

顾家依, 居浩然, 朱昌进, 等. 纳米碳点: 赋能作物增产提质抗逆的新途径[J]. 华中农业大学学报, 2026, 45(2): 58-69.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.007

纳米碳点: 赋能作物增产提质抗逆的新途径

顾家依, 居浩然, 朱昌进, 蒲天宇, 李国辉, 许轲

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/扬州大学水稻产业工程技术研究院, 扬州 225009

摘要 在全球粮食生产面临耕地等资源紧缺和化肥、农药等高额投入的严峻背景下, 确保作物产量与资源利用效率协同提升是农业可持续发展亟待解决的重要挑战。纳米技术为农业绿色转型提供了新机遇, 其中纳米碳点因其优异的水溶性、生物相容性及环境友好等特性, 在促进作物生长、增强光合作用与抗逆性、提高养分吸收和利用效率及产量等方面展现出广阔潜力。本文重点综述了纳米碳点在作物生产中的应用进展, 指出其在提升作物产量与品质方面具有显著效果, 并具备良好的生态和食品安全应用前景。然而, 目前仍存在作用机制不明确、长期生态效应与安全性研究不足等问题。未来需加强纳米碳点与植物及环境互作机理研究, 优化其低成本合成技术与应用模式, 并完善风险评估与监管体系。总体而言, 纳米碳点有望为保障全球粮食安全与推动农业绿色可持续发展提供新的思路和技术策略。

关键词 纳米碳点; 种子萌发; 光合作用; 抗逆性; 产量和品质

中图分类号 Q945; S13 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0058-12

近年来我国实施粮食大面积单产提升工程, 粮食总产量连续10年稳定在6.5亿t以上^[1]。然而, 受资源环境约束和成本收益不平衡等因素影响, 进一步增产面临挑战^[2-3], 我国粮食总消费量持续上升, 2023年小麦、玉米和大豆消费量较2022年分别增长9.7%、1.7%和2.2%^[4]。因此, 在人口基数大和粮食需求总量高的背景下, 保障粮食安全始终是我国农业发展的中心工作。当前我国粮食生产面临水土流失、耕地面积减少和水资源短缺等问题, 加之化肥和农药过度使用, 以及土壤重金属污染等, 限制了作物增产潜力^[5]。同时, 极端天气频发成为粮食生产面临的又一难题。高温、台风等异常天气, 叠加晚秋多雨、冷空气极速降温, 导致周年轮作系统作物生育进程和产量潜力难以发挥, 水稻迟收、小麦迟播^[6], 无法构建高产群体, 两熟难以平衡增产^[7]。为缓解这些不利影响, 目前主要依赖于两大关键措施: 农艺措施和化学调控, 其中, 化学调控措施通过合理施用植物生长调节剂、营养补给剂等材料, 有效调节作物体内生理代谢过程, 增强抗逆性

和生产潜力^[8]。因此, 现代粮食生产必须在提高生产效率、优化资源利用和推动绿色可持续发展等方面进行全面升级^[9]。

纳米技术为应对这些挑战提供了新的契机。过去几十年里, 许多纳米材料(如纳米复合肥料、碳纳米管、纳米生物炭等)已被开发并应用于农业, 在促进作物生长、提高产量、提升肥料和农药利用效率、保护生态环境等方面发挥了重要作用^[10-11]。纳米碳点(nano carbon dots, NCDs)作为纳米材料的新星, 在农业领域展现了广泛的应用前景^[12], 它是多种纳米碳材料的统称, 包括石墨烯量子点、碳量子点和碳化聚合物点等, 具有体积小、核壳结构、可调光致发光特性、优异的水溶性、生物相容性以及几乎无毒性等特点^[13]。纳米碳点制备过程简单、原料来源丰富且成本低廉, 被广泛应用于细胞成像、生物传感、光催化、分子传递和作物生产等领域^[14]。近年来, 研究发现纳米碳点在促进种子萌发和根系生长、提高养分吸收效率、促进植株生长、增强光合作用、提高作物产量和抗病性以及增强抗非生物胁迫能力等方面

收稿日期: 2025-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272200); 江苏省重点研发计划项目(BE2021361); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022425); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

顾家依, E-mail: 544596416@qq.com

通信作者: 李国辉, E-mail: lgh@yzu.edu.cn

发挥重要作用^[15]。NCDs通过提升光系统电子传递效率和叶绿素合成来增强光合性能,通过提高同化能力和碳水化合物含量来促进作物生长,同时激活抗氧化酶系清除活性氧、缓解逆境氧化损伤,并改善代谢过程以提升籽粒品质,从而实现作物增产、提质与抗逆的多重协同效应。为把握研究前沿,本文重点总结近年来NCDs在作物上的应用研究,梳理其在促进作物生长、提高抗逆性等方面的有益效果及作用机制,以期为农业绿色可持续发展提供理论参考。

1 碳点对作物生长、产量和品质的影响

近年来,纳米碳点因其独特的理化性质和良好的生物相容性在农业领域受到广泛关注。其种类多样、来源广泛,不同类型的纳米碳点在作物中的生理调控效应存在差异。纳米碳点(NCDs)的分类见表1所示。大量研究表明,NCDs可通过促进作物生长、光合增效、养分优化和抗逆稳产等多方面调控显著提高作物产量^[16-20],将成为未来进一步突破产量瓶颈的可持续农业的核心技术之一。

表1 纳米碳点(NCDs)的分类^[13,21]

Table 1 Classification of nano carbon dots

分类 Classification	生物相容性 Biocompatibility	毒性 Toxicity	结构 Structure
石墨烯量子点 GQDs	高 High	低到中度 Low to moderate	由单个石墨烯片或几片石墨烯片组成的小石墨烯碎片,在边缘或层间缺陷内具有明显的石墨烯晶格和化学基团
碳量子点 CQDs	高 High	低 Low	球形,表面具有明显的晶格和化学基团
碳纳米点 CNDs	高 High	低 Low	具有较高的碳化度,表面有一些化学基团,但通常没有明显的晶格结构和聚合物特征
碳化聚合物点 CPDs	高 High	低 Low	具有聚合物/碳杂化结构,包括表面丰富的官能团/聚合物链和碳核

1.1 作物对碳点的吸收和运输

NCDs是一种具有荧光特性的碳基纳米材料,进入植物体内后才能发挥作用,独特的发光特性使其在植物体内的吸收和分布可以通过荧光成像、透射电子显微镜和拉曼光谱等技术进行观察^[22]。NCDs可以穿透植物细胞,与水 and 矿物质一同被吸收,并沿着细胞壁和胞外途径进入皮层,随后通过质外体途径进入木质部,参与植物的水分和养分运输^[23]。这一运输路径使得NCDs能够在植物体内迅速分布,进而影响植物的生理活动。Li等^[24]使用共聚焦激光扫描显微镜和透射电子显微镜观察了CDs-1(碳纳米点)在水稻中的分布,发现其荧光信号在水稻根部最强,随后在茎和叶部逐渐减弱,而对照组未检测到荧光,表明碳纳米点可被根吸收并运输到茎和叶,进一步观察发现,碳纳米点在水稻细胞核中也存在强荧光信号,因此,碳纳米点在水稻生长期间能被植株吸收并转运至各个组织和细胞。在吸收与转运机制方面,目前对不同粒径与表面性质的NCDs在植物体内吸收效率与转运特征的系统性比较仍较缺乏,限制了对其作用机制及应用潜力的解析。未来研究可结合同位素标记、荧光示踪等手段,直观揭示NCDs在植物体内的跨膜吸收、细胞间运输及维管组织中的

