

## 纳米碳点对小麦苗期生长和产量的影响

顾家依,吴婉婷,蒲天宇,徐继伟,章岩,朱昌进,黄涵语,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,江苏扬州 225009)

**摘要:**为探讨纳米碳点对小麦出苗、苗期形态和生理特征及产量的影响,以小麦品种扬麦25号为材料,设置纳米碳点水溶液浸种、拌种、出苗后叶面喷施三种施用方式,以及0.02、0.1和0.5 mg·mL<sup>-1</sup>三种碳点浓度,同时以不施用纳米碳点处理作为对照(CK),分析了不同处理下小麦出苗率、株高、生物量、抗逆生理及产量的差异。结果表明,碳点水溶液浸种和拌种后小麦田间实际出苗率(播后20 d)分别达到76.8%~78.0%和58.4%~60.5%,较CK分别增加了27.0~28.2和8.6~10.7个百分点。与CK相比,纳米碳点浸种、拌种和叶面喷施处理下小麦幼苗(播后20 d)的株高分别增加了39.8%~52.5%、25.6%~28.1%和23.3%~32.2%,地上部鲜重分别增加95.3%~100.4%、46.9%~53.8%和45.3%~56.5%,最大根长分别增加58.4%~60.7%、28.6%~35.4%和19.2%~34.7%,根鲜重分别增加60.2%~85.8%、45.5%~48.1%和36.2%~39.1%;同时,纳米碳点浸种、拌种和叶面喷施后小麦幼苗 $\alpha$ -淀粉酶、 $\beta$ -淀粉酶和抗氧化酶活性及可溶性糖含量均显著提高,丙二醛含量降低,产量分别增加了13.8%~16.0%、9.8%~10.6%和5.4%~7.0%。上述结果说明,利用纳米碳点浸种、拌种和叶面喷施能有效促进小麦出苗和早发壮苗,增强其抗逆性,提高产量,其中以0.02~0.5 mg·mL<sup>-1</sup>纳米碳点溶液浸种的效果最佳。

**关键词:**小麦;纳米碳点;幼苗生长;出苗率;产量

**中图分类号:**S512.1;S311

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-1041(2025)08-1101-08

## Effect of Nano-Carbon Dots on Seedling Growth and Yield of Wheat

GU Jiayi, WU Wanting, PU Tianyu, XU Jiwei, ZHANG Yan, ZHU Changjin, HUANG Hanyu, LI Guohui, XU Ke

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation Physiology, Jiangsu Co-Innovation Centre for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:** To investigate the effects of nano-carbon dots on wheat emergence, the morphological and physiological characteristics of seedling and yield, a total of three treatments were set up: seed soaking, seed dressing, foliar spraying after emergence with nano-carbon dots aqueous solution, and no application of nano-carbon dots was used as the control(CK), with a wheat variety Yangmai 25 as the material. Three carbon dots concentrations were applied for seed soaking, seed dressing, and foliar spraying, with concentrations of 0.02, 0.1, and 0.5 mg·mL<sup>-1</sup>, respectively. The differences in wheat emergence rate, plant height, biomass, stress resistance physiology, and yield under different treatments were analyzed. The results showed that using carbon dots aqueous solution for seed soaking and seed dressing, the actual emergence rates in the field after 20 days of sowing reached 76.8%–78.0% and 58.4%–60.5%, respectively. Compared with CK, the emergence rates of wheat in the field were increased by 27.0–28.2 percentage points and 8.6–10.7 percentage points, respectively. Compared with CK, after 20 days of wheat sowing, the height of seedlings treated with seed soaking, seed

收稿日期:2024-07-06 修回日期:2024-08-05

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(22)3151];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资金项目(BE2022425);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者 E-mail:mz120231378@stu.yzu.edu.cn(顾家依)

