

胶质类芽孢杆菌衍生氮掺杂碳量子点及其缓解烟草盐胁迫的研究

牛旭朝¹, 田保华^{2*}, 张国艳¹, 冯军鹏¹, 曹青¹, 梁海霞²
(1. 太原理工大学化学与化工学院, 山西太原 030024;
2. 太原理工大学环境与生态学院, 山西晋中 030600)

摘要:采用一步水热法以不同碳氮比下的 *P. m.* 菌体为前体合成氮掺杂碳量子点(N-CQDs), 对其进行结构表征, 评估其自由基清除能力及对烟草盐胁迫(NaCl)氧化损伤的影响。结果表明, N_{0.5}-CQDs 比 N₀-CQDs 和 N₅-CQDs 具有更多的—OH、—COOH 和—NH₂ 官能团, 显示最强自由基清除能力; N_{0.5}-CQDs 对·O₂⁻、·OH 和 DPPH·清除率分别为 76.3%、60.9% 和 79.3%, 半抑制浓度 IC₅₀ 为 0.86、1.72 mg/mL 和 0.71 mg/mL。NaCl 处理使烟草叶片过氧化氢(H₂O₂)和丙二醛(MDA)含量升高, 棕色沉淀增多; 而 N_{0.5}-CQDs+NaCl 显著缓解 NaCl 诱导的 H₂O₂ 和 MDA 含量升高, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性分别提升 27.73% 和 22.25%, 抗坏血酸(ASA)和谷胱甘肽(GSH)含量增加 31.91% 和 30.49%。研究表明, N_{0.5}-CQDs 协同增强烟草抗氧化酶活性与抗氧化物含量, 缓解盐胁迫的氧化损伤。

关键词: C:N 比; 胶质类芽孢杆菌; 碳量子点; 活性氧; 盐胁迫

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S2-0219-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.039

Study on nitrogen-doped carbon quantum dots derived from *Paenibacillus mucilaginosus* for alleviating salt stress in tobacco

NIU Xu-zhao¹, TIAN Bao-hua^{2*}, ZHANG Guo-yan¹, FENG Junpeng¹, CAO Qing¹, LIANG Hai-xia²
(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Environment and Ecology, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

Abstract: To examine the regulation of antioxidant capability of *Paenibacillus mucilaginosus* (*P. m.*)-derived Carbon Quantum Dots (CQDs) by carbon to nitrogen ratio. Nitrogen-doped carbon quantum dots (N-CQDs) were synthesized through a one-step hydrothermal method using *P. m.* cultured under varying carbon-to-nitrogen (C:N) ratios. The synthesized N-CQDs were analyzed by TEM, XPS, FT-IR and XRD characterization methods, their free radical scavenging capacity and their protective effects against NaCl stress-induced oxidative in tobacco were systematically investigated. The results showed that N_{0.5}-CQDs exhibited superior free radical scavenging capacity compared to N₀-CQDs and N₅-CQDs, attributed to their higher content of hydroxyl (—OH), carboxyl (—COOH), and amino (—NH₂) functional groups; N_{0.5}-CQDs exhibited optimal radical scavenging activity, demonstrating removal rates of 76.3% for superoxide radicals (·O₂⁻), 60.9% for hydroxyl radicals (·OH), and 79.3% for DPPH radicals, with corresponding IC₅₀ values of 0.86, 1.72, and 0.71 mg/mL, respectively. Under NaCl stress, the H₂O₂ and MDA contents of tobacco leaves were significantly increased, accompanied by visible brown precipitation; Furthermore, the N_{0.5}-CQDs+NaCl treatment reduced H₂O₂ and MDA accumulation and enhanced the activity of key antioxidant enzymes, increasing superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities by 27.73% and 22.25%. Concurrently, it elevated non-enzymatic antioxidant levels, with ascorbic acid (ASA) and glutathione (GSH) contents rising by 31.91% and 30.49%, respectively. These results demonstrate that N_{0.5}-CQDs exhibit dual antioxidant functionality: synergistic upregulation of both enzymatic (SOD, CAT) and non-enzymatic (ASA, GSH) antioxidant systems, collectively attenuating NaCl-induced oxidative damage in tobacco.

Key words: C:N; *Paenibacillus mucilaginosus*; carbon quantum dots; reactive oxygen species; salt stress

受全球气候变暖、降雨模式改变和灌溉不足等因素影响, 土壤盐分持续累积, 导致植物生长抑制, 土壤盐渍化是制约全球农业生产的重要环境胁迫因素。盐胁迫(Salt stress, 如 NaCl)可诱导植物体内活性氧(ROS)的积累, 包括过氧化氢(H₂O₂)、超氧阴离子(·O₂⁻)和羟基自由基(·OH)等, 进而引发氧化损伤并破坏细胞稳态^[1]。植物可通过抗氧化系统

清除过量 ROS, 但长时间胁迫导致植物体抗氧化系统失衡^[2]。因此, 迫切需要通过外源干预策略增强植物耐盐性, 这已成为农业可持续发展的重要研究方向。

碳量子点(Carbon quantum dots, CQDs)是由 sp²/sp³ 杂化碳核构成的新型纳米材料, 富含羟基(—OH)和羧基(—COOH)等官能团, 赋予其优异的

