

# 碳点促进作物种子萌发及生长的机制研究

刘振玲<sup>1</sup>, 李亚伟<sup>1</sup>, 杨涵越<sup>2</sup>, 刘晓飞<sup>2</sup>, 王传洗<sup>2\*</sup>

(1. 无锡新视野环保有限公司, 江苏无锡 214135; 2. 江南大学环境过程与污染控制研究所, 环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘要** [目的]研究碳点(CDs)对作物种子萌发及生长的影响。[方法]采用微宇宙培养系统,探究10 mg/L下 CDs 处理对菠菜(伏播611)种子发芽性能及幼苗生长的影响。[结果]在菠菜种子培植10 d后, CDs 处理的菠菜种子萌发率为69.0%,显著高于对照组(46.0%,  $P < 0.05$ )。CDs 增加了菠菜幼苗的生物量,相对于对照组,鲜重提高30.1%,干重提高55.3%。CDs 上调了菠菜种子的水通道蛋白基因表达,增加对水分的吸收,促进菠菜种子萌发及生长。[结论]CDs 可以作为一种优良的纳米材料应用于现代农业发展中,特别是应用在作物种子的萌发及生长方面。

**关键词** 碳点;菠菜种子;萌发;幼苗生长;水通道蛋白基因

中图分类号 Q945 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)24-0001-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.24.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Study on the Mechanism of Carbon Dots Promoting Crop Seed Germination and Growth

LIU Zhen-ling<sup>1</sup>, LI Ya-wei<sup>1</sup>, YANG Han-yue<sup>2</sup> et al (1. Wuxi New Vision Environmental Protection Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214135; 2. Institute of Environmental Processes and Pollution Control, School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122)

**Abstract** [Objective] To study the effects of carbon dots (CDs) on the germination and growth of crop seeds. [Method] A microcosmic culture system was used to explore the effects of CDs (10 mg/L) on the germination performance and seedling growth of spinach (Fubo 611). [Result] After the spinach seeds were cultivated for 10 days, the seeds germination rate treated with CDs was 69.0%, which was significantly higher than that of the control group (46.0%,  $P < 0.05$ ). CDs increased the biomass of spinach seedlings relative to the control group (fresh and dry weight increased by 30.1% and 55.3%, respectively). CDs up-regulated the aquaporin gene expression of spinach seeds, increased water absorption, and promoted the germination and growth of spinach seeds. [Conclusion] CDs can be used as excellent nanomaterials for developing modern agriculture, especially in the germination and growth of crop seeds.

**Key words** Carbon dot; Spinach seed; Germination; Seedling growth; Aquaporin gene

我国是一个农业大国,长期面临着人多地少、资源短缺、粮食不足的压力。农业生产过多依赖资源消耗,农业环境污染问题日益突出。因此,如何探索出一条高效、安全、资源节约、环境友好的可持续农业发展道路,是当前必须应对的重大挑战。近年来,以人工纳米材料(engineered nanomaterials, ENMs)生产的纳米化肥、纳米农药、纳米农业传感器等新颖纳米农业产品,在提高作物产量和品质、降低资源投入、减少农业环境污染等方面已经显现出巨大潜力<sup>[1-3]</sup>。已有研究表明,250 mg/kg CeO<sub>2</sub> ENMs 在土壤中能够抑制番茄镰刀菌的生长,比对照组降低53%<sup>[4]</sup>;100 mg/L CuO ENMs 能够提高水稻产量25%<sup>[5]</sup>;500 mg/kg TiO<sub>2</sub> ENMs 能够增加麦粒中所有氨基酸的含量,而同等浓度下 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ENMs 只能增加半胱氨酸和酪氨酸的含量<sup>[6]</sup>;0.8 mg/L Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ENMs 能够促进草莓组培苗的生长并提高其对干旱胁迫的抗性<sup>[7]</sup>;水培条件下50 mg/L的 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ENMs 分别提高柚子幼苗叶绿素含量和根系活力23.2%和23.8%<sup>[8]</sup>。尽管这些金属或金属氧化物的ENMs可以有效调控作物产量及品质,但农业中的不当使用或过度使用仍会损害生态系统并造成实质性问题。

碳点(carbon dots, CDs)作为一类新兴的碳基荧光ENMs,由于其表现出的优良性能,如光吸收较宽、荧光可调、

发光效率高、抗光漂白、化学稳定性高、生物相容性好、低毒性等,被广泛应用于生物成像、药物递送、催化、光电器件等领域<sup>[9]</sup>。近年来,CDs 被证实能够促进作物生长,改善植物的光合作用,增强植物的抗性及固氮能力<sup>[10-11]</sup>。例如,0.02 mg/L的CDs可以提高绿豆芽鲜重14.9%,促进光合产物碳水化合物的合成(21.9%)<sup>[10]</sup>;0.1和100.0 mg/kg的碳黑材料可以增强大豆固氮作用(91%以上)<sup>[11]</sup>。前期研究表明石墨烯类ENMs具有丰富的含氧官能团,能够增加水分的输送,促进种子萌发<sup>[12]</sup>。

