

# 可用于防晒吸收剂的广谱抗紫外碳点的制备

陈奇丹<sup>1,2</sup>, 陈冠吉<sup>1,2</sup>, 游善媚<sup>1</sup>, 臧欣瑶<sup>1,2</sup>, 杨 柏<sup>2,3</sup>

(1. 珠海科技学院生命科学学院, 珠海 519041;

2. 吉林大学珠海研究院, 珠海 519041;

3. 吉林大学化学学院, 超分子结构与材料国家重点实验室, 长春 130012)

**摘要** 防晒吸收剂是防晒产品中的关键物质, 是吸收紫外线的有效成分. 然而, 传统的有机和无机吸收剂都存在未知的人体健康及环境危害、稳定性和水溶性差以及紫外吸收波长范围较窄等问题, 因此, 研发环境友好的广谱抗紫外防晒吸收剂材料对于防晒产品的开发具有重要意义. 碳点材料因其化学稳定性好、光学性能优异、制备方法简单、成本低及环境友好等优点而展示出良好的应用前景. 本文首先以盐酸多巴胺及邻苯二胺、柠檬酸及尿素为原料, 通过简单水热法制备并提纯出UVB和UVA吸收碳点材料(分别命名为O-CDs和A-CDs), 并利用X射线光电子能谱(XPS)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)等分析方法表征了其组成和形貌结构, 通过紫外吸收光谱(UV)和荧光光谱测试了其光学性能. 研究结果表明, 将O-CDs和A-CDs以最佳质量比1:1.5混合, 可制成广谱抗紫外碳点防晒吸收剂材料(命名为B-CDs). 将B-CDs作为有效防晒吸收剂成分制备了可顺滑书写的墨水添加剂, 并测试了其一定周期内(120 h)的抗紫外光稳定性. 结果表明, 所制备的碳点作为防晒墨水成分具有抗紫外辐射效果显著、稳定性好的优点, 说明碳点材料作为广谱防晒吸收剂在防晒产品中的应用具有可行性.

**关键词** 碳点; 广谱抗紫外; 防晒吸收剂

中图分类号 O631; O657.3

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240313

## Preparation of Broad-spectrum UV Protection Carbon Dots for the Application of Sunscreen Absorber

CHEN Qidan<sup>1,2\*</sup>, CHEN Guanji<sup>1,2</sup>, YOU Shanmei<sup>1</sup>, ZANG Xinyao<sup>1,2</sup>, YANG Bai<sup>2,3\*</sup>

(1. School of Life Sciences, College of Zhuhai Science and Technology, Zhuhai 519041, China;

2. Zhuhai Institute, Jilin University, Zhuhai 519041, China;

3. State Key Laboratory of Supramolecular Structure and Materials, College of Chemistry,

Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract** Sunscreen absorber, the basic ultraviolet (UV) protection additives that absorb UV rays, is the active ingredient in sunscreen products. However, traditional sunscreen absorbers are known as organic and inorganic chemicals which have problems such as unknown toxicity for human health and environment, instability, poor water solubility, and a narrow range of UV absorption, the study of eco-friendly broad-spectrum sunscreen absorber materials is important for the application of sunscreen products. In recent years, carbon dots have shown good

收稿日期: 2024-06-26. 网络首发日期: 2024-08-02.

联系人简介: 陈奇丹, 女, 博士, 教授, 主要从事环保发光材料的制备及应用方面的研究. E-mail: qidanchen@jlu.edu.cn

杨 柏, 男, 博士, 教授, 主要从事碳化聚合物点功能材料方面的研究. E-mail: byangchem@jlu.edu.cn

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项基金(批准号: 2020ZDZX2036)、珠海市基础与应用基础课题项目(批准号: ZH22017003200015PWC)和珠海科技学院三个层次人才建设工程资助.

Supported by the Guangdong Special Foundation for the Major Program of Higher Education, China(No.2020ZDZX2036), the Zhuhai Basic and Applied Basic Research Foundation, China(No.ZH22017003200015PWC) and the Three Levels of Talent Project of Zhuhai College of Science and Technology, China.

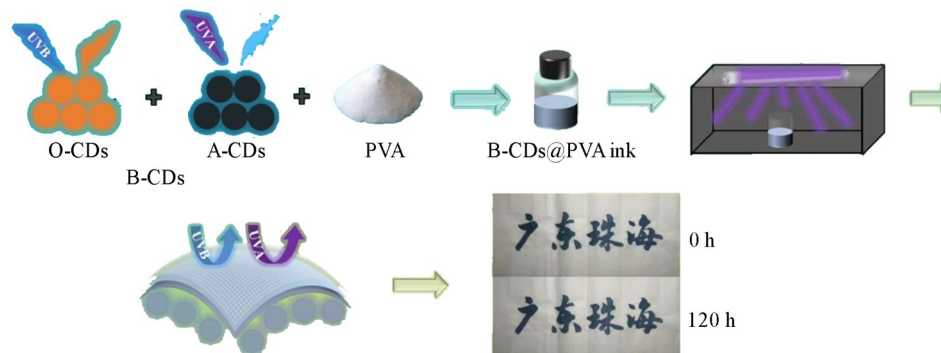
properties in the application of UV absorbers due to their chemistry stability, eco-friendly, excellent UV absorption efficiency. In this study, two kinds of carbon dots (named O-CDs and A-CDs, respectively) were prepared from dopamine hydrochloride and *o*-phenylenediamine, citric acid and urea independently by simple one-pot hydrothermal synthesis method, purified by column chromatography and then characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), and fluorescence spectroscopy. The results showed that a broad-spectrum UV protection material named as B-CDs was developed by mixing O-CDs and A-CDs with the optimized mass ratio of 1:1.5. In addition, the B-CDs were added as a broad-spectrum UV absorber to polyvinyl alcohol (PVA) solution to prepare the UV protection calligraphy ink, and the sunscreen effect stability of the ink was tested in a certain period (120 h). The results indicated that the broad-spectrum carbon dots UV absorber is high-efficiency and stable, and carbon dots have the potential to be used as ideal photostable broad-spectrum UV absorber additives for sunscreen products.