分布规律,从而为其作用机理的解析与应用安全性的科学评价提供实验支撑。

1.2 碳点促进作物水分吸收和种子萌发

种子发芽是作物生长的关键一步,对作物生长发育至关重要^[25]。NCDs对种子萌发和植物生长的促进作用已在多种植物中得到证实,包括绿豆、番茄、生菜、拟南芥、烟草、大豆、茄子、辣椒、西瓜、萝卜、芹菜、香菜和卷心菜等^[13]。马兴立等^[26]发现NCDs显著促进了花生种子萌发、幼苗的生长,尤其在根长、茎高和叶面积等方面表现出明显促进作用,并且随着NCDs浓度的增加,花生的生理指标呈现出先升高后降低的趋势,也表明了NCDs浓度过高对种子萌发具有负面影响。NCDs促进种子萌发与其增强种子吸水能力密切相关,Wang等^[27]报道,N-CDs(氮掺杂碳纳米点)能够显著提高绿豆种子水分含量以及根系活力,从而促进萌发;不同浓度N-CDs处理的水稻种子,其含水量、幼苗长度和根长等方面都显著增加^[24]。刘振玲等^[28]研究也证实了碳纳米点能显著增加菠菜种子吸水能力,促进种子萌发和幼苗生长。NCDs促进种子吸水和幼苗生长的机制,一方面是NCDs能够穿透坚硬的种皮,促进水分渗透,同时水分子通过与NCDs表面的亲水基团结合,随

NCDs进入植物体内,从而加速种子萌发并促进幼苗生长^[24];另一方面NCDs进入植物体后,能增强抗逆性和抗病能力,有助于种子顺利出苗和提高幼苗素质,增强吸水能力^[29]。此外,NCDs可通过激活水通道蛋白基因的表达,促进幼苗根系和下胚轴的伸长,提高了作物对水分和矿质元素的吸收能力^[30]。上述研究表明,NCDs通过提高植物体内的水分吸收能力,能够有效促进种子发芽和植物的生长,展示了其在培育壮苗和增产提质方面的潜力。

1.3 碳点提高作物养分吸收利用

NCDs促进作物养分吸收和改善土壤性质等多重效应在农业生产上受到广泛关注。NCDs能穿透生物屏障,通过与植物体内矿物元素的氢键和静电相互作用,促进矿物元素的吸收,这些矿物元素与NCDs表面的亲水基团结合后,通过植物维管系统运输至茎部,从而促进植物生长与发育^[31-32]。Kou等^[33]研究表明,番茄内部矿物质元素,如氮、钾、钙、镁和锰的含量在碳纳米点处理后显著提高,番茄果实维生素(VC)、可溶性蛋白和可溶性糖含量均显著增加,这表明碳纳米点能够有效促进矿物元素的积累。NCDs可作为不同类型肥料的增强剂,通过加速化学反应,提高土壤肥力、改善土壤结构以及增加水分保持能力等途径,显著促进作物对养分的吸收;同时NCDs与土壤中的营养元素相互促进,进一步促进作物生长并增强其抗逆性。研究表明,纳米碳增效肥料在提高作物肥料利用率方面具有显著作用,NCDs与肥料的有机结合能够增强土壤中养分的有效性,改善作物根际微环境,从而促进作物对氮、磷、钾等关键营养元素的吸收与转运^[34-36],此类效应在其他作物中亦有体现,以水稻为例,纳米碳点肥料在生殖生长阶段能提高水稻对关键养分的吸收效率,为穗分化和籽粒发育提供了充足的营养支持,结实过程中的养分供给能力明显增强^[37]。

进一步研究表明,纳米碳点与肥料配施能够优化作物品质结构,例如在薯类作物中,纳米碳与钾肥配比施用,不仅降低了马铃薯粗蛋白质含量,淀粉含量还显著提升,纳米碳配合70%常规施肥和50%钾肥处理的淀粉含量得到了显著提高^[38]。NCDs的施用对淀粉型与鲜食型甘薯均表现出促进作用,其中对前者主要增强了淀粉含量的积累,对后者则提高了可溶性糖含量,这一差异化表现体现了NCDs在调节光合产物转化与营养成分积累方面的潜力,反映了作物对养分的更高效吸收与利用^[39]。

综上所述,已有研究充分证明NCDs能够直接促进作物对氮、磷、钾及微量元素等关键矿质养分的吸收和转运,从而提升作物产量和品质。然而,NCDs在农业体系中的作用不仅局限于植物体内的营养积累,还体现在其对根际土壤环境的调控。作为一种新型纳米材料,NCDs能够通过调节土壤微生物活性、改变养分循环及影响土壤理化性质,从外部环境层面间接增强作物对养分的吸收效率。Liu等^[40]采用微量热量法、土壤酶活性测定及变性梯度凝胶电泳(DGGE)等方法系统分析了碳纳米管对土壤微生物生长速率和活性的影响,结果表明碳纳米管在低浓度范围内可显著提高土壤微生物生长速率和活性;同时,其对微生物群落结构和功能的影响较小。Huang等^[41]研究表明,掺杂N,P-CDs(氮磷掺杂碳点)能够改变土壤中重金属的形态分布,与金属离子调控还原-氧化反应,从而调控土壤酶活性并改变微生物群落结构,促进微生物元素循环过程,间接提高土壤中氮、磷、钾等主要养分的有效性,增强植物吸收效率,最终对土壤生态效应及作物生长产生积极影响。尽管NCDs在农业中展现出广泛的应用潜力,但仍存在一些挑战。目前,关于NCDs在土壤-植物系统中的迁移、积累及其生态效应的研究仍较为有限。未来的研究应关注其在不同土壤类型和植物品种中的影响,并评估长期应用的生态安全性^[42]。

1.4 碳点促进作物生长

NCDs对作物幼苗生长的影响主要体现在促进根系生长,提高植物养分吸收能力,促进植株生长,提高生物量和产量等方面。多项研究证实NCDs能显著改善作物根系构型与茎叶发育,Wang等^[27]发现0.02 mg/mL碳纳米点处理使绿豆根长、茎长分别提升29.9%和18.3%,生物量积累增加36.1%;刘振玲等^[28]观察到碳纳米点处理使菠菜幼苗地上部和根长度分别增加43.4%和69.4%,根表面积提升44.8%;罗振宇^[43]利用0.56 mg/mL碳纳米点处理水稻,根长显著增长550%,芽长增加86%。NCDs的生理效应呈现显著浓度梯度特征,在0~0.56 mg/mL范围内,碳纳米点对水稻芽和根生长的促进效应随浓度递增而增强^[44]。NCDs通过多重生理机制促进植物生长,一是增强环境适应性,NCDs可通过调节根际环境,增强水稻根系对镉的固定能力,抑制重金属吸收转运,避免重金属的负面影响^[45];其次,NCDs可提升根系活力,Li等^[46]发现NCDs(碳纳米点)使绿豆根活力显著提高;此外,NCDs可增强植株的同化能