通讯作者 E-mail:xuke@yzu.edu.cn(许轲);lgh@yzu.edu.cn(李国辉)

dressing, and foliar spraying increased by 39.8%–52.5%, 25.6%–28.1%, and 23.3%–32.2%, respectively; the fresh weight of aboveground parts increased by 95.3%–100.4%, 46.9%–53.8%, and 45.3%–56.5%, respectively; the maximum root length increased by 58.4%–60.7%, 28.6%–35.4%, and 19.2%–34.7%, and the fresh weight of roots increased by 60.2%–85.8%, 45.5%–48.1%, and 36.2%–39.1%, respectively. After seed soaking, seed dressing, and foliar spraying with nano-carbon dots, wheat seedling's  $\alpha$ -amylase and  $\beta$ -amylase activities, antioxidant enzyme activity, and content of soluble sugar were significantly increased, and the content of malondialdehyde was decreased. The wheat yield increased by 13.8%–16.0%, 9.8%–10.6%, and 5.4%–7.0%, respectively. The above results indicated that using nano-carbon dots for seed soaking, seed dressing, and foliar spraying led to the effectively promoted wheat emergence, early emergence and strong seedling, enhanced its stress resistance, and thus increased yield, and using 0.02–0.5 mg · mL<sup>-1</sup> nano-carbon dots solution to soak seeds can achieve the best effect in wheat production.

**Keywords:** Wheat; Nano-carbon dots; Seedling growth; Emergence rate; Yield

小麦是中国最主要的粮食作物之一,其高产稳产对保障中国粮食安全和促进国民经济发展具有重要意义。出苗率和出苗质量是影响小麦壮苗形成、高产高效群体构建和产量形成的关键因素<sup>[1-3]</sup>。目前,小麦生产上主要通过提高整地质量、控制播种深度、合理施肥、做好田间土壤水分管理和病虫害防治等措施提高出苗率和出苗质量<sup>[4]</sup>。使用生物炭、NO、抗旱拌种剂、吡虫啉种衣剂、乙草胺等物质也能有效增强小麦植株抗逆能力,提高出苗率和出苗质量<sup>[5-7]</sup>。栽培和化控措施虽然可以培育壮苗和提高出苗质量,但由于生产条件、农机装备、技术普及、成本投入、操作便捷性等因素的影响,小麦播后出苗问题在生产上依然没有很好解决<sup>[8]</sup>,亟需研发绿色安全、方便快捷的技术,进而改善小麦播种和出苗质量,以保障小麦高产稳产。

纳米碳点是一种新型纳米材料,具有生物相容性、水溶性、低毒性等特点,制备过程简单,有丰富的低成本来源,近年来在作物上展现出了良好的应用前景<sup>[9-10]</sup>。碳点的主要生理作用体现在促进种子萌发、养分吸收、植株生长和光合作用,提高植株碳水化合物含量、抗逆能力和产量<sup>[10]</sup>。研究表明,碳点能穿透坚硬的种皮,加快水分渗透,从而促进种子萌发,加速了幼苗的生长,增强其抗逆和抗病能力,有利于提高幼苗质量。目前,碳点对种子萌发和植株生长的促进作用在绿豆、番茄、生菜、拟南芥、烟草、大豆、茄子、辣椒、西瓜、萝卜、芹菜、香菜、卷心菜等作物上被观察到<sup>[11]</sup>,而纳米碳点是否能够提高小麦播种后出苗率、出苗质量和最终产量目前鲜有报道。本试验探究了不同浓

度纳米碳点和不同施用方式对小麦的出苗率、幼苗生长发育和产量的影响,以期对纳米碳点在小麦生产上推广应用提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料方法

### 1.1 试验地点和材料

试验在扬州市广陵区沙头镇(32°31'N, 119°55'E)进行。该地区属亚热带季风气候,年平均气温 14.8 °C,全年平均无霜期 220 d,平均日照 2 140 h,年降水量 1 030 mm。试验地 0~20 cm 土层的 pH 值为 7.79,有机物、碱解氮、有效钾和有效磷含量分别为 31.72 g · kg<sup>-1</sup>、104.91 mg · kg<sup>-1</sup>、119.08 mg · kg<sup>-1</sup> 和 15.40 mg · kg<sup>-1</sup>。供试小麦品种为扬麦 25。

