

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240206

网络首发日期: 2025-01-14; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250114.1545.008>

碳点在促进植物生长领域的研究进展

孙晓丽, 汤素雷, 王慕华, 冯丽萍, 徐雅兰

(丽水学院生态学院, 丽水 323000)

摘要: 碳点(carbon dots, CDs)作为一种新型的碳纳米材料,因其小尺寸、优异的光致发光性能、良好的光稳定性和生物相容性等优点,近年来在农业研究领域受到广泛关注。本文综述了 CDs 在促进种子萌发、植物中的吸收与运输、提高光合作用以及增强植物抗逆性等领域的应用。通过系统总结 CDs 在植物领域的研究进展,归纳 CDs 存在的问题,旨在为未来相关研究提供参考,促进 CDs 在农业领域的应用。

关键词: 碳点; 吸收与运输; 种子萌发; 光合作用; 抗逆性

中图分类号: TQ127.1; TB383.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)03-0001-09

Research Progress in Carbon Dots for Promoting Plant Growth

SUN Xiaoli, TANG Sulei, WANG Muhua, FENG Liping, XU Yalan

(School of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China)

Abstract: Carbon dots (CDs), as a new type of carbon-based nanomaterials, have attracted extensive attention in agriculture in recent years, due to their small size, excellent photoluminescence, good photostability, and biocompatibility. This article reviews the applications of CDs in plants, including their roles in promoting seed germination, enhancing nutrient absorption and transport, improving photosynthesis and increasing plant stress resistance. By systematically summarizing the research advancements of CDs in plant science, this review highlights existing challenges and aims to provide a reference for future studies, thereby fostering the development of CDs in agricultural applications.

Key words: carbon dots; absorption and transport; seed germination; photosynthesis; stress resistance

引文格式:

孙晓丽, 汤素雷, 王慕华, 等. 碳点在促进植物生长领域的研究进展[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(3): 1-9.

SUN X L, TANG S L, WANG M H, et al. Research progress in carbon dots for promoting plant growth[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2025, 40(3): 1-9.

碳点(carbon dots, CDs)是粒径小于 10 nm 的碳纳米材料,具有独特的荧光特性、低毒性、良好的水溶性和生物相容性等优点,被广泛应用于生物医药、生物传感、荧光成像、光电器件、光催化和药物载体等领域^[1]。制备 CDs 的原料来源广泛,可通过廉价的可再生自然资源进行大规模合成。这不仅有助于降低成本,还符合资源循环利用和可持续发展的理念^[2]。根据碳核结构、表面基团和发光特性,CDs 可分为石墨量子点、碳量子点、碳纳米点和聚合物点。近年

来,关于 CDs 的研究涵盖了发光机制^[3-4]、表面工程^[5]、大规模合成^[6]、红外/近红外荧光发射调控^[6]等方面。随着研究的深入,CDs 因其优异的物理化学性质,在农业领域展现出巨大的应用潜力。传统生长促进剂(如赤霉素、细胞分裂素、生长素、芸苔素内酯等)虽然在农业中广泛使用,但其见光易分解、稳定性差,且长期使用可能导致环境污染和食品安全隐患^[7]。相比之下,CDs 作为新型生长促进剂,不仅具备良好的环境稳定性,不易因光照或温度变化而失

收稿日期: 2024-10-13; 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(22076072)

作者简介: 孙晓丽(1988—),女,浙江龙游人,教授, sx12015@lsu.edu.cn

效,还能通过绿色合成方法实现低成本生产。更重要的是,CDs 在植物中的利用效率高,能够显著增强光合作和抗逆性,同时减少环境胁迫的影响,为现代农业提供了安全、高效、可持续的解决方案。

利用 CDs 优异的光学性能,可以间接调控植物的生理过程,促进植物生长^[8]。CDs 可以将自然光转换为叶绿素强吸收的红光和蓝光^[9],从而增强光合作用。CDs 表面丰富的官能团使其具有良好的水溶性,不仅可以提高种子的发芽率、生物量积累,还能促进根系水分的吸收^[10-11]。此外,CDs 通过提高大豆植株根瘤酶的活性,增强固氮能力,进一步提升大豆的品质^[12]。尽管 CDs 在农业领域的应用前景广阔,但在植物领域的研究和综述仍较为有限。本文系统总结了 CDs 在种子萌发、植物中的吸收与运输以及植物抗逆性中的研究进展,分析了当前面临的主要问题,并对 CDs 在农业领域的未来发展趋势进行展望。

1 CDs 的合成

CDs 的合成方法通常分为自上而下和自下而上两种^[13]。自上而下法是将尺寸较大的碳源,如石墨、碳纳米管和碳纤维等通过氧化裂解得到小尺寸的 CDs。这种方法主要包括电弧放电、激光剥离、电化学合成等^[14]。Shi 等^[15]以碳纳米粉末、石墨、石墨烯

和碳纳米管为原料,利用酸氧化法,合成了尺寸、形貌、化学组成各不相同的 4 种 CDs,它们都表现出很高的生物相容性和优良的光热转换效率。Hu 等^[16]以煤炭为原料、过氧化氢为氧化剂成功制备了一种蓝色荧光发射的 CDs,可以高效降解有机污染物。

尽管自上而下合成方法通过氧化裂解大尺寸碳源,能够制备出具有优良光热转换效率的 CDs 材料,但是该方法在植物应用中的研究仍然较少。这可能的原因是该工艺通常需要使用强氧化剂或高能耗设备,对环境造成潜在的危害;同时,所制备的 CDs 性能易受到原料特性和工艺条件的限制,难以针对植物的特殊需求实现功能化。较高的制备成本也成为其在农业领域大规模应用的障碍。

与自上而下法不同,自下而上法的合成路线是利用有机小分子、聚合物或生物质为碳源,通过脱水、碳化、聚合形成 CDs^[17]。该合成方法具有成本低廉、合成过程简单、原材料丰富等优点^[13]。Wang 等^[18]以柠檬酸和乙二胺为碳源,采用水热法,合成了一种可以促进大豆氮元素的吸收和代谢的 CDs。Li 等^[19]以生物质丹参为前驱体,采用水热法得到了具有抗氧化性能的 CDs,可以有效缓解意大利生菜的抗盐胁迫能力。近年来,利用自下而上法,不同种类碳源制备的荧光 CDs 被越来越多地应用于植物领域(表 1)。