力,Wang等^[47]发现,碳纳米点处理使植株碳水化合物含量提高21.9%,提高了同化产物积累。尽管NCDs在促进植物生长方面表现出广泛积极作用,但已有研究指出,其对植物的影响具有一定的浓度依赖性,高浓度NCDs可在植物体内积累,引发活性氧升高、细胞膜及叶绿体损伤等负面效应,从而抑制光合作用和养分代谢^[36]。在自然环境中,NCDs可能与土壤有机质和矿物颗粒相互作用,影响其迁移、稳定性及生物可利用性,长期存在可能造成残留积累^[41];在生态层面,NCDs可能干扰土壤微生物群落结构与功能,进而影响养分循环和生态系统稳定性^[48],因此,施用合适浓度至关重要^[49-50]。上述研究表明,NCDs通过促进形态发育、代谢调控和环境适应等机制,在作物提质增产和抗逆栽培方面具有重要应用潜力,不同作物及品种的最佳作用浓度阈值及其分子作用机理仍需深入研究。

在分子机制方面,目前关于NCDs对植物的研究大多停留在形态学或生理指标层面,而在分子调控层面的研究仍较为有限。研究表明NCDs能通过调控基因表达影响植物生长和发育^[42-43]。Zhang等^[44]在水稻中通过转录组学分析发现,碳纳米点预处理显著改变了与生长素合成及运输相关基因的表达模式,从而调控根系发育。Xue等^[51]在绿藻转基因分析中发现,碳纳米点处理显著影响了光合作用、色素代谢和电子传递相关通路,促进藻体生长。Shivashakarappa等^[52]研究将碳纳米点作为载体把大片段质粒DNA(含GFP、GUS、CRISPR等)导入植物组织,并在叶片、根、芽细胞中获得表达,这不仅表明NCDs可以被植物吸收并进入细胞内环境,也展示了其作为快速基因表达载体的有效性,为探究NCDs调控植物分子机制提供了新的研究思路。

1.5 碳点增强作物光合作用

光合作用是植物生长和生物量积累的关键过程,它将光能转化为化学能,是植物生长的基础^[53]。NCDs具有良好的光吸收和发光性,能够吸收紫外光并将其转换为适合植物光合作用的波长,与叶绿体的吸收光谱匹配,从而增强植物对光的吸收,促进光合作用^[54-55]。徐兰青等^[17]研究表明,叶面喷施生物质碳点(Soy-CDs)后,玉米叶片净光合速率显著增强,尤其10 mg/L处理后净光合速率增加了208%。NCDs通过提高光吸收和电子传递速率,显著改善了玉米的光合作用,其机制是NCDs作为电子供体和受体,加速了光系统I(PSI)中的电子转移速率,还能提

高叶绿素含量和Rubisco活性,进而增强光合作用和碳水化合物的合成^[36]。Guirguis等^[56]把碳纳米点整合到不同植物模型的光系统中,发现碳纳米点作为电子供体和受体同样提高了光系统II(PSII)到PSI的电子传递链的效率,还增强了电子传递链的电导率,从而提高了ATP和氧的产量,进而提高了植物的光合作用效率和产量。此外,NCDs还能提高水稻和玉米的气孔导度,从而提高了其光合速率(分别为56%和18%)^[57]。Liu等^[58]制备了具有可调量子产率的不同氮掺杂碳点(N-CDs),能够将紫外线辐射(300~370 nm)有效转化为光合有效辐射,显著改善了叶绿体的光合能力,促进了水稻植株的生长。因此,NCDs可实现光能增效,改善作物光合作用,为提升作物光合效率和抗逆性提供新思路,未来纳米技术仍需与农业生产紧密结合,助力农业可持续发展。

1.6 碳点提高作物产量和品质

NCDs通过显著增强作物的光合作用效率和养分吸收利用能力,从源头上促进了作物的生长发育和干物质积累,这种双重促进作用不仅改善了作物的生理代谢状态,也为最终产量和品质的提升提供了坚实基础。研究表明,在玉米生殖生长期叶面喷施氮掺杂碳点(N-CDs)可提高光合作用效率44.48%,进而提高玉米产量24.50%,千粒重增加15.03%^[17]。在营养缺乏和正常营养条件下,叶面喷施碳纳米点可通过激活CEPD1介导的信号通路提高甘薯氮利用效率、叶片光合速率和在低养分条件下的抗逆性,显著增加产量^[59]。徐兰青等^[17]研究表明,10 mg/L的Soy-CDs增加了玉米叶片对光能的吸收和利用效率,显著提高了叶片净光合速率;提高了玉米根长、根表面积及根尖数,有利于玉米养分和水分的吸收利用,单株产量增加11.6%,百粒质量提升6.5%,棒长增加16.2%。李双^[60]研究表明碳纳米点处理可显著提升番茄幼苗的株高、叶面积、干质量和鲜质量,促进叶片的光合作用、电子传递速率和叶绿素荧光特性,进而增加单株果实数和产量,提升番茄品质与营养价值。

NCDs在增强光合作用的基础上,通过调控作物对矿质养分的吸收、转运及代谢过程,促进作物生长发育,有效提升了作物体内营养物质的积累量,进一步改善了作物营养品质。研究表明氮掺杂CDs(N-CDs)叶面喷施能显著促进生菜生长,提升地上和地下部分鲜质量、干质量及叶面积,并显著提高生菜中可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C和钾的含量,尤其

是钾积累量增加12.48%~15.38%，并降低硝酸盐含量，改善了营养品质^[61]；不同浓度N-CDs可使番茄内矿物质元素，如氮、钾、钙、镁和锰的含量和维生素(VC)、可溶性蛋白和可溶性糖含量均显著增加^[48]；N/P-CDs能增强蕹菜叶片对红光的吸收，喷洒50 mg/L浓度的N/P-CDs可显著提高蕹菜的类黄酮、总酚、可溶性糖和可溶性蛋白质含量，硝酸盐和丙二醛含量显著下降，这表明N/P-CDs是通过增强光合作用进而显著提高了蕹菜的营养品质^[31]。NCDs在干旱胁迫条件下能够有效提高大豆对氮和水分的吸收，从而使其产量提高了25.2%，籽粒蛋白质和脂肪含量分别增加了6.9%和17.3%，脂肪酸和氨基酸含量也有所提高^[16]。因此，作物生产上应用NCDs可

以实现产量和品质的协同提高。

以上研究大多为室内或盆栽试验对作物生长的积极影响，但大田试验研究仍相对匮乏，限制了其在实际农业生产中的推广应用潜力。最近一项研究表明，在大田种植的缺氮条件下，水稻叶面喷施碳量子点可通过提高光合酶、茎秆和籽粒淀粉代谢酶及蔗糖转运相关酶的活性，上调蔗糖转运相关基因的表达，调节同化物的积累与转运，改善籽粒充实度和产量，同时增加经济效益^[62]。然而，关于NCDs在大田环境中的应用研究仍处于初步阶段，缺乏系统和长期效果评估，尤其缺少在不同土壤类型、气候条件以及农业管理实践下的试验验证。表2总结了纳米碳点在主要作物上的应用效果。