### 1.2 试验设计

试验设置纳米碳点水溶液浸种(种子在碳点溶液中浸泡 12 h 后播种)、拌种(种子在碳点溶液中浸润后播种)、出苗后叶面喷施(出苗后 2 叶 1 心期喷施)三种施用方式,以及 0.02、0.1 和 0.5 mg · mL<sup>-1</sup> 三种碳点浓度(分别用 C0.02、C0.1 和 C0.5 表示),同时设置不施用纳米碳点处理作为对照(CK)。每个处理重复 3 次。小麦于 2022 年 11 月 10 日人工条播,行距 25 cm,每行播种量为 110 粒 · m<sup>-1</sup>,小区面积 12 m<sup>2</sup> (3 m × 4 m)。各处理在全生育期内施用纯氮 270 kg · hm<sup>-2</sup>,其中 60% 基施,40% 拔节追施;磷肥使用过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12%),钾肥使用氯化钾(K<sub>2</sub>O, 60%),施用量均为 162 kg · hm<sup>-2</sup>,其中磷肥全部基施,钾肥基施与拔节追施量各占 50%。其他管理按高产栽培要求统一进行。碳点由江苏大学黄健老师提

供,属于单晶态碳点,为石墨六方结构(5 nm)<sup>[12]</sup>。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 出苗率测定

每小区播种前标记 3 个 1 m 长双行样区,播种后 10 和 20 d 统计出苗数,并且计算出苗率。出苗率=出苗的种子/全部种子×100%。

#### 1.3.2 农艺性状调查

在播种后 10 和 20 d 每小区分别取生长一致小麦幼苗 15 株,用去离子水冲洗干净,滤纸吸干水分,分别调查株高、地上部鲜重、最大根长、根鲜重等农艺性状。

#### 1.3.3 保护酶活性及丙二醛(MDA)含量测定

在播种后 10 d 和 20 d 采集新鲜小麦幼苗,用检测试剂盒(上海酶联生物公司)对小麦的 POD、CAT 和 SOD 活性及 MDA 含量进行测定。

#### 1.3.4 可溶性糖含量和淀粉水解酶活性测定

在播种后 10 和 20 d,采集新鲜小麦幼苗,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量, $\alpha$ -淀粉酶和 $\beta$ -淀粉酶活性则用检测试剂盒(上海酶联生物公司)测定。

#### 1.3.5 产量及其构成测定

在成熟期,每小区选取 3 个 1 m 双行记录有效穗数,然后连续选取 40 穗测定穗粒数,并利用计数板测定千粒重。每小区中间收割 2 m<sup>2</sup> 测定产量,按 13% 含水量计算实际产量。

### 1.4 数据处理

录入和整理试验数据使用 Excel。方差分析和多重比较使用 Statistix 软件。绘图利用 Sigma Plot 软件。

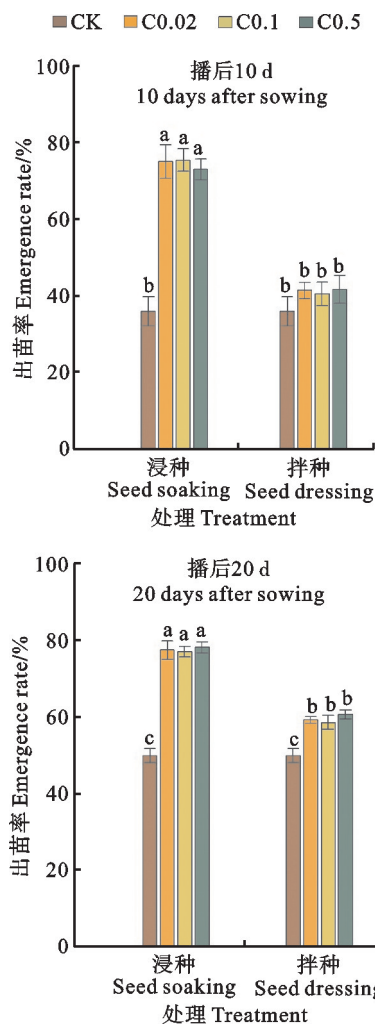
## 2 结果

### 2.1 纳米碳点对小麦出苗率的影响

纳米碳点施用方式和浓度对小麦出苗率均具有明显影响(图 1)。与 CK 相比,纳米碳点浸种和拌种后小麦播种后 10 d 和 20 d 的出苗率均不同程度增加,浸种处理的增幅分别为 37.0~39.4 和 27.0~28.2 个百分点,而拌种处理增幅分别为 4.5~5.8 和 8.6~10.7 个百分点;除播种后 10 d 拌种效果不显著外,其余纳米碳点处理均效果显著,而且浸种的效果优于拌种。同一施用方式下,不同纳米碳点浓度之间出苗率差异均不显著。