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-07-29

基金项目: 山西省基础研究计划面上项目(202203021221024); 山西省中央引导地方科技发展资金项目科技创新基地建设(YDZJSX2024B016)

作者简介: 牛旭朝(2000-), 男, 硕士生, 研究方向为纳米材料, niuxuzhao0922@163.com; 田保华(1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为固废资源利用及微生物代谢产物研究, 通讯联系人, tianbaohua01@tyut.edu.cn。

水溶性和可修饰性^[3]。通过异质元素掺杂(如氮、硫等)或表面功能化,可进一步调控 CQDs 的光学特性、电子结构及表面化学活性,从而扩展应用范围^[4]。近年来,基于生物质绿色合成的 CQDs 因其环境友好、成本低廉等优势受到广泛关注,其表现出超小尺寸(<10 nm)、高荧光量子产率、生物相容性和低毒性等特征^[5]。其中,植物源生物质(如甘蔗渣、绿茶叶渣、百香果壳)已被成功合成高性能 CQDs^[6]。微生物源如金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等细菌或酵母菌等真菌可制备多功能 CQDs^[7]。目前,基于生物质的 CQDs 已在生物成像、化学传感及植物抗逆等领域展现出应用潜力。例如丹参水热法合成的 CQDs 可显著提升意大利生菜的耐盐性,证实在植物胁迫调控中的价值^[8]。

氮掺杂可引入氨基($-\text{NH}_2$)、吡咯氮等活性基团,通过调节 CQDs 的能带结构和表面电子密度,显著增强其自由基清除能力(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$)及电子传递效率^[9]。如 Jing 等^[10]开发的氮掺杂 CQDs 可有效缓解拟南芥在盐胁迫下的氧化损伤,表明开发功能化 CQDs 在农业中具有广阔的应用前景。以调节培养基碳氮比(C:N)获得的胶质类芽孢杆菌菌体为前体,采用一步水热法合成系列 N-CQDs。通过透射电镜(TEM)、傅里叶红外光谱仪(FT-IR)和 X 射线衍射仪(XRD)等手段对 N-CQDs 的形貌和结构进行表征,并测试 N-CQDs 对自由基的清除能力,以期缓解植物盐胁迫提供一种有效的纳米材料应用。

1 实验部分

1.1 细菌培养条件

本研究选用的胶质类芽孢杆菌(*Paenibacillus mucilaginosus* LT1906, *P. m.*)菌株保存于太原理工大学生物医学工程系实验室。采用无菌液体培养基(蔗糖 10 g、硫酸铵 0.5 g、 K_2HPO_4 0.2 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g、 FeCl_3 0.005 g、 H_2O 1 L, pH = 7.2)进行培养,根据蔗糖与硫酸铵的质量设置 3 组碳氮比,分别为 10:0(无氮对照组)、10:0.5 和 10:5,将菌种接种于 100 mL 锥形瓶中,置于 30℃ 恒温培养箱中,在 180 r/min 的条件下连续培养 36 h 获得菌液,并测定 OD_{600} 。

1.2 氮掺杂碳量子点的制备方法

采用一步水热法合成 N-CQDs,具体制备流程如下:菌液在 4℃ 离心机中以 5 000 r/min 离心 5 min 收集菌体,弃上清液,用去离子水洗涤 3 次后重悬于 10 mL 去离子水中,再将其转移至 100 mL 聚四氟乙

烯内衬不锈钢高压反应釜中,于 180℃ 下水热反应 12 h,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤去除杂质,获得均质碳量子点溶液,于 4℃ 避光保存。不同碳氮比培养的菌体合成的 N-CQDs 分别命名为 N_0 -CQDs、 $\text{N}_{0.5}$ -CQDs 和 N_5 -CQDs。

1.3 氮掺杂碳量子点的表征方法

采用 JEM-2100F 型 TEM 对 N-CQDs 的形态特征进行表征,并利用高分辨透射电子显微镜(HRTEM)获取高分辨率图像。采用 DX-2700BH 型 XRD 对 N-CQDs 的晶体结构进行表征。采用布鲁克 ALPHA 型 FT-IR 以及 ESCALAB 250XI 型 XPS 分析 N-CQDs 的表面官能团和元素组成。

1.4 体外自由基清除能力的测定

1.4.1 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力

参照苏凡等^[11]方法测定 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除率。将蛋氨酸(13 mmol/L, 0.5 mL)、氯化硝基四氮唑蓝(75 mmol/L, 0.5 mL)、核黄素(20 $\mu\text{mol/L}$, 0.5 mL)、0.5 mL 不同浓度的 N-CQDs 和 2.5 mL PBS 缓冲液(pH = 7.8, 50 mmol/L)混合均匀,以氯化硝基四氮唑蓝(Nitrotetrazolium blue chloride, NBT)为探针测定 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除率。然后用 12 W 的照明管照射混合物 10 min,于 560 nm 处测定吸光度。

1.4.2 $\cdot\text{OH}$ 清除活性

羟基自由基($\cdot\text{OH}$)清除活性参照 Wang 等^[12]方法并作适当优化。首先,由 FeSO_4 (1.8 mmol/L)和 H_2O_2 (5 mmol/L)反应生成 $\cdot\text{OH}$,10 min 后,将水杨酸(1.8 mmol/L)和 1.0 mL 不同浓度的 N-CQDs 加入上述混合物中,30 min 后测定 510 nm 处的吸光度。