种子的萌发在植物生长周期过程中属于一个极为关键的时期,也是对非生物环境因子极为敏感的阶段。植物幼苗能否迅速健壮的生长与种子萌发能力密切相关。研究发现,CDs在种子发芽阶段发挥着重要的作用。CDs(0.56 mg/mL)显著促进水稻种子的萌发<sup>[13]</sup>;25%的CDs溶液可以在5 d时促进绿豆种子发芽<sup>[14]</sup>。然而CDs促进种子萌发的机制有待进一步研究。菠菜(*Spinacia oleracea* L.)富含丰富的胡萝卜素、维生素C、氨基酸以及Fe、P、Na、K等矿质元素,是我国食用的重要绿叶蔬菜之一<sup>[15]</sup>。因此,该研究选取菠菜作为供试作物,揭示CDs促进种子萌发及生长的机制,以期CDs在农业中的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 该试验于江南大学环境过程与污染控制研究所进行。供试菠菜种子(伏播611)购于河北大禹种业有限公司。CDs合成原料柠檬酸购自国药集团化学试剂有限公司,尿素购自上海泰坦科技股份有限公司。试验所用去离

**基金项目** 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP221023)。  
**作者简介** 刘振玲(1981—),女,江苏徐州人,高级工程师,硕士,从事环境评估和治理研究。\*通信作者,研究员,博士,博士生导师,从事环境功能材料研究。  
**收稿日期** 2021-04-14

子水为实验室自制。试验用土为潮土,土壤基本理化性质为 pH 7.5、有机质 20 mg/kg。

该试验所用 CDs 为自制:取柠檬酸 1.0 g 和尿素 0.5 g,溶解于 40 mL 纯水中,装入 50 mL 高压反应釜中,在 180 °C 的烘箱中反应 10 h 后,经过滤,收集溶液,随后将所收集的溶液通过真空冷冻干燥机(中国上海比朗 FD-1A-50)干燥得到样品<sup>[16]</sup>。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 CDs 悬浮液的制备。**从制备的 CDs 样品中称取一定量加入纯水中,将溶液在 20 °C 下利用超声波细胞粉碎机(新芝 SCIENTZ-IIID)进行超声处理(200 W, 20 kHz) 10 min,使其均匀分散于水中形成纳米材料悬浮液,最终制备出浓度为 10 mg/L 的 CDs 悬浮液。

**1.2.2 CDs 性质的表征。**通过透射式电子显微镜(TEM,日本电子株式会社 JEM-2100)观察 CDs 形态与粒径分布,利用 X 射线光电子能谱(XPS,美国赛默飞 ESCALAB 250Xi)和傅立叶转换红外光谱仪(FTIR,德国布鲁克 TENSOR 27)测定 CDs 表面的主要官能团种类及其元素组成。

**1.2.3 菠菜发芽试验。**选取直径 5 cm、铺有 1 层定性滤纸的塑料培养皿,挑选大小均匀饱满的 42 粒菠菜种子(伏播 611),用 0.05% 的次氯酸钠溶液浸泡 30 min 以除去表面细菌,再用去离子水多次冲洗后培育于培养皿,均匀排布。将纯水和处理浓度为 10 mg/L 的 CDs 溶液分别喷施于培养皿中,将培养皿用封口膜密封后于 25 °C 下避光培养。

选取长 54 cm、宽 28 cm,共 50 穴的育苗穴盘,其中 12 个穴位铺满土壤。试验设计 3 个处理,分别为空白(CK)以及 2 个碳点(CDs1 和 CDs2)处理,每个处理 4 个穴位,挑选大小均匀的 108 粒菠菜种子(伏播 611),用 0.05% 的次氯酸钠溶液浸泡 30 min 以除去表面细菌,再用去离子水多次冲洗后培育于育苗穴盘中,每个穴位播种 9 粒种子,均匀排布。将纯水和处理浓度为 10 mg/L 的 CDs1 和 CDs2 溶液分别喷施于育苗穴盘中,将育苗穴盘放于 25 °C 下避光培养。

## 1.3 测定方法

**1.3.1 发芽率。**试验测试期间每日记录菠菜种子的发芽数,试验结束后计算菠菜种子的发芽率,计算公式为:发芽率=(发芽种子总数/供试种子总数)×100%。

在试验测试期间种子幼根或子叶伸出种皮视为萌发,只有幼根超过 1 mm 才被记为根长。

**1.3.2 生物量。**在发芽试验结束后,收集菠菜幼苗,利用电子天平测定其鲜重,通过烘箱干燥后,测定其干重。

**1.3.3 根参数。**在发芽试验结束后,收集菠菜幼苗,利用扫描仪(Scanner,日本爱普生 12000XL)测定菠菜幼苗的长度和表面积。

**1.3.4 水通道蛋白表达量测定。**选定 2 条 *PIPs* 基因特异性引物进行荧光定量 PCR 分析<sup>[17]</sup>。在对菠菜进行发芽处理 5 d 以后,用液氮快速冷冻菠菜幼苗,并仔细研磨至呈粉末。采用通用植物总 RNA 提取试剂盒(Takara, Japan)提取菠菜幼苗的总 RNA。提取的 RNA 用超微量分光光度计测定样品的纯度和浓度,检验合格的 RNA 进行后续反转录试验。随