### 2.2 纳米碳点对小麦的苗期农艺性状的影响

播后 10 d,与 CK 相比,浸种和拌种处理的株高分别增加 68.2%~92.4%和 9.1%~15.2%,



图柱上不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

图 1 不同处理下小麦播种后的出苗率

Fig. 1 Seedling emergence after sowing of wheat in different treatments

地上部鲜重分别增加 68.2%~103.0%和 9.1%~13.6%,最大根长分别增加 31.4%~37.1%和 15.7%~22.9%,根鲜重分别增加 57.5%~67.5%和 12.5%~22.5%;浸种处理的各性状与 CK 差异均显著,而拌种处理与 CK 差异均不显著。播后 20 d,与 CK 相比,浸种、拌种和叶面喷施处理的株高分别增加 39.8%~52.5%、25.6%~28.1%和 23.3%~32.2%,地上部鲜重分别增加 95.3%~100.4%、46.9%~53.8%和 45.3%~56.5%,最大根长分别增加 58.4%~60.7%、28.6%~35.4%和 19.2%~34.7%,根鲜重分别增加 60.2%~85.8%、45.5%~48.1%和 36.2%~39.1%,三种施用方式处理的各性状与 CK 差异均显著。同

一施用方式下不同碳点浓度间各性状均无显著差异(表 1)。总体上,浸种对各性状的促进效果最好,其次是拌种,叶面喷施的效果最差。这说明施用纳米碳点对小麦幼苗生长有明显促进作用,但其效果与施用方式有关。

### 2.3 纳米碳点对小麦的幼苗 α-淀粉酶活性、β-淀粉酶活性和可溶性糖含量的影响

纳米碳点对小麦幼苗 α-淀粉酶和 β-淀粉酶活性及可溶性糖含量均表现出正向效应(表 2)。与 CK 相比,播后 10 d,浸种和拌种处理的 α-淀粉酶活性分别增加 32.5%~46.4%和 47.5%~63.4%,β-淀粉酶活性分别增加 104.3%~105.2%和 84.3%~86.1%,可溶性糖含量分别增加 71.4%~75.0%和 66.1%~71.4%;播后 20 d,浸种、拌种和叶面喷施处理的 α-淀粉酶活性分别增加 33.7%~47.0%、21.1%~26.2%和 28.0%~35.0%,β-淀粉酶活性分别增加 56.0%~57.4%、32.6%~41.7%和 48.0%~52.5%,可溶性糖含量分别增加 41.5%~51.5%、26.2%~32.4%和 34.6%~37.0%。纳米碳点处理的三个指标与 CK 差异均显著。同一施用方式下不同碳点浓度间各指标差异均较小,

大多数不显著。在三种施用方式中各指标均以浸种效果最好。这说明施用纳米碳点可促进淀粉分解,有助于幼苗生长,其中浸种效果最佳。

### 2.4 纳米碳点对小麦幼苗抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量的影响

纳米碳点处理可显著提高小麦抗氧化酶活性,显著降低 MDA 含量。与 CK 相比,播后 10 d,浸种和拌种处理的 SOD 活性分别增加 32.3%~36.6%和 23.3%~27.6%,CAT 活性分别增加 34.1%~38.6%和 20.0%~27.0%,POD 活性分别增加 20.0%~26.5%和 12.5%~19.4%,MDA 含量分别降低 24.5%~31.4%和 21.2%~23.1%。播后 20 d,浸种、拌种和叶面喷施处理的 SOD 活性分别增加 18.6%~33.1%、14.2%~221.3%和 25.0%~27.5%,CAT 活性分别增加 14.9%~19.7%、12.4%~21.4%和 11.5%~25.2%,POD 活性分别增加 20.8%~25.4%、8.5%~15.6%和 18.5%~20.4%,MDA 含量分别降低 24.5%~31.4%、23.1%~26.8%和 28.4%~30.8%。除播种后 20 d 的 C0.02 拌种处理 CAT 活性外,其余处理的各指标与 CK 差异