表2 纳米碳点对主要作物生长的影响

Table 2 Effect of NCDs on growth of main crops

作物 Crops	NCDs来源 Source of NCDs	施用方式 Application method	施用质量浓度/ (mg/L) Concentration	测定指标 Measured parameters	应用效果 Application effect	作用机制 Mechanism of action	参考文献 Reference
水稻 Rice	电化学方法合成	种子处理	20~40	叶片颜色、抗病性	叶片颜色改善，抗病性增强	NCDs进入细胞核，使DNA结构松弛，增加基因表达	[12]
玉米 Corn	冷冻干燥获得固态粉末状SoyCDs	叶面喷施	5~25	光合速率、干物质积累	光合作用增强，干物质增加	增加光吸收和加速光合作用中的电子传递速率	[17]
甘薯 Sweet potato	丹参提取物加入离子水加热	叶面喷施	1	产量、氮代谢	提高产量，增加氮代谢水平	提高酶活性，促进了O ₂ ⁻ 和NH ₄ ⁺ 的摄取、运输和同化，提高氮代谢和产量	[20]
番茄 Tomato	使用半胱氨酸和葡萄糖加热	拌种	25	茎叶生长、矿物质含量	促进生长，钾、钙、镁含量升高	跨越生物屏障，携带更多的养分和水分	[23]
水稻 Rice	使用柠檬酸、乙醇胺和水合镁水热合成	浸种	50	出苗率、根长	出苗率提高，促进根系生长	调节水和离子的运动	[24]
大豆 Soybean	使用石墨棒进行电化学蚀刻	根系处理	50	幼苗生长、根系活力	促进幼苗生长，根系活力提高	有效增强RuBisco活性，保障根系活力	[63]

2 碳点对作物生物和非生物胁迫抗性的影响

生物胁迫与非生物胁迫都会影响作物的生长，降低产量，我国超过90%的耕地受到环境压力的影响^[17]。NCDs能够显著增强作物对生物和非生物胁迫的抗性^[63-65]。NCDs能够直接产生活性氧(ROS)，破坏病原体细胞膜通透性，通过诱导植物系统获得性抗性(SAR)增强防御反应。Li等^[20]将碳量子点引入水稻种子生长培养基中，4周后检测水稻对纹枯病的抗性，发现其比对照组表现出较高的抗病性，叶片上纹枯病病斑长度减少了80%。碳点(碳基纳米材料)可有效减轻烟草花叶病毒(TMV)的感染，同时诱导植物激活内源性防御机制，提高抗病毒能力^[66]。

植物病原体(如细菌、真菌、病毒和线虫)是影响作物生长和产量的重要因素，而NCDs在防治由这些病原体引发的病害方面展现出巨大潜力。纳米碳颗粒具有超小尺寸粒径和较高比表面积，能够更有效地与病原体细胞表面结合，并通过细胞渗透作用破坏其正常生理功能^[67]。此外，纳米碳颗粒还可降低病毒活性和感染性，减少病毒在植物体内的积累，并诱导植物激活内源性防御机制。Adeel等^[66]研究表明碳基纳米材料不仅通过抑制病毒复制和传播来减轻病毒感染，还通过激活植物内源性防御机制，增强植物的抗病毒能力。

在非生物胁迫方面，季亚卉^[15]研究表明NCDs在干旱胁迫下能够有效增强大豆的抗逆能力，改善其在胁迫条件下的生理状态，提升对不利环境的适

应性,从而减轻了干旱对大豆生长发育的抑制效应,有助于其正常的代谢过程与品质形成的维持。同样, Ji等^[64]研究也表明碳量子点通过清除干旱胁迫下大豆叶片中活性氧的积累,有效维持光合作用与碳水化合物转运,同时,碳量子点诱导根系分泌物(氨基酸、有机酸和生长素)并重塑根际微生物群落(放线菌门、子囊菌门、酸杆菌门和肾小球菌门等),促进土壤氮素活化。分子水平上, *GmNRT*、*GmAMT*和*GmAQP*等基因表达上调,增强了氮素与水分吸收效率,进而促进氮代谢和氨基酸合成,最终显著改善大豆在干旱条件下的生理代谢和产量品质。Su等^[68]研究表明,碳量子点处理能显著缓解PEG-6000处理引起的花生生长抑制,由于碳量子点表面存在亲水自由基,这些基团能够在花生木质部导管中有效保留并缓慢释放微量营养素,因此不仅增强了植株抗旱能力,还增强了植株抗氧化能力,降低了膜脂过氧化水平,从而更好地保护植株免受氧化应激,延缓衰老过程。Li等^[20]研究探讨了NCDs减轻镉(Cd)毒性的作用,暴露于200 mg/L Cd²⁺的柑橘幼苗经900 mg/L NCDs处理后,生理特性得到显著改善,由此表明NCDs能够吸附Cd²⁺,减少其进入植物根部,从而降低氧化应激反应,并使谷胱甘肽合成基因的表达水平显著下降。马兴立等^[26]研究表明,不同质量浓度NCDs处理显著降低了花生幼苗叶片中MDA含量,增加了可溶性糖含量,并提高了幼苗体内SOD、POD、CAT活性。Wang等^[63]研究表明,NCDs促进了大豆根系中AQP家族的表达,提升了大豆叶片和根系的水分吸收能力,降低了ABA含量并调节AQPs和气孔功能,进而增强了大豆的耐旱性。此外,施用纳米碳尿素可有效降低土壤全盐含量,常规用量下可促进小麦增产^[69]。因此,NCDs通过渗透调节和抗氧化等机制,为作物抗逆性提升提供了高效、绿色的技术途径。

NCDs通过直接抑制病原体/病毒活性、清除活性氧、增强光合效率、促进氮素和水分吸收及代谢来缓解逆境影响,且诱导植物免疫、清除ROS并激活抗氧化体系诱导作物激活防御反应,从而降低病害造成的生长减损,提高作物整体抗逆性与耐受性,保护作物生长、维持代谢并提高产量与品质。但多数研究仍停留在盆栽或室内短期处理层面,未来需通过多组学与田间-盆栽耦合多因素试验,系统验证NCDs在复杂农业生态系统中的长期有效性与安全性。

3 碳点在食品和生态安全上的应用

全球食品系统的复杂性凸显了食品可追溯性的重要性。NCDs作为新型纳米材料,具有独特理化特性,可与纳米传感器结合,在食品可追溯性方面极具潜力,能为食品供应链提供实时数据,提升食品安全与质量^[70]。氧化反应对食品及生物体具有负面影响,不仅导致食品营养流失,还与衰老、癌症及神经退行性疾病等健康问题密切相关。NCDs表面含有有机官能团,如羟基和羧基,它们作为氢供体通过中和自由基等活性分子,有效抑制氧化危害,可作为一种新型抗氧化剂,在食品安全领域具有重要应用价值^[71]。

为了保障作物高品质和高产,农民通常依赖化学农药来控制害虫、病菌、杂草等有害物的侵害,尤其是高效农药和综合防治手段的普及,使农药的种类和使用方法更加多样化。农药中的有机磷、有机氯化物、汞化合物等化学物质,对生态、作物和人体具有严重危害^[72-73]。鉴于农药潜在毒性以及残留富集性,构建面向残留农药的高灵敏度、高选择性的定量检测方法对于环境、食物的安全及人类的健康非常重要^[74]。