后用 RNA 反转录试剂盒(Takara, Japan)将符合要求的 RNA 样品反转录成 cDNA, -80 °C 保存备用。

**1.4 数据分析** 所有数据均采用 OriginPro 2016 SR0 程序进行分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对空白和处理组的平均值进行比较,分析结果进行 Tukey-Kramer 检验,  $P < 0.05$  时,试验结果具有统计学显著性差异。

## 2 结果与分析

**2.1 CDs ENMs 的表征** 试验用的 CDs ENMs 采用一步水热法制备<sup>[16]</sup>,其结构、尺寸、表面化学性质由电子透射显微镜(TEM)、傅立叶转换红外线光谱(FTIR)和 X 射线光电子能谱(XPS)进行表征。从 TEM 照片(图 1)可以看出, CDs 尺寸分布均在 10 nm 以下,平均尺寸为  $(5.5 \pm 0.3)$  nm,呈规则圆形颗粒状。FTIR 结果证实 CDs 的主要官能团包括—OH、C=O、C=C 等(图 2)。由 XPS 结果(图 3)可知, CDs 的主要元素组成是 C、N、O,并且有吡啶氮、吡咯氮、石墨氮等结构存在。高分辨 XPS 结果(图 4)表明, CDs ENMs 表面具有多种亲水官能团,与 FTIR 结果非常一致。这些官能团赋予了 CDs 优异的水相分散性。据报道,含有  $sp^2$  和  $sp^3$  混合结构的氧化石墨烯,可以作为优良的水分传递剂,增加土壤保水作用,从而促进种子萌发<sup>[12]</sup>。因此,拥有相似结构的 CDs ENMs 可能也有类似的水分传递作用。

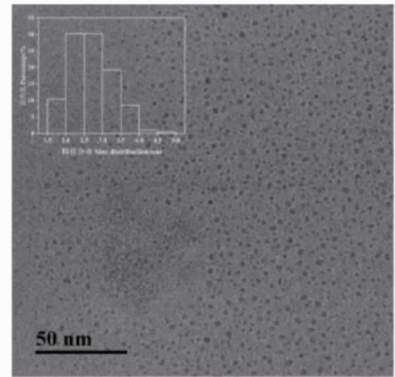


图1 碳点的 TEM 照片以及粒径分布

Fig.1 TEM image and particle size distribution of carbon dots

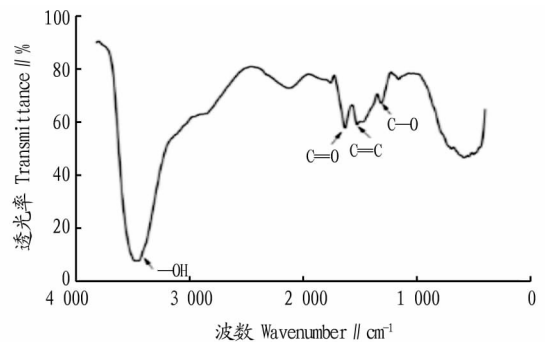


图2 碳点的傅立叶变换红外光谱图(FTIR)

Fig.2 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) of carbon dots

**2.2 CDs ENMs 在水环境中对菠菜种子发芽及生长的影响** 从图 5 可以看出, CDs ENMs (CDs1) 能够显著促进菠菜种子的萌发。从第 4 天至第 10 天,施加 CDs1 的菠菜种子的

发芽率均明显高于对照组;在第 10 天时,施以 CDs1 的菠菜种子发芽率为 69.0%,而对照组为 46.0%,比较对照组,CDs1 处理使得发芽率提高 50.0%(图 6)。除此之外,CDs1 也显著增加了菠菜干鲜重,相比于对照,鲜重增加了 30.1%,干重增加了 55.3%(图 7a)。同时,CDs1 对于菠菜根、茎形态的发育均有促进作用,主要体现在茎长和表面积方面(图 7b、图 7c 和图 8)。CDs1 能够增加菠菜种子的长度,地上部增加 43.4%,根部增加 69.4%(图 7b)。CDs1 能够增加菠菜根、茎的表面积,根表面积增加 44.8%,茎表面积增加 38.7%(图 7c)。由此可见,CDs ENMs 在水环境中不仅可以提高种子的萌发率,而且能够提高幼苗的生物量。