表 1 不同处理下小麦幼苗的农艺性状  
Table 1 Agronomic traits of wheat seedlings under different treatments

播种后天数 Days after sowing/d	处理 Treatment	碳点浓度 Carbon dot concentration	株高 Plant height/cm	地上部鲜重 Fresh weight of shoot / (g · plant <sup>-1</sup> )	最大根长 Maximum root length/cm	根鲜重 Root fresh weight/ (g · plant <sup>-1</sup> )	
10	浸种 Seed soaking	C0.02	11.1±1.2b	0.111±0.028b	9.2±2.2a	0.064±0.006a	
		C0.1	12.7±1.0a	0.124±0.020ab	9.6±2.8a	0.063±0.012a	
		C0.5	11.7±1.7ab	0.134±0.019a	9.5±2.1a	0.067±0.024a	
	拌种 Seed dressing	C0.02	7.4±1.1c	0.072±0.019c	8.2±1.7ab	0.047±0.007b	
		C0.1	7.6±1.7c	0.073±0.016c	8.1±3.1ab	0.045±0.019b	
		C0.5	7.2±1.0c	0.075±0.012c	8.6±2.5ab	0.049±0.015b	
	CK		6.6±0.8c	0.066±0.010c	7.0±1.6b	0.040±0.005b	
	20	浸种 Seed soaking	C0.02	16.8±1.5ab	0.353±0.031a	14.4±0.7a	0.084±0.009abc
			C0.1	17.8±2.5a	0.354±0.029a	14.3±2.0a	0.097±0.021a
C0.5			18.3±3.0a	0.362±0.035a	14.5±2.6a	0.087±0.012ab	
拌种 Seed dressing		C0.02	15.3±1.5bc	0.276±0.023b	12.2±1.3b	0.077±0.011bc	
		C0.1	15.4±1.7bc	0.278±0.030b	11.9±1.4bcd	0.077±0.006bc	
		C0.5	15.1±1.6c	0.266±0.021b	11.6±0.9bcd	0.076±0.003bc	
叶面喷施 Foliar spraying		C0.02	14.8±1.4c	0.263±0.025b	10.8±1.2cd	0.071±0.015c	
		C0.1	15.9±2.0bc	0.283±0.091b	12.2±1.9bc	0.073±0.033c	
		C0.5	15.5±2.2bc	0.281±0.092b	10.8±1.6d	0.071±0.012c	
CK		12.0±2.5d	0.181±0.047c	9.0±1.6e	0.052±0.021d		

同一列数值后不同字母表示同一取样时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different letters after the values in the same columns indicate significant differences among different treatments at the same sampling stages at 0.05 level. The same in tables 2-4.

表 2 不同处理下小麦幼苗  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶活性和可溶性糖含量Table 2 Activities of  $\alpha$ -amylase and  $\beta$ -amylase and content of soluble sugar in wheat seedlings under different treatments

