

# 碳量子点提高农作物抗盐胁迫性的分子机制研究进展

张富华 王美艳 程家栋 张陌  
河北工业大学能源与环境工程学院  
DOI:10.12238/eep.v8i1.2414

**[摘要]** 气候变化加剧了农作物生长环境的复杂性,其中土壤盐碱化问题日益严重,显著限制作物生产。碳量子点(CQDs)作为一种新兴纳米材料,凭借其丰富的表面官能团、低毒性及高生物相容性,成为更具前景的植物纳米生物技术解决方案。研究表明,CQDs可通过调控渗透胁迫及 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 离子稳态,减少盐胁迫导致的膜脂过氧化;增强抗氧化防御系统活性,有效清除过量活性氧(ROS),缓解氧化损伤;触发水稻防御相关基因(如WRKY、MYB等转录因子)的表达,激活激素信号通路,形成系统性抗逆响应。基于水热反应构建的CQDs育种策略,能够通过消除ROS减轻盐胁迫对作物的影响,同时作为纳米生物刺激剂,诱导植物产生“疫苗效应”,提升其对干旱、高温等非生物胁迫的适应性。CQDs的应用为培育耐逆作物提供了高效且可持续的新策略,具有广阔的农业应用前景。

**[关键词]** 盐胁迫; 碳量子点; 活性氧; 基因表达

**中图分类号:** TQ424.27 **文献标识码:** A

## Progress on the molecular mechanism of carbon quantum dots to improve salt stress resistance in crop crops

Fuhua Zhang Meiyan Wang Jiadong Cheng Mo Zhang

School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology

**[Abstract]** Climate change has exacerbated the complexity of crop growth environments, with soil salinization becoming increasingly severe and significantly limiting crop production. Carbon quantum dots (CQDs), as an emerging nanomaterial, have emerged as a more promising solution in plant nanobiotechnology due to their abundant surface functional groups, low toxicity, and high biocompatibility. Research has shown that CQDs can enhance crop resistance to salt stress through multiple pathways: by regulating osmotic stress and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ion homeostasis to reduce membrane lipid peroxidation caused by salt stress; by enhancing the activity of the antioxidant defense system to effectively scavenge excess reactive oxygen species (ROS) and mitigate oxidative damage; and by triggering the expression of defense-related genes (such as WRKY, MYB, and other transcription factors) in rice, activating hormone signaling pathways to form a systemic stress response. The breeding strategy based on hydrothermal synthesis of CQDs can alleviate the impact of salt stress on crops by eliminating ROS, while acting as a nanobiostimulant to induce a "vaccine effect" in plants, enhancing their adaptability to abiotic stresses such as drought and high temperatures. The application of CQDs provides an efficient and sustainable new strategy for cultivating stress-tolerant crops, with broad prospects in agriculture.

**[Key words]** Salt stress; Carbon quantum dots; Reactive oxygen species; Gene expression

### 引言

土壤盐碱化是限制作物生产的主要因素。目前, 占全球陆地面积的7%(约8亿公顷)受盐胁迫影响, 如果仅考虑耕地, 全球比例上升到20%以上。此外, 由于严重的气候变化和农业对灌溉的日益依赖, 受盐碱度影响的农田面积每年都在持续增长。如果目前的土壤盐碱化速度持续存在, 预计这一比例在未来将增加到50%。盐胁迫对植物的生长和发育产生一系列不利影响, 导致主食作物产量的大幅损失。

碳量子点(CQDs)作为一种新兴的纳米颗粒材料, 具有官能团丰富、可调节特性、化学稳定性高、生物相容性好、毒性低等特点。据报道Se-CQDs优化了根际土壤微环境, 改善了根系发育和植物对Se(包括其他矿物养分)的吸收和运输。Si-CQDs通过增强玉米叶片中的抗氧化防御系统, 激活一组抗氧化酶(如SOD、CAT、POD等)或非酶抗氧化代谢物(如类黄酮)清除ROS以维持植物正常生长, 有效减少昆虫攻击引起的植物氧化应激。这些基于作物所需营养物质掺杂其他原子的杂交CQDs提高了作物的品质

和抗性,向我们展示了植物纳米生物技术在推动可持续农业方面的广阔前景<sup>[1]</sup>。实验材料的不同应用方式对作物的抗性有巨大影响。因此,在实际操作中需要仔细选择和改进全面的技术和应用方法。

## 1 碳量子点的制备和表征

### 1.1 碳量子点的制备

CQDs合成方法有“自上而下”和“自下而上”两种。“自上而下”合成方法是从较大尺寸的生物质碳材料出发,通过物理或化学手段将其逐步裂解、切割成尺寸较小的碳量子点;“自下而上”合成方法是以小分子的生物质前驱体物质为原料,通过合适的化学反应使其发生聚合、碳化等过程,逐渐构建形成碳量子点结构。基于生物质的CQDs的最主要方法是“自上而下”合成,生物质拥有相当大比例的碳元素和丰富的杂原子,是一种具有成本效益、丰富且毒性低的资源<sup>[2]</sup>。作为绿色环保的前驱体材料,有利于绿色CQDs的大规模生产。水热炭化将含有生物质粉末等化学药品在超纯水的悬浮液进行超声处理后,将混合物转移到配备有PTFE衬里的不锈钢高压釜中,然后在150~200°C下加热6~24小时。冷却至室温后,将混合物离心将得到的上清液在2000Da透析袋中透析48小时。然后将所得溶液冷冻干燥以获得固体CQDs。