表 1 不同种类碳源制备的 CDs 在植物中的应用

Tab. 1 Application of CDs prepared from different carbon sources in plants

	原料	合成方法	发光颜色	应用	参考文献
生物质	丹参	水热	蓝色	缓解莴苣盐胁迫	[19]
	芥子油灯	烟熏	蓝色	促进小麦种子萌发	[20]
	葡萄糖	水热	蓝色	促进黄瓜核酸运输	[21]
	大豆、核桃、紫菜	水热	蓝色	促进玉米光合作用	[22]
	胡椒叶	水热	黄色	提高草莓产量	[23]
	玉兰枯叶	煅烧	黄色	提高豆芽发芽率	[24]
	大豆	水热	蓝色	提高玉米产量	[25]
	螺旋藻	水热	蓝色	促进扁豆芽生长	[26]
有机小分子	姜黄素	水热	黄色	缓解甘薯镉毒害	[27]
	柠檬酸、乙二胺	水热	紫色	促进小麦光合作用	[28]
	柠檬酸	水热	蓝色	促进绿豆植株生长发育	[29]
	半胱氨酸、葡萄糖	水热	蓝色	提高番茄抗旱能力	[30]
	聚乙烯醇、邻苯二胺	水热	蓝色	延长草莓保质期	[31]
	L-半胱氨酸、葡萄糖	水热	蓝色	提高番茄及生菜产量与品质	[32]
	柠檬酸、乙二胺、镁	水热	蓝色	促进水稻幼苗生长,提高抗其逆性	[33]
	甜菜糖蜜	水热	蓝色	缓解烟草植株干旱和盐胁迫	[34]
	谷氨酸	水热	蓝色	植物细胞荧光成像	[35]
	邻苯二胺、柠檬酸	水热	橙色	促进玉米光合作用	[36]

从原料来源看,制备 CDs 的前驱体主要分为生物质和有机小分子两大类。生物质原料具有天然的

化学多样性和广泛的可获取性,而有机小分子则凭借其高反应活性能够通过水热法快速合成,且 CDs 产

率较高。表 1 中 CDs 的发光特性主要集中于蓝色和黄色, 少量为紫色和橙色。不同发光颜色在植物中的作用各有侧重。例如, 蓝光和紫光 CDs 普遍在促进种子萌发、光合作用增强及抗逆性提高方面表现出显著效果^[19-22, 28-35]; 黄色和橙色发光 CDs 则多应用于提高作物产量, 如草莓和豆芽的增产^[23-24, 36]。此外, 水热法作为主要合成方法, 操作简便且条件温和, 能够充分保留原料中丰富的官能团, 从而赋予 CDs 优异的光学性能。煅烧法则主要用于处理较坚硬或难分解的生物质(如玉兰枯叶)^[24]。然而, 自下而上法仍存在一定挑战, 在煅烧过程中高温可能破坏 CDs 的一些活性位点, 而水热法需要进一步优化, 以实现 CDs 光学性能的精准调控。

尽管 CDs 在促进植物生长方面表现出色, 但其作用机制以及原料与植物生长间的关系仍不完全清楚。目前的研究大多集中在 CDs 对植物的物理或化学刺激作用, 而对其在分子水平上如何调控光信号传导、代谢途径及激素分布尚缺乏系统性研究。更重要的是, 不同来源的 CDs 在作用效果和稳定性上存在显著差异, 表明其化学组成和结构特性可能对植物产生不同的影响。此外, CDs 作为外源性材料, 其长期使用对土壤生态系统及环境的潜在影响尚未完全评估。因此, 在实际应用之前, 仍需深入研究其作用机制、安全性及环境影响。

2 CDs在植物中的应用

2.1 CDs在种子萌发中的应用

CDs 表面含有丰富的羟基、羧基、氨基等官能团, 展现出良好的亲水性^[37]。这些官能团通过与水分子形成氢键, 能够促进水在植物细胞壁与细胞膜间的快速传导, 从而提高植物体内水分的传递效率。

种子萌发是植物生长的关键阶段。在萌发初期, 种子内部的水溶性物质开始吸收水分, 随着胚胎的发育, 种子需要吸收更多的水分以支持生长。刘振玲等^[10]通过微宇宙培养法发现, CDs 能提高菠菜种子的发芽率, 并显著增加水通道蛋白基因的表达量。CDs 通过激活生菜和西红柿水通道蛋白基因的表达, 加速种子萌发, 促进幼苗的根系和下胚轴伸长, 增强促进矿物质元素的吸收和光合作用, 提高成熟植物的产量和营养品质^[38]。由于水通道蛋白在调节水分运输中起关键作用, 其表达量的增加可以有效促进种子吸水, 为种子萌发提供充足的水分, 从而加速生长。

为了进一步揭示 CDs 在种子萌发过程中的多重作用机制。Liang 等^[39]将由塑料合成的 CDs 用作豌豆种子萌发的纳米引发剂, 发现 CDs 能够穿透种皮进入种胚, 如图 1(a) 所示。透射电子显微镜图像显示, CDs 处理的豌豆种皮内有大量棕色纳米颗粒, 扫描电子显微镜图像则显示, CDs 处理后, 豌豆种子表面出现明显的褶皱、孔洞和裂隙。接触角测量结果进一步表明, CDs 处理的种皮表面疏水性显著下降, 这意味着 CDs 可能通过破坏表皮疏水层加速水分吸收。CDs 在种子萌发过程中先穿透种皮部分, 通过吸水进入种胚; 随着水分的运输, CDs 通过维管系统被运输到根、芽和叶^[39]。这一过程进一步促进了植物器官的发育。此外, 由褐藻油制备的 CDs 在低浓度下也能够促进绿豆种子萌发, 如图 1(b)^[40]所示。

上述研究表明, CDs 通过调控水通道蛋白基因表达、改变细胞结构、优化水分运输等途径, 在种子萌发和植物早期生长过程中发挥了多种积极作用。未来研究应进一步探索 CDs 在不同植物种类中的应用效果, 以及不同浓度和条件下的最佳使用策略, 为农业生产提供理论支持和实践指导。