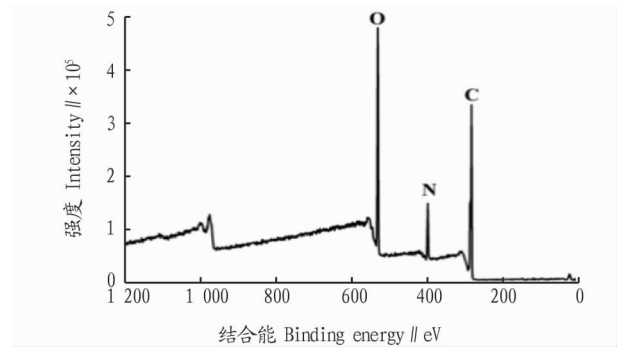


图 3 碳点表面的元素组成分析

Fig.3 Elemental composition analysis of carbon dots surfaces

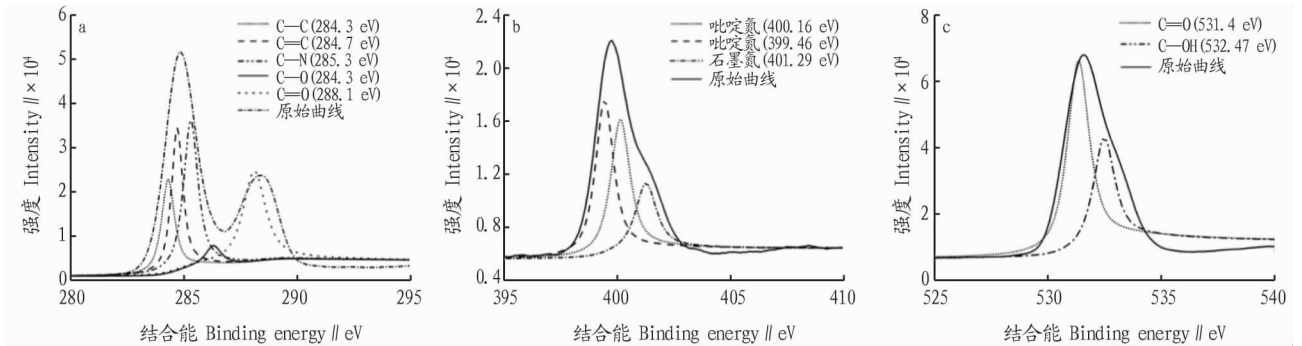


图 4 碳点表面含碳官能团(a)、含氮官能团(b)和含氧官能团(c)的组成

Fig.4 The composition of carbon-containing functional groups (a), nitrogen-containing functional groups (b) and oxygen-containing functional groups (c) on the surface of carbon dots

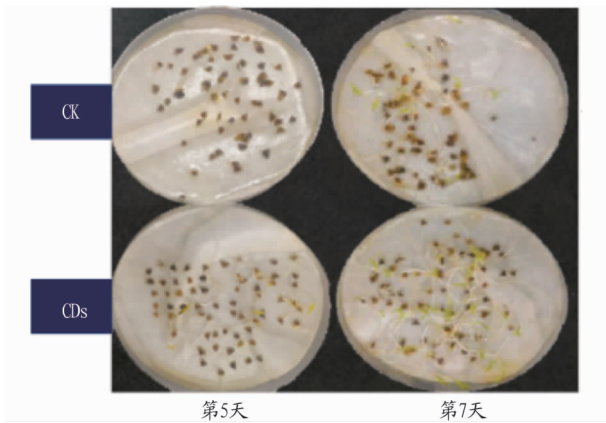


图 5 水环境中菠菜种子第 5 天和第 7 天的发芽情况

Fig.5 The germination of spinach seeds on day 5 and day 7 in aquatic environment

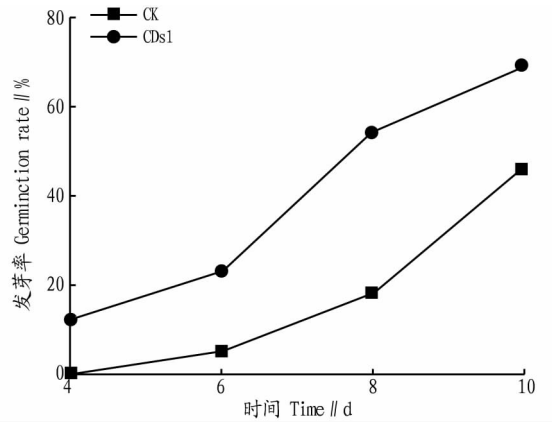


图 6 碳点在水环境中菠菜种子 10 d 内的发芽率

Fig.6 The germination rate of spinach seeds in water environment within 10 days of carbon dots

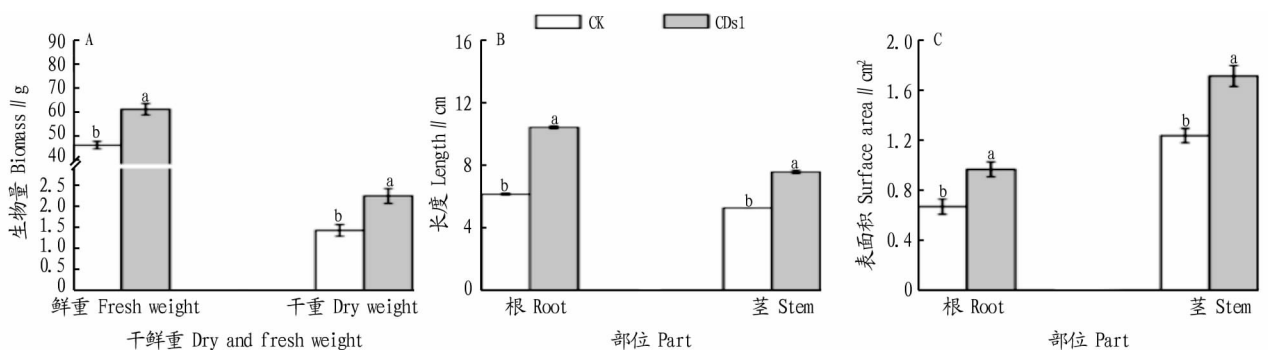


图 7 菠菜幼苗的干鲜重(A)、长度(B)和表面积(C)