纳米碳点凭借其小尺寸、优异的生物相容性和可调节的荧光特性,能够在低浓度下灵敏地检测农药残留,并在复杂的食品样本中稳定工作,这使其在农药残留检测领域展现出独特的优势^[75]。NCDs表面可通过化学修饰来增强与不同类型农药分子的亲和力,实现与农药分子的选择性结合,这种结合不仅提高了检测荧光变化的灵敏度,还提升了可操作性,能够高效、精确地检测农药残留^[76]。碳量子点在检测某些常见农药(如有机磷类、氨基甲酸酯类等)时,能够达到极低的检测限,甚至在食品中痕量级别的残留量下仍能有效检测^[77]。这一特点使得NCDs成为农药残留监测领域中的重要工具,尤其适用于复杂食品样本中微量农药的快速、敏感检测。Nethaji等^[77]的研究表明,蓝色发射碳点具有较强的荧光特性,能够与多种有机氯农药分子发生特异性相互作用,当碳量子点与农药分子结合时,其荧光信号出现明显的增强或猝灭效应,能够有效反映农药的存在和浓度。因此,NCDs对不同类型有机氯农药具有较高的选择性,可以通过荧光增强或猝灭方式,实现对农药残留的灵敏探测。Cao等^[78]研究表明,碳量子点具有优良的荧光性质,能够与吡虫啉分子发生特

异性相互作用,引起NCDs荧光信号的显著变化,通过荧光增强或猝灭效应反映了吡虫啉的存在与浓度;通过化学修饰NCDs表面,增强其对吡虫啉分子的亲和力,可以提高检测的选择性和灵敏度,为农药残留检测提供了高灵敏度的检测平台。

在除草剂残留检测方面,Bera等^[79]开发了一种碳量子点-CdTe集成探针,用于检测水性介质中的草甘膦除草剂,发现碳量子点与CdTe的相互作用可以促进光电子转移,使碳量子点-CdTe复合系统能够在极低浓度下准确检测草甘膦,草甘膦会引起荧光信号的显著变化,且检测限非常低,从而能被碳量子点-CdTe集成探针快速捕获并快速检测。

在杀菌剂检测方面,Wang等^[80]提出了一种创新的智能手机辅助荧光传感平台,利用黄绿色发光碳点(Y-G-CDs)作为荧光探针,能够快速、便捷地检测水果和作物中的甲基硫菌灵残留。该平台结合了NCDs的荧光特性和智能手机的成像与分析能力,将

NCDs的荧光特质与甲基硫菌灵分子特异性结合,导致荧光信号的明显变化,这种变化反映了甲基硫菌灵的分布情况和浓度水平,从而实现了高灵敏度的残留检测。与传统化学分析方法相比,NCDs传感平台具有环境友好、成本低廉、操作简便等优点,能够在不需要复杂仪器情况下,快速检测出食品中的甲基硫菌灵残留,适用于日常食品安全监测^[81]。Hou等^[82]开发了与多菌灵高亲和力、高特异性结合的短寡核苷酸序列适配体,与NCDs结合构建了灵敏度与选择性提升的生物传感器,并将 Fe_3O_4 等磁性纳米颗粒引入传感系统,增强了目标分析物的分离与富集效果,降低了检测限、提高了分析速度,用于多菌灵的检测,在实际应用中具有较高实用性。

因此,NCDs的抗氧化性、高灵敏识别、高效检测和环境友好等特点,为食品保存和农药残留检测提供了有效途径,未来通过功能化修饰与设备集成,该方法将成为食品安全与环境监测领域的核心技术(图1)。

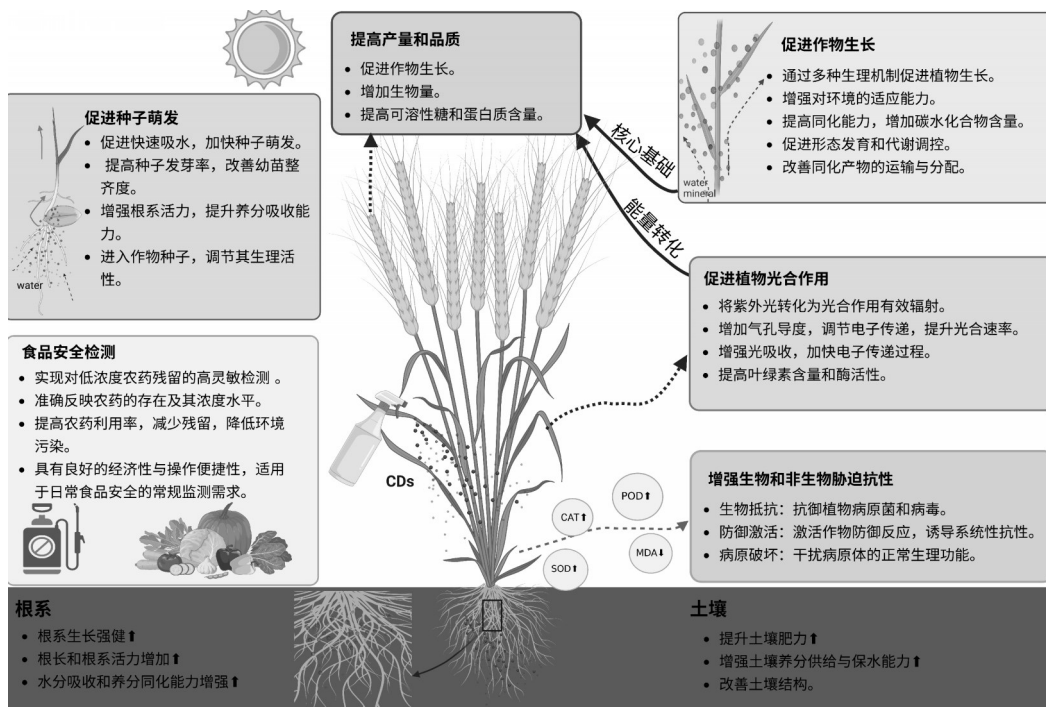


图1 碳点在作物生产上的应用及作用机制^[25,34,41,44,59,67,75,78]

Fig.1 Applications of carbon dots in crops and its mechanism

4 展望

综上所述,NCDs具有亲水性表面基团,促进了种子在萌发阶段吸收水分,从而加速萌发进程并刺激根系伸长;其表面电荷特性有助于与离子结合,增强作物对养分的吸收与利用效率。此外,NCDs可优

化光能捕获、传递与转化过程,提升光合碳同化能力,进而促进光合作用。在胁迫响应方面,NCDs通过增强活性氧清除能力,有效提升作物对生物与非生物胁迫的抗性。NCDs的这些生理与分子层面的调控效应,最终体现为产量及其构成因子(有效穗数、穗粒数和千粒重)的增加,以及蛋白质、淀粉等营