1.4.3 DPPH \cdot 清除活性

DPPH \cdot 的清除活性根据 Thaipong 等^[13]方法进行测量。将 0.5 mL 不同浓度的 N-CQDs 样品分别与 2.5 mL DPPH(100 μM)乙醇溶液混合,摇匀,室温避光放置 30 min,测定 517 nm 处吸光度。

$\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 DPPH 自由基清除率计算公式如下:

$$\text{清除率}(\%) = (1 - A_t/A_0) \times 100\%$$

式中, A_0 为空白对照组吸光度; A_t 为不同样品溶液的吸光度。

1.5 生长条件与胁迫处理

烟草种子经 75% 的乙醇溶液消毒 1 min、2.6% 次氯酸钠消毒 10 min,用去离子水冲洗 3 次,25℃ 黑暗萌发 2 d 后,发芽后幼苗转移至蛭石与珍珠岩(1:1)混合基质,然后转入光照培养(温度 25℃,光强度

160 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光周期 16 h/8 h, 相对湿度 60%), 生长 30 d。

在进行胁迫处理时, 选取生长一致的烟草叶片分为 4 组。其中 3 组分别用 200 mmol/L NaCl、1 mg/mL N-CQDs、200 mmol/L NaCl 和 1 mg/mL N-CQDs 的混合溶液进行处理, 另外 1 组未处理的幼苗作为对照组(CK)。所有实验进行 3 次重复, 分别处理 24 h 后取样, 然后测定其理化参数。

1.6 生理指标测定

取 0.2 g 烟草叶片, 用 5 mL 预冷的 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液(0.05 mol/L Na_2HPO_4 , 0.05 mol/L K_2HPO_4 , pH=7.0) 研磨, 3 000 r/min 离心 5 min, 取上清液为粗酶液^[14]。丙二醛(Malondialdehyde, MDA) 含量测定采用硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA) 比色法, H_2O_2 含量通过测量过氧化钛络合物在 410 nm 处的吸光度来确定^[14]。根据 Beauchamp 等^[15] 方法测量超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD) 活性。通过测量 H_2O_2 的消耗来测定过氧化氢酶(Catalase, CAT) 活性^[16]。谷胱甘肽(Glutathione, GSH) 和抗坏血酸(Ascorbic acid, ASA) 分别根据 Hissin 等^[17] 和 Arakawa 等^[18] 的方法进行测定。

1.7 叶片过氧化氢组织化学染色

烟草叶片放入含有适量 1% 二氨基联苯(Diaminobenzidine, DAB) 溶液的培养皿中, 于 28℃ 下避光保存 8 h, 蒸馏水冲洗 3 次, 放入无水乙醇中, 于 80℃ 水浴中恒温 24 h, 使叶片脱色, 再次更换无水乙醇, 置 4℃ 冰箱保存后观察并拍照。

1.8 数据处理

所有数据均采用 3 个重复的平均值, 差异显著性分析采用 SPSS Statistics 20.0 软件进行 Duncan 检验, 不同大小写字母表示各组差异显著($p < 0.05$)。然后用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 碳氮比对菌体生物量的影响

图 1 显示碳氮比为 10:0 时, 菌液浓度 OD_{600} 为 0.05, 菌体鲜重为 2.19 g/L, 当碳氮比为 10:0.5 时, OD_{600} 值上升至 0.4, 菌体鲜重增加至 10.35 g/L, 而高氮组 10:5 中菌体虽保持增殖能力, 但生物量比 10:0.5 组显著下降, 这与胞内碳氮代谢失衡相关, 进而导致生物量减少。

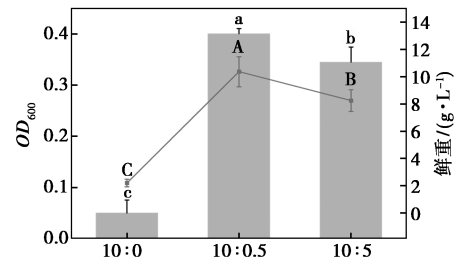


图 1 不同碳氮比(C:N)条件下 *P. m.* 的生长特性
注: 图中不同的大小写字母表示各处理组差异显著($p < 0.05$)。

2.2 碳氮比对 N-CQDs 结构特征的影响

以胶质类芽孢杆菌菌体为前体制备 N_0 -CQDs、 $\text{N}_{0.5}$ -CQDs 和 N_5 -CQDs 的形貌和结构表征如图 2 (a) ~ (c) 所示。TEM 结果显示 3 种 N-CQDs 分散