**Keywords** Carbon dots; Broad-spectrum UV protection; Sunscreen absorber

根据波长的不同,紫外线可分为UVA(320~400 nm)、UVB(280~320 nm)和UVC(200~280 nm)<sup>[1,2]</sup> 3种。在这3种波长的紫外线中,UVC会被臭氧层吸收,只有UVA和UVB才能突破臭氧层到达地球表面<sup>[3]</sup>。UVA和UVB会与空气中的氧气结合,在聚合物材料中产生自由基<sup>[4,5]</sup>,最终通过破坏物质的化学键影响结构稳定性而使其老化<sup>[6]</sup>。传统的UV吸收剂,如二苯甲酮、苯并三氮唑、三嗪等有机吸收剂<sup>[7]</sup>和TiO<sub>2</sub>、ZnO、CeO<sub>2</sub>等无机吸收剂<sup>[8]</sup>虽然应用广泛、种类丰富,但都存在污染环境、紫外吸收波长范围较窄及稳定性和水溶性差等问题<sup>[9,10]</sup>。近年来,由于苯甲酮及辛氧酸酯等紫外线有机吸收剂已被证明对珊瑚礁生态系统有害<sup>[11]</sup>,一些热带地区(如帕劳、夏威夷等)已限制其使用。因此,研究出环境友好、紫外吸收光谱宽、稳定性好的防晒吸收剂材料对防晒产品的应用具有重要意义。

碳点(CDs)是一类新型的零维碳纳米材料(尺寸小于10 nm),具有紫外线吸收性能优异、合成方法简单、光学稳定性良好及细胞毒性低等优点<sup>[12-15]</sup>。Hernandez-Rivera等<sup>[16]</sup>将碳点与聚偏氟乙烯复合,该碳点复合物可用作UVA防晒霜的有效成分。Qiu等<sup>[17]</sup>合成了水溶性碳点,将其与聚乙烯醇复合后获得了高性能的紫外线屏蔽膜。该薄膜高度透明且可以阻挡99%以上的紫外线。Xu等<sup>[18]</sup>用氮掺杂的3-氨基喹啉和柠檬酸合成了全紫外波段吸收的碳点并用于透明防晒伞产品开发。所制备的防晒伞对全紫外波段光线的阻隔率可达97.2%。

本文以盐酸多巴胺和柠檬酸为碳源、邻苯二胺和尿素为氮源,通过水热方法合成了水溶性碳点材料,经紫外光谱表征筛选出在UVA和UVB波段分别具有最佳吸收的广谱抗紫外碳点材料O-CDs及A-CDs,然后将其按1:1.5的质量比混合作为广谱防晒吸收剂添加成分(B-CDs)加入至聚乙烯醇(PVA)溶液中制备了B-CDs@PVA防晒墨水,并探究了B-CDs@PVA在120 h紫外光连续照射下的稳定性,对其防晒应用的可行性进行了初步探索(Scheme 1)。



**Scheme 1** Experimental flow chart of the preparation of broad-spectrum carbon dots UV absorber and the stability test for UV protection application of the B-CDs@PVA inks

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

盐酸多巴胺( $C_8H_{12}ClNO_2$ )、邻苯二胺( $C_6H_8N_2$ )、尿素( $CO(NH_2)_2$ )和无水柠檬酸,分析纯,萨恩化学技术(上海)有限公司;聚乙烯醇(PVA)和二氯甲烷( $CH_2Cl_2$ ),分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;无水乙醇和无水甲醇,分析纯,汕头西陇化工股份有限公司;硅胶(200-300目),阿拉丁试剂(上海)有限公司;石英砂,上海国药集团化学试剂有限公司。

IR Prestige-21型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、UV-2450型紫外-可见(UV-Vis)分光光度计和RF-5301型荧光分光光度计,日本Shimadzu公司;ESCALAB Xi+型X射线光电子能谱仪(XPS),美国Thermo Fisher公司;FEI Tecnai F20型透射电子显微镜(TEM),美国FEI公司;Ultima IV型X射线衍射仪(XRD),日本Rigaku公司;FD-1A-50型真空冷冻干燥机,北京博医康仪器有限公司;功率15 W、波长分别为340 nm和295 nm的紫外灯,深圳冠宏雅光电科技有限公司。

### 1.2 实验过程

**1.2.1 UVB碳点的制备** 参照文献[19]方法,以盐酸多巴胺为碳源,邻苯二胺为氮源,通过水热方法制备UVB碳点。将0.2270 g盐酸多巴胺、0.1080 g邻苯二胺、5 mL乙醇和5 mL去离子水加入50 mL烧杯中,超声30 s使两种固体完全溶解且混合均匀,转移至带聚四氟乙烯内衬的反应釜中,于180 °C的电热鼓风干燥箱中反应16 h,待反应釜自然冷却后,将所得暗红色碳点原液用0.22 μm无机相微孔滤膜过滤后置于离心管中密封,储存备用。

将制备的碳点利用二氯甲烷-甲醇(体积比20:1)作为洗脱剂进行色谱分离,收集到橙(Orange)、红(Red)、黄(Yellow)3种不同荧光“色带”的碳点,分别命名为O-CDs, R-CDs, Y-CDs。将3种碳点溶液旋蒸蒸发除去溶剂,然后于40 °C真空干燥24 h,于干燥器中储存备用。

**1.2.2 UVA碳点的制备** 将0.7000 g柠檬酸、0.7000 g尿素、5 mL乙醇和5 mL去离子水加入50 mL烧杯中,超声30 s使两种固体完全溶解且混合均匀,转移至带聚四氟乙烯内衬的反应釜中,于180 °C的电热鼓风干燥箱中反应4 h;待反应釜自然冷却后,用0.22 μm无机相微孔滤膜过滤原液,得到墨绿色碳点原液,通过冷冻干燥得到碳点粉末,命名为A-CDs,于干燥器中储存备用。

