

朱 淇, 刘 洋, 崔茂亚, 等. 纳米材料——碳点对作物生长发育的影响研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 823-832.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.020

纳米材料——碳点对作物生长发育的影响研究进展

朱 淇¹, 刘 洋¹, 崔茂亚¹, 高平磊¹, 陈英龙¹, 戴其根^{1,2}

(1.江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/农业农村部盐碱土改良与利用<滨海盐碱地>重点实验室/扬州大学水稻产业工程技术研究院, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大学教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室/扬州大学农业科技发展研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 碳点(CD)作为一种新型的纳米材料,由于其具有低成本、易合成、低毒性且可生物降解、高量子产率、小尺寸和生物相容性高等优点在农业领域日益得到广泛的关注。本文综述了 CD 对作物生长发育的影响,从种子萌发、作物根系生长发育、矿质元素吸收、光反应、碳同化、抗氧化和抗逆性等方面阐述其影响作物生长和产量的作用机制,以期安全、可持续提高作物产量提供理论参考。最后,讨论了 CD 在农业系统中的潜在应用所面临的挑战。

关键词: 碳点; 生长发育; 光合作用; 抗逆性

中图分类号: S482.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)04-0823-10

Research progress on the effects of nano-material – carbon dots on crop growth and development

ZHU Qi¹, LIU Yang¹, CUI Maoya¹, GAO Pinglei¹, CHEN Yinglong¹, DAI Qigen^{1,2}

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Lands), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*; 2. *Joint International Research Laboratory of Agriculture & Agri-Product Safety of MOE, Yangzhou University/Institute of Agricultural Science and Technology Development, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: Carbon dots (CDs), as a novel class of nanomaterials, have garnered increasing attention in the agricultural field due to their advantages such as low cost, ease of synthesis, low toxicity, biodegradability, high quantum yield, small size, and excellent biocompatibility. In this paper, we reviewed the effects of CDs on the growth and development of crops and elaborated on the mechanisms through aspects such as seed germination, root growth and development, mineral element absorption, photosynthetic reactions, carbon assimilation, antioxidant capacity, and stress resistance, with the aim of providing theoretical references for the safe and sustainable improvement of crop yield. Finally, we discussed the challenges faced by the potential applications of CDs in agricultural systems.

Key words: carbon dots; growth and development; photosynthesis; stress resistance

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFD1700803); 江苏省重点研发计划项目(D21YFD1700)

作者简介: 朱 淇(2001-), 女, 四川大英人, 硕士研究生, 从事水稻栽培技术研究。(E-mail) 3329638349@qq.com

通讯作者: 戴其根, (E-mail) qgdai@yzu.edu.cn

随着人口增长和工业发展,到 2050 年,全球人口估计将达到 9.7×10^9 人,为满足不断增长人口对食物的需求,粮食产量至少需要提高 70%^[1-3]。而耕地面积不断缩小、水资源短缺和极端天气频发,给粮食生产和分配带来了越来越大的压力^[4-6]。此外,

耐逆作物品种培育进展缓慢,转基因作物的安全性受到公众质疑,而化学肥料和农药的使用对环境、农产品以及人体的安全产生威胁^[7-9],农业需要提高生产力和多样化,以应对气候变化和有限自然资源的限制。纳米技术的迅速发展为多个领域带来了重大进步,并为农业开辟了充满希望的道路。

三维空间中至少有一维处于纳米尺寸(1~100 nm)的材料被称为纳米材料,它具有独特的理化性质,可以在原子或分子水平上运行^[10],被广泛应用于成像^[11]、医学^[12-14]、能源^[15-17]、食品^[18-19]等领域。在其众多应用中,农业领域的应用正在被越来越多地探索,现已用于监测作物生长状况^[20]、促进作物生长^[21-22]、提高肥料和农药的效率^[23-24]以及防治病虫害^[25-26]。纳米材料独特的性质使其可以通过不同于化学和基因工程的机制为可持续农业做出贡献。

碳点(CD)是一种新型的纳米材料,根据其形成机理、微结构和性能的不同,主要分为石墨烯量子点(GQD)、碳量子点(CQD)和碳化聚合物点(CPD)^[27]。2004年科学家在制备单壁碳纳米管时,意外地发现具有明亮荧光的碳纳米粒子——碳点。碳点是一种介于分子和凝聚态固体之间的新型体系或碳材料,融合了纳米效应、表面官能团和碳元素的特性,因此具备光学、化学和生物学三种基本功能^[28]。CD具有丰富的表面基团,可以与离子、有机分子、聚合物、DNA和蛋白质结合,从而改变碳点的性质,并且这些功能化碳点可以满足特定要求^[29]。与无机、金属和氧化物基纳米材料相比,具有低毒性(或无毒性)、可生物降解、优异的可调光致发光(PL)、高量子产率(QY)、小尺寸、生物相容性好和低成本等特点^[30-32]。自从2012年Qu等^[31]通过微波合成水溶性发光CD,揭示了其在水溶液中表现出稳定的与激发波长相关的PL特性,以及对植物和动物的毒性为零或较低的特性以来,CD对各种作物生长的潜在影响引起了全世界研究人员的广泛关注。通过不断研究发现,CD对作物的生长、光合作用和非生物/生物胁迫的抵抗力表现出优异的性能。本文综述CD对植物的生物学功能,并将讨论关于CD研究的挑战和机遇,以期安全、可持续提高作物产量提供理论参考。

1 CD对作物种子发芽的影响

发芽是植物个体生长发育的开始,快速、整齐的

种子发芽和幼苗生长对于农业产量尤为重要^[33]。种子的发芽过程可以分为三个阶段,分别是吸水、萌动和发芽^[34]。CD能够通过影响种子呼吸与代谢、氧含量和水通道蛋白基因的表达,改变种子休眠特性、增加种子对水和矿质元素的吸收,从而促进种子萌发、根伸长和幼苗生长。