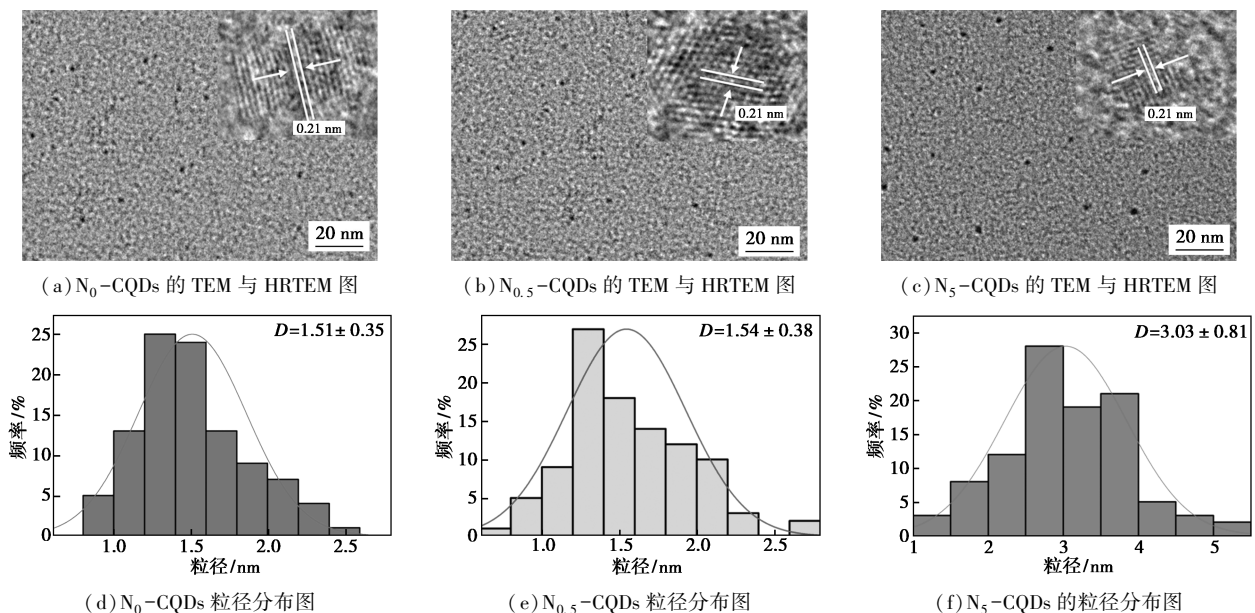


图 2 N-CQDs 的 TEM(HRTEM) 和粒径分布图

性均好,无团聚现象。HRTEM 显示 3 种 N-CQDs 表面均存在明显晶格条纹,晶格间距为 0.21 nm,这与石墨(100)的晶面间距相一致^[19]。由图 2(d)~(f)可知, N_0 -CQDs 和 $N_{0.5}$ -CQDs 的平均粒径分别为 (1.51 ± 0.35) nm 和 (1.54 ± 0.38) nm,而 N_5 -CQDs 的粒径最大,为 (3.03 ± 0.81) nm,在 C:N=10:5 下菌体表面形成高浓度氮环境,部分氮原子嵌入碳骨架内部,通过化学键改变碳核长,导致粒径增大^[20]。

通过 XRD 分析 3 种 N-CQDs 的晶相结构。如图 3(a)所示,3 种 N-CQDs 在 2θ 为 $20 \sim 25^\circ$ 出现一个较宽的特征衍射峰,对应于无定形碳结构^[21]。XRD 结果与 HRTEM 结果一致。N-CQDs 的表面化学键和官能团通过 FT-IR 光谱分析。由图 3(b)可知,3 种 N-CQDs 在 $3\ 600 \sim 3\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 范围内均呈现 O—H 宽特征峰^[22], $1\ 671\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收带对应于 C=O 伸缩振动^[23], $1\ 629\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应于 C=C 伸缩振动^[24], $1\ 381\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰来自于 C—N 伸缩振动^[25]。其中, N_5 -CQDs 和 $N_{0.5}$ -CQDs 的 C=O 和 C—N 振动峰强度显著高于 N_0 -CQDs,可能是氮源缺失限制含氮官能团的生物合成,使 C=O 和 C—N 振动峰强度降低^[26]。

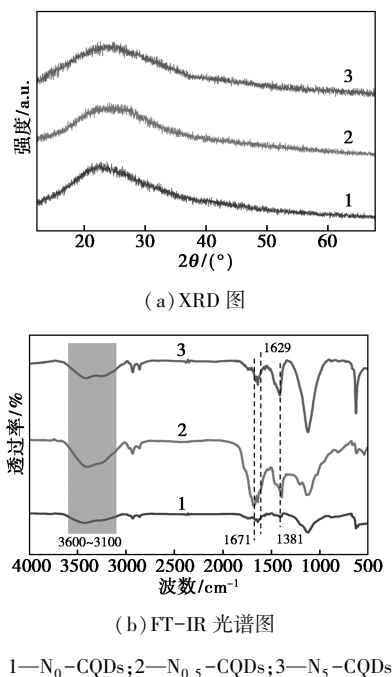


图 3 N-CQDs 的结构与化学特性

由图 4(a)可知, N_0 -CQDs 未检测出 N 元素,而 N_5 -CQDs 和 $N_{0.5}$ -CQDs 的 N 含量分别为 9.29% 和 9.24%,未见显著增多,表明胶质类芽孢杆菌对 N 转化具有极限性,N 在碳骨架中掺杂已达饱和;而 N_5 -CQDs 中 C 含量比 N_0 -CQDs 和 $N_{0.5}$ -CQDs 明显减少