### 1.2 碳量子点的表征

尽管生物质的组成复杂,但基于生物质的CQDs具有各种优异的性能,如粒径小而均匀、荧光强度高、水溶性高、生物相容性好等,通过对生物质基CQDs的表征可以更有效地了解这些特性<sup>[3]</sup>。使用透射电子显微镜表征CQDs的大小和形态了解到CQDs形貌显示球形,量子范围在10nm量级。通过动态光散射(DLS)测量的这些CQDs的平均流体动力学直径远大于通过TEM观察到的尺寸。这种差异可能是由于在水环境中CQDs周围形成水合层或溶液中的纳米颗粒聚集引起的,这种现象在纳米材料中很常见,其中液体介质中的表面水合层和颗粒相互作用会导致DLS测量期间尺寸显著增加。Zeta电位测量表明,大多数CQDs表现出负 $\zeta$ 电,这归因于其表面含氧官能团(例如羧基和羟基)的电离。通过傅里叶变换红外光谱在4000至500 $\text{cm}^{-1}$ 的波数范围内分析CQDs的反应性表面官能团。3400 $\text{cm}^{-1}$ 和2935 $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别归因于OH和CH键的拉伸振动,1650 $\text{cm}^{-1}$ 、1590 $\text{cm}^{-1}$ 和1410 $\text{cm}^{-1}$ 处的其他峰对应于羰基(C=O)、芳香族C=C和C-O官能团的振动。这些基团,特别是羟基和羧基官能团,增强了CQDs在水环境中的溶解度和生物相容性,这对于它们在压力下与植物细胞的相互作用至关重要。并通过X射线光电子能谱进一步分析CQDs的化学成分,揭示了碳(C)和氧(O)是其主要元素。使用紫外-可见分光光度计在200~500nm的波长范围内进行紫外-可见光吸收测量发现CQDs具有相似的吸收曲线,由于碳核的 $\pi-\pi^*$ 跃迁,在250~270nm范围内具有明显的吸收。

## 2 基于生物质的CQDs提高农作物抗盐胁迫性

### 2.1 CQDs调控盐胁迫下农作物的渗透胁迫和 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 稳态

植物盐胁迫的一个关键挑战是活性氧(ROS)的过度积累,这

会诱导氧化应激,破坏细胞结构,尤其是膜脂质。丙二醛(MDA)是脂质过氧化的标志物,会破坏细胞膜的稳定性并增加电解质泄漏。盐胁迫下植物中丙二醛(MDA)的含量显著增加,表明膜功能改变,膜通透性增加,膜脂质过氧化,导致植物抗性降低。然而,与未处理相比,在盐胁迫下施加CQDs的植物中MDA水平都显著低于未处理的植物。具体来说,施加CQDs幼苗的MDA水平较未施加CQDs的植物降低了37.5%。MDA的降低表明CQDs有效地最大限度地减少了氧化损伤,提高了细胞膜的完整性和稳定性。从机制上讲,在CQDs处理的幼苗中MDA的减少可能归因于其ROS清除特性<sup>[4]</sup>。

在盐胁迫环境中,植株中离子稳态的破坏很明显, $\text{Na}^+$ 的过度积累导致质膜去极化并伴有持续的 $\text{K}^+$ 外排从而抑制了植株对 $\text{K}^+$ 的吸收。钾(K)是植物生长所必需的营养物质,参与许多生理过程,例如蛋白质合成、渗透调节和细胞膜极化的控制。此外,在盐胁迫下在细胞质中保持高 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比率的能力是植物耐盐性的常见指标。因此,维持 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 稳态在缓解盐胁迫中起着至关重要的作用。施加CQDs处理组的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 含量较未处理组在正常条件下生长的植物的 $\text{Na}^+$ 含量相对较低。与未处理对照组相比,盐胁迫下植物叶片中 $\text{K}^+$ 含量显著降低,而 $\text{Na}^+$ 含量显著增加。施加CQDs提高了盐胁迫下植物叶片的 $\text{K}^+$ 含量和降低了 $\text{Na}^+$ 含量。