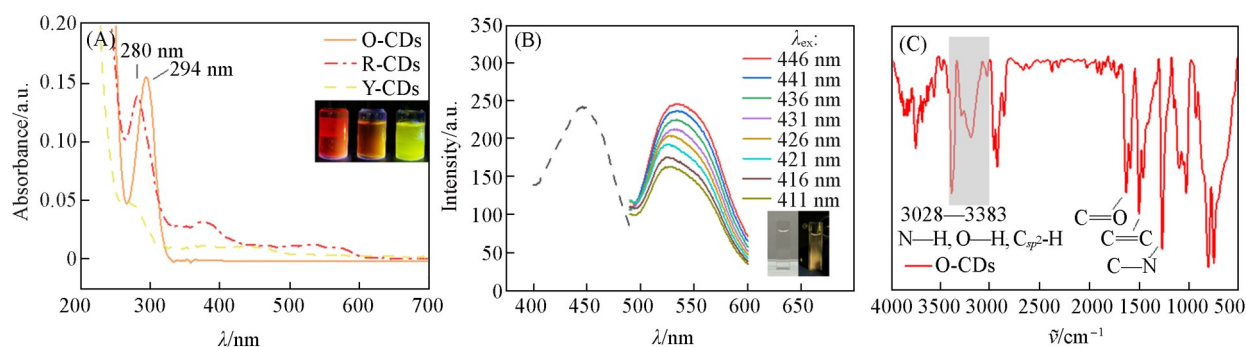
**1.2.3 广谱防晒吸收剂碳点的筛选** 通过紫外光谱分析O-CDs, R-CDs和Y-CDs,选出在UVB波段有最优吸收的O-CDs(1.0 mg)分别与1.0, 1.2, 1.5, 2.0和2.5 mg A-CDs混合,加入30 mL去离子水超声5 min后进行紫外-可见吸收光谱表征。筛选出在UVA与UVB波段都有最优吸收的混合碳点,命名为B-CDs。

**1.2.4 碳点墨水的制备** 将B-CDs作为碳点墨水的主要成分,为了增加墨水的黏稠度,添加0.05 g/mL的聚乙烯醇(PVA)溶液。将1.5 g PVA溶于30 mL去离子水中,并在90 °C下搅拌2 h直到溶液澄清透明,分别加入不同质量的B-CDs(1.1, 2.2, 3.3和4.0 mg),配制不同B-CDs含量的碳点墨水B-CDs@PVA。

## 2 结果与讨论

### 2.1 UVB吸收剂O-CDs的表征

以二氯甲烷-甲醇(体积比20:1)作为洗脱剂,对由盐酸多巴胺和邻苯二胺制备的碳点进行柱层析色谱分离,得到O-CDs, R-CDs和Y-CDs 3种碳点。图1(A)为其紫外-可见吸收光谱,图1(A)插图为其3种碳点在365 nm紫外灯下的光学照片。可以看出,O-CDs紫外最大吸收峰位于294 nm,R-CDs的紫外最大吸收峰位于280 nm,O-CDs与R-CDs的紫外最大吸收峰都处在UVB(280~320 nm)之内。综合考虑,选择最大紫外吸收峰在294 nm的O-CDs作为UVB吸收的碳点。由图1(B)可见,O-CDs的最大激发波长为446 nm,最大发射波长为533 nm,用411~446 nm激光作为激发波长时,O-CDs的发射波长始终保持在533 nm,表现出与激发光无关的发射性质,说明制备的碳点形貌结构和尺寸均一性良好<sup>[20]</sup>。

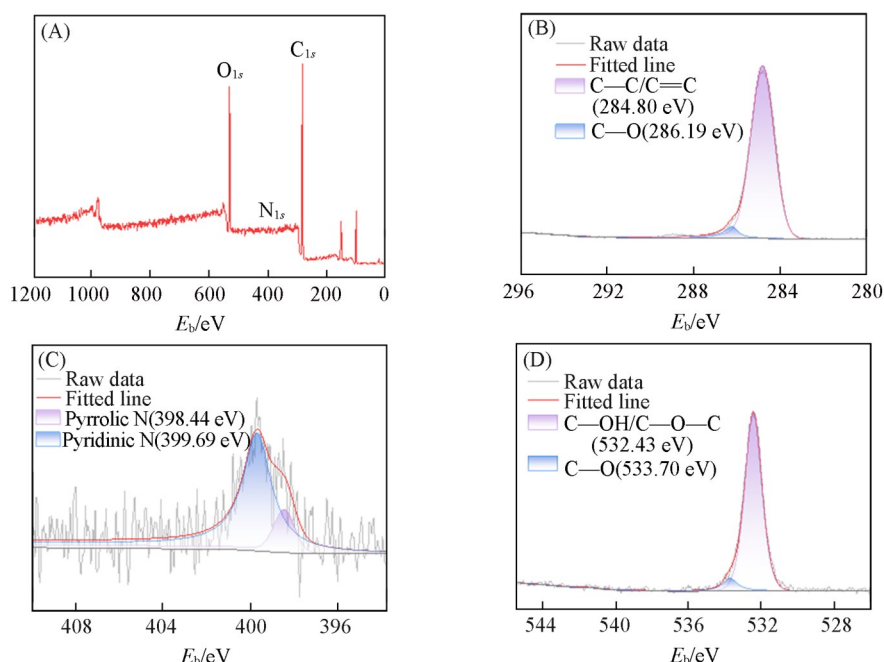


**Fig. 1 UV-Vis absorption spectra of O-CDs, R-CDs and Y-CDs(A), fluorescence spectra(B) and FTIR spectrum(C) of O-CDs**

Insets: (A) photos of O-CDs, R-CDs and Y-CDs (from left to right) under 365 nm UV light; (B) photos of O-CDs under visible light (left) and 365 nm UV light (right).