Han等^[35]通过水热法制备二硝基苯酚钠衍生碳点(SCD),将其应用于棉花种子发芽试验中,通过对棉花芽苗自由水和结合水含量的分析,推测CD增强了芽苗的呼吸和代谢,从而解除了种子休眠,促进了萌发。Li等^[36]通过电化学法合成不同含氧量的CD,探究碳纳米颗粒对水稻生长的影响,发现CD可以渗透到种子细胞核中,进而促进种子萌发、根伸长、幼苗生长,此试验中获得最佳CD质量浓度为0.56 mg/mL,这些结果与之前关于其他碳点材料的报道类似^[37-38];此外通过进一步研究发现种子的含水量、根系发育和幼苗长度与CD中氧含量有关,当CD含氧量29%左右,能有效促进水稻生长。同时在另一项研究中,Li等^[39]通过室温电化学方法利用碳棒合成了约5 nm的纳米颗粒,并将其加入培养基,用于拟南芥的培养,其结果表明CD表面的羟基和羧基可为水分子提供大量的结合位点,从而加速水分子进入种子,促进种子萌发。作物水通道蛋白(AQP)是作物生长发育过程中关键的吸水蛋白,可以介导其他小分子、气体、营养物质和金属离子的转运^[40]。Kou等^[41]以L-半胱氨酸和葡萄糖通过水热法获得碳点,并将其加入水培营养液中,用于培养生菜和番茄,其结果表明CD的亲水基团(-COOH、-OH)可以通过增加水通道蛋白相关基因的表达来促进种子发芽与作物生长,以及增加水和矿质营养元素的吸收并显著激活光合作用。Zhang等^[42]研究发现CD短期处理,导致根中与植物激素生物合成、失活和信号转导相关的一组基因的转录变化,促进根和芽的生长,但对发芽率没有太大影响。

种子萌发不仅受到水分的影响,还受到一系列酶和作物激素的调控。因此,研究人员应更加关注相关酶和作物激素在分子水平上的变化,以揭示CD在种子萌发调节中的作用机制。这将有助于我们更好地理解CD的应用潜力,并为进一步开发CD在作物生长发育调控中的应用提供理论依据。

2 CD对作物根系生长发育的影响

作物对水分和各种矿质营养元素的吸收和传导

有质外体途径、共质体途径和跨细胞途径 3 种^[43]。CD 通过细胞间隙穿透种皮并积聚在子叶中以加速种子萌发,根出现后,CD 被吸附在根表面可通过质外体和共质体途径被吸收并渗透到根维管束中,并在根压和蒸腾拉力的作用下从根部转移到茎叶^[44],此外因为 CD 小尺寸使其能够跨越生物屏障,叶面喷施后也可扩散到作物维管系统中发挥作用^[45]。

CD 在适宜浓度范围内可以通过增强作物对养分的吸收从而促进作物根系生长和增加作物生物量积累,进而影响作物的营养品质。Wang 等^[46]用不同浓度 CD 培养绿豆,其结果表明当质量浓度低于 0.02 mg/mL 时,随着质量浓度的增加,CD 通过增强根系活力以及促进水分吸收,提高豆芽的根长、茎长和生物量。Chen 等^[47]通过热解法和水解法获得功能性碳纳米点 (FCN),并将其作为拟南芥培养基中的植物生长调节剂,其结果表明 FCN 促进幼苗主根生长,增加了幼苗生物量的积累,且植物的生理反应与 FCN 的结构特征之间存在很强的相关性,用官能团最丰富且尺寸较小的原始 FCN 处理幼苗,观察到植物生长增加最显著。Kou 等^[41]使用 *L*-半胱氨酸和葡萄糖通过水热法获得的 CD 培育生菜和番茄,发现在 0.066 mg/mL 至 0.132 mg/mL 范围内显著促进根和下胚轴的伸长,这可能是因为 CD 可以吸附带正电荷的金属离子,如 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等,并一起进入作物体内促进作物根系发育和新陈代谢。Chakravarty 等^[48]在种植前将香菜和大蒜种子用 0.2 mg/mL 的石墨烯量子点处理 3 h,其结果表明石墨烯量子点作为植物生长调节剂提高了香菜和大蒜叶、根、芽、花和果实的生长速度。此外,CD 表面的羧基还能降低根际环境的 pH 值,通过化学吸附增强作物对养分的吸收能力,以及影响根际微生物环境,从而间接影响作物的生长^[41,49]。

CD 对作物根系生长发育的作用在一定浓度范围内表现出剂量效应。相对较低的剂量下有助于根系生长发育,而较高的剂量会抑制根系生长发育。Chen 等^[50]通过整合生理学、代谢组学和转录组学技术,系统地研究了 CD 对拟南芥毒性及其潜在的植物毒性机制,发现在 125 mg/mL 至 1 000 mg/L 范围内 CD 上调根和芽中与刺激反应、UDP 碳基转移酶活性和细胞对磷酸盐饥饿反应相关基因的表达,下调与叶绿体结构和功能相关基因的表达,影响植物代谢物的含量,导致植物产生氧化应激,改变了拟

南芥根和芽的渗透势从而引起了作物毒性的反应,显著抑制拟南芥幼苗的生长。相似地,Kou 等^[41]的研究结果表明当 CD 质量浓度大于 0.33 mg/mL 时,会显著抑制大白菜幼苗根系和下胚轴伸长,过量的 CD 可能会积聚在根部,对细胞内稳态产生负面影响以及 CD 可能通过产生活性氧导致脂质过氧化,对蛋白质和 DNA 造成损伤。

CD 对作物根系形态、生理生化特性的影响及其在整个生长周期中的作用机制尚未完全明了。目前,关于 CD 调控作物其他器官的机制研究较为匮乏。亟需深入研究,以揭示 CD 的化学特性如何与植物生长发育过程中的生化过程相互作用。

3 CD 对作物光合作用的影响

光合作用是作物吸收光能,同化 CO_2 , 制造有机物质并释放氧气的过程,分为光反应和碳同化,对作物生长和生物物质积累来说至关重要^[51]。目前,人们已经对 CD 对光合作用中所有过程的作用进行了研究。结果表明 CD 可以通过影响作物对光能的吸收、传输转换效率,提高光能利用率和提高光合碳同化来提高光合效率。