2.2 CDs在植物中的吸收与运输

CDs 在植物体内主要采用质外体和共质体两种途径进行转运, 这些途径通过径向运动的方式改变运输途径^[41]。在质外体途径中, CDs 在质膜外通过细胞外间隙、相邻细胞的细胞壁和木质部导管运输, 使其能够到达植物根部和维管组织。在共质体途径中, CDs 通过胞间连丝在植物体相邻细胞的细胞质之间转运^[41]。这两种途径的选择和效率可能受到植物种类、CDs 的物理化学性质以及环境条件的影响。质外体途径依赖细胞外间隙和木质部导管的连接, 运输速率通常较快, 但可能受到植物根系结构的影响。相比之下, 共质体途径的运输则依赖于胞间连丝的连接, 虽然运输速率可能较慢, 但可以更有效地跨越细胞壁障碍, 直接影响细胞的生理功能。

Tripathi 等^[20]研究发现, 以芥末灯油为原料利用水热法制备的 CDs, 不仅被小麦幼苗的根部吸收, 还显著促进根和茎的生长。这原因可能在于 CDs 的尺寸小和表面反应性高, 使其能够穿越生物屏障。使用拉曼图像光谱识别, CDs 在植物的根部表皮和维管区积累, 这些区域是快速分裂和生长的主要部位, 表明 CDs 可能具有类似植物生长调节剂的功能, 能够通过调控细胞的分裂和扩展促进植物生长。Bajpai 等^[42]以瓜尔胶为前驱体, 通过微波辅助法合成 CDs,

将朱槿的叶片直接浸在 CDs 水溶液中,利用荧光显微镜,在叶片保卫细胞中观察到 CDs 的存在。这证实了 CDs 能够通过叶片的细胞壁和细胞膜进入植物细胞内部,并在保卫细胞中富集。此外,保卫细胞在调节气孔开闭中起着关键作用,CDs 在这些细胞中的存在可能会对植物的气体交换和水分平衡产生影响。如图 2^[43]所示,以绿豆为模型,Li 等^[43]发现 CDs 通过质外体途径,从植物维管系统中由根向茎和叶中转移。通过进一步的定量分析,CDs 在茎和叶中的浓度显著高于根部,表明 CDs 在植物体内的运输具有明显的方向性。这一发现不仅揭示了 CDs 在植物中的迁移机制,还为开发基于 CDs 的植物健康监测和药物传递系统提供了理论支持。另一项研究中,Liang 等^[24]以玉兰枯叶为前体,采用煅烧法制备 CDs 培育豆芽,在紫外灯下观察到豆芽的根、茎、叶部位有蓝色荧光。这种荧光信号的存在为研究 CDs 在植物体

内的分布和动态迁移提供了一种实时无损的监测方法。同时,该研究还显示在豆芽的水分减少时,CDs 在根部的荧光强度有所下降,表明 CDs 的迁移可能与水分的流动密切相关。上述研究表明,当豆芽根部吸收水分时,CDs 会随着水分进入根部维管系统,并随着水分在豆芽的茎、叶中迁移。由于 CDs 具有优异的光致发光性质,可以实时监测其在植物体内吸收、转运和利用的动态过程。此外,不同类型的 CDs 在植物体内的迁移模式和最终定位可能有所不同,例如,一些功能化的 CDs 能够优先聚集在特定的组织或细胞器中,为基于 CDs 的靶向农业应用提供了可能性。当 CDs 喷施到植物叶片上时,它们可以通过气孔、角质层和表皮细胞进入植物内部。CDs 也可以通过灌溉的方式被植物根系吸收,再通过植物的木质部(导管)被运输到地上茎和叶片等组织。

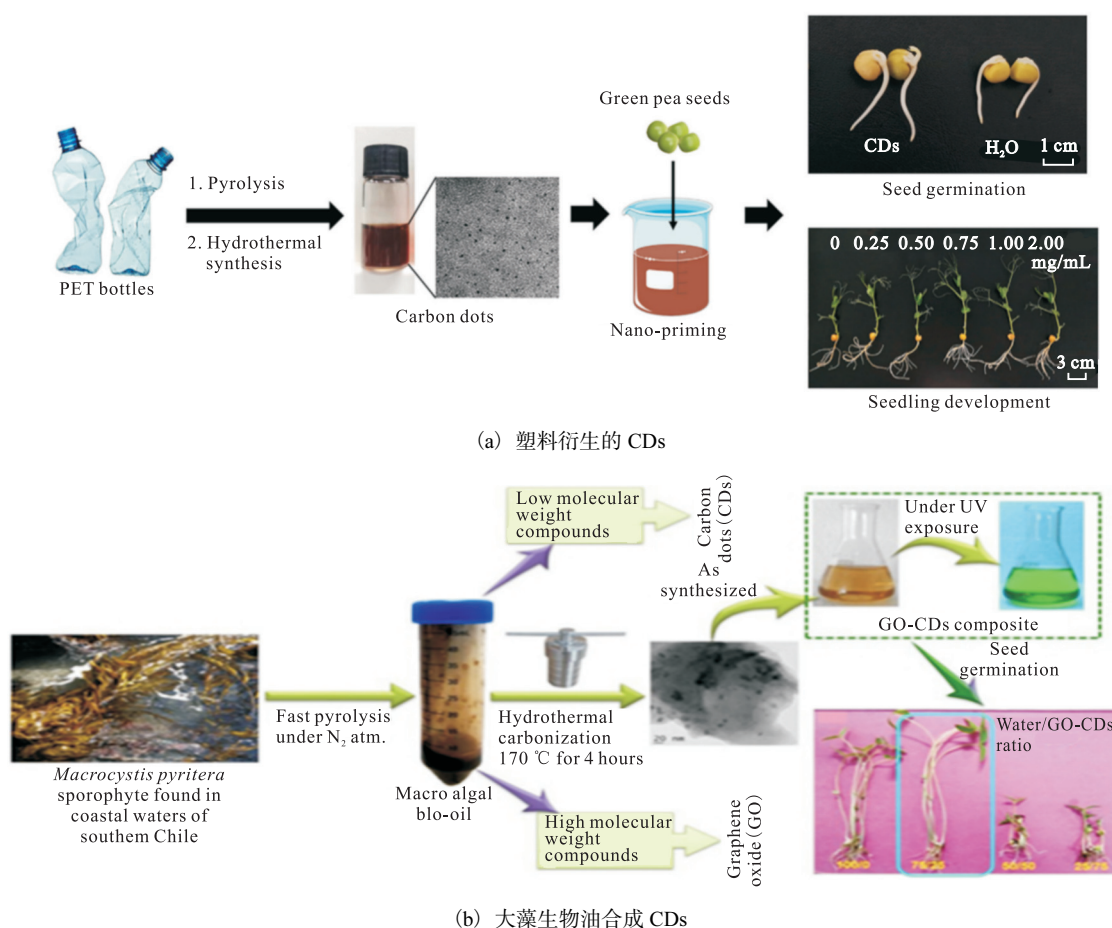


图 1 塑料衍生的 CDs 提高种子发芽率以及大藻生物油合成 CDs 对种子萌发影响

Fig. 1 Enhanced seed germination rate by plastic-derived CDs and effect of algal bio-oil-derived CDs on seed germination