图1(C)为O-CDs的红外光谱. 3298与3383  $\text{cm}^{-1}$ 处分别为—OH和—NH<sub>2</sub>的伸缩振动峰<sup>[21]</sup>, 3028  $\text{cm}^{-1}$ 处为苯环C—H的伸缩振动峰, 1448~1500  $\text{cm}^{-1}$ 和1621  $\text{cm}^{-1}$ 附近的强吸收峰分别对应于C=C和C=O的伸缩振动<sup>[22]</sup>, 1269  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—N的吸收峰. 结果表明, O-CDs中含有一OH, C=O和—NH<sub>2</sub>等官能团, 这些官能团源于原料及高温碳化后的产物.

O-CDs的XPS谱图[图2(A)]在284.1, 399.0和531.8 eV处有3个峰, 分别对应于C<sub>1s</sub>, N<sub>1s</sub>和O<sub>1s</sub>, 表明O-CDs主要由C, N和O元素组成(C, H和O含量分别为74.42%, 1.03%和24.54%). C<sub>1s</sub>高分辨率XPS谱图[图2(B)]可拟合为284.80和286.19 eV处的两个峰, 分别与C—C/C=C, C—O键相对应. N<sub>1s</sub>高分辨率XPS谱图[图2(C)]可以拟合为398.44和399.69 eV处的两个峰, 分别对应于吡咯N和吡啶N. O<sub>1s</sub>高分辨率XPS谱图[图2(D)]可以拟合为532.43和533.70 eV处的两个峰, 分别对应于C—OH/C—O—C和C—O键. 上述结果与FTIR光谱分析一致, 证明了所制备的O-CDs表面含有丰富的O—H, N—H和C=C键<sup>[23]</sup>.



**Fig. 2 Survey XPS spectrum(A) and C<sub>1s</sub>(B), N<sub>1s</sub>(C) and O<sub>1s</sub>(D) high resolution XPS spectra and fitting results of O-CDs**

图3示出O-CDs的TEM照片、粒径分布柱状图及其高斯拟合曲线及XRD谱图. 由图3[(A)]可以看出, O-CDs为球形, 且具有明显的晶格条纹, 平均晶格间距为0.21 nm, 与文献报道的石墨的(100)晶面一致<sup>[24]</sup>. 由图3[(B)]可以看出, O-CDs的粒径分布范围为1.44~4.13 nm, 平均粒径为2.74 nm.

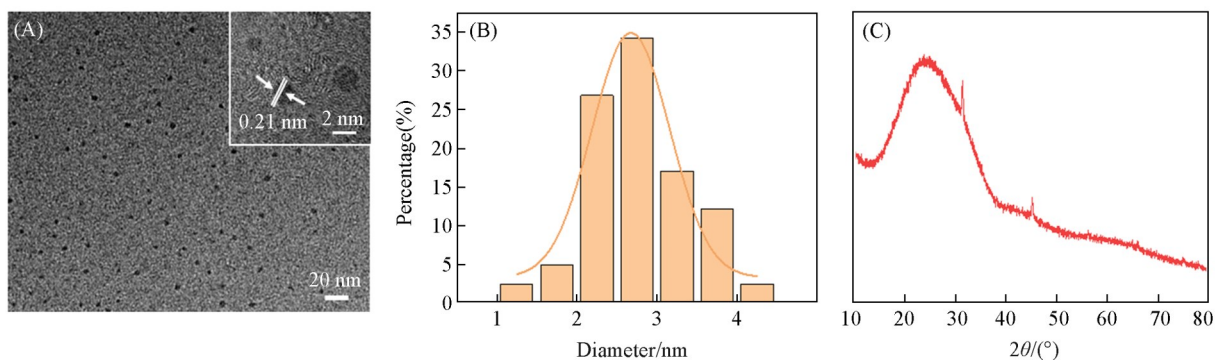


Fig. 3 TEM and HRTEM(inset) images(A), size distribution histogram with Gaussian fitting curve(B) and XRD pattern(C) of O-CDs

图3(C)在 $2\theta=24^\circ$ 处出现了一个宽的衍射峰,表明所制备的O-CDs中存在一些原子结构接近石墨的有序层状纳米碳,这与高分辨TEM(HRTEM)图像结果一致<sup>[25]</sup>.

## 2.2 A-CDs的表征

A-CDs在234和338 nm处出现较强的吸收峰[图4(A)],这些峰与A-CDs中的 $p$ 轨道电子跃迁有关:234 nm处的吸收峰主要由 $C=C$ 键的 $\pi\rightarrow\pi^*$ 跃迁引起,338 nm处吸收峰对应于 $C=O$ 键的 $n\rightarrow\pi^*$ 跃迁. A-CDs主要吸收UVA波段(320~400 nm)的紫外光,故可用作UVA吸收剂材料.由图4(A)插图可以看出,A-CDs的乙醇溶液在日光下为淡黄色,在365 nm的紫外光下呈现明亮的蓝色荧光.由图4(B)可见,A-CDs的最大激发波长为344 nm,最大发射波长为450 nm,且A-CDs的荧光发射峰位也不会随着激发波长在304~344 nm区间的改变而移动,这可能与最佳反应条件和原料配比下A-CDs表面完全被钝化,发光源于 $sp^2$ 碳团簇的单一辐射跃迁所致<sup>[26]</sup>.