而氧元素同步升高,归因于氮掺杂引发的结构重构加速表面氧化过程^[27]。由图 4(b)可知, N_5 -CQDs 和 $N_{0.5}$ -CQDs 在 $401.3 \sim 401.5\ \text{eV}$ 处对应石墨氮峰,在 $399.7 \sim 399.9\ \text{eV}$ 处为吡咯氮峰^[28]。图 4(c)显示 3 种 N-CQDs 的 C 1s 谱分别为 $288.2 \sim 288.8\ \text{eV}$ (C=O)、 $286.2 \sim 286.3\ \text{eV}$ (C—O) 和 $284.8\ \text{eV}$ (C—C/C=C)^[29]。图 4(d)所示,3 种 N-CQDs 的 O 1s 谱中均包含位于 $533.2 \sim 533.4\ \text{eV}$ (C—O) 和 $531.7 \sim 531.9\ \text{eV}$ (C=O) 的两个特征峰^[29]。

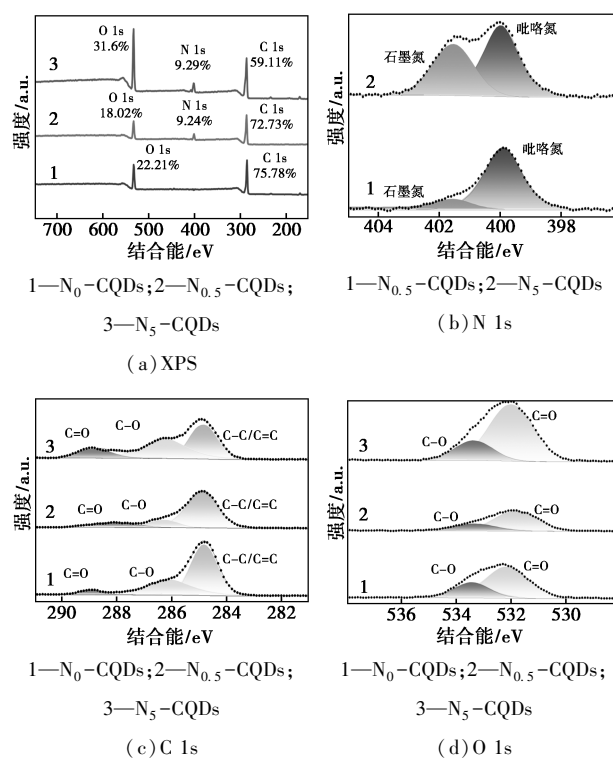
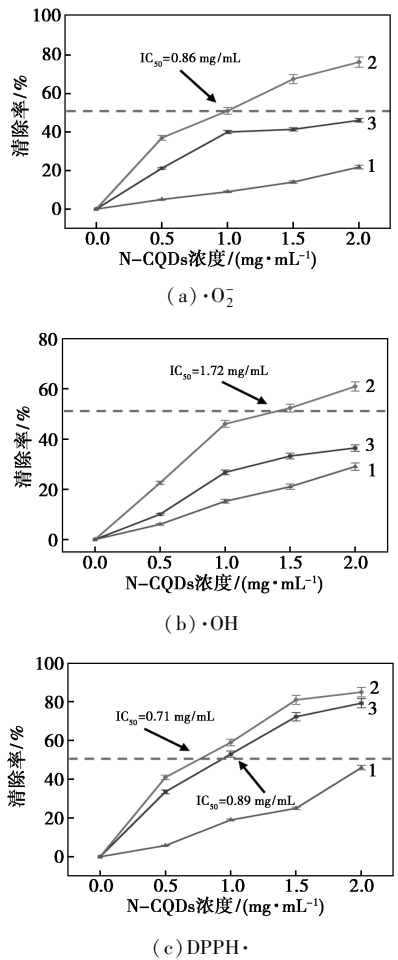


图 4 N-CQDs 的 XPS 光谱

2.3 碳氮比对 N-CQDs 清除 ROS 能力的影响

如图 5(a)所示,经多项式拟合计算可知, $N_{0.5}$ -CQDs 对 $\cdot\text{O}_2^-$ 半数抑制浓度 IC_{50} 为 $0.86\ \text{mg/mL}$,显著低于 N_5 -CQDs 和 N_0 -CQDs。图 5(b)显示 3 种 N-CQDs 的对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率具有显著的剂量依赖性,且 $N_{0.5}$ -CQDs 的 IC_{50} 为 $1.72\ \text{mg/mL}$ 显著低于 N_5 -CQDs 和 N_0 -CQDs。图 5(c)结果显示 N_5 -CQDs 与 $N_{0.5}$ -CQDs 的 DPPH \cdot 清除率 IC_{50} 分别为 $0.87\ \text{mg/mL}$ 和 $0.71\ \text{mg/mL}$,均显著低于 N_0 -CQDs。以上结果表明 $N_{0.5}$ -CQDs 表现出最优自由基清除能力,当 $N_{0.5}$ -CQDs 浓度为 $2\ \text{mg/mL}$ 时, $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 DPPH \cdot 的清除率分别为 76.3%、60.9% 和 79.3%。这表明氮掺杂能优化 $N_{0.5}$ -CQDs 的电子结构与反应活性,增强自由基清除能力。本研究的 $N_{0.5}$ -CQDs 与 Wang 等^[30]以氢氧化铵为氮源合成的 N-Ti₃C₂ 量子