此外,粒径直接决定了 CDs 的比表面积、光学特性以及在植物组织中的传输效率,对植物的生长发育具有显著影响。较小粒径的 CDs 更容易穿透植物细

胞壁和细胞膜,进入细胞内部参与代谢活动,从而促进植物的光合作用、抗氧化反应及营养吸收^[44]。然而,过小的粒径可能会引发植物细胞的应激反应,导

致活性氧 (ROS) 过度产生, 从而对细胞造成氧化损伤。随着 CDs 尺寸的逐渐增大, 其发射波长逐渐红移, 不同波长的光可能对植物的不同生理过程产生调控作用。因此, 合理控制 CDs 粒径至适宜范围, 对于其最大化促进植物生长的潜力、同时避免可能的负面

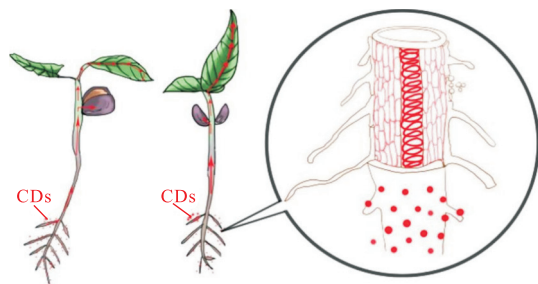


图 2 植物通过根部途径吸收 CDs

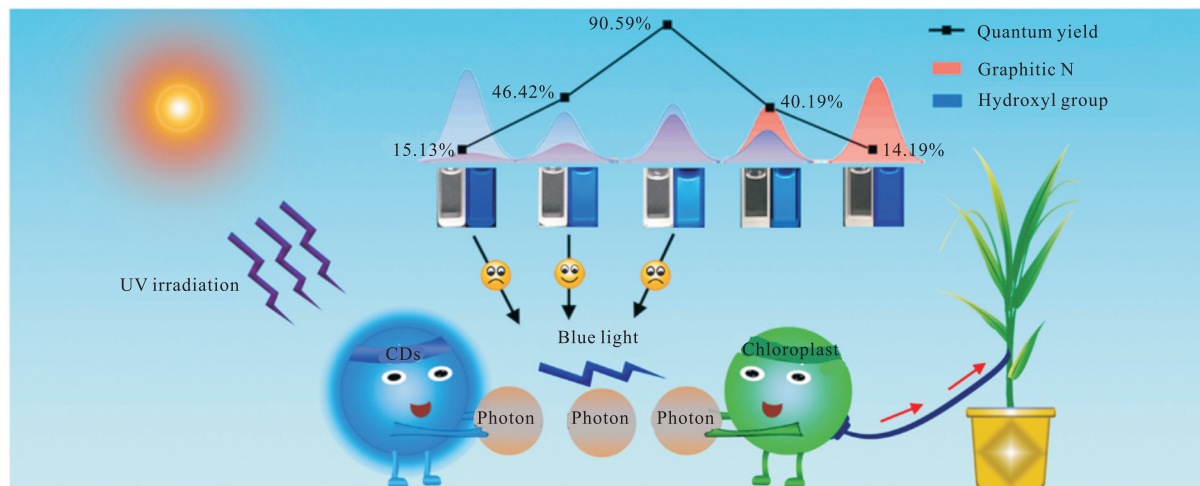
Fig. 2 Absorption of CDs by plants through the root pathway

效应至关重要^[45]。

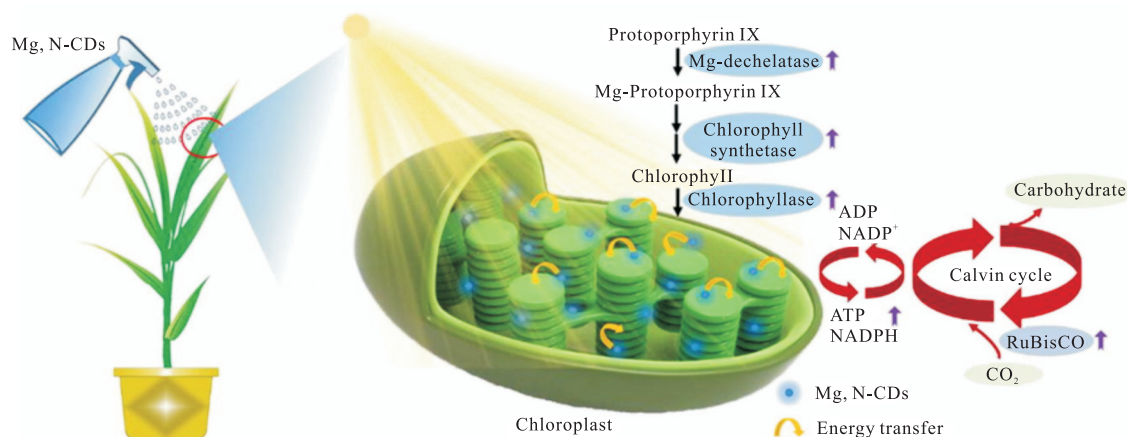
2.3 CDs在植物光合作用中作用

光合作用由光反应和暗反应两部分组成, CDs 作为功能性纳米材料, 在这两部分中表现出不同的作用。

在光反应阶段, CDs 表现出较强的荧光发射可协调性, 能够将自然光转换为更适合植物光合作用的红光和蓝光。受激发的 CDs 可以将能量传递给叶绿体, 加快类囊体膜上的电子传递速率, 进而提高光合作用的效率^[46]。如图 3 (a)^[47]所示, Li 等^[47]通过调控 CDs 中的氮元素掺杂量, 制备具有量子产率 (QY) 梯度变化的 CDs, 并研究 QY 对光合作用的影响。结果表明, 适中 QY (46.42%) 的 CDs 可以有效地将紫外光转换为蓝光, 被叶绿体捕获并用于光合作用。然而, 过低或过高的 QY 则会干扰叶绿体光捕获, 抑制光合作用^[47]。进一步的实验发现, CDs 不仅影响光捕获过