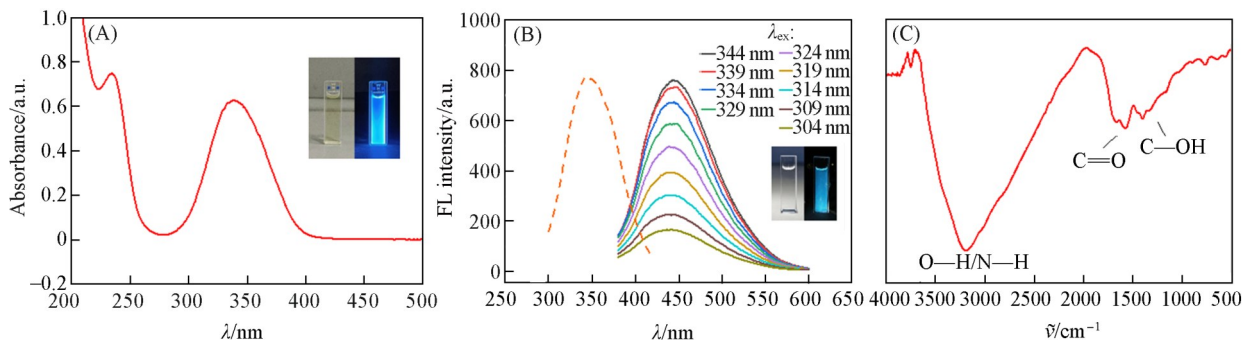


Fig. 4 UV-Vis absorption spectrum(A), fluorescence spectra(B) and FTIR spectrum(C) of A-CDs

The insets are photos of A-CDs under visible light(left) and 365 nm UV light(right), respectively.

图4(C)中在 $3194\text{ cm}^{-1}$ 处有一个宽的吸收带,这归属于 $N-H$ 和 $O-H$ 键的伸缩振动<sup>[27]</sup>;在 $1664\text{ cm}^{-1}$ 附近出现 $C=O/C=N$ 的伸缩振动峰<sup>[28]</sup>;  $1311\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-C-O$ 的振动峰.以上分析表明,A-CDs表面富含 $-OH$ ,  $-COOH$ 和 $-NH_2$ 等官能团,这些基团属于亲水基团,增加了A-CDs在水溶液中的稳定性和亲水性,故A-CDs作为水溶性防晒吸收剂将具有广泛的应用前景.

A-CDs的XPS表征结果进一步证实了FTIR结果. A-CDs在285.18, 400.10和531.73 eV处有3个峰,分别对应于 $C_{1s}$ ,  $N_{1s}$ 和 $O_{1s}$ , C, N和O元素含量分别为69.47%, 18.94%和11.60%[图5(A)].此外,从A-CDs的 $C_{1s}$ 高分辨率XPS谱图[图5(B)]中可观察到 $C-C/C=C$ (284.80 eV)、 $O-C=O$ (288.56 eV)、 $C=O$ (287.45 eV)和 $C-O$ (286.14 eV)的吸收峰,表明A-CDs含 $-OH$ 和 $-COOH$ 官能团.  $N_{1s}$ 高分辨率XPS谱图在399.84和401.26 eV处存在吡啶N和取代N的吸收峰[图5(C)].  $O_{1s}$ 的高分辨率XPS谱图包含531.51和533.14 eV处的两个峰,分别为 $C=O$ 和 $C-O$ 的吸收峰[图5(D)]<sup>[29]</sup>.

由A-CDs的TEM照片[图6(A)]可见,A-CDs呈均匀的球形,HRTEM照片显示A-CDs的晶格间距为0.33 nm[图6(A)插图],与石墨的(002)晶面接近. A-CDs粒径在2.50~7.70 nm之间,平均粒径为

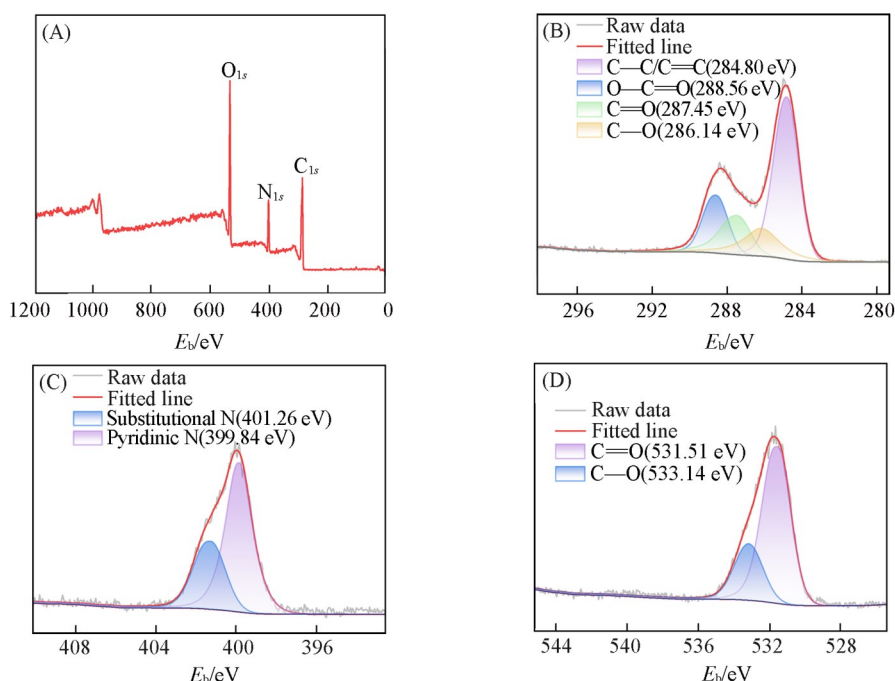


Fig. 5 Survey XPS spectrum(A) and C<sub>1s</sub>(B), N<sub>1s</sub>(C), and O<sub>1s</sub>(D) high resolution XPS spectra and fitting results of A-CDs