养品质指标的改善。此外,NCDs凭借其优异的理化特性在食品和生态安全方面具有重要应用价值。

目前,NCDs在作物上的作用机理已有较多研究,并取得显著进展,但总体来说在农业中的系统应用研究尚处于探索阶段,仍存在多个亟待拓展和深入的研究方向。大量研究表明,NCDs对农作物有积极效应,然而其作用机制仍需深入解析。首先需明确作物吸收NCDs的途径及其在植物体内的转运路径和空间分布规律;其次,当前研究多集中于表型观察,如根系、茎叶和生物量等,但对其分子调控网络,如基因表达、信号通路和激素调控等研究较少,仍需结合转录组学、代谢组学等技术揭示NCDs如何影响植物基因表达及代谢途径;第三,其能量传递和光催化效应机理和对光合作用的具体贡献需进一步阐明。整体来看,NCDs对植物的作用通常是正面的,尤其在促进种子发芽、矿物养分吸收和光合作用等方面,表现出显著的增强效应,但是过量施用也会带来负面效果,同时关于纳米碳点的毒理学机制尚未系统阐明,尤其是其在植物体内的吸收、转运、代谢路径及对土壤微生物群落和生态系统功能的潜在影响仍缺乏系统研究。因此,仍需揭示不同作物碳点浓度-效应规律,建立不同作物、品种、生长阶段的最佳浓度阈值数据库,避免浓度过高抑制生长,并综合评估植物毒理学效应、环境行为及生态风险,以确保高效且安全的农业应用。NCDs的优越性能和功能可调节性使其在智能与精准农业中与多技术协同应用,通过技术研发,利用表面修饰设计靶向NCDs,开发可负载养分、农药、调节剂分子等,实现缓释与精准递送。在作物栽培应用方面,目前关于NCDs效应的研究多集中于室内或盆栽条件,而在大田间复杂环境(如土壤类型、养分和水分管理、温湿度等)对NCDs效应的影响尚不清晰,需开展多因素耦合试验验证其效应的稳定性。另外,还需探索NCDs在种子包衣、叶面喷雾、水肥一体化等农艺环节的适用性,评估其在不同农业应用场景中的效益及其生态安全风险。

未来研究需从表型分析向机制解析、技术开发和应用推广全方位推进,同时注重跨学科协作,包括材料科学、农学和环境科学等,以推动NCDs从实验室走向田间,实现农业绿色可持续发展。

参考文献 References

[1] 心怡. 前三季度农业农村发展稳中提质 全年粮食产量有望

首次突破1.4万亿斤:国新办就2024年前三季度农业农村经济运行情况举行发布会[J]. 中国食品, 2024(21): 16-25. XIN Y. The development of agriculture and rural areas improved steadily in the first three quarters, and the annual grain output is expected to exceed 1.4 trillion Jin for the first time: The State Council held a press conference on the operation of agriculture and rural economy in the first three quarters of 2024 [J]. China food, 2024(21): 16-25(in Chinese).

- [2] 倪坤晓,何安华. 中国粮食供需形势分析[J]. 世界农业, 2021(2): 10-18. NI K X, HE A H. Analysis of grain supply and demand situation in China[J]. World agriculture, 2021(2): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘亚维,刘学维,李亚宁. 双循环背景下我国粮食安全面临的挑战与策略[J]. 中共石家庄市委党校学报, 2023, 25(3): 34-38. LIU Y W, LIU X W, LI Y N. Challenges and strategies of China's food security under the background of double cycle [J]. Journal of the Party School of Shijiazhuang Municipal Committee of the CPC, 2023, 25(3): 34-38(in Chinese with English abstract).
- [4] 吴初国,王楠. 我国耕地保护与粮食安全形势分析[J]. 自然资源情报, 2025(1): 1-6. WU C G, WANG N. Analysis of the situation of cultivated land protection and food security in China[J]. Natural resources information, 2025(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- [5] 朱坤林,杨晓雨. 新形势下我国粮食安全面临的主要风险及对策研究[J]. 粮食问题研究, 2024(6): 35-39. ZHU K L, YANG X Y. Research on the main risks and countermeasures of China's food security under the new situation [J]. Grain issues research, 2024(6): 35-39(in Chinese with English abstract).
- [6] 赵莉,何贤芳,都斌斌,等. 播期和品种对沿淮晚播稻茬小麦产量和产值的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(5): 613-623. ZHAO L, HE X F, DU B B, et al. Effects of sowing date and variety on yield and output value of late-sown wheat after rice in the region along Huaihe River [J]. Journal of triticeae crops, 2021, 41(5): 613-623(in Chinese with English abstract).
- [7] 邵文奇,董青君,董玉兵,等. 药剂拌种对沿淮地区迟播小麦壮苗效应及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(6): 22-28. SHAO W Q, DONG Q J, DONG Y B, et al. Effect of chemical seed dressing on seedling strength and yield of late-sowing wheat in Huaihe River Region [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2024, 40(6): 22-28(in Chinese with English abstract).
- [8] 马瑞琦,亓振,常旭虹,等. 化控剂对冬小麦植株性状及产量品质的调节效应[J]. 作物杂志, 2018(1): 133-140. MA R Q, QI Z, CHANG X H, et al. Regulation effects of growth regulators on plant characters, yield and quality of winter wheat [J]. Crops, 2018(1): 133-140(in Chinese with English abstract).
- [9] 蓝红星,冯文慧,胡原. 粮食安全视域下生态低碳农业的发展战略与路径选择[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 39-50. LAN H X, FENG W H, HU Y. Development strategy and

- path choice of ecological low-carbon agriculture in perspective of food security[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(3): 39-50 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王晓梅, 杨娇, 崔海信, 等. 全球纳米农业发展现状及对中国的启示[J]. 全球科技经济瞭望, 2023, 38(11): 50-60. WANG X M, YANG J, CUI H X, et al. Current status of global nanoagriculture development and its enlightenment for China[J]. Global science, technology and economy outlook, 2023, 38(11): 50-60 (in Chinese with English abstract).
- [11] XU Z P. Material nanotechnology is sustaining modern agriculture[J]. ACS agricultural science & technology, 2022, 2(2): 232-239.
- [12] LI Y D, GAO J M, XU X K, et al. Carbon dots as a protective agent alleviating abiotic stress on rice (*Oryza sativa* L.) through promoting nutrition assimilation and the defense system[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12(30): 33575-33585.
- [13] XIA C L, ZHU S J, FENG T L, et al. Evolution and synthesis of carbon dots: from carbon dots to carbonized polymer dots[J/OL]. Advanced science, 2019, 6(23): 1901316 [2025-08-25]. <https://doi.org/10.1002/advs.201901316>.
- [14] 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.
- [15] 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. JI Y H. Mechanism of carbon dots regulating soybean drought tolerance and quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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.
- [17] 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. XU L Q, CHENG B X, WANG C X. Study of the effect of biomass carbon dots on corn photosynthesis and yield by foliar application[J]. Ecology and environmental sciences, 2023, 32(12): 2166-2173 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李璐. 荧光碳点对绿豆、玉米生理生化的影响及机制研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2023. LI L. Effect and mechanism of fluorescent carbon dot on physiology and biochemistry of mung bean and maize[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [19] 梁强. 生物质碳点提高甘薯耐盐和耐低钾性的生理机制研究[D]. 徐州: 江苏师范大学, 2022. LIANG Q. Study on physiological mechanism of improving salt tolerance and low potassium tolerance of sweet potato by biomass carbon point[D]. Xuzhou: Jiangsu Normal University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [20] LI J L, XIAO L, CHENG Y C, et al. Applications of carbon quantum dots to alleviate Ca^{2+} phytotoxicity in *Citrus maxima* seedlings[J/OL]. Chemosphere, 2019, 236: 124385 [2025-08-25]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124385>.
- [21] 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.
- [22] 陈爽. 基于碳点和BODIPY共价有机框架纳米材料的制备与应用[D]. 长春: 长春工业大学, 2021. CHEN S. The synthesis and application of carbon dots-BODIPY covalent organic framework nanomaterials[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [23] YIN K Y, BAO Q L, LI J Q, et al. Molecular mechanisms of growth promotion and selenium enrichment in tomato plants by novel selenium-doped carbon quantum dots[J/OL]. Chemosphere, 2024, 364: 143175 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143175>.
- [24] 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.
- [25] 曲昭杰, 朱坤森, 胡吕良, 等. 木醋液和生物炭复合处理种子对油菜萌发、生长、产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 24-34. QU Z J, ZHU K M, HU L L, et al. Effects of treating seeds compositely with wood vinegar and biochar on germination, growth, yield and quality of rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(1): 24-34 (in Chinese with English abstract).
- [26] 马兴立, 赵昆昆, 赵品源, 等. 纳米碳点对花生幼苗生长及其相关生理生化指标的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(2): 138-144. MA X L, ZHAO K K, ZHAO P Y, et al. Effects of carbon nanodots on seedling growth and related physiological and biochemical parameters in peanut[J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2019, 34(2): 138-144 (in Chinese with English abstract).
- [27] WANG A W, KANG F W, WANG Z G, et al. Facile synthesis of nitrogen-rich carbon dots as fertilizers for mung bean sprouts[J/OL]. Advanced sustainable systems, 2019, 3(3): 1800132 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1002/adsu.2018.00132>.
- [28] 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. LIU Z L, LI Y W, YANG H Y, et al. Study on the mechanism of carbon dots promoting crop seed germination and growth[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2021, 49(24): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孙光燕. 新型纳米材料调控玉米萌发和幼苗生长的生理机制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. SUN G Y. Physiological mechanism of new nanomaterials regulating maize germination and seedling growth[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [30] 余梦琪. 氮磷掺杂碳点的制备及其在蔬菜生长调控中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. SHE M Q. Preparation of ni-