### 2.2 CQDs强化农作物抗氧化防御系统

在低浓度下,ROS充当信号分子来调节许多生物过程,包括植物生长和对各种生物和非生物胁迫的反应。然而,在盐胁迫条件下ROS的过度积累会对植物组织产生不利影响。ROS的有害影响传统上归因于它们破坏关键细胞结构的能力,包括细胞膜中的脂质过氧化、DNA损伤、蛋白质变性、碳水化合物氧化、色素分解和酶活性受损。为了减少ROS在高盐度下积累引起的氧化应激,植物依赖于ROS清除机制的激活。盐生植物对高盐度的耐受性增强在一定程度上是由于维持ROS稳态的能力增强。在高盐度下清除过量的ROS可能归因于酶制剂,为了更好地了解CQDs如何调节抗氧化防御系统,在作物中测量了关键抗氧化酶——过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性。这些酶对于维持ROS稳态和保护植物免受氧化损伤至关重要。在盐胁迫下,与未处理的对照相比,几种CQDs处理的植株的抗氧化酶活性均有所降低。具体来说,CQDs处理的幼苗的CAT活性降低了15.06%。SOD和POD也观察到类似的模式,CQDs处理的幼苗的使SOD活性降低了21.15%。POD活性下降最为显著,降低了31.01%。抗氧化酶活性的下降表明,CQDs处理的植物总体上经历了较低的氧化应激。这意味着植物受ROS的影响较小,因此需要较少的高抗氧化酶活性激活。对抗氧化酶活性的需求减少反映了CQDs增强ROS清除的能力,从而可以更有效地管理氧化应激。这些结果表明,CQDs在盐胁迫下调控植物抗氧化防御系统方面起着至关重要的作用。通过降低调节抗氧化酶活性,CQDs可有效减轻氧化损伤并提高植物恢复力。这可以归因于CQDs在增强细胞结构和激活关键压力反应机制方面的双重

作用,使它们成为一种很有前途的纳米材料,可增强作物对非生物胁迫的抵抗力。

2.3 CQDs触发水稻防御相关基因的表达,以提高水稻的耐盐性

应激反应由受体激活和细胞信号转导触发。与正常生长组相比,CQDs处理植物中与激素信号转导相关的DEGs上调,在盐胁迫下下调,CQDs处理组其表达水平再次上调。这些基因包括几个与乙烯、茉莉酸和生长素相关的基因。这些结果表明CQDs激活激素信号通路。植物激素被认为是胁迫反应的“守护者”,介导复杂的信号级联并诱导防御反应。CQDs能够与多种信号转导途径相互作用,包括CDPKs、CIPKs、MAPKs和激素,从而通过维持ROS稳态来增强对盐胁迫的抵抗力。

细胞信号转导导致转录因子(TFs)的调节,转录因子通过各种机制与应激相关基因的顺式元件结合,以增加或抑制其转录。因此,作为信号转导的终点和基因调控的起点,TFs在植物对生物和非生物胁迫的响应中起着关键作用。在这项研究中,CQDs增加了几种与压力相关的转录因子的表达水平,包括WRKY、MYB、BHLH、ERF、bZIP、NAC、ARF、HSF和TCP。例如,WRKY蛋白已被证明具有对各种非生物胁迫的耐受性,并可能在介导非生物和生物胁迫反应之间的串扰中发挥作用<sup>[5]</sup>。bZIP已被证明通过调节应激反应基因的表达来参与对干旱、盐度和寒冷等非生物胁迫的反应。此外,NAC家族的不同成员通过调节不同的靶基因来介导NaCl应激反应。总之,CQDs触发多个应激信号通路,这些通路共同形成一个相互关联的应激调节网络。

### 3 结论与展望

总体而言,基于通过水热反应构建CQDs的育种策略,通过用CQDs消除ROS减轻作物的盐胁迫。具有ROS清除活性的CQDs可以触发防御反应,导致显著的转录组重编程和防御相关基因表达的上调,从而能够对未来的胁迫做出快速而强烈的防御反应。在这种方法中,CQDs在细胞和分子水平上与植物相互作用。它们可能通过调节抗氧化反应、能量代谢、离子平衡和信号转导来间接影响基因表达。因此,CQDs代表了一种纳米生物刺激剂,可以被视为植物的“疫苗”。这种获得性的“疫苗”启动并触发了系统防御机制,可以保护作物免受各种非生物胁迫,如干旱、高温、低温和内涝。这种方法有望成为培育耐逆作物的高效策略。

#### [参考文献]

- [1]张卿.碳量子点制备及应用研究[D].上海交通大学,2020.
- [2]郑广强,吕小慧,朱小山,等.碳量子点的生物毒性研究进展[J].中国科学:化学,2017,47(10):1170-1178.
- [3]盛优莹,王贺飞,苏燕,等.碳量子点的制备、环境应用和生物毒性[J].中国环境科学,2024,44(03):1592-1601.
- [4]王运强,肖炼,邹正康,等.碳量子点对甜瓜幼苗镉胁迫的缓解作用[J].中国瓜菜,2019,32(06):19-26.
- [5]李锐,卢明珠,刘念,等.碳量子点对模式植物拟南芥的生物效应研究[J].植物科学学报,2019,37(02):240-250.

#### 作者简介:

张富华(1998--),男,汉族,河北省邯郸市人,硕士研究生,河北工业大学,研究方向:能源利用过程中的污染物控制技术。