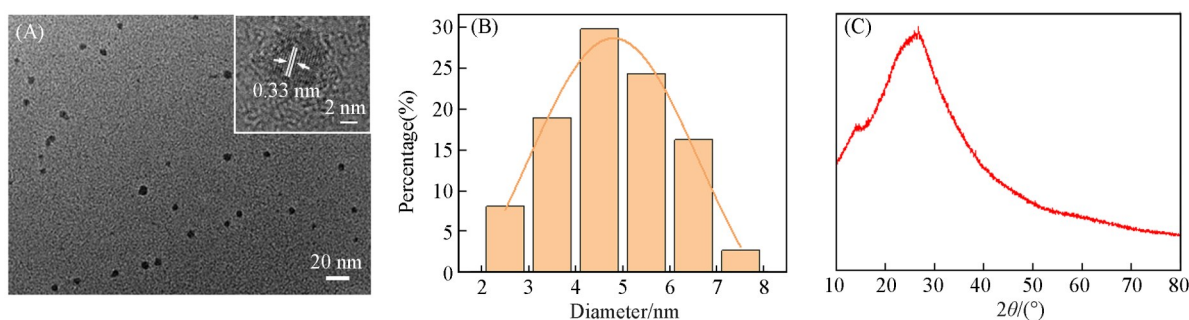


Fig. 6 TEM image(A), size distribution histogram with Gaussian fitting curve(B) and XRD pattern(C) of A-CDs

Inset of (A): HRTEM image.

4.91 nm[图6(B)]. A-CDs的XRD谱图[图6(C)]在 $2\theta=14^\circ$ 处有一个弱衍射峰,在 $2\theta=26^\circ$ 处有一个较宽的特征衍射峰,推测A-CDs具有类似石墨的纳米层状结构,与HRTEM结果基本一致<sup>[30]</sup>.

### 2.3 广谱吸收剂B-CDs的比例优化

选取 $m(\text{O-CDs}):m(\text{A-CDs})=1:1.0, 1:1.2, 1:1.5, 1:2.0$ 和 $1:2.5$ 进行吸收最大值的优化,结果如图7所示.比较338 nm及294 nm两处的紫外最大吸收峰可见,当 $m(\text{O-CDs}):m(\text{A-CDs})$ 为 $1:1.5$ 时,所

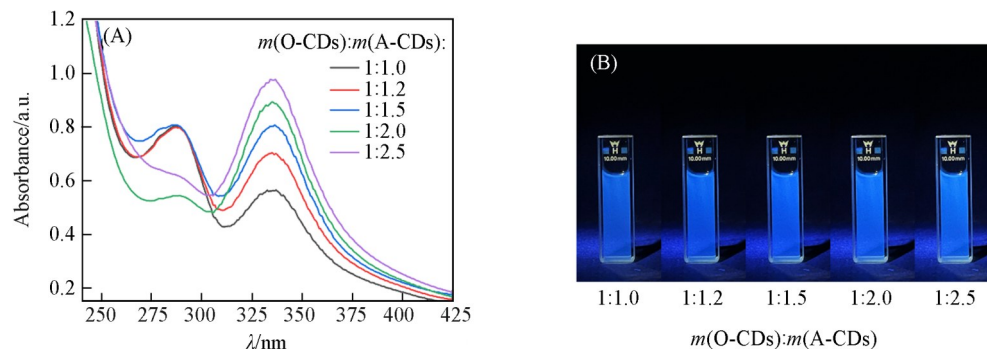


Fig. 7 UV absorption spectra of B-CDs with different  $m(\text{O-CDs}):m(\text{A-CDs})$  ratios(A) and photos of B-CDs aqueous solution with different  $m(\text{O-CDs}):m(\text{A-CDs})$  ratios under 365 nm UV light(B)

得混合体系对UVA和UVB综合吸收效果最好,因此,选取 $m(\text{O-CDs}):m(\text{A-CDs})=1:1.5$ 为最佳配比制备广谱防晒吸收剂碳点材料B-CDs.

#### 2.4 防晒墨水中B-CDs添加量的优化

以B-CDs作为广谱防晒吸收剂,初步以30 mL 0.05 g/mL的PVA溶液作为溶剂来对防晒墨水(B-CDs@PVA)中的B-CDs含量进行优化.由紫外吸收光谱[图8(A)]可见,与未添加碳点的纯PVA成分相比,B-CDs碳点是墨水的主要防晒成分,随着B-CDs含量的增加,碳点墨水溶液的紫外吸收程度大大提高,表明增大B-CDs含量有助于提高紫外吸收效率.此外,由图8(B)可见,随着B-CDs含量从1.1 mg逐渐增加,当PVA溶液中B-CDs含量达到4.0 mg时,在200~400 nm紫外波长区域内,透射率降低最显著.因此,选择30 mL 0.05 g/mL的PVA溶液中含有4.0 mg B-CDs防晒剂成分作为最优B-CDs添加量.

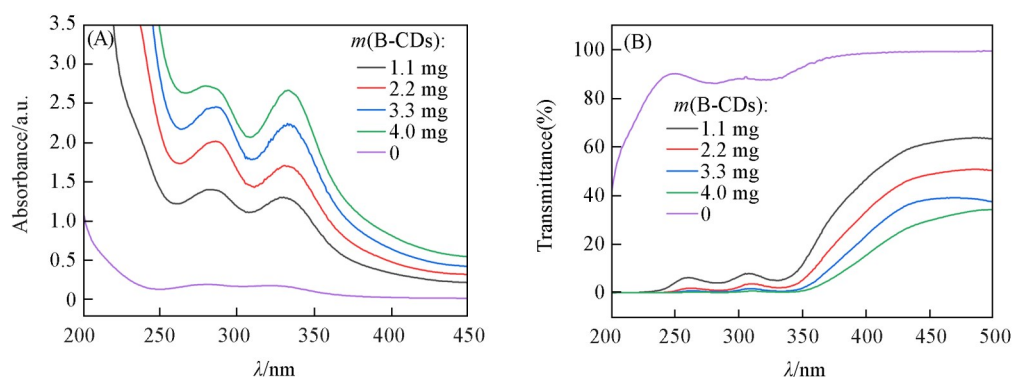


Fig. 8 UV absorption spectra(A) and UV transmission spectra(B) of B-CDs@PVA ink with different contents of B-CDs in 30 mL 0.05 g/mL PVA solution

#### 2.5 碳点墨水的防晒效果稳定性

在室温条件下,将最优比例的B-CDs防晒墨水同时暴露于波长分别为295 nm与340 nm的15 W紫外灯下,持续照射120 h,考察B-CDs防晒墨水在295 nm(UVB)与340 nm(UVA)紫外光照射下的稳定性.图9为340 nm紫外灯照射0, 12, 24, 48, 72, 96, 120 h后B-CDs墨水的照片.可以看出,墨水颜色在紫外光照射后没有显著变化.