- trogen and phosphorus doped carbon quantum dots and their application in growth regulation of water [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [31] YAN X Y, WANG J H, LI D X, et al. Response of primary root to nitrogen-doped carbon dots in *Arabidopsis thaliana*: alterations in auxin level and cell division activity [J]. Environmental science:nano, 2021, 8(5):1352-1363.
- [32] ZHAO Y, ZHAO P, LUO J J, et al. Effects of different types of nano-carbon biological fertilizers on the growth and quality of crops [J]. Nanoscience and nanotechnology letters, 2019, 11(12):1644-1650.
- [33] 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(2):944-953.
- [34] GUO B Y, LIU G, LI W, et al. The role of carbon dots in the life cycle of crops [J/OL]. Industrial crops and products, 2022, 187: 115427 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115427>.
- [35] ABU SALHA B, 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.
- [36] ALIKHANI M, MIRBOLOOK A, SADEGHI J, et al. Effect of a new slow-release zinc fertilizer based on carbon dots on the zinc concentration, growth indices, and yield in wheat (*Triticum aestivum*) [J/OL]. Plant physiology and biochemistry, 2023, 200: 107783 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107783>.
- [37] 金永林. 纳米碳/纳米腐植酸新型肥料增效载体研制及应用 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023. JIN Y L. Development and application of nanometer carbon/nanometer humic acid fertilizer synergists [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [38] 范立春, 孙磊, 王丽华, 等. 不同施肥量配合纳米碳肥料增效剂对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(4):208-212. FAN L C, SUN L, WANG L H, et al. Effect of different fertilization combined with nano carbon fertilizer synergist on yield and quality of potato [J]. Soils and fertilizers sciences in China, 2021(4):208-212 (in Chinese with English abstract).
- [39] 唐洪杰. 复合肥不同方式配施纳米碳对甘薯产量和品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2023, 39(33):38-43. TANG H J. Effects of different ways of applying nano carbon compound fertilizer on yield and quality of sweet potato [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2023, 39(33):38-43 (in Chinese with English abstract).
- [40] LIU W J, YAO J, CHAI H K, et al. Concentration-dependent effect of photoluminescent carbon dots on the microbial activity of the soil studied by combination methods [J]. Environmental toxicology and pharmacology, 2015, 39(2):857-863.
- [41] HUANG X Y, LIU S B, LIU X M, et al. Doped carbon dots affect heavy metal speciation in mining soil: changes of dissimilated iron reduction processes and microbial communities [J]. Environmental science:nano, 2024, 11(4):1724-1739.
- [42] ANDLEEB N, ZAFAR S, RAHIM Z, et al. Carbon quantum dots as versatile nanomaterials for improving soil health and plant stress tolerance: a comprehensive review [J/OL]. Planta, 2025, 262(2):44 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1007/S00425-025-04758-2>.
- [43] 罗振宇. 碳点纳米影响水稻苗期生长的转录组学和DNA甲基化修饰研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2022. LUO Z Y. Transcriptomic and DNA methylation modification studies of carbon dots nanoparticles affecting growth of rice seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [44] 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.
- [45] LI Y D, XU R H, QI J Y, et al. Foliar spraying of carbon dots reduces cadmium accumulation in rice by regulating rhizosphere immobilization, root development, and subcellular distribution [J/OL]. Science of the total environment, 2024, 955: 177236 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177236>.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] FENG Y P, HE Y Z, YE W B, et al. Mechanistic insights into the biodegradation of carbon dots by fungal laccase [J]. Environmental science & technology, 2023, 57(32):11977-11987.
- [49] YAN X Y, XU Q, LI D X, et al. Carbon dots inhibit root growth by disrupting auxin biosynthesis and transport in *Arabidopsis* [J/OL]. Ecotoxicology and environmental safety, 2021, 216: 112168 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112168>.
- [50] CHEN J, DOU R Z, YANG Z Z, et al. The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.) [J]. Nanotoxicology, 2016, 10(6):818-828.
- [51] XUE H D, DONG Y B, LI Z H, et al. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanisms by which carbon dots regulate the growth of *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Journal of colloid and interface science, 2023, 649:22-35.
- [52] SHIVAS HAKARAPPA K, MARRIBOINA S, YADGARARI Z, et al. DNA delivery into plant tissues using carbon