播种后天数 Days after sowing/d	处理 Treatment	碳点浓度 Carbon dot concentration	$\alpha$ -淀粉酶活性 $\alpha$ -amylase activity/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\beta$ -淀粉酶活性 $\beta$ -amylase activity/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	可溶性糖含量 Soluble sugar content/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	
10	浸种 Seed soaking	C0.02	39.1 $\pm$ 0.4b	23.5 $\pm$ 0.2a	9.6 $\pm$ 0.2ab	
		C0.1	42.7 $\pm$ 1.0a	23.5 $\pm$ 0.5a	9.7 $\pm$ 0.1a	
		C0.5	43.3 $\pm$ 0.1a	23.6 $\pm$ 0.3a	9.8 $\pm$ 0.1a	
	拌种 Seed dressing	C0.02	35.1 $\pm$ 0.5d	21.2 $\pm$ 0.6b	9.3 $\pm$ 0.2c	
		C0.1	36.5 $\pm$ 0.9c	21.3 $\pm$ 0.4b	9.3 $\pm$ 0.1bc	
		C0.5	38.8 $\pm$ 0.6b	21.4 $\pm$ 0.4b	9.6 $\pm$ 0.2abc	
	CK		26.5 $\pm$ 0.9e	11.5 $\pm$ 0.7c	5.6 $\pm$ 0.4d	
	20	浸种 Seed soaking	C0.02	41.4 $\pm$ 0.5cd	24.8 $\pm$ 0.5a	10.5 $\pm$ 0.1ab
			C0.1	45.5 $\pm$ 0.4a	24.9 $\pm$ 0.2a	10.6 $\pm$ 0.1ab
C0.5			45.0 $\pm$ 1.0ab	25.0 $\pm$ 0.4a	11.2 $\pm$ 0.2a	
拌种 Seed dressing		C0.02	37.5 $\pm$ 0.2g	21.0 $\pm$ 0.6b	9.3 $\pm$ 0.2e	
		C0.1	37.9 $\pm$ 0.9f	21.9 $\pm$ 0.3b	9.8 $\pm$ 0.1de	
		C0.5	39.1 $\pm$ 0.5e	22.5 $\pm$ 0.2b	9.8 $\pm$ 0.1cd	
叶面喷施 Foliar spraying		C0.02	39.6 $\pm$ 0.3e	23.5 $\pm$ 0.4a	10.0 $\pm$ 0.1cd	
		C0.1	40.6 $\pm$ 0.9de	23.7 $\pm$ 0.4a	10.0 $\pm$ 0.0bc	
		C0.5	41.8 $\pm$ 0.5bc	24.2 $\pm$ 0.5a	10.1 $\pm$ 0.2abc	
CK			31.0 $\pm$ 1.1h	15.9 $\pm$ 0.5c	7.4 $\pm$ 0.3f	

表 3 不同处理下小麦幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量

Table 3 Antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content of wheat seedlings under different treatments

播种后天数 Days after sowing/d	处理 Treatment	碳点浓度 Carbon dot concentration	SOD 活性 SOD activity/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	CAT 活性 CAT activity/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	POD 活性 POD activity/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	MDA 含量 MDA content/ ( $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )	
10	浸种 Seed soaking	C0.02	36.9 $\pm$ 0.8b	79.9 $\pm$ 1.3b	224.8 $\pm$ 3.1b	47.1 $\pm$ 0.9c	
		C0.1	37.4 $\pm$ 0.3ab	81.4 $\pm$ 0.7ab	226.2 $\pm$ 3.7b	47.0 $\pm$ 0.7c	
		C0.5	38.1 $\pm$ 0.3a	82.6 $\pm$ 1.6a	237.1 $\pm$ 3.9a	42.8 $\pm$ 0.8d	
	拌种 Seed dressing	C0.02	34.4 $\pm$ 0.6d	71.5 $\pm$ 0.5d	210.9 $\pm$ 4.6c	49.2 $\pm$ 0.5a	
		C0.1	34.8 $\pm$ 0.5cd	72.8 $\pm$ 0.1d	214.2 $\pm$ 5.1c	48.7 $\pm$ 0.9ab	
		C0.5	35.6 $\pm$ 0.9c	75.7 $\pm$ 1.9c	223.8 $\pm$ 4.1b	48.0 $\pm$ 0.7bc	
	CK		27.9 $\pm$ 0.9e	59.6 $\pm$ 1.2e	187.4 $\pm$ 2.1d	62.4 $\pm$ 1.1e	
	20	浸种 Seed soaking	C0.02	40.7 $\pm$ 0.2b	82.5 $\pm$ 1.7bc	253.0 $\pm$ 4.0a	39.0 $\pm$ 0.3c
			C0.1	38.5 $\pm$ 0.3d	79.3 $\pm$ 1.0d	255.8 $\pm$ 5.5a	38.2 $\pm$ 0.4d
C0.5			43.1 $\pm$ 0.2a	80.8 $\pm$ 1.1c	262.8 $\pm$ 5.5a	37.7 $\pm$ 0.1d	
拌种 Seed dressing		C0.02	39.3 $\pm$ 0.4c	68.7 $\pm$ 0.5f	227.3 $\pm$ 2.5d	42.7 $\pm$ 0.8a	
		C0.1	38.0 $\pm$ 0.5de	77.5 $\pm$ 0.7d	232.8 $\pm$ 3.9d	41.9 $\pm$ 0.8a	
		C0.5	37.0 $\pm$ 0.1e	83.7 $\pm$ 1.7b	242.2 $\pm$ 2.7c	41.4 $\pm$ 0.6ab	
叶面喷施 Foliar spraying		C0.02	41.3 $\pm$ 0.4a	76.9 $\pm$ 1.2e	248.3 $\pm$ 3.8c	40.9 $\pm$ 0.7b	
		C0.1	40.5 $\pm$ 0.4bc	86.3 $\pm$ 1.5a	249.5 $\pm$ 4.0c	40.8 $\pm$ 0.7b	
		C0.5	41.2 $\pm$ 0.1a	85.1 $\pm$ 1.3a	252.3 $\pm$ 1.4b	39.2 $\pm$ 1.0c	
CK			32.4 $\pm$ 0.8f	68.9 $\pm$ 1.1f	209.5 $\pm$ 1.9e	54.5 $\pm$ 1.2e	