3.1 光反应

作物可以利用的太阳辐射的波长范围相对较窄,主要集中在 400~500 nm 和 650~800 nm 的光谱^[52],而 CD 具有优异的光致发光性能,可以共价官能化,使其在可见光谱区具有很强的吸收和发射能力,发光范围几乎覆盖了整个可见光谱区,也可以延伸到近红外光区^[53-54]。同时,CD 还可以发出作物需要的蓝光或红光以及将作物无法吸收的紫外线转化为作物可以利用的蓝紫光 and 红光,提高叶片的光合速率^[45]。Budak 等^[55]的研究结果表明当 CD 与叶绿体相互作用时,存在从 CD 到叶绿体的能量转移,提高叶绿体对 360~420 nm 波长光的吸收能力,并将其转化为 680~720 nm 波长的发射光。此外,叶绿素含量是衡量光合作用效率的重要指标,而由于 CD 的种类和浓度以及不同作物的光饱和点不同,CD 对叶绿素含量的影响不同研究有不同的结果。Li 等^[56]研究发现将氮掺杂碳点 (N-CD) 引入叶绿体能够提升光合作用效率,DCPIP 和铁氰化物的含量分别减少 52.48% 和 41.86%,叶面喷施能上调水稻叶绿素合成基因和代谢相关酶基因的表达,进而导致叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量增加。此外 CD

对叶绿素合成的调节作用与表面官能团,尤其是含氮官能团密切相关^[46]。在番茄^[41]和生菜^[57]的研究中也得出了类似的结论。但也有研究结果表明施用 CD 不会增加叶绿素含量^[36,37]。

当光照度超过光饱和点时,光合速率不再增加,电子转移反应和 *RuBisCO* (1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶)酶活性成为限制因素^[58]。CD 具有优异的光学性能和表面易于进行功能修饰的特点,既可作为电子供体又可作为电子受体为农作物光合作用提供了有利的条件。Chandra 等^[59]首先报道了 CD 对电子传递的影响,CD 和叶绿体的波长吸收范围相同,其发射光谱与叶绿体的吸收光谱部分重叠,因此 CD 可以轻松地通过吸附在叶绿体表面上形成光捕获复合物,将吸收的光电子转移给叶绿体。CD 也会接收光合色素多余的电子,再将电子传递至 PS II 和 PS I,增加对 ATP 和 NADPH 的需求,提高 CO₂ 同化速率,从而增强叶片的整体光合作用能力。同时 CD 能极大地提高 PS II 反应中心色素的荧光量子产率,增强能量转换,并将多余的光作为热量消散,以防止对 PS II 和相关光合作用机制造成损害,从而保护植物免受损害^[57]。Tan 等^[60]的研究结果显示,喷施 CD 后,水稻和玉米的光合电子传递最大速率分别提升 57.3% 和 65.5%,Li 等^[43]发现喷施远红外碳点后电子转移速率比对照提升了 28%。CD 的掺杂修饰也可以增加电荷转移量,在光照射下产生电子空穴,提高光电转换效率。目前,CD 的掺杂主要采用掺杂原子的方式(N、P、S、Cl 和 B)^[61-62]。其中,N 掺杂到 CD 中,优化了 CD 的结构,导致电子和空穴的高分离效率,提高了光反应的光转换效率,最终提高了光反应速率^[63]。

3.2 碳同化

碳同化是作物光合作用的第 2 个阶段,利用光反应产生的同化力将 CO₂ 还原为糖类。*RuBisCO* 酶是光合作用碳同化的关键酶,催化 CO₂ 同化和光呼吸碳氧化的第 1 步反应,其底物特异性差、羧化效率低,是光合作用碳同化反应的限速酶^[64-65]。研究表明 CD 可以增强其活性,从而提高光合效率^[66]。Li 等^[36]首先以一系列具有不同氧含量的 5 nm 的 CD 探索其对水稻生长的影响,发现 CD 处理后 *RuBisCO* 酶活性显著增加(增加 42%);随后 Li 等^[39]在室温下通过一步电化学方法直接从碳棒合成 CD,所制备的 CD 也能有效增强 *RuBisCO* 酶活

性,进而促进双子叶作物(大豆、番茄、茄子等)生长,最终提高产量。同时,CD 也能提高玉米、生菜和小球藻等的 *RuBisCO* 酶活性,提高其生物质的积累^[43,60,67]。此外在 H₂O₂ 存在下,CD 可被辣根过氧化物酶(HRP)降解为作物激素类似物(仅适用于石墨或部分石墨 CD)和 CO₂。作物激素类似物可以促进作物生长,CO₂ 通过光合作用的卡尔文循环转化为碳水化合物,进而提高作物的产量^[39]。气孔是调节作物与外界水、气交换的重要通道,气孔导度是气孔开放程度的量度,气孔可调节作物的光合作用和蒸腾作用^[68]。CD 可能促进了水稻气孔导度的提高,增强在叶绿体中的 CO₂ 扩散,并增加叶肉吸收 CO₂ 的能力,间接提高作物的光合作用^[47]。

光合作用是一个涉及多步骤的复杂生物化学过程,而 CD 在这一过程中的具体分子和细胞机制尚未得到充分研究;环境因素也可能调节碳点对光合作用的影响,当前研究多在实验室控制环境下进行,这可能与自然条件有所不同。因此,探究碳点在自然环境中的表现及其对光合作用的具体影响,对于全面评估其生态效应具有重要意义。

4 CD 对作物抗逆性的影响

作物在其生命周期中面临着极端温度、盐害、干旱、洪涝等多种非生物胁迫,也面临着昆虫、食草动物、真菌、细菌以及病毒等生物胁迫^[69-72]。这些胁迫通常会引起渗透和氧化胁迫,造成细胞损伤,从而扰乱作物生长发育并降低作物产量和品质^[9,73]。CD 本身可以作为抗氧化剂清除非生物胁迫应激中产生的过度自由基,还可以增强作物自身的抗氧化防御系统或诱导抗氧化相关酶基因的表达,从而提高对于逆境的抵抗能力。