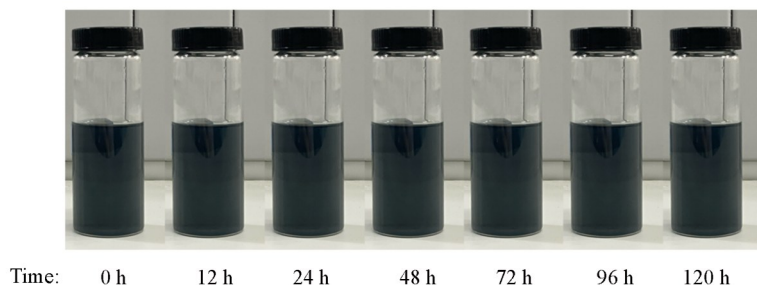
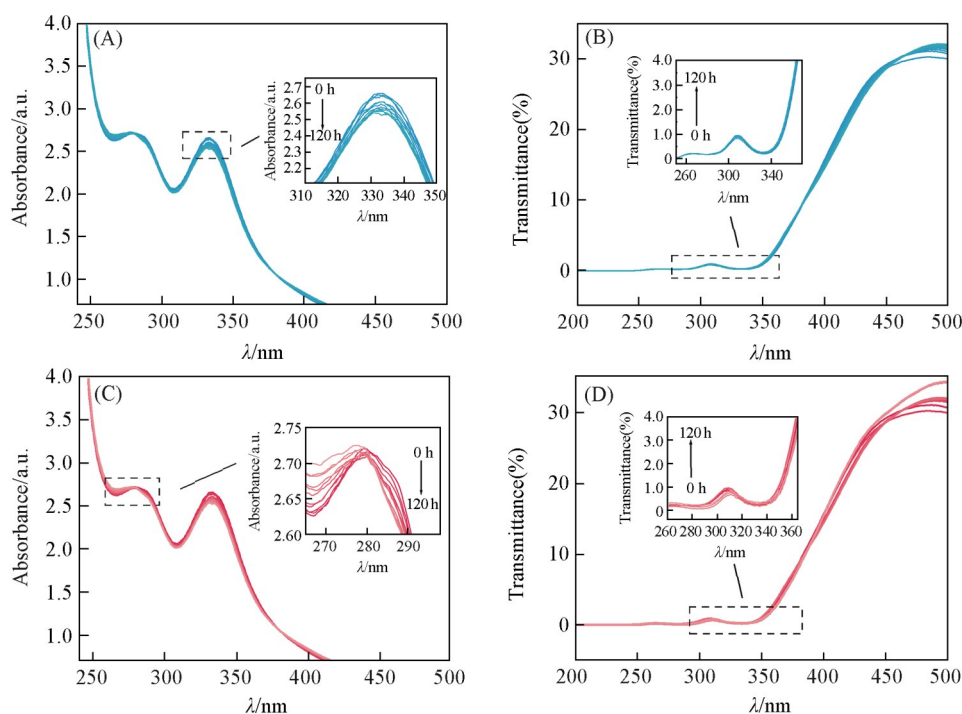


Fig. 9 Photos of B-CDs@PVA ink under 340 nm UV lamp irradiation for different time

图10为B-CDs@PVA防晒墨水在340 nm和295 nm紫外光照射0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 12, 24, 48, 72, 96和120 h后的紫外吸收及透射光谱图.由图10(A)和(B)可见,在340 nm紫外灯照射下,120 h内B-CDs墨水的吸光度和透射率波峰仅出现轻微变动,吸光度和透射率仅下降3.5%和2.6%,而在295 nm紫外灯照射120 h后,墨水的吸光度和透射率同样变化不显著,仅下降4%和2.9%[图10(C)和(D)],这表明该墨水具有优异的广谱抗紫外性能,在一定周期内防晒效果稳定,该碳点材料可在相关防晒吸收剂产品中作为广谱抗紫外添加成分使用.



**Fig. 10** UV absorption(A, C) and transmittance(B, D) spectra of B-CDs@PVA ink under 340 nm(A, B) and 295 nm(C, D) UV lamp for 0–120 h

Insets: stability of the absorption (A, C) and transmittance peak (B, D) under irradiation of a 340 nm UV lamp (A, B) and a 295 nm UV lamp(C, D).

### 3 结 论

以盐酸多巴胺与邻苯二胺、柠檬酸与尿素两组原料水热合成了两种不同的碳点, 经筛选后按最优比例混合制成在UVA和UVB波段均有优异吸收的广谱型防晒吸收剂材料, 并进行了组成、形貌结构、性能等表征, 应用紫外光谱跟踪测试了防晒效果. 此外, 还将该广谱抗紫外碳点防晒吸收剂制备成防晒碳点墨水, 并对其防晒稳定性进行了研究. 在120 h内, 用功率为15 W波长为295 nm与340 nm的两种紫外灯在室温下持续照射该碳点墨水, 通过紫外光谱的吸光度和透光度变化追踪墨水的防晒效果, 发现其具有很好的防晒稳定性. 以上实验结果表明, 所制备的广谱抗紫外碳点材料可作为高效防晒吸收添加剂应用于防晒墨水中. 由于碳点材料颜色透明、水溶性好, 根据防晒品需求(如颜色、吸收波段等), 可通过优化比例筛选出适合的混合碳点材料进行添加, 具有广泛的应用潜力.

