.2.1 CDs 的发现与命名.....	2
1.2.2 CDs 的分类.....	2
1.2.3 CDs 的制备.....	3
1.2.4 CDs 理化性质.....	4
1.3 ACDs 的研究进展.....	7
1.3.1 ACDs 的概念、特点及优势.....	7
1.3.2 ACDs 的抗菌机理.....	8
1.3.3 影响 ACDs 抗菌性能的因素.....	9
1.3.4 ACDs 的应用研究.....	10
1.4 本文研究内容与意义.....	11
1.4.1 研究内容.....	11
1.4.2 技术路线.....	12
1.4.3 研究意义与创新点.....	13
第 2 章 CDs 的制备及优化.....	14
2.1 引言.....	14
2.2 实验材料与仪器.....	14
2.2.1 实验材料.....	14
2.2.2 主要仪器.....	15
2.3 实验部分.....	16
2.3.1 LL-CDs 的合成及优化.....	16
2.3.2 CU-CDs 的合成及优化.....	16
2.4 数据统计与分析.....	18
2.5 结果与分析.....	19
2.5.1 LL-CDs 的合成工艺优化.....	19
2.5.2 CU-CDs 的合成工艺优化.....	20
2.5.3 CDs 的表征.....	20

2.6 讨论.....	26
2.7 本章小结.....	27
第3章 CDs 的抗菌性能研究.....	28
3.1 引言.....	28
3.2 实验材料与仪器.....	28
3.2.1 实验材料.....	28
3.2.2 主要仪器.....	29
3.2.3 受试菌及培养基.....	29
3.3 实验方法.....	30
3.3.1 细菌的活化及培养.....	30
3.3.2 CDs 的最小抗菌浓度对比分析.....	30
3.3.3 CDs 抗菌实验与杀菌动力学分析.....	30
3.3.4 CDs 的广谱抗菌性.....	30
3.3.5 CDs 与抗生素的比较.....	31
3.3.6 细菌细胞形貌的扫描.....	31
3.4 数据统计与分析.....	31
3.5 结果与分析.....	31
3.5.1 CDs 的最小抗菌浓度对比分析.....	31
3.5.2 CDs 的杀菌效能及动力学分析.....	33
3.5.3 CDs 的广谱抗菌性.....	33
3.5.4 CDs 与抗生素的比较.....	34
3.5.5 细菌形貌的扫描.....	35
3.6 讨论.....	36
3.7 本章小结.....	36
第4章 ACDs 对细菌细胞膜完整性的研究.....	38
4.1 引言.....	38
4.2 实验材料与试剂.....	38
4.2.1 实验材料.....	38
4.2.2 主要仪器.....	39
4.3 实验方法.....	39
4.3.1 LDH 含量测定.....	39
4.3.2 蛋白质与核酸的泄露.....	39
4.3.3 CDs 对受试菌 ROS 的影响.....	40

4.3.4 CDs 对受试菌 DNA 的影响	40
4.3.5 CDs 对受试菌 DNA 结构的影响	40
4.4 数据统计与分析	40
4.5 结果与分析	41
4.5.1 LDH 含量测定	41
4.5.2 CDs 对细菌内部 ROS 的影响	41
4.5.3 蛋白质与核酸的泄露	42
4.5.4 CDs 对受试菌 DNA 的影响	43
4.5.5 CDs 对受试菌 DNA 结构的影响	44
4.6 讨论	44
4.7 本章小结	45
第 5 章 ACDs 在食品保鲜膜中的应用研究	46
5.1 引言	46
5.2 实验材料与仪器	46
5.2.1 实验材料	46
5.2.2 主要仪器	47
5.3 实验部分	47
5.3.1 细菌培养	47
5.3.2 复合薄膜的制备	47
5.3.3 复合膜的形态分析	48
5.3.4 复合膜的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)	48
5.3.5 抑菌圈实验	48
5.3.6 复合膜的力学性能测试	48
5.3.7 复合薄膜透光率测试	48
5.3.8 复合膜含水率 (WC) 与水溶性 (WS) 的分析	49
5.3.9 ACDs 膜在食品保鲜的应用	49
5.4 数据统计与分析	49
5.5 结果与分析	50
5.5.1 复合膜的形态分析	50
5.5.2 复合膜的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)	52
5.5.3 抑菌圈实验	52
5.5.4 复合膜的力学性能测试	54
5.5.5 复合膜透光率测试	54

5.5.6 复合膜含水率 (WC) 与水溶性 (WS) 的分析	55
5.5.7 ACDs 膜在食品保鲜的应用	56
5.6 讨论	65
5.7 本章小结	66
第 6 章 结论与展望	67
6.1 结论	67
6.2 不足之处	67
6.3 展望	68
参考文献	69
致谢	81
作者简介	82