- dots made from citric acid and β -alanine[J/OL]. *Frontiers in chemistry*, 2025, 13: 1542504 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1542504>.
- [53] WEI Y L, CHEN H Z, WANG L, et al. Cold acclimation alleviates cold stress-induced PSII inhibition and oxidative damage in tobacco leaves [J/OL]. *Plant signaling & behavior*, 2022, 17 (1) : 2013638 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.2013638>.
- [54] 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.
- [55] XU O W, LIU W, LI J W, et al. A novel surfactant sensitized fluorescent sensor for co(II) based on nitrogen doped carbon quantum dots[J]. *Photonic sensors*, 2022, 12(2): 152-163.
- [56] GUIRGUIS A, YANG W R, CONLAN X A, et al. Boosting plant photosynthesis with carbon dots: a critical review of performance and prospects[J/OL]. *Small*, 2023, 19(43): e2300671 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1002/sml.202300671>.
- [57] TAN T L, ZULKIFLI N A, ZAMAN A S K, et al. Impact of photoluminescent carbon quantum dots on photosynthesis efficiency of rice and corn crops[J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2021, 162: 737-751.
- [58] LIU Y K, ZHANG S, YANG F, et al. New strategy of light quality regulation with leaf-spraying fluorescent coatings for enhancing photosynthesis efficiency [J]. *RSC advances*, 2021, 11(43): 26620-26628.
- [59] PAN Z Y, ZANG H H, LI Y J, et al. Foliar application of carbon dots enhances nitrogen uptake and assimilation through CEPD1-dependent signaling in plants [J/OL]. *Plant physiology and biochemistry*, 2024, 217: 109229 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109229>.
- [60] 李双. 柠檬酸-甲酰胺-碳点对番茄生长的促进效应及机制研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2023. LI S. Effect and mechanism of citric acid-formamide-carbon dots mediated enhancement on tomato growth [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [61] TAN J Q, ZHAO S L, CHEN J Y, et al. Preparation of nitrogen-doped carbon dots and their enhancement on lettuce yield and quality[J]. *Journal of materials chemistry B*, 2023, 11(14): 3113-3123.
- [62] LI G H, NI C, ZHU C J, et al. Foliar application of nano carbon dots increases grain yield in rice *via* enhancing leaf photosynthesis and stem assimilates translocation under nitrogen deficiency [J/OL]. *Field crops research*, 2025, 333: 110037 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110037>.
- [63] 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.
- [64] 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/OL]. *The science of the total environment*, 2023, 856 (Pt 1) : 159125 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159125>
- [65] DONG C, WANG S N, MA M H, et al. Inhibition of oxidative stress *in vivo* through enzyme-like activity of carbon dots [J/OL]. *Applied materials today*, 2021, 25: 101178 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101178>.
- [66] ADEEL M, FAROOQ T, WHITE J C, et al. Carbon-based nanomaterials suppress tobacco mosaic virus (TMV) infection and induce resistance in *Nicotiana benthamiana* [J/OL]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 404: 124167 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124167>.
- [67] RAJANI, MISHRA P, KUMARI S, et al. Role of nanotechnology in management of plant viral diseases [J]. *Materials today: proceedings*, 2022, 69: 1-10.
- [68] 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.
- [69] 刘晓宇, 郑海春, 高娃, 等. 纳米碳尿素对小麦产量的影响 [J]. *现代农业*, 2018(5): 89-90. LIU X Y, ZHENG H C, GAO W, et al. Effect of nano-carbon urea on wheat yield [J]. *Modern agriculture*, 2018(5): 89-90 (in Chinese).
- [70] SHAFI Z, PANDEY V K, SINGH R, et al. Carbon dots-nanosensors: advancement in food traceability for a sustainable environmental development [J/OL]. *Food control*, 2024, 165: 110693 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110693>.
- [71] WANG D F, YAN Z H, REN L K, et al. Carbon dots as new antioxidants: synthesis, activity, mechanism and application in the food industry [J/OL]. *Food chemistry*, 2025, 475: 143377 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143377>.
- [72] JOKANOVIĆ M, OLEKSAK P, KUČA K. Multiple neurological effects associated with exposure to organophosphorus pesticides in man [J/OL]. *Toxicology*, 2023, 484: 153407 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153407>.
- [73] SHEKHAR C, KHOSYA R, THAKUR K, et al. A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts [J/OL]. *Toxicology reports*, 2024, 13: 101840 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101840>.
- [74] 许子强, 刘义. 用于残留农药检测的碳量子点荧光探针研究进展 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2022, 68(2): 113-122. XU Z Q, LIU Y. Research progress of carbon quantum dots fluorescent probes for the detection of pesticide residues [J]. *Journal of Wuhan University (natural science edition)*, 2022, 68(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).
- [75] 庞西蓠. 杂原子掺杂的碳量子点荧光探针的制备及应用研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020. PANG X J. Preparation and application of heteroatom doped carbon quantum dot fluorescent probes for the detection of pesticide residues [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.

- cent probe [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [76] NGUYEN D H H, EL-RAMADY H, PROKISCH J. Food safety aspects of carbon dots: a review [J]. *Environmental chemistry letters*, 2025, 23(1): 337-360.
- [77] NETHAJI P, REVATHI P, SENTHIL KUMAR P, et al. Fluorescence enhancing and quenching signal based on new approach for selective detection of multiple organochlorine pesticides using blue emissive-carbon dot [J/OL]. *Environmental pollution*, 2024, 345: 123418 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123418>.
- [78] CAO C H, GUO W C. Carbon dots-based fluorescent probe for the detection of imidacloprid residue in leafy vegetables [J/OL]. *Food chemistry*, 2024, 435: 137578 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137578>.
- [79] BERA M K, MOHAPATRA S. Ultrasensitive detection of glyphosate through effective photoelectron transfer between CdTe and chitosan derived carbon dot [J/OL]. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 2020, 596: 124710 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124710>.
- [80] WANG Y, MA Y X, WANG H, et al. Smartphone-assisted carbon dots fluorescent sensing platform for visual detection of Thiophanate-methyl in fruits and vegetables [J/OL]. *Food chemistry*, 2024, 441: 138413 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138413>.
- [81] HAN Y, YANG W X, LUO X L, et al. Carbon dots based ratiometric fluorescent sensing platform for food safety [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2022, 62(1): 244-260.
- [82] HOU L M, HU X L, PANG W Y, et al. A dual-channel fluorescent sensing system based on carbon dots and photoswitchable Pdots for sensitive detection of acetamiprid and carbendazim in food samples [J/OL]. *Talanta*, 2026, 296: 128444 [2025-08-05]. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128444>.

Nanocarbon dots : a new route to empower crops to increase yield , improve quality , and resist stress

GU Jiayi, JU Haoran, ZHU Changjin, PU Tianyu, LI Guohui, XU Ke

Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology /Jiangsu Province Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/ Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China.

Abstract Ensuring the coordinated improvement of crop yield and resource-use efficiency is an important challenge that urgently needs to be addressed for the sustainable development of agriculture in the severe context of global food production facing the scarce of arable land and the high investment in fertilizers, pesticides, and other resources. Nanotechnology provides new opportunities for the green transformation of agriculture, among which nanocarbon dots (NCDs) have shown great potential in promoting crop growth, enhancing photosynthesis and stress resistance, improving nutrient uptake and utilization, and ultimately increasing yield and quality due to their excellent water solubility, biocompatibility, and environmental friendliness. This article focused on the progress of applying NCDs in crop production. It has been pointed out that NCDs have significant effects in improving crop yield and quality, with good prospects for the applications in ecology and food safety. However, there are still issues including unclear mechanisms of action and insufficient evaluation of long-term effects on ecology and safety. In the future, it is necessary to strengthen the researches on elucidating the mechanism of interaction between NCDs and plants and the environment, optimize the technology of cost-effective synthesis and the mode of application, and improve the system of risk assessment and regulation. Overall, nanocarbon dots are expected to provide new ideas and technological strategies for ensuring global food security and promoting green and sustainable development of agriculture.

Keywords nanocarbon dots; seed germination; photosynthesis; stress resistance; yield and quality

(责任编辑:陆文昌)