(a) 不同荧光量子产率的 CDs 对光合作用的影响



(b) 镁掺杂 CDs 对水稻叶绿素含量的影响

图 3 不同荧光量子产率的 CDs 对光合作用的影响以及镁掺杂 CDs 对水稻叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of CDs with different fluorescence quantum yields on photosynthesis and effects of magnesium doped CDs on chlorophyll content of rice

程,还对电子传递链中的多个关键步骤产生调节作用。在高 QY 条件下,CDs 通过增加电子传递链中光合色素的激发态寿命,使电子传递效率下降,从而抑制光合作用。在低 QY 条件下,CDs 则通过减少光合色素的激发态寿命,使电子传递链中的电子供应不足,影响光合作用效率。这些结果表明,QY 对光合作用有显著的双向调节作用,CDs 的光致发光特性需要精细调控,才可以实现最佳的光合作用效果。Li 等^[47]以生物质黄柏为前驱体制备的 CDs,能够提高生菜叶片中的叶绿素含量。另一项研究中,如图 3(b)^[34]所示,将镁掺杂的 CDs 喷洒于水稻叶面上,发现植株叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别提高了 14.39% 和 26.54%,表明 CDs 能够促进水稻叶绿素合成。

暗反应主要发生在叶绿体基质中,CDs 可能通过与光反应产物如腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)的相互作用,提高暗反应中 CO₂ 的固定效率。它们通过增强 ATP 的供应、提高 NADPH 的利用效率,间接促进 Calvin 循环中 CO₂ 的固定。此外,Wang 等^[48]研究发现,CDs 通过改变核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(RuBisCO)的二级结构,增强 RuBisCO 的活性,进而加快 CO₂ 的固定。实验显示,经 CDs 处理的绿豆幼苗 RuBisCO 酶活性提高了 30.9%。Zhang 等^[49]在研究 CDs 对小球藻光合作用的影响时也发现,CDs 可被小球藻降解并产生大量 CO₂,使小球藻 RubisCO 酶的体外和体内活性分别提高 38% 和 34%。因此,CDs 不仅在光捕获和电子传递方面发挥重要作用,还通过促进叶绿素合成和增强 RuBisCO 酶活性,加速光合作用全过程。

2.4 CDs在提高植物抗逆中的应用

CDs 在抗盐和抗旱方面,如图 4(a)所示,Wang 等^[50]以黄芩为前驱体制备的 CDs,可以有效清除生菜体中由 UV-B 产生的活性氧,同时提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶等抗氧化酶的活性,降低 UV-B 胁迫造成的氧化损伤。Li 等^[19]以丹参为原料合成一种蓝色荧光的 CDs。丹参经水热处理后,在 CDs 表面形成了许多丹参类聚合物,使 CDs 具有较高的抗氧化能力。分析表明,这些 CDs 具有多种抗氧化酶活性,能有效清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH·)、超氧阴离子和羟基自由基,其抗氧化活性强于纯丹参提取物。在意大利莴苣幼苗叶片上喷洒 CDs 可以有效缓解盐胁迫引起的氧化损伤^[19, 50]。Kara 等^[34]研究源自甜菜糖蜜的内生源食品 CDs(MCDs)对烟草植物在干旱和盐胁迫下生长的影响,通过施加

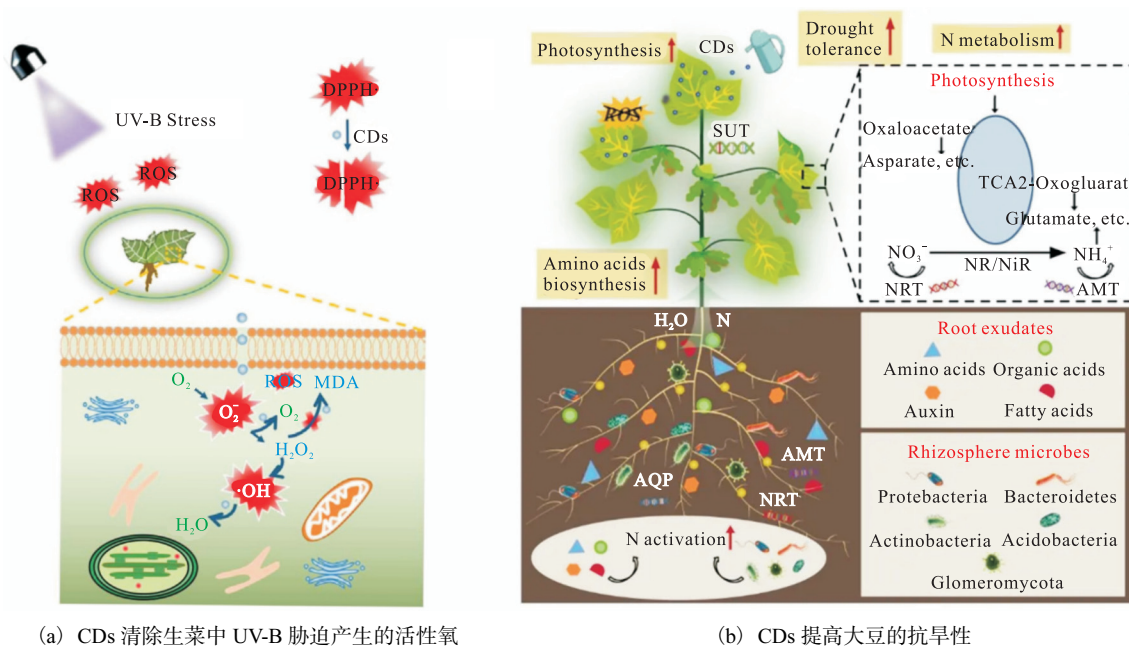
6 种不同质量浓度的 MCDs(0、10、25、50、100、500 mg/L),评估 MCDs 在非胁迫、盐胁迫和干旱胁迫条件下对烟草植物生长的作用。结果表明,即使在质量浓度高达 500 mg/L 时,MCDs 也能显著促进烟草植物的生长。在干旱和盐胁迫条件下,MCDs 不仅可以通过降低丙二醛含量减轻氧化损伤,还能增加脯氨酸积累维持细胞渗透平衡。MCDs 处理还增强了烟草植物在干旱和盐胁迫下的抗氧化酶系统,包括超氧化物歧化酶、抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽还原酶和过氧化氢酶的活性。这表明 MCDs 能够提高植物的抗氧化能力,从而抵御氧化应激。上述研究表明,CDs 兼具抗氧化酶活性与稳定性,能够显著提升植物的抗逆能力。Ji 等^[51]发现叶面喷施 CDs,能清除干旱胁迫下大豆活性氧的积累,从而增强光合作用和碳水化合物转运〔图 4(b)〕。与干旱胁迫对照组相比,施用 CDs 后大豆叶片的丙二醛含量降低 43.6%,叶绿素含量升高 7.3%。CDs 通过减少活性氧的积累增强光合作用,进而促进碳水化合物的积累和运输,刺激根系分泌,提高大豆在干旱胁迫下的吸水率。目前,提高抗旱性的方法主要有调节植物体内激素(如脱落酸、吲哚乙酸、乙烯、赤霉素、油菜素内酯)、垄沟播种和地膜覆盖相结合、微喷灌、滴灌、使用抗蒸腾剂等。然而,这些方法虽然能在一定程度上缓解干旱对植物的影响,但是也存在一些局限性。例如,激素类物质和塑料农膜的使用可能会带来环境污染问题,这些物质难以降解,并且可能随着雨水扩散到环境中^[52]。相比之下,CDs 作为一种环境友好型的纳米材料,提供了一种新的解决方案。CDs 通过以下机制增强植物的抗旱性。(1)改善光合作用:CDs 能够提高植物对光能的利用效率,从而增强光合作用,为植物提供更多的能量和生长所需的有机物质^[51]。(2)清除活性氧:在干旱胁迫条件下,植物会产生大量的活性氧,这会对细胞结构和功能造成损害。CDs 能够有效清除这些活性氧,减少氧化应激,保护植物细胞^[19, 50]。综上所述,CDs 的环境风险较低,它们为提高植物抗旱性提供了一种更加可持续和环保的方法。