4.1 非生物胁迫

非生物胁迫,如干旱、高温、寒冷、盐害和强光,单独或组合发生对作物存活、生长和发育产生负面影响,限制农作物的产量^[74-77]。当作物遭受非生物胁迫时,会产生活性氮(RNS)、活性氧(ROS)、丙二醛(MDA)或丙酮醛(MG)等多种有害物质。这些有害物质会破坏作物细胞膜的结构,使细胞生理功能受损,引起脂质过氧化反应,最终导致细胞死亡^[78]。

CD 表面易于功能化,富含羟基、羧基等官能团,良好的电子受体和电子供体,又具有清除自由基的特性^[44-45,79-81]。Zhang 等^[67]以小球藻为研究对

象,其结果表明 CD 本身可以作为抗氧化剂,保护普通小球藻细胞免受氧化损伤,通过进一步研究发现这主要由于 CD 表面羟基基团和共轭 sp^2 碳,可以稳定自由电子。Li 等^[82]以生物质丹参为前驱体,采用一步水热合成荧光 CD,这些 CD 具有多种酶活性,可以清除 DPPH·、 O_2^- 和 ·OH,对植物细胞内 ROS 具有良好的清除作用,能有效缓解盐胁迫下意大利生菜的氧化损伤。CD 的氧空位可以可逆地与氧原子结合,以及硫醇、噻吩、羧基、酰胺和苯并噻唑等表面基团的电子转移和质子转移皆有助于 CD 的抗氧化^[83]。此外具有丰富的官能团的 CD 通过化学基团与金属离子之间的静电吸引和络合,提高拟南芥的生物富集效率和对重金属的耐受性来影响植物的生长和发育^[84]。Đučić 等^[85]的研究结果也表明 CD 通过表面官能团与 Cu^{2+} 形成络合物,降低了玉米幼苗根部 Cu^{2+} 浓度,从而缓解了铜对根木质部细胞壁多糖以及叶韧皮部和叶肉中多糖和蛋白质的不利影响。Dong 等^[86]通过水热合成方法合成的掺铈碳量子点,可诱导植物气孔开放,从而增强植物的代谢效率和氯化钠的排泄,有效缓解了盐胁迫的影响。Li 等^[87]通过丹参衍生物制备 CD,发现 CD 上的羟基和羧基通过环核苷酸和环核苷酸门控离子通道以及凝集素受体激酶促进 Ca^{2+} 活化,增强植物 Ca^{2+} 信号传导,避免 ROS 爆发引起的氧化损伤,从而使植物对各种环境胁迫具有高度适应性,CD 也可以通过调节离子(Na^+ 、 K^+ 和 Fe^{2+}) 稳态,提高甘薯在营养缺乏情况下的适应性。

CD 除了自身可以清除活性氧,提高作物抗性,还可以增强作物自身的抗氧化防御系统或诱导抗氧化相关酶基因的表达,从而提高作物对于逆境的抵抗能力^[46]。Su 等^[88]用含 180 mg/L CD 的水溶液培养花生植株幼苗,发现与未施用 CD 相比,施用 CD 的花生植株超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性较高,MDA 含量较低,同时 CD 表面亲水基团可以使花生木质部导管内的微量营养元素被大量截留并缓慢释放,进一步保证花生所需养分的供应,提高花生的抗逆能力。Zhong 等^[89]的研究结果表明亚精胺碳点(Spd-CD)通过降低活性氧和脂质过氧化,以及提高谷胱甘肽/氧化型谷胱甘肽、抗坏血酸/脱氢抗坏血酸比值以及其他抗氧化酶活性,增强番茄在热应激(45 °C)下的耐受性。Chen 等^[90]研究发现,FCN 能调节酶促和

非酶促抗氧化系统,有效减轻植物细胞的氧化损伤;增强根系活性,促进水分吸收,进而提升幼苗的细胞相对含水量,增强番茄对干旱胁迫的适应性。Xiao 等^[91]用 Cd^{2+} 处理小麦时,添加 CD(50 mg/L 和 75 mg/L)可以显著降低根和叶中的镉含量(33.1%~57.7%),同时增加抗氧化应激相关基因 *ATPSd* 的表达,降低 *APR* 和 *SiR* 基因表达,缓解 Cd^{2+} 对作物造成的非生物胁迫。Chandrakar 等^[92]也有类似的报道。在干旱胁迫下,施用 CD 能促进玉米叶片中脯氨酸和脱落酸的合成和长距离运输到根部,从而将 *AQP* 基因的表达上调 2.3~7.6 倍,增加 K^+/Na^+ 比例,促进干旱条件下作物根系吸水^[29]。此外,作物还可以通过 CD 增强自身的抗氧化防御系统缓解 UV-B^[93]、干旱和盐害对作物的胁迫^[94-95] 以及延缓衰老^[96]。

CD 可以促进植物对土壤中氮素的吸收与利用,促进作物生长进而提高作物的抗逆性。Ji 等^[97]的研究结果表明干旱条件下叶面喷施 CD(5 mg/L)可以刺激根系分泌物(氨基酸、生长素和有机酸)的分泌,并丰富根际有益微生物群落(放线菌、子囊菌、酸杆菌和球囊菌等),促进土壤中的氮活化。同时可以促进氮代谢并增强氨基酸生物合成,使大豆地上部和根部的氮含量分别增加了 13.2% 和 30.5%。Chen 等^[90]的研究结果表明 FCN 通过调节土壤 pH、酶活性、有机碳和有机质含量来诱导土壤细菌和真菌群落丰富度、多样性和结构的改变,提高营养利用率。Yang 等^[98]的研究结果表明,在玉米上施用 CD 可以提高碳水化合物向根部的运输速率,增加根系分泌物(有机酸、氨基酸等)的含量和根际微生物(变形菌、放线菌、子囊菌等)的丰度,促进玉米对氮、磷的吸收,从而提高玉米的抗旱能力。同时,CD 增强土壤中酶的活性,进而促进氮的吸收和代谢。Wang 等^[99]的研究结果表明 CD 可以与固氮酶结合,影响固氮酶的二级结构,改善生物催化过程中的电子传递,最终提高固氮酶的固氮活性;CD 也可以增强脲酶的活性,上调豆血红蛋白基因的相对表达水平和减弱硝酸还原酶的活性来增加 NH_4^+-N 向 $NO_3^- -N$ 的转化,从而促进土壤的氮循环,增强大豆对氮素的吸收从而促进干旱条件下大豆生长。