点类似,其自由基清除能力显著优于 Ti_3C_2 。

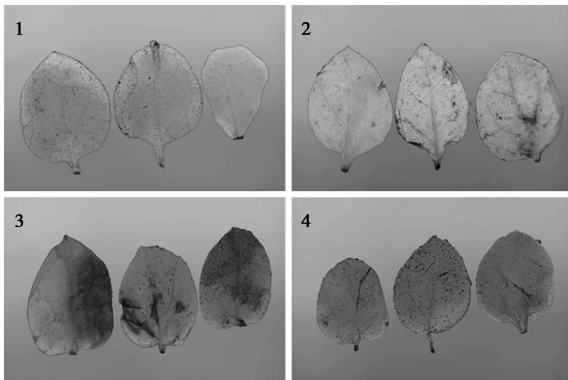


1— N_0 -CQDs; 2— $N_{0.5}$ -CQDs; 3— N_5 -CQDs

图 5 N-CQDs 对 ROS 的清除能力

2.4 $N_{0.5}$ -CQDs 对 NaCl 胁迫下烟草氧化损伤的影响

如图 6(a) 所示, DAB 组织染色显示, 与对照组相比, NaCl 处理组烟草叶片的棕色沉淀显著增多, $N_{0.5}$ -CQDs+NaCl 处理使 ROS 的积累显著减少。如图 6(b) 所示, 与对照组相比, NaCl 处理烟草叶片后



1—CK; 2— $N_{0.5}$ -CQDs; 3—NaCl; 4— $N_{0.5}$ -CQDs+NaCl

(a) 烟草叶片 DAB 染色

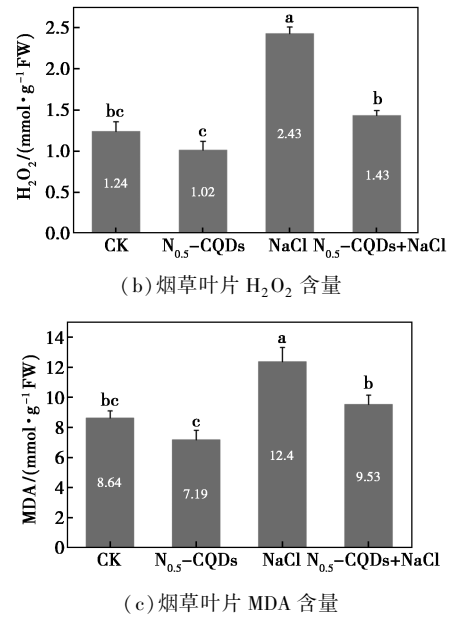


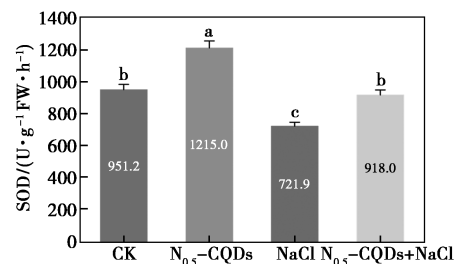
图 6 不同处理对烟草叶片氧化应激指标的影响

注:图中小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。

H_2O_2 含量为 2.43 mmol/g FW, $N_{0.5}$ -CQDs+NaCl 处理组可缓解 NaCl 胁迫引起的 H_2O_2 含量升高,这也与 DAB 染色结果一致。同时 MDA 含量的变化趋势与 H_2O_2 一致[图 6(c)]。Qiao 等^[31]发现, *SITpx* 过表达的烟草在 150 mmol/L NaCl 处理下, H_2O_2 积累显著减少, MDA 含量也明显下降。

2.5 $N_{0.5}$ -CQDs 对 NaCl 胁迫下烟草抗氧化系统的影响

如图 7(a) 所示, $N_{0.5}$ -CQDs 处理组使 SOD 活性较对照组显著提高 27.73%, 而 NaCl 处理组的 SOD 活性较对照组降低 24.1%, $N_{0.5}$ -CQDs+NaCl 处理组的 SOD 活性较 NaCl 处理组显著提高, 显著缓解 NaCl 诱导的活性降低。CAT 活性的变化趋势与 SOD 一致[图 7(b)]。Li 等^[32]发现 Cu/N-CDs 激活黄瓜幼苗 SOD 和 CAT 活性缓解盐胁迫引起的氧化损伤, 进而增强植株抗逆性。图 7(c)、(d) 显示, 与对照组相比, NaCl 处理组的 ASA 和 GSH 含量分别显著降低 17.54% 和 24.60%, 这与 NaCl 胁迫诱导 ROS 积累并消耗抗氧化物的机制一致^[33], 而 NaCl+