中英文缩写对照表

缩写词	英文	中文
L	Liter	升
mL	Milliliter	毫升
μ L	Microliter	微升
min	Minute	分钟
h	Hour	小时
OD	Optical Density	光密度
rpm	Revolutions Per Minute	转每分
g	Gram	克
mg	Milligram	毫克
μ g	Microgram	微克
TEM	Transmission Electron Microscope	透射电子显微镜
HRTEM	High Resolution Transmission Electron Microscope	高分辨透射电子显微镜
FL	Fluorescence Spectrum	荧光光谱
UV-Vis	Ultraviolet-visible Spectrophotometer	紫外-可见分光光度计
FT-IR	Fourier Transform Infrared	傅里叶变换红外光谱
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	X 射线光电子能谱
Zeta	Malvern Particle Size Analyze	马尔文粒径分析仪
QY	Fluorescence Quantum Yield r	荧光量子产率
CDs	Carbon Dots	碳点
ACDs	Antibacterial Carbon Dots	抗菌碳点
LL-CDs	Licorice-Lysine Carbon Dots	甘草-赖氨酸碳点
CU-CDs	Caffeic Acid-Urea Carbon Dots	咖啡酸-尿素碳点
ROS	Reactive Oxygen Species	活性氧

第1章 绪论

1.1 食品保鲜的重要性和现状

食品保鲜技术是减少资源浪费、提升经济效益的核心手段，其具有显著的经济效益和社会效益。通过延长食品保质期，可显著降低因腐败导致的经济损失，同时提高食品供应链的利用效率，也可助力农业与食品工业的可持续发展。食品保鲜技术是保障食品安全与品质的关键屏障^[1,2]。从传统腌制到现代纳米材料抗菌膜的技术演变，通过抑制微生物增殖、调控呼吸代谢，不仅能阻断腐败变质风险，还可维持食品色泽、质地与营养，满足消费者对安全与品质的双重需求。冷链物流使生鲜食品跨季节供应成为可能，生物保鲜剂让无添加健康食品普及化，而智能包装技术更构建了“从农田到餐桌”的全链条安全保障体系，最终实现“吃得放心、吃得新鲜”的社会福祉目标。

微生物污染严重威胁食品安全，已然成为食品保鲜领域面临的首要挑战。严重的生物污染会造成食品中毒问题，其中细菌性中毒，在食物中毒事件位居首位。为了抑制细菌快速繁殖，传统的处理方式有低温、烘干、真空包装以及高糖、高盐、高油等。然而，在实际应用中存在成本高昂或效果不佳等问题。因为传统的食品保鲜膜在抗菌性能方面存在局限性，所以，开发高效抗菌的食品保鲜膜，不仅能够有效抑制微生物污染、延长食品保质期，还能进一步提升食品安全水平，对减少食品浪费和保障公众健康具有重要意义^[3]。



图 1-1 保鲜膜下的鲜蔬宝库

Figure 1-1 Fresh vegetable treasure house under fresh-keeping film

近年来,以生物质为主要成分的新型保鲜薄膜逐渐受到关注,如蛋白质保鲜膜、脂质保鲜膜和多糖保鲜膜^[4]。其中,多糖膜因其强度高、透明度良好和化学性质稳定等优点,成为研究的热点。壳聚糖(CS)作为一种天然碱性多糖,不仅来源广泛、成本低,还具有良好的降解性、生物相容性、无毒性 and 成膜性。因此,CS成为了制备食品保鲜膜的优选材料^[5]。而聚乙烯醇(PVA)是一种具有独特性能的水溶性高分子聚合物,可以与CS通过分子间氢键复合,改善CS膜的脆性,可增强复合膜的机械拉伸强度^[6]。因此,开发基于CS与PVA的复合型智能保鲜薄膜成为突破传统技术瓶颈的重要方向。通过将CS、PVA与CDs复合,构建兼具高效抗菌和湿度调控的多维保鲜体系。例如,CDs-聚糖-碳量子点复合膜既能通过纳米材料增强机械阻隔性能,又能利用CDs的靶向抗菌特性精准抑制食源性致病菌,同时其荧光特性还可实现食品新鲜度的可视化监测,形成“抗菌-阻氧-智能感知”协同增效的新型保鲜策略。

1.2 CDs 的概述

1.2.1 CDs 的发现与命名

碳点(Carbon Dots, 简称CDs)是一种尺寸小于10 nm的零维纳米材料,是由分散的类球状碳颗粒组成,其表面具有明显的晶格和化学基团、具有显著荧光特性的零维碳纳米材料。2004年^[7],研究者在电泳分离荧光单壁碳纳米管时,意外地观察到了一种具有独特荧光性能的碳纳米颗粒,这标志着CDs的首次问世。经过几年的深入研究,2006年^[8],利用激光烧灼碳靶材并通过钝化试剂处理,成功制备出了蓝色荧光碳质颗粒,并正式将其命名为CDs。它是继二维石墨烯、一维碳纳米管和零维富勒烯等碳纳米材料之后发现的一种新型荧光材料。

1.2.2 CDs 的分类

CDs的分类主要基于其结构组成和特性。按照其结构组成和特性可分为三大类。基于结构组成可以分为三种:(1)石墨烯量子点(Graphene Quantum Dots, GQDs):由单层或多层石墨烯形成的碳核,以及边缘部位连接的化学基团构成。这类材料呈现出各向异性,横向尺寸大于纵向高度,且具备典型的晶格结构;(2)聚合物点(Polymer Dots, PDs):由单体或线性聚合物,经脱水反应或部分碳化过程,形成交联聚集体。聚合物点的内部不存在晶格结构,按照分子共轭特性,又可划分为非共轭聚合物点和共轭聚合物点^[9];(3)碳纳米点(Carbon Nanodots, CNDs):外观通常呈球状。依据内部结构差异,可细分为两类:一类是拥有晶格结构的碳量子点,另一类是没有晶格结构的普通碳