### 参 考 文 献

- [1] Qiu J. M., Ye W. H., Xu X. K., Chen C. C., Xu Z. Q., Lei B. F., Hu C. F., Zhuang J. L., Dong H. W., Hu G. Q., Liu Y. L., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2022**, 10(36), 11958–11968
- [2] Zhang Y., Naebe M., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2021**, 9(4), 1427–1442
- [3] Chen C. C., Xu Z. Q., Qiu J. M., Ye W. H., Xu X. K., Wang R. Z., Hu C. F., Zhuang J. L., Lei B. F., Li W., Zhang X. J., Hu G. Q., Liu Y. L., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2022**, 5(7), 9140–9149
- [4] Feng X., Zhao Y. F., Jiang Y. Q., Miao M., Cao S. M., Fang J. H., *Carbohydr. Polym.*, **2017**, 161, 253–260
- [5] Yan W. Q., de la Vega J., Eroğlu Ö., Heisenberg L., Wang D. Y., *Macromol. Mater. Eng.*, **2024**, 309(5), 2300456
- [6] Tarbuk A., Grancarić A. M., Šitum M., *Autex Res. J.*, **2016**, 16(1), 19–28
- [7] Barman B. K., Sele Handegård Ø., Hashimoto A., Nagao T., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2021**, 9(29), 9879–9890
- [8] Gause S., Chauhan A., *J. Mater. Chem. B*, **2016**, 4(2), 327–339
- [9] Shi C., Zhang S., Wang W. Y., Linhardt R. J., Ragauskas A. J., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2019**, 8(1), 22–28
- [10] Esperanza M., Seoane M., Rioboo C., Herrero C., Cid Á., *Sci. Total Environ.*, **2019**, 669, 412–420
- [11] Vesper I., *Nature*, **2017**, 21332[2017-02-03], <https://www.nature.com/articles/nature.2017.21332>
- [12] Hess S. C., Permatasari F. A., Fukazawa H., Schneider E. M., Balgis R., Ogi T., Okuyama K., Stark W. J., *J. Mater. Chem. A*, **2017**,

- 5(10), 5187—5194
- [13] Miao S. H., Liang K., Zhu J. J., Yang B., Zhao D. Y., Kong B., *Nano Today*, **2020**, *33*, 100879
- [14] Javed N., O'Carroll D. M., *Part. Part. Syst. Charact.*, **2021**, *38*(4), 2000271
- [15] Esfandiari N., Bagheri Z., Ehtesabi H., Fatahi Z., Tavana H., Latifi H., *Heliyon*, **2019**, *5*(12), E02940
- [16] Hernández-Rivera D., Torres-Landa S. D., Rangel-Ayala M., Agarwal V., *RSC Adv.*, **2021**, *11*(52), 32604—32614
- [17] Qiu J. M., Ye W. H., Chen C. C., Xu Z. Q., Hu C. F., Zhuang J. L., Dong H. W., Lei B. F., Hu G. Q., Liu Y. L., *J. Ind. Eng. Chem.*, **2023**, *117*, 442—449
- [18] Xu Y. L., Xu Z. Q., Chen C. C., Ye W. H., Guo B. Y., Qiu J. M., Zhuang J. L., Hu C. F., Lei B. F., Hu G. Q., Liu Y. L., *Dyes Pigm.*, **2023**, *214*, 111204
- [19] Chen Q. X., Chen Q. D., Zhong X. Y., *Spectrosc. Spect. Anal.*, **2020**, *40*(10), 3086—3091(陈绮娴, 陈奇丹, 钟学沉. 光谱学与光谱分析, **2020**, *40*(10), 3086—3091)
- [20] Zhang X. Q., Yang H. Y., Wan Z. J., Su T., Zhang X. J., Zhuang J. L., Lei B. F., Liu Y. L., Hu C. F., *Adv. Opt. Mater.*, **2020**, *8*(15), 2000251
- [21] Limosani F., Bauer E. M., Cecchetti D., Biagioni S., Orlando V., Pizzoferrato R., Proposito P., Carbone M., *Nanomaterials*, **2021**, *11*(9), 2249
- [22] Flores-Oña D., Fullana A., *Diamond Relat. Mater.*, **2020**, *108*, 107960
- [23] Kang Y. Y., Li D. N., Dong R. Y., Zhang H. R., Li W., Zhang X. J., Yang X., Lei B. F., *J. Lumin.*, **2022**, *251*, 119164
- [24] Fu F. M., Xu M. R., Liang Z. S., Huang S. R., Li H., Zhang H. R., Li W., Zheng M. T., Lei B. F., *Chem. J. Chinese Universities*, **2023**, *44*(2), 20220464(符芳媚, 徐梦如, 梁梓珊, 黄斯锐, 李晖, 张浩然, 李唯, 郑明涛, 雷炳富. 高等学校化学学报, **2023**, *44*(2), 20220464)
- [25] Boukhalov D. W., Osipov V. Y., Murzalinov D., Serikkanov A., Bi H., *Carbon*, **2024**, *225*, 119101
- [26] Strauss V., Wang H. Z., Delacroix S., Ledendecker M., Wessig P., *Chem. Sci.*, **2020**, *11*(31), 8256—8266
- [27] Egorova M. N., Kapitonov A. N., Alekseev A. A., Obratsova E. A., *J. Struct. Chem.*, **2020**, *61*, 811—817
- [28] Qu D., Zheng M., Du P., Zhou Y., Zhang L. G., Li D., Tan H. Q., Zhao Z., Xie Z. G., Sun Z. C., *Nanoscale*, **2013**, *5*(24), 12272—12277
- [29] Bogireddy N. K. R., Lara J., Fragosio L. R., Agarwal V., *Chem. Eng. J.*, **2020**, *401*, 126097
- [30] Guo Z., Zhang Z. Q., Zhang W., Zhou L. Q., Li H. W., Wang H. M., Andreatza-Vignolle C., Andreatza P., Zhao D. X., Wu Y. H., Wang Q. L., Zhang T., Jiang K.M., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, *6*(23), 20700—20708

(Ed.: W, K, M)