Fig.7 Dry and fresh weight (A), length (B) and surface area (C) of spinach seedlings

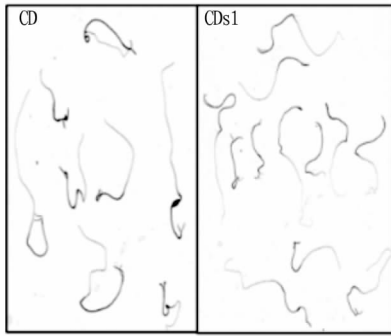


图8 菠菜幼苗在根扫描仪下的扫描图

Fig.8 Scanning image of spinach seedlings under the root scanner

**2.3 CDs ENMs 在土壤中对菠菜种子发芽及生长的影响** 种子萌发往往在土壤中进行,促进种子在土壤中发芽及生长更具有农业操作价值。为了验证在土壤中 CDs ENMs (CDs1)对菠菜种子发芽的影响,该研究设计了土施试验,结果表明(图9~10),土壤培育 19 d,CDs1 能够显著促进对菠菜种子发芽,其发芽率及生长远远高于对照组。同时,该研究采用另外一种结构相似的 CDs ENMs (CDs2),进行施用作为另一个处理组。由图 9 可知,施用 CDs2 的菠菜种子的萌发率及生长也高于对照组。此结果说明在土壤培植菠菜时,施用 CDs 可以很好地促进菠菜种子发芽及生长。

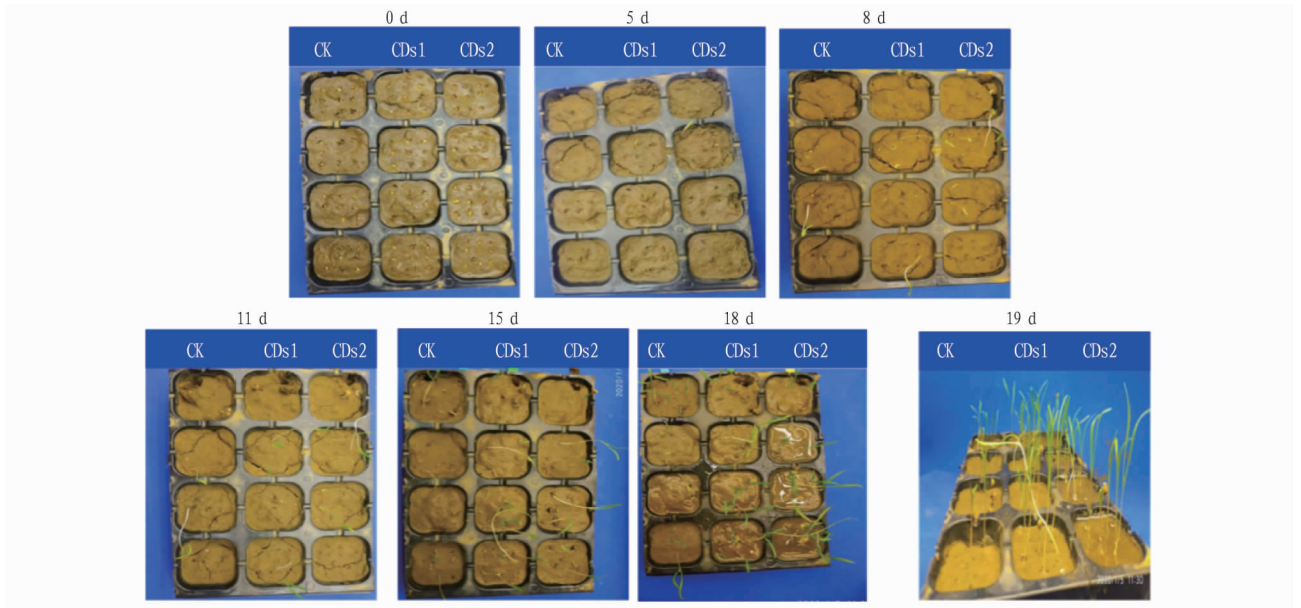


图9 土壤环境中菠菜种子第0、5、8、11、15、18和19天的发芽情况

Fig.9 The germination of spinach seeds in the soil environment on the 0th,5th,8,11,15,18 and 19 days

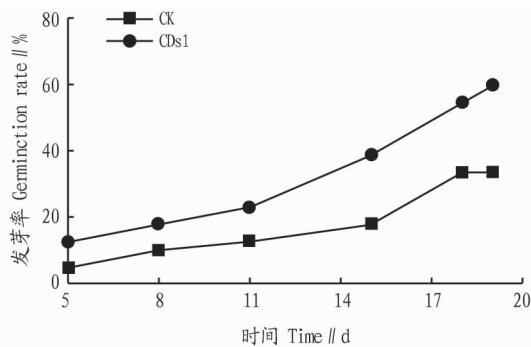


图10 碳点在土壤环境中对菠菜种子发芽率的影响

Fig.10 The effect of carbon dots on the germination rate of spinach seeds in the soil environment