(a) SOD 活性

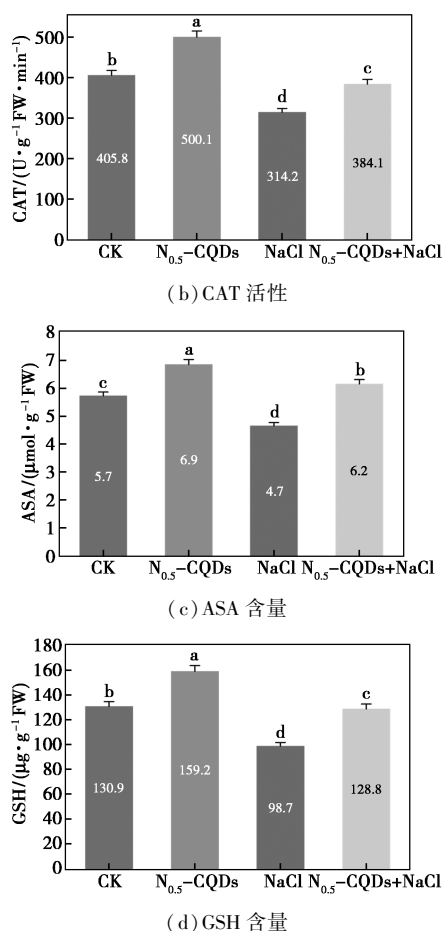


图 7 不同处理对烟草叶片抗氧化酶与抗氧化物的影响

注:图中不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。

$N_{0.5}$ -CQDs 处理可缓解这种降低,由此表明, N -CQDs 可缓解盐胁迫对抗氧化物的破坏,维持植物氧化还原体系的稳态^[33]。

3 结论

本研究利用胶质类芽孢杆菌制备氮掺杂碳量子点(N -CQDs),不同碳氮比显著影响菌体生物量及代谢产物组成,从而调控 N -CQDs 的 N 掺杂程度、粒径大小与表面官能团分布, $N_{0.5}$ -CQDs 具备最优的自由基清除能力。在 $NaCl$ 胁迫下, $N_{0.5}$ -CQDs 处理后的烟草叶片中, H_2O_2 和 MDA 含量明显减少, DAB 染色叶片棕色沉淀显著减轻,表明 ROS 积累受到有效抑制,同时 $N_{0.5}$ -CQDs 处理可显著增强 SOD 与 CAT 酶活性,减少 GSH 和 ASA 抗氧化物的过度消耗,这些作用协同维持植物体氧化还原体系的稳态。

参考文献

[1] Jiang L, Xiao M, Huang R, *et al.* The regulation of ROS and phyto-

hormones in balancing crop yield and salt tolerance[J]. *Antioxidants*, 2025, 14(1): 63.

[2] Mishra N, Jiang C, Chen L, *et al.* Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1110622.

[3] Bhatia P, Chaira T, Gupta L K. Therapeutic applications of carbon quantum dots (CQDs): A review[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2024, 35: 3243–3259.

[4] Fu Q, Li N, Lu K, *et al.* The emerging development of nitrogen and sulfur co-doped carbon dots: Synthesis methods, influencing factors and applications[J]. *Materials Today Chemistry*, 2024, 37: 102032.

[5] Tarannum N, Pooja K, Singh M, *et al.* A study on the development of c-dots via green chemistry: A state-of-the-art review [J]. *Carbon Letters*, 2024, 34(6): 1537–1568.

[6] Wu J, Chen T, Ge S, *et al.* Synthesis and applications of carbon quantum dots derived from biomass waste: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(6): 3393–3424.

[7] Moradi M, Molaei R, Kousheh S A, *et al.* Carbon dots synthesized from microorganisms and food by-products: Active and smart food packaging applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(14): 1943–1959.

[8] Li Y, Li W, Yang X, *et al.* *Salvia Miltiorrhiza*-derived carbon dots as scavengers of reactive oxygen species for reducing oxidative damage of plants [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 4(1): 113–120.

[9] Innocenzi P, Stagi L. Carbon dots as oxidant-antioxidant nanomaterials, understanding the structure-properties relationship. A critical review [J]. *Nano Today*, 2023, 50: 101837.

[10] Jing X, Liu Y, Liu X, *et al.* Nitrogen-doped carbon dots enhanced seedling growth and salt tolerance with distinct requirements of excitation light [J]. *RSC Advances*, 2023, 13(18): 12114–12122.

[11] 苏凡, 杨小波, 李东海, 等. 五指山水满茶的茶多酚、总黄酮含量与抗氧化活性研究 [J]. *热带作物学报*, 2018, 39(4): 675–680.

[12] Wang L, Wang Z, Li X. Preliminary phytochemical and biological activities study of solvent extracts from a cold-field fruit-*Malus Baccata* (Linn.) Borkh [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 47: 20–28.

[13] Thaipong K, Boonprakob U, Crosby K, *et al.* Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6/7): 669–675.

[14] Dargiri S A, Naeimi S, Nekouei M K. Enhancing wheat resilience to salinity: The role of endophytic *penicillium chrysogenum* as a biological agent for improved crop performance [J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 354.

[15] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276–287.

[16] Gallego S M, Pena L B, Barcia R A, *et al.* Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 83: 33–46.