CDs 在减少植物重金属胁迫方面,高佳等^[27]以生物质姜黄素为碳源,通过一步水热法制备水溶性 CDs,以甘薯为模式植物研究其缓解镉(Cd)胁迫的作用。结果表明,CDs 显著提高甘薯幼苗叶绿素含量,增强净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,同时降低胞间 CO₂ 浓度、丙二醛和脯氨酸的含量、硝酸还原酶活性及 NO 积累水平,且根尖 Cd 离子内流显著减少。

CDs 通过降低 Cd 胁迫下甘薯幼苗体内的硝酸还原酶活性, 减少甘薯体内 Cd 诱导的 NO 积累。该研究揭示了 CDs 在提高甘薯幼苗抗 Cd 胁迫能力中的积极作用, 通过调节植物内部的生理和生化过程, 减轻了 Cd 对甘薯幼苗的负面影响^[27]。CDs 表面含氮、氧的官能团可以与汞、Cd 等离子整合, 形成较大的聚集体, 从而减少植物对重金属离子的吸收, 缓解重金属对植物的胁迫^[53-54]。许荣华^[55]团队在研究 CDs 对水稻 Cd 的缓解效应及机制时发现, 通过叶面喷施 CDs 预处理水稻后, CDs 从水稻叶片转运至根系, 上调了其抗氧化和细胞壁形成相关基因表达水平, 激活了抗氧化防御、能量代谢、生长发育相关代谢通路, 进而促进水稻根系的发育, 提高了水稻的生长势和对 Cd 胁迫的抗逆性。Chen 等^[56]以石墨板为电极、氨水为电解质, 采用一步电解法合成了具有高比表面积和多官能团的两性 N-CDs。研究中制备的两性氮掺杂

CDs (N-CDs) 具有环境友好的优势, 并且含有丰富的官能团, 例如羧基、氨基、羟基和羰基等。这些官能团通过静电吸引和与金属离子络合作用, 使 N-CDs 在重污染水中对 Cd^{2+} 展现出优异的吸附能力, 其饱和吸附量达到 559 mg/g。N-CDs 材料可有效促进拟南芥幼苗在不同 Cd 胁迫下的 Cd 生物积累, 缓解植株生长迟缓。这进一步拓展了 CDs 在环境污染治理中的应用前景, 表明其在减轻重金属胁迫对植物生长的不利影响方面具有潜在的环境保护价值。目前, 研究者对 CDs 抗植物重金属胁迫的研究仍处于初级阶段, 不同土壤、气候等条件下 CDs 对植物抗重金属胁迫的响应机理及效率方面还需要进一步探究。

因此, CDs 能够提高植物对不利环境的适应性, 从而改善植物在逆境下的生长状况, 其在提高植物抗逆性、减轻生物与非生物胁迫、促进作物生长及提高产量方面展现出广阔的应用前景。



(a) CDs 清除生菜中 UV-B 胁迫产生的活性氧

(b) CDs 提高大豆的抗旱性

图 4 CDs 清除生菜中 UV-B 胁迫产生的活性氧以及提高大豆的抗旱性

Fig. 4 CDs scavenge reactive oxygen species produced by UV-B stress in lettuce and drought resistance enhancement in soybean by CDs

3 总结与展望

CDs 作为一种新型纳米材料, 因其具有优异的荧光性能和生物相容性, 可以用于追踪植物养分吸收, 在植物生长和发育中具有广阔的应用前景。CDs 还可以作为一种植物生长的诱导剂, 通过调控植物激素合成和信号传导路径, 促进植物生长和提高产量。通过不同合成方法和原料制备的 CDs, 展现出不同的物

理化学特性, 能够有效与植物细胞内的生物大分子相互作用, 提高光合作用, 促进植物生长发育。虽然 CDs 在农业领域的研究已经取得了初步进展, 但是其研究领域还需进一步拓展, 例如: (1) CDs 在植物体内的代谢途径及产物尚不明确, 特别是在长期暴露下, CDs 对植物的生理和生化影响尚需进一步研究; (2) CDs 的环境持久性及其在土壤和水体中的迁移行为, 目前还缺乏系统性的研究, 其对环境的潜在影响仍需进一步深入研究; (3) CDs 的产量较低, 纯化方

法繁琐,限制了其在农业中的大规模使用;(4)目前,用于植物中的 CDs 大多发射蓝色的荧光,容易受到植物组织自荧光的干扰,导致其在实际应用中信号检测灵敏度下降,不利于观察 CDs 的吸收与运输,亟需开发长波长发射的 CDs。此外,还需要探索如何优化 CDs 的合成和纯化工艺,降低成本和提高产量,以便在大规模农业生产中广泛应用。