4.2 生物胁迫

作物在生长过程中经常受到各种病原微生物和害虫的胁迫,导致植株生长迟缓、作物产量及品质降

低,严重威胁粮食安全^[71-72]。CD 可以通过诱导相关基因表达,增强作物抗病性和抗虫性,这为其在抵抗作物生物胁迫中的应用提供了可能性。Luo 等^[100]的研究结果表明叶面喷施 10 mg/L 氮掺杂 CD (N-CD) 可抑制番茄青枯病,使病害严重程度降低 71.19%,其主要原因是增强了活性氧清除能力以及激活番茄中水杨酸和茉莉酸依赖性系统获得性抗性 (SAR),从而抑制体内病原体生长。CD 也可以进入细胞核,通过嵌入结合的方式与 DNA 的大沟和小沟结合,使 DNA 结构松散,诱导硫素基因 (*Os06g32600*) 过度表达,增强抗病性^[36]。

鉴于研究方法、技术手段、成本及难度等因素,当前关于 CD 对作物非生物胁迫作用的研究主要聚焦于干旱胁迫,而对其他非生物胁迫的关注相对较少。在生物胁迫方面,多数研究侧重于利用人类病原体进行体外实验,以评价碳点的抗菌特性,而在作物上的研究较为有限。未来的研究应深入探讨碳点提高作物抵抗胁迫的具体响应机制,以推动其在逆境下农业中的实际应用。

5 CD 对作物品质的影响

不同种类和浓度的 CD 对不同作物品质的影响研究结果各异。Hu 等^[49]利用营养液培养香菜幼苗 7 d,其中添加了不同浓度的 CD,结果发现用 40 mg/L CD 处理的香菜叶中可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素 C 含量分别增加了 17.0%、27.1% 和 26.0%,并增加了钾、钙、镁、磷、锰、铁等矿质营养元素的含量,显著改善了香菜的营养品质。此外 Wang 等^[99]在土壤中施用 CD (5 mg/kg),通过提高氮生物有效性促进大豆生长,大豆籽粒中碳水化合物和蛋白质含量分别增加 28.2% 和 3.4%,油酸、亚油酸、亚麻酸、棕榈酸、硬脂酸 5 种主要脂肪酸含量分别增加 9.7%、8.2%、6.0%、5.7% 和 5.0%。同时在对番茄和生菜的研究中也得到类似的结果^[41,101]。但是, Li 等^[36]的研究结果则表明 CD 虽然能够增加水稻产量,但水稻表观直链淀粉含量和凝胶稠度 (GC) 显著降低,稻米品质总体下降。

6 展望

本文综述了 CD 对作物生长发育影响的最新研究进展,显示 CD 在提高作物产量方面的可观潜力。大部分研究结果表明 CD 有利于作物的生长发育,

包括具有亲水表面基团的 CD 在种子发芽过程中可以增加种子的水分含量并加速种子萌发和根发育;通过静电吸附金属离子,从而促进作物对养分的吸收。适宜的 CD 也可以通过优化光能的吸收、传输和转换,提高光能的有效利用,提高光合碳同化效率,加速作物的光合作用,另外 CD 可以通过提高作物对活性氧的清除能力增强作物对生物胁迫和非生物胁迫的抵抗能力。但是 CD 在浓度较高时会使作物产生氧化损伤,抑制作物的生长。

尽管在农业领域关于 CD 对作物生长发育影响的研究已经取得了一定进展,但仍存在许多需要解决的问题,例如缺乏大规模生产经验、结构和化学式不明确,以及大田试验中的研究较少等。然而,相对于其他纳米材料,CD 具有明显优势,如前驱体来源广泛、制备方法环保、生物相容性好、易于表面功能修饰等。因此,CD 在农业领域有着广阔的应用前景,未来的研究应该重点关注以下几个方面。

(1) 寻找系统且可扩展的合成方案来生产具有所需结构 (例如尺寸、形状、结晶度、官能团数量、缺陷类型和位置) 的高质量 CD 方法,且需制备更高产率的固态 CD。

(2) 推进 CD 在实际生产中的应用,促进其市场化和产业化,为改善生态环境、保障作物生产可持续发展做出贡献。

(3) 改进研究方法和技术手段,在非干旱环境中,对其他非生物胁迫和生物胁迫下 CD 的作用机制展开深入研究至关重要。这有助于加深对 CD 潜在应用价值的认识,对农业和环境领域具有重要意义。

(4) 跨学科结合方法,诸如运用计算机软件合成和模拟 CD 结构,研究其与作物细胞或细胞器的相互作用。同时,需关注相关酶以及作物激素在分子水平上的变化,从代谢组学、蛋白质组学和基因组学等方面揭示 CD 对作物生长发育调控的具体分子机制。