[17] Hissin P J, Hilf R. A fluorometric method for determination of oxi-

- dized and reduced glutathione in tissues[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 74(1): 214–226.
- [18] Arakawa N, Tsutsumi K, Sanceda N G, *et al.* A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4,7-Diphenyl-L, 10-Phenanthroline [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1981, 45(5): 1289–1290.
- [19] Boukhvalov D W, Osipov V Y, Murzalinov D, *et al.* A comprehensive model of carbon nanodots with 0.21 nm lattice fringes patterns [J]. *Carbon*, 2024, 225: 119101.
- [20] Ng L Y, Chiang A K M, Ng C Y, *et al.* Magnetite nitrogen-doped carbon quantum dots from empty fruit bunches for tramadol removal [J]. *Processes*, 2025, 13(2): 298.
- [21] Tran N B, Nguyen Q K, Dang T M N, *et al.* Nitrogen doped carbon quantum dots (N-CQDs) synthesized by a microwave assisted hydrothermal method in combination with gold nanoparticles (AuNPs) as sensitive dual sensor for antibiotic meropenem detection [J]. *Microchemical Journal*, 2025, 210: 112977.
- [22] Ma W, Wang B, Yang Y, *et al.* Photoluminescent chiral carbon dots derived from glutamine [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2021, 32(12): 3916–3920.
- [23] Deepak K R, Mohan S, Dinesha P, *et al.* CO₂ uptake by activated hydrochar derived from orange peel (*Citrus Reticulata*): Influence of carbonization temperature [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118350.
- [24] Xu H, Zhan W H, Wan M J, *et al.* Research on green synthesis and performance analysis of biomass-derived carbon quantum dots [J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 227: 120775.
- [25] Xu Y, Wang B, Ding S, *et al.* Hydrothermal carbonization of kitchen waste: An analysis of solid and aqueous products and the application of hydrochar to paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157953.
- [26] 田稼, 吴小杰, 孙超, 等. 胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) 的研究进展 [J]. *土壤与肥料*, 2017(6): 15–22.
- [27] 董广雨, 丁玉梅, 杨卫民, 等. 超声波-双氧水联合氧化处理连续碳纤维表面的研究 [J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(6): 45–49.
- [28] Cao S, Zhao Z, Zheng Y, *et al.* A library of ros-catalytic metalloenzyme mimics with atomic metal centers [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(16): 2200255.
- [29] Gao F, Liu J, Gong P, *et al.* Carbon dots as potential antioxidants for the scavenging of multi-reactive oxygen and nitrogen species [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462: 142338.
- [30] Wang L, Zhang N, Li Y, *et al.* Mechanism of nitrogen-doped Ti₃C₂ quantum dots for free-radical scavenging and the ultrasensitive H₂O₂ detection performance [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 42442–42450.
- [31] Qiao S, Feng Y, Yan J, *et al.* Overexpression of tomato *Sltpx* improves salt stress tolerance in transgenic tobacco plants by scavenging H₂O₂ [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2022, 151(2): 321–333.
- [32] Li C, Tan J, Zhang Z, *et al.* Copper and nitrogen codoped CDs for alleviating the damage of reactive oxygen species for cucumber seedlings under salt stress [J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2025, 8(4): 3343–3355.
- [33] Zia-ur-Rehman M, Anayatullah S, Irfan E, *et al.* Nanoparticles assisted regulation of oxidative stress and antioxidant enzyme system in plants under salt stress: A Review [J]. *Chemosphere*, 2023, 314: 137649. ■
- (上接第 218 页)
- [20] Zhuang L Z, Li Q H, Chen J S, *et al.* Carbothermal preparation of porous carbon-encapsulated iron composite for the removal of trace hexavalent chromium [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 253: 24–33.
- [21] Vunain E, Njewa J B, Biswick T T, *et al.* Adsorption of chromium ions from tannery effluents onto activated carbon prepared from rice husk and potato peel by H₃PO₄ activation [J]. *Appl Water Sci*, 2021, 11(9): 14.
- [22] Ma R, Yan X Q, Pu X C, *et al.* An exploratory study on the aqueous Cr(VI) removal by the sulfate reducing sludge-based biochar [J]. *Sep Purif Technol*, 2021, 276: 119314.
- [23] Li Y, Wei Y N, Huang S Q, *et al.* Biosorption of Cr(VI) onto *Auricularia auricula* dreg biochar modified by cationic surfactant: Characteristics and mechanism [J]. *J Mol Liq*, 2018, 269: 824–832.
- [24] Chen T, Zhou Z Y, Xu S, *et al.* Adsorption behavior comparison of trivalent and hexavalent chromium on biochar derived from municipal sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 388–394.
- [25] Yu J D, Jiang C Y, Guan Q Q, *et al.* Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution by supported ZnO nanoparticles on biochar derived from waste water hyacinth [J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 632–640.
- [26] Shakya A, Agarwal T. Removal of Cr(VI) from water using pineapple peel derived biochars: Adsorption potential and re-usability assessment [J]. *J Mol Liq*, 2019, 293: 111497.
- [27] Ma Y F, Li P, Yang L, *et al.* Iron/zinc and phosphoric acid modified sludge biochar as an efficient adsorbent for fluoroquinolones antibiotics removal [J]. *Ecotox Environ Safe*, 2020, 196: 110550.
- [28] Dong H N, Liang H, Yang L, *et al.* Porous biochar derived from waste distiller's grains for hexavalent chromium removal: Adsorption performance and mechanism [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 110137.
- [29] Zhang X J, Zhang L, Li A. Eucalyptus sawdust derived biochar generated by combining the hydrothermal carbonization and low concentration KOH modification for hexavalent chromium removal [J]. *J Environ Manage*, 2018, 206: 989–998. ■