未来克服上述困难后,CDs 有望在农业科技领域发挥关键作用,推动现代农业的可持续发展。特别是在精准农业和智能农业的背景下,CDs 可以结合传感器技术和信息技术,为作物监测和管理提供更为精确和高效的解决方案。这将不仅有助于提高农业生产效率,还能减少化肥和农药的使用,减少环境污染,从而实现农业的绿色转型。

参考文献:

- [1] BAWEJA H, JEET K. Economical and green synthesis of graphene and carbon quantum dots from agricultural waste[J]. *Materials research express*, 2019, 6(8): 0850g8.
- [2] 徐雅兰. 前驱体导向的功能型碳点制备及其应用研究[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [3] 王欢,徐晶,黄昱清,等. 红光碳点:发光机理、调控及应用探究[J]. *发光学报*,2020,41(12):1579-1597.
- [4] 徐冀健,曲丹,安丽,等. 红光/近红外发射碳点制备、光学调控与应用[J]. *发光学报*,2021,42(12):1837-1851.
- [5] LIU W, LI C, REN Y, et al. Carbon dots: surface engineering and applications[J]. *Journal of materials chemistry B*, 2016, 4(35): 5772-5788.
- [6] ZHANG J, YU S H. Carbon dots: large-scale synthesis, sensing and bioimaging[J]. *Materials today*, 2016, 19(7): 382-393.
- [7] 陶淞源,朱守俊,杨柏. 新型碳基发光纳米材料:碳点:研究进展及展望[J]. *科学观察*,2019,14(6):3.
- [8] LI H, HUANG J, LIU Y, et al. Enhanced RuBisCO activity and promoted dicotyledons growth with degradable carbon dots[J]. *Nano research*, 2019, 12: 1585-1593.
- [9] DONG R, LI Y, LI W, et al. Recent developments in luminescent nanoparticles for plant imaging and photosynthesis[J]. *Journal of rare earths*, 2019, 37(9): 903-915.
- [10] 刘振玲,李亚伟,杨涵越,等. 碳点促进作物种子萌发及生长的机制研究[J]. *安徽农业科学*,2021,49(24):1-5.
- [11] 张丽珍,杨冬业,黄夕洋,等. 金樱子叶衍生碳点的制备及其对金樱子不定芽的影响[J]. *化学研究与应用*, 2024, 36(5): 1021-1230.
- [12] 季亚卉. 碳量子点调控大豆耐旱性和品质的机制研究[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [13] ZUO P, LU X, SUN Z, et al. A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots[J]. *Microchimica acta*, 2016, 183: 519-542.
- [14] 李林. 荧光碳点的功能化调控及其分析应用[D]. 太原:山西大学,2021.
- [15] SHI W, HAN Q, WU J, et al. Synthesis mechanisms, structural models, and photothermal therapy applications of top-down carbon dots from carbon powder, graphite, graphene, and carbon nanotubes[J]. *International journal of molecular sciences*, 2022, 23(3): 1456.
- [16] HU S, WEI Z, CHANG Q, et al. A facile and green method towards coal-based fluorescent carbon dots with photocatalytic activity[J]. *Applied surface science*, 2016, 378: 402-407.
- [17] XIA C, ZHU S, FENG T, et al. Evolution and synthesis of carbon dots: from carbon dots to carbonized polymer dots[J]. *Advanced science*, 2019, 6(23): 1901316.
- [18] WANG A, KANG F, WANG Z, et al. Facile synthesis of nitrogen-rich carbon dots as fertilizers for mung bean sprouts[J]. *Advanced sustainable systems*, 2019, 3(3): 1800132.
- [19] 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.
- [20] TRIPATHI S, SARKAR S. Influence of water soluble carbon dots on the growth of wheat plant[J]. *Applied nanoscience*, 2015, 5: 609-616.
- [21] DELGADO-MARTIN J, DELGADO-OLIDEN A, VELASCA L. Carbon dots boost dsRNA delivery in plants and increase local and systemic siRNA production[J]. *International journal of molecular sciences*, 2022, 23(10): 5338.
- [22] 杨直霖. 生物质碳点对植物光合作用及品质的调控机制[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [23] SALHA B A, SARAVANAN A, MARUTHAPANDI M, et al. Plant-derived nitrogen-doped carbon dots as an effective fertilizer for enhanced strawberry growth and