总之,CD 作为一种新兴的纳米材料,通过有效利用其特性,能够显著促进作物的生长与发育,实现增产。同时,其在农产品检测^[102-103]、农业环境监测^[104-105]以及农业废弃物资源化利用^[106-107]等方面也有应用。随着研究的深入和技术的进步,未来 CD 在农业领域的应用将更加广泛和深入,为实现农业可持续发展提供强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] ESSE H P, REUBER T L, DOES D. Genetic modification to improve disease resistance in crops[J]. *New Phytologist*, 2020, 225(1):70-86.
- [2] GILBERTSON L M, POURZAHEDI L, LAUGHTON S, et al. Guiding the design space for nanotechnology to advance sustainable crop production[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(9):801-810.
- [3] LOWRY G V, AVELLAN A, GILBERTSON L M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6):517-522.
- [4] ZHAO L J, LU L, WANG A D, et al. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(7):1935-1947.
- [5] RODRIGUES S M, DEMOKRITOU P, DOKOOZLIAN N, et al. Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges[J]. *Environmental Science: Nano*, 2017, 4(4):767-781.
- [6] LIAO J Y, FAN C, HUANG Y Z, et al. Distribution of residual agricultural pesticides and their impact assessment on the survival of an endangered species[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389:121871.
- [7] GENC Y, TAYLOR J, LYONS G, et al. Bread wheat with high salinity and sodicity tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:1280.
- [8] DE LANGE O, KLAVINS E, NEMHAUSER J. Synthetic genetic circuits in crop plants[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 49:16-22.
- [9] 吴丽婷,程国亭,梁 燕. 植物绿叶挥发物的生物胁迫防御功能研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021(8):27-32.
- [10] LI W, ZHENG Y J, ZHANG H R, et al. Phytotoxicity, uptake, and translocation of fluorescent carbon dots in mung bean plants[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(31):19939-19945.
- [11] SIM S, WONG N K. Nanotechnology and its use in imaging and drug delivery (Review)[J]. *Biomedical Reports*, 2021, 14(5):42.
- [12] LOMBARDO D, KISELEV M A, CACCAMO M T. Smart nanoparticles for drug delivery application: development of versatile nanocarrier platforms in biotechnology and nanomedicine[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2019(1):3702518.
- [13] GOLDBERG M S. Improving cancer immunotherapy through nanotechnology[J]. *Nature Reviews Cancer*, 2019, 19(10):587-602.
- [14] ZHOU J R, KROLL A V, HOLAY M, et al. Biomimetic nanotechnology toward personalized vaccines[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(13):1901255.
- [15] NAGAR A, PRADEEP T. Clean water through nanotechnology: needs, gaps, and fulfillment[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6):6420-6435.
- [16] MAUTER M S, ZUCKER I, PERREAULT F, et al. The role of nanotechnology in tackling global water challenges[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1:166-175.
- [17] LU J, CHEN Z H, MA Z F, et al. The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(12):1031-1038.
- [18] THIRUVENGADAM M, RAJAKUMAR G, CHUNG I M. Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry[J]. *3 Biotech*, 2018, 8(1):74.
- [19] HE X J, DENG H, HWANG H M. The current application of nanotechnology in food and agriculture[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2019, 27(1):1-21.
- [20] GIRALDO J P, WU H H, NEWKIRK G M, et al. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6):541-553.
- [21] LI Y D, JIN Q, YANG D S, et al. Molybdenum sulfide induce growth enhancement effect of rice (*Oryza sativa* L.) through regulating the synthesis of chlorophyll and the expression of aquaporin gene[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(16):4013-4021.
- [22] WANG C X, LIU X F, LI J, et al. Copper nanoclusters promote tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield and quality through improving photosynthesis and roots growth[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289:117912.
- [23] GOGOS A, KNAUER K, BUCHELI T D. Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(39):9781-9792.
- [24] RALIYA R, SAHARAN V, DIMKPA C, et al. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(26):6487-6503.
- [25] LI Y D, YANG D S, CUI J H. Graphene oxide loaded with copper oxide nanoparticles as an antibacterial agent against *Pseudomonas syringae* pv. tomato[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(62):38853-38860.
- [26] ATHANASSIOU C G, KAVALLIERATOS N G, BENELLI G, et al. Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives[J]. *Journal of Pest Science*, 2018, 91(1):1-15.
- [27] ZHU S J, SONG Y B, ZHAO X H, et al. The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective[J]. *Nano Research*, 2015, 8(2):355-381.
- [28] JOSHI P N, MATHIAS A, MISHRA A. Synthesis of ecofriendly fluorescent carbon dots and their biomedical and environmental applications[J]. *Materials Technology*, 2018, 33(10):672-680.
- [29] LI G H, XU J W, XU K. Physiological functions of carbon dots and their applications in agriculture: a review[J]. *Nanomaterials*,