**2.4 CDs ENMs 促进菠菜种子萌发的机制研究** 水分在种子发芽中起着至关重要的作用。在发芽开始时,种子中的水溶物质开始吸收水分;而当胚胎开始发育时,种子继续需要吸收大量水分。为了探究 CDs 对菠菜种子吸水能力的影响,该研究测定了控制水分吸收的水通道蛋白的调控基因。PIP<sub>s</sub> 基因表达结果表明,经 CDs 处理的菠菜种子相比于对照组,其水通道蛋白基因表达量显著增加(图 11)。对于菠菜

水通道蛋白调控基因的 2 种基因 (*SoPIP1;2* 和 *SoPIP2;1*) 而言,CDs 处理组基因表达量分别显著提高 409.0%、156.0% (图 11)。施加 CDs 的菠菜幼苗含水率显著高于对照组,这与水通道蛋白基因表达的结果相吻合。Li 等<sup>[18]</sup>研究发现硅量子点(0.01~0.30 mg/mL)可以提高黄瓜幼苗根部的水通道蛋白基因表达,从而促进幼苗生长。因此,该研究结果表明

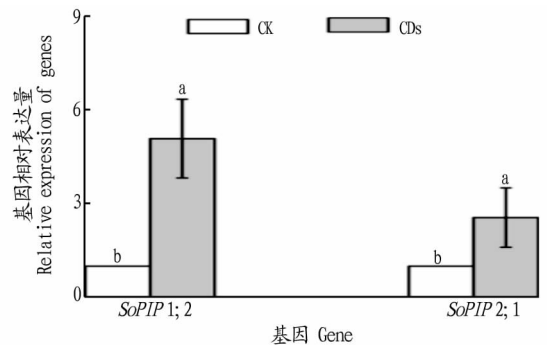


图11 碳点对菠菜幼苗的 2 种水通道蛋白基因相对表达量的影响

Fig.11 The effect of carbon dots on the relative expression of two aquaporin genes in spinach seedlings

CDs 可以通过上调菠菜水通道蛋白基因的表达,从而提高种子的吸水能力,促进种子发芽(图 12)。另外由于 CDs 自身的特定结构(—OH 和—C=O 等表面官能团)使其可以作为

优良的土壤保湿剂,保证种子发芽所需要的湿度,进而促进种子发芽(图 12)。

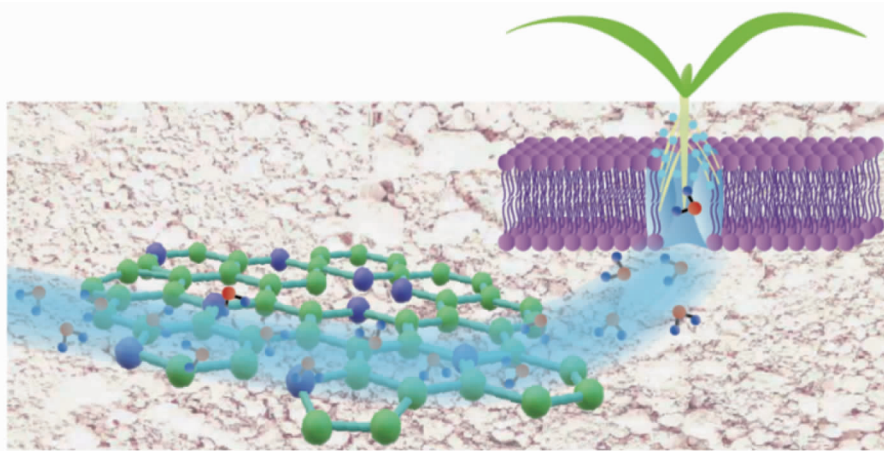


图 12 碳点促进菠菜种子萌发及生长的机制

Fig.12 The mechanism of carbon dots promoting spinach seed germination and growth

### 3 讨论与结论

基于 ENMs,发展新型的纳米农业技术及产品(纳米肥料和纳米农药)能够减少现有农业化学品投入,降低农业生产对环境的影响。同时,纳米农业技术有效地保持/提高农作物的产量,利于保证全球粮食安全,降低人口快速增加对粮食需求的压力<sup>[19]</sup>。截至目前,基于金属和金属氧化物的纳米农业技术得到快速发展。例如,氧化铜纳米片(50 mg/L)可以提高大豆地上生物量(60.3%)和地下生物量(34.3%)<sup>[20]</sup>;3% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ENMs 提高了 36.5% 的生菜幼苗干重<sup>[21]</sup>。然而,金属和金属氧化物在农业中不当或过量使用,使得这些纳米肥料会通过许多途径进入土壤,进行植物积累,最终进入食物链,对人体造成危害<sup>[22]</sup>。