- yield[J]. ACS ES&T engineering, 2023, 3(8): 1165–1175.
- [24] LIANG S, WANG M, GAO W, et al. Fluorescent carbon dots derived from magnolia withered leaves for promoting growth and fluorescent labeling of bean sprouts[J]. Carbon trends, 2021, 4: 100063.
- [25] 徐兰青, 程冰徐, 王传洗. 叶面喷施生物质碳点对玉米光合及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(12): 2166–2173.
- [26] AGNOL L D, NEVES R M, MARASCHIN M, et al. Green synthesis of *Spirulina*-based carbon dots for stimulating agricultural plant growth[J]. Sustainable materials and technologies, 2021, 30: e00347.
- [27] 高佳, 潘志远, 夏楠, 等. 姜黄素衍生碳点缓解甘薯镉毒害的作用机制[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(7): 65–71.
- [28] 刘永强. 在红蓝光培育模式下氮磷共掺杂碳量子点对小麦光合作用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [29] 李璐. 荧光碳点对绿豆、玉米生理生化的影响及机制研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2023.
- [30] KOU E, LI W, ZHANG H, 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.
- [31] 郑晓凤, 高秋杰, 涂心睿, 等. 分心木碳点/聚乙烯醇复合膜的制备及其在草莓保鲜的应用[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 71–80.
- [32] KOU E, YAO Y, YANG X, et al. Regulation mechanisms of carbon dots in the development of lettuce and tomato[J]. ACS Sustainable chemistry & engineering, 2021, 9(2): 944–953.
- [33] LI Y, XU X, LEI B, et al. Magnesium-nitrogen co-doped carbon dots enhance plant growth through multifunctional regulation in photosynthesis[J]. Chemical engineering journal, 2021, 422: 130114.
- [34] KARA M, SECGIN Z, ARSLANOGLU S 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.
- [35] WANG Z, QU Y, GAO X, et al. Facile preparation of oligo(ethylene glycol)-capped fluorescent carbon dots from glutamic acid for plant cell imaging[J]. Materials letters, 2014, 129: 122–125.
- [36] MILENKOVIC I, BORISEV M, ZHOU Y, et al. Photosynthesis enhancement in maize via nontoxic orange carbon dots[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2021, 69(19): 5446–5451.
- [37] WANG P, LOMBI E, ZHAO F J, et al. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences[J]. Trends in plant science, 2016, 21(8): 699–712.
- [38] QU Y, YU L, ZHU B, et al. Green synthesis of carbon dots by celery leaves for use as fluorescent paper sensors for the detection of nitrophenols[J]. New journal of chemistry, 2020, 44(4): 1500–1507.
- [39] LIANG L, WONG S C, LISAK G. Effects of plastic-derived carbon dots on germination and growth of pea (*Pisum sativum*) via seed nano-priming[J]. Chemosphere, 2023, 316: 137868.
- [40] SANKARANARAYANAN S, VISHNUKUMAR P, HARIRAM M, et al. Hydrothermal synthesis, characterization and seed germination effects of green-emitting graphene oxide-carbon dot composite using brown macroalgal bio-oil as precursor[J]. Journal of chemical technology & biotechnology, 2019, 94(10): 3269–3275.
- [41] PEREZ-DE-LUQUE A. Interaction of nanomaterials with plants: what do we need for real applications in agriculture?[J]. Frontiers in environmental science, 2017, 5: 12.
- [42] BAJPAI S K, D'SOUZA A, SUHAIL B. Carbon dots from guar gum: synthesis, characterization and preliminary in vivo application in plant cells[J]. Materials science and engineering: B, 2019, 241: 92–99.
- [43] LI W, ZHENG Y, ZHANG H, et al. Phytotoxicity, uptake, and translocation of fluorescent carbon dots in mung bean plants[J]. ACS Applied materials & interfaces, 2016, 8(31): 19939–19945.
- [44] 陈琼. 功能性碳纳米点调控植物生长的机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [45] ZAID A, WAANI S H. Reactive oxygen species generation, scavenging and signaling in plant defense responses[M]//JOGAIAH S, ABDEIRAHMAN M. Bioactive molecules in plant defense. Cham: Springer International Publishing, 2019: 111–132.
- [46] 李亚东, 许晓凯, 李唯, 等. 荧光碳点调控植物光合作用研究进展[J]. 发光学报, 2021, 42(8): 1172–1181.
- [47] LI Y, PAN X, XU X, et al. Carbon dots as light converter for plant photosynthesis: augmenting light coverage and quantum yield effect[J]. Journal of hazardous materials, (下转第 19 页)

- formation in antarctic gram-negative bacteria[J]. Microbial ecology, 2021, 81 (3) : 645–656.
- [29] FEENEY A, SLEATOR R D. Functional screening of the *Cronobacter sakazakii* BAA-894 genome reveals a role for *ProP*(*ESA_02131*) in carnitine uptake[J]. Bio-engineered, 2015, 6 (3) : 161–165.
- [30] FEENEY A, SLEATOR R D. An in silico analysis of osmotolerance in the emerging gastrointestinal pathogen *Cronobacter sakazakii*[J]. Bioeng bugs, 2011, 2 (5) : 260–270.
- [31] MA Y, ZHANG Y Y, CHEN K, et al. The role of *PhoP/PhoQ* two component system in regulating stress adaptation in *Cronobacter sakazakii*[J]. Food microbiology, 2021, 100: 103851.
- [32] JAMEELAH M, DEWANTI-HARIYADI R, NURJANAH S. Expression of *rpoS*, *ompA* and *hfq* genes of *Cronobacter sakazakii* strain Yrt2a during stress and viable but nonculturable state[J]. Food science and biotechnology, 2018, 27 (3) : 915–920.
- [33] IWASE T, OKAI C, KAMATA Y, et al. A straightforward assay for measuring glycogen levels and RpoS[J]. Journal of microbiological methods, 2018, 145: 93–97.
- [34] SRIKUMAR S, CAO Y, YAN Q Q, et al. RNA Sequencing-based transcriptional overview of xerotolerance in *Cronobacter sakazakii* SP291[J]. Applied and environmental microbiology, 2019, 85 (3) : e01993–18.
- [35] YANG C L, ZHOU Y, FAN J, et al. SpBADH of the halophyte *Sesuvium portulacastrum* strongly confers drought tolerance through ROS scavenging in transgenic *Arabidopsis*[J]. Plant physiology and biochemistry, 2015, 96: 377–387.
- [36] MALEK A A, CHEN C L, WARGO M J, et al. Roles of three transporters, CbcXWV, BetT1, and BetT3, in *Pseudomonas aeruginosa* choline uptake for catabolism[J]. Journal of bacteriology, 2011, 193 (12) : 3033–3041.
- [37] BREISCH J, AVERHOFF B. Identification of osmo-dependent and osmo-independent betaine-choline-carnitine transporters in *Acinetobacter baumannii*: role in osmoprotection and metabolic adaptation[J]. Environmental microbiology, 2020, 22 (7) : 2724–2735.

责任编辑: 郎婧

(上接第 9 页)

- 2021, 410: 124534.
- [48] WANG H, ZHANG M, SONG Y, et al. Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts[J]. Carbon, 2018, 136: 94–102.
- [49] ZHANG M, WANG H, SONG Y, et al. Pristine carbon dots boost the growth of *Chlorella vulgaris* by enhancing photosynthesis[J]. ACS Applied bio materials, 2018, 1 (3) : 894–902.
- [50] WANG H, KANG 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.
- [51] JI Y, YUE L, CAO X, 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.
- [52] 王硕, 贾潇倩, 何璐, 等. 作物对于旱胁迫的响应机制及提高作物抗旱能力的调控措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38 (29) : 31–44.
- [53] WATCHARAMONGKOL T, KHAOPUEAK P, SEESUEA C, et al. Green hydrothermal synthesis of multifunctional carbon dots from cassava pulps for metal sensing, antioxidant, and mercury detoxification in plants[J]. Carbon resources conversion, 2024, 7 (2) : 100206.
- [54] WANG C, JI Y, CAO X, 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.
- [55] 许荣华. 叶面喷施碳点降低土壤镉对水稻植物毒性的机制研究[D]. 保定: 河北大学, 2024.
- [56] CHEN Q, LIU 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, 2019, 190: 110108.

责任编辑: 郎婧