- 2023,13(19):2684.
- [30] WANG B Y, LU S Y. The light of carbon dots;from mechanism to applications[J]. Matter,2022,5(1):110-149.
- [31] QU S N, WANG X Y, LU Q P, et al. A biocompatible fluorescent ink based on water-soluble luminescent carbon nanodots[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2012, 51 (49) : 12215-12218.
- [32] DO ESPIRITO SANTO PEREIRA A, CAIXETA OLIVEIRA H, FERNANDES FRACETO L, et al. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture[J]. Nanomaterials,2021, 11(2):267.
- [33] REED R C, BRADFORD K J, KHANDAY I. Seed germination and vigor;ensuring crop sustainability in a changing climate[J]. Heredity,2022,128(6):450-459.
- [34] LIM S Y, SHEN W, GAO Z Q. Carbon quantum dots and their applications[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44 (1) : 362-381.
- [35] HAN S, WANG J, REN Y C, et al. Fabrication of sodium dinitrophenol derived carbon dots and its effect on seed germination of cotton[J]. Micro & Nano Letters,2022,17(7):149-154.
- [36] LI H, HUANG J, LU F, et al. Impacts of carbon dots on rice plants;boosting the growth and improving the disease resistance [J]. ACS Applied Bio Materials,2018,1(3):663-672.
- [37] TRIPATHI S, SONKAR S K, SARKAR S. Growth stimulation of gram (*Cicer arietinum*) plant by water soluble carbon nanotubes [J]. Nanoscale,2011,3(3):1176-1181.
- [38] HE Y J, HU R R, ZHONG Y J, et al. Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil[J]. Nano Research,2018,11(4):1928-1937.
- [39] LI H, HUANG J, LIU Y, et al. Enhanced RuBisCO activity and promoted dicotyledons growth with degradable carbon dots [J]. Nano Research,2019,12(7):1585-1593.
- [40] 徐 德,徐建俊,李 彪,等. 植物水通道蛋白研究进展[J]. 分子植物育种,2019,17(14):4674-4678.
- [41] KOU E F, YAO Y Y, YANG X, et al. Regulation mechanisms of carbon dots in the development of lettuce and tomato[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2021,9:944-953.
- [42] ZHANG Y, ZHANG A C, JING J X, et al. Transcriptomic analyses reveal carbon dots-based seed priming in the regulation of root growth in rice[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2023,42(12):7614-7623.
- [43] LI D N, LI W, ZHANG H R, et al. Far-red carbon dots as efficient light-harvesting agents for enhanced photosynthesis[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(18):21009-21019.
- [44] LI Y D, XU X K, WU Y, et al. A review on the effects of carbon dots in plant systems[J]. Materials Chemistry Frontiers,2020,4(2):437-448.
- [45] SAI L M, LIU S Q, QIAN X X, et al. Nontoxic fluorescent carbon nanodot serving as a light conversion material in plant for UV light utilization[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,2018, 169: 422-428.
- [46] WANG H B, ZHANG M L, SONG Y X, et al. Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts[J]. Carbon,2018,136:94-102.
- [47] CHEN Q, CHEN L, NIE X K, et al. Impacts of surface chemistry of functional carbon nanodots on the plant growth[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2020,206:111220.
- [48] CHAKRAVARTY D, ERANDE M B, LATE D J. Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators:effects on coriander and garlic plants[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2015,95(13):2772-2778.
- [49] HU J, JIA W Y, YU X F, et al. Carbon dots improve the nutritional quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.) by promoting photosynthesis and nutrient uptake[J]. Environmental Science: Nano,2022,9(5):1651-1661.
- [50] CHEN J, LIU B F, YANG Z Z, et al. Phenotypic,transcriptional, physiological and metabolic responses to carbon nanodot exposure in *Arabidopsis thaliana* L. [J]. Environmental Science-Nano, 2018,5(11):2672-2685.
- [51] WU A, HAMMER G L, DOHERTY A, et al. Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield [J]. Nature Plants, 2019,5(4):380-388.
- [52] CROCE R, VAN AMERONGEN H. Light harvesting in oxygenic photosynthesis;structural biology meets spectroscopy[J]. Science, 2020,369(6506):eaay2058.
- [53] LIU J J, LI R, YANG B. Carbon dots;a new type of carbon-based nanomaterial with wide applications [J]. ACS Central Science, 2020,6(12):2179-2195.
- [54] CAO L, SAHU S, ANILKUMAR P, et al. Carbon nanoparticles as visible-light photocatalysts for efficient CO₂ conversion and beyond [J]. Journal of the American Chemical Society,2011,133(13):4754-4757.
- [55] BUDAK E, ERDOĞAN D, ÜNLÜ C. Enhanced fluorescence of photosynthetic pigments through conjugation with carbon quantum dots[J]. Photosynthesis Research,2021,147(1):1-10.
- [56] LI Y D, XU X K, LEI B F, et al. Magnesium-nitrogen Co-doped carbon dots enhance plant growth through multifunctional regulation in photosynthesis [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 422:130114.
- [57] HU J, JIA W Y, WU X Y, et al. Carbon dots can strongly promote photosynthesis in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Environmental Science: Nano,2022,9(4):1530-1540.
- [58] GAO Y B, ZHENG W W, ZHANG C, et al. High temperature and high light intensity induced photoinhibition of bayberry (*Myrica rubra* Sieb.et Zucc.) by disruption of D1 turnover in photosystem II[J]. Scientia Horticulturae,2019,248:132-137.
- [59] CHANDRA S, PRADHAN S, MITRA S, et al. High throughput electron transfer from carbon dots to chloroplast;a rationale of enhanced photosynthesis[J]. Nanoscale,2014,6(7):3647-3655.
- [60] TAN T L, ZULKIFLI N A, ZAMAN A S K, et al. Impact of pho-

- luminescent carbon quantum dots on photosynthesis efficiency of rice and corn crops[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 162:737-751.
- [61] LI W, WU S S, ZHANG H R, et al. Enhanced biological photosynthetic efficiency using light-harvesting engineering with dual-emissive carbon dots[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(44):1804004.
- [62] WANG Y F, HU A G. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(34):6921-6939.
- [63] WANG C X, YANG H Y, CHEN F R, et al. Nitrogen-doped carbon dots increased light conversion and electron supply to improve the corn photosystem and yield[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(18):12317-12325.
- [64] 盛阳阳,徐秀美,张巧红,等. 光合作用碳同化的合成生物学研究进展[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5):870-883.
- [65] 张智胜,朱国辉,彭新湘. 优化碳同化实现作物高光效研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2022, 43(6):69-77.
- [66] LI Y D, PAN X Q, XU X K, et al. Carbon dots as light converter for plant photosynthesis: augmenting light coverage and quantum yield effect[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 410:124534.
- [67] ZHANG M L, WANG H B, SONG Y X, et al. Pristine carbon dots boost the growth of *Chlorella vulgaris* by enhancing photosynthesis[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2018, 1(3):894-902.
- [68] 刘耀权,张晓洋,白 斌. 不同生态型小麦品种叶片气孔密度及形态差异分析[J]. *西北农业学报*, 2023, 32(5):677-684.
- [69] HASANUZZAMAN M, BHUYAN M H M, ZULFIQAR F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(8):681.
- [70] BHARATH P, GAHIR S, RAGHAVENDRA A S. Abscisic acid-induced stomatal closure: an important component of plant defense against abiotic and biotic stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:615114.
- [71] IQBAL Z, IQBAL M S, HASHEM A, et al. Plant defense responses to biotic stress and its interplay with fluctuating dark/light conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:631810.
- [72] KHAN M, KHAN A U, HASAN M A, et al. Agro-nanotechnology as an emerging field: a novel sustainable approach for improving plant growth by reducing biotic stress[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5):2282.
- [73] 陈柯岐,邓星光,林宏辉. 植物响应非生物胁迫的分子机制[J]. *生物学杂志*, 2021, 38(6):1-8.
- [74] CHOUDHURY F K, RIVERO R M, BLUMWALD E, et al. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination[J]. *The Plant Journal*, 2017, 90(5):856-867.
- [75] DING Y L, SHI Y T, YANG S H. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(4):1690-1704.
- [76] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought[J]. *Science*, 2020, 368(6488):266-269.
- [77] LAMERS J, VAN DER MEER T, TESTERINK C. How plants sense and respond to stressful environments[J]. *Plant Physiology*, 2020, 182(4):1624-1635.
- [78] 赵晶晶,詹万龙,周 浓. 非生物胁迫下植物体内活性氧和丙酮醛代谢的研究进展[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(8):2099-2113.
- [79] LU F, YANG S W, SONG Y X, et al. Hydroxyl functionalized carbon dots with strong radical scavenging ability promote cell proliferation[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(6):065030.
- [80] DAS B, PAL P, DADHICH P, et al. *In vivo* cell tracking, reactive oxygen species scavenging, and antioxidative gene down regulation by long-term exposure of biomass-derived carbon dots[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2019, 5(1):346-356.
- [81] WANG H T, XIE Y S, NA X K, et al. Fluorescent carbon dots in baked lamb: formation, cytotoxicity and scavenging capability to free radicals[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286:405-412.
- [82] LI Y J, 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*, 2021, 4(1):113-120.
- [83] KOU E F, LI W, ZHANG H R, et al. Nitrogen and sulfur Co-doped carbon dots enhance drought resistance in tomato and mung beans[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2021, 4(8):6093-6102.
- [84] CHEN Q, LIU B B, MAN H, et al. Enhanced bioaccumulation efficiency and tolerance for Cd(II) in *Arabidopsis thaliana* by amphoteric nitrogen-doped carbon dots[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190:110108.
- [85] DUČIĆ T, MILENKOVIĆ I, MUTAVDŽIĆ D, et al. Estimation of carbon dots amelioration of copper toxicity in maize studied by synchrotron radiation-FTIR[J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2021, 204:111828.
- [86] DONG Z H, GONG Y, ZHAO J. Cerium-doped carbon quantum dots trigger mung bean seeds to help mitigate salt stress by increasing the degree of stomata opening[J]. *Carbon Letters*, 2022, 32(7):1715-1727.
- [87] LI Y J, TANG Z H, PAN Z Y, et al. Calcium-mobilizing properties of *Salvia miltiorrhiza*-derived carbon dots confer enhanced environmental adaptability in plants[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(3):4357-4370.
- [88] SU L X, MA X L, ZHAO K K, et al. Carbon nanodots for enhancing the stress resistance of peanut plants[J]. *ACS Omega*, 2018, 3(12):17770-17777.
- [89] ZHONG M, YUE L Q, CHEN Q Q, et al. Spermidine carbon dots enhance thermotolerance by modulating photosynthesis and cellular redox homeostasis in tomato[J]. *Environmental Science-Nano*, 2023, 10(2):595-610.
- [90] CHEN Q, CAO X F, NIE X K, et al. Alleviation role of functional