相比之下,CDs ENMs 具有生物相容性、化学惰性,甚至对食物链和人体细胞无毒。近年来的研究表明,CDs 可以作为光转换材料,提高作物对光的捕获能力,从而增强其光合作用,提高作物产量。例如,烟草叶片在注射 CDs 溶液 2 d 后,其光合速率提升了 18.0%<sup>[23]</sup>;CDs (560 mg/L)可以增强光合中 Rubisco 活性(42.0%),并使双子叶谷物(大豆、番茄和茄子)的产量提高 20.0%<sup>[24]</sup>。该研究结果表明,由一步水热法合成的粒径小于 10 nm 的 CDs ENMs 自身独特的亲水结构以及上调种子水通道蛋白表达,可以增强种子吸水能力,从而能够促进作物种子的发芽和生长,这为后期的作物生长及产量提供了重要的保障。除此之外,不同 CDs 均对种子萌发有显著的促进作用,同时 CDs 具有低毒性、来源广泛、成本低的特点,使其在纳米农业发展上有广阔应用前景。因此,基于 CDs ENMs 的纳米农业技术有望应用在可持续农业生产中。然而,目前 CDs ENMs 的大规模合成的局限性和高成本阻碍了其在农业生产中的应用。农业生产过程中的废弃生物质提供了多种廉价的前体物质,开发生物质资源化利用技术,能够实现生物质 CDs ENMs 的大量、廉价制备。因此,生物质 CDs ENMs 在未来的农业中具有巨大的潜力。

### 参考文献

- [1] ADISA I O,PULLAGURALA V L R,PERALTA-VIDEA J R,et al.Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides;A critical review of mechanisms of action[J].Environmental science:Nano,2019,6(7):2002-2030.
- [2] 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.
- [3] KAH M,KOOKANA R S,GOGOS A,et al.A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues[J].Nature nanotechnology,2018,13(8):677-684.
- [4] ADISA I O,REDDY PULLAGURALA V L,RAWAT S,et al.Role of cerium compounds in Fusarium wilt suppression and growth enhancement in tomato (*Solanum lycopersicum*)[J].Journal of agricultural and food chemistry,2018,66(24):5959-5970.
- [5] LIU J,SIMMS M,SONG S,et al.Physiological effects of copper oxide nanoparticles and arsenic on the growth and life cycle of rice (*Oryza sativa japonica* 'Koshihikari')[J].Environmental science & technology,2018,52(23):13728-13737.
- [6] WANG Y Y,JIANG F P,MA C X,et al.Effect of metal oxide nanoparticles on amino acids in wheat grains (*Triticum aestivum*) in a life cycle study[J].Journal of environmental management,2019,241:319-327.
- [7] MOZAFARI A A,HAVAS F,GHADERI N.Application of iron nanoparticles and salicylic acid in *in vitro* culture of strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.) to cope with drought stress[J].Plant cell tissue & organ culture,2018,132(3):511-523.
- [8] HU J,GUO H Y,LI J L,et al.Comparative impacts of iron oxide nanoparticles and ferric ions on the growth of *Citrus maxima*[J].Environmental pollution,2017,221:199-208.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WANG Y,CHANG C H,JI Z X,et al.Agglomeration determines effects of carbonaceous nanomaterials on soybean nodulation,dinitrogen fixation potential,and growth in soil[J].ACS nano,2017,11(6):5753-5765.
- [12] HE Y,HU R,ZHONG Y,et al.Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil[J].Nano research,2018,4:1928-1937.
- [13] 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.