- carbon nanodots for tomato growth and soil environment under drought stress [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127260.
- [91] XIAO L, GUO H Y, WANG S X, et al. Carbon dots alleviate the toxicity of cadmium ions (Cd^{2+}) toward wheat seedlings[J]. *Environmental Science; Nano*, 2019, 6(5): 1493-1506.
- [92] CHANDRAKAR V, YADU B, KORRAM J, et al. Carbon dot induces tolerance to arsenic by regulating arsenic uptake, reactive oxygen species detoxification and defense-related gene expression in *Cicer arietinum* L.[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 156:78-86.
- [93] WANG H, KANG Y Y, YANG N, et al. Inhibition of UV-B stress in lettuce through enzyme-like *Scutellaria baicalensis* carbon dots [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 246: 114177.
- [94] KARA M, SEÇGIN Z, ARSLANOĞLU Ş F, et al. Endogenous food-borne sugar beet molasses carbon dots for alleviating the drought and salt stress in tobacco plant [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(7): 4541-4556.
- [95] GOHARI G, PANAHIRAD S, SEPEHRI N, et al. Enhanced tolerance to salinity stress in grapevine plants through application of carbon quantum dots functionalized by proline[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 42877-42890.
- [96] KUANG L F, KANG Y Y, WANG H, et al. The roles of *Salvia miltiorrhiza*-derived carbon dots involving in maintaining quality by delaying senescence of postharvest flowering Chinese cabbage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134704.
- [97] JI Y H, YUE L, CAO X S, et al. Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress; reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159125.
- [98] YANG H Y, WANG C X, CHEN F R, et al. Foliar carbon dot amendment modulates carbohydrate metabolism, rhizospheric properties and drought tolerance in maize seedling[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151105.
- [99] WANG C X, JI Y H, CAO X S, et al. Carbon dots improve nitrogen bioavailability to promote the growth and nutritional quality of soybeans under drought stress [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 12415-12424.
- [100] LUO X, CAO X S, WANG C X, et al. Nitrogen-doped carbon dots alleviate the damage from tomato bacterial wilt syndrome; systemic acquired resistance activation and reactive oxygen species scavenging[J]. *Environmental Science; Nano*, 2021, 8(12): 3806-3819.
- [101] HUANG Z W, GUO B Y, ZOU Y J, et al. Different kinds of citric acid based carbon dots and their enhancement of the growth of Italian lettuce[J]. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2022, 2(3): 684-692.
- [102] ASHRAFI TAFRESHI F, FATAHI Z, GHASEMI S F, et al. Ultrasensitive fluorescent detection of pesticides in real sample by using green carbon dots[J]. *PLoS One*, 2020, 15(3): e0230646.
- [103] LIAO X F, CHEN C J, YANG J L, et al. Nitrogen-doped carbon dots for dual-wavelength excitation fluorimetric assay for ratiometric determination of phosalone [J]. *Microchimica Acta*, 2021, 188(8): 247.
- [104] MAHOLIYA A, RANJAN P, KHAN R, et al. An insight into the role of carbon dots in the agriculture system; a review[J]. *Environmental Science-Nano*, 2023, 10(4): 959-995.
- [105] SINGH P, ARPITA, KUMAR S, et al. Assessment of biomass-derived carbon dots as highly sensitive and selective templates for the sensing of hazardous ions [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(40): 16241-16267.
- [106] OMRAN B A, WHITEHEAD K A, BAEK K-H. One-pot bioinspired synthesis of fluorescent metal chalcogenide and carbon quantum dots; applications and potential biotoxicity [J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2021, 200: 111578.
- [107] DAS PURKAYASTHA M, MANHAR A K, DAS V K, et al. Antioxidative, hemocompatible, fluorescent carbon nanodots from an 'end-of-pipe' agricultural waste; exploring its new horizon in the food-packaging domain [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(20): 4509-4520.

(责任编辑:蒋永忠)