- [22] ZOU X J, ZOU H X, LU J. Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modelling[J]. *Machine vision and applications*, 2012, 23(1): 43-63.
- [23] 李占贤, 许哲. 双目视觉的成像模型分析[J]. *机械工程与自动化*, 2014(4): 191-192.
- [24] 张文明, 刘彬, 李海滨. 基于双目视觉的三维重建中特征点提取及匹配算法的研究[J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 181-185.
- [25] BRUNO F, BIANCO G, MUZZUPAPPA M, et al. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction[J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2011, 66(4): 508-518.
- [26] SMISEK J, JANCOSEK M, PAJDLA T. 3D with kinect [C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (Conference Paper). Barcelona, Spain; IEEE, 2011: 1154-1160.
- [27] HIRSCHMULLER H, SCHARSTEIN D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2009, 31(9): 1582-1599.
- [28] 黄林超. 基于双目立体视觉的三维重建技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [29] WHEATSTONE C. Contributions to the physiology of vision. Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision[J]. *Philosophical transactions of the royal society of London*, 2009, 128: 371-394.
- [30] SHIPLEY T. The first random-dot texture stereogram[J]. *Vision research*, 1971, 11(12): 1491-1492.
- [31] JULESZ B, MILLER J E. Automatic stereoscopic presentation of functions of two variables[J]. *Bell system technical journal*, 1962, 41(2): 663-676.
- [32] WRIGHT W D. Foundations of cyclopean perception[J]. *Journal of modern optics*, 1972, 19(6): 550.
- [33] JULESZ B. Towards the automation of binocular depth perception[J]. *Communications of the ACM*, 1962, 5(6): 439-444.
- [34] ZHI Q, COOPERSTOCK J R. Toward dynamic image mosaic generation with robustness to parallax[J]. *IEEE transactions on image processing*, 2012, 21(1): 366-378.
- [35] MARR D, NISHIHARA H K. Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes[J]. *Proceedings of the royal society of London*, 1978, 200(1140): 269-294.
- [36] GRIMSON W W L. A computer implementation of a theory of human stereo vision[J]. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 1981, 292(1058): 217-253.
- [37] CAO H, WANG R W, WEN X B, et al. A novel recognition algorithm in 3D point clouds based on local spherical harmonics [C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Tianjin, China; IEEE, 2019: 1041-1046.
- [38] ASADA M, TANAKA T, HOSODA K. Adaptive binocular visual servoing for independently moving target tracking [C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, CA, USA; IEEE, 2000.
- [39] FANG Y, MASAKI I, HORN B. Depth-based target segmentation for intelligent vehicles: Fusion of radar and binocular stereo[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2002, 3(3): 196-202.
- [40] 魏菊锦. 基于双目视觉的三维重建方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [41] 阮晓东, 李世伦, 诸葛良, 等. 用立体视觉测量多自由度机械装置姿态的研究[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(5): 571-573.
- [42] 高庆吉, 洪炳溶, 阮玉峰. 基于异构双目视觉的全自主足球机器人导航[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(9): 1029-1032, 1088.
- [43] 王保丰, 周建亮, 唐歌实, 等. 嫦娥三号巡视器视觉定位方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(4): 452-460.
- [44] 刘好, 刘洒, 杨长辉, 等. 基于双目立体视觉的重叠柑橘空间定位[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(9): 104-112.
- [45] 王磊, 李会容, 周科, 等. 嵌入式 ARM 的果蔬采摘双目视觉系统与算法设计[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(1): 71-80.
- [46] 周云成, 许童羽, 邓寒冰, 等. 基于自监督学习的番茄植株图像深度估计方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 173-182.
- [47] JAFARI MALEKABADI A, KHOJASTEHPOUR M, EMADI B. Disparity map computation of tree using stereo vision system and effects of canopy shapes and foliage density[J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2019, 156: 627-644.
- [48] NUGROHO A P, FADILAH M A N, WIRATMOKO A, et al. Implementation of crop growth monitoring system based on depth perception using stereo camera in plant factory[J]. *IOP conference series earth and environmental science*, 2020, 542(1): 1-9.
- [49] 殷悦, 张慧春, 郑加强. 基于双目立体视觉的植物三维重建系统[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(3): 129-135.
- [50] 杨鹏树, 刘卉, 王晓翠, 等. 基于双目视觉的作物苗期障碍物三维信息检测方法[J]. *农机化研究*, 2021, 43(4): 11-16.
- [51] ÖZÜYMAK İ B. Determination of plant height for crop and weed discrimination by using stereo vision system[J]. *Journal of tekindag agricultural faculty*, 2020, 17(1): 97-107.
- [52] BAO Y, TANG L, BREITZMAN M W, et al. Field-based robotic phenotyping of sorghum plant architecture using stereo vision[J]. *Journal of field robotics*, 2019, 36(2): 397-415.
- [53] CUEVAS-VELASQUEZ H, GALLEGO A J, FISHER R B. Segmentation and 3D reconstruction of rose plants from stereoscopic images[J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2020, 171: 1-29.
- [54] 殷小舟, 淮永建, 黄冬辉. 基于双目立体视觉的花卉三维重建[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 33(3): 91-94.
- [55] 贺磊盈, 武传宇, 杜小强. 基于双轮廓同步跟踪的果树枝干提取及三维重建[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 182-189.
- [56] DANDRIFOSSE S, BOUVRY A, LEEEMANS V, et al. Imaging wheat canopy through stereo vision: Overcoming the challenges of the laboratory to field transition for morphological features extraction[J]. *Frontiers in plant science*, 2020, 11: 1-15.
- [57] 王伟羊. 基于计算机视觉的采茶机导航技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [58] 郑琼娥, 雷国铨. 三产融合与茶产业转型升级: 问题、驱动力与路径[J]. *学术交流*, 2019(5): 114-123.
- [59] 刘珈妮, 刘少群, 孙彬妹, 等. 茶产业科技扶贫模式与经验浅析[J]. *福建茶叶*, 2020, 42(6): 115-116.

(上接第5页)

- [14] 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.
- [15] 黄碧阳. 光质与光周期环境对菠菜生长发育的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [16] 曹中海. 碳量子点的制备及其在有机发光二极管中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [17] CHEN K, FESSEHAIE A, ARORA R. Aquaporin expression during seed osmopriming and post-priming germination in spinach[J]. *Biologia plantarum*, 2013, 57(1): 193-198.
- [18] LI Y J, LI W, ZHANG H R, et al. Biomimetic preparation of silicon quantum dots and their phytophysiology effect on cucumber seedlings[J]. *Journal of materials chemistry B*, 2019, 7(7): 1107-1115.
- [19] 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.
- [20] MA C X, BORGATTA J, HUDSON B G, et al. Advanced material modulation of nutritional and phytohormone status alleviates damage from soybean sudden death syndrome[J]. *Nature nanotechnology*, 2020, 15(12): 1033-1042.
- [21] JURKOW R, SEKARA A, POKLUDA R, et al. Biochemical response of oakleaf lettuce seedlings to different concentrations of some metal (oid) oxide nanoparticles[J]. *Agronomy*, 2020, 10: 997-1015.
- [22] 林茂宏, 沈玖玖, 吴佳妮, 等. 纳米氧化锌对两种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 72-78.
- [23] 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 & surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 169: 422-428.
- [24] 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.