均显著;同一施用方式下三个不同碳点浓度间各指标差异相对较小,以 C0.5 的抗氧化酶活性最高,MDA 含量最小;三种施用方式中,浸种对抗

氧化酶活性的提高效果及对 MDA 含量的降低效应优于拌种,与喷施相当。由此可见,纳米碳点施用可改善小麦的抗氧化特性,其效果与施用方式

和浓度均有关。

### 2.5 不同纳米碳点处理小麦的产量及产量构成分析

与 CK 相比,碳点溶液浸种、拌种和叶面喷施处理均显著提高了小麦产量,增产幅度分别为 13.8%~16.0%、9.8%~10.6%和 5.4%~7.0% (表 4)。从产量构成因素分析,浸种和拌种主要是大幅增加了有效穗数,叶面喷施处理的有效穗

数略有增加,而三种施用方式对穗粒数无显著影响,只有浸种对千粒重有明显的提高作用。三种施用方式的生物量较 CK 显著增加,增幅分别为 23.9%~28.8%、18.0%~21.3%和 5.8%~10.5%。施用碳点对小麦收获指数无显著影响。同一施用方式下不同碳点浓度间各性状均无显著差异。

表 4 不同处理小麦产量及产量构成

Table 4 Yield and yield components of wheat under different treatments

处理 Treatment	碳点浓度 Carbon dot concentration	产量 Yield/ (t · hm <sup>-2</sup> )	有效穗数 Panicle number/ (×10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grains per spike	千粒重 Thousand-grain weight/g	生物量 Biomass/ (t · hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index
浸种 Seed soaking	C0.02	10.3±0.08ab	691.7±12.0a	46.0±0.3a	45.0±0.1a	29.7±1.2a	0.48±0.01a
	C0.1	10.2±0.09ab	711.7±25.5a	43.4±2.9a	44.8±0.1ab	28.5±1.4ab	0.49±0.01a
	C0.5	10.4±0.21a	703.3±19.5a	46.2±0.8a	45.0±0.1a	29.7±0.5a	0.49±0.01a
拌种 Seed dressing	C0.02	9.9±0.02bc	620.0±13.5bc	46.1±0.7b	44.8±0.1ab	27.2±0.1bc	0.47±0.02a
	C0.1	9.9±0.32bc	641.7±12.0b	46.5±0.8a	44.6±0.3bc	27.7±0.16abc	0.48±0.01a
	C0.5	9.9±0.23bc	618.3±16.5bc	46.6±0.9a	44.6±0.1bc	27.9±0.19ab	0.46±0.02a
叶面喷施 Foliar spraying	C0.02	9.5±0.04d	571.7±12.0de	47.6±1.2a	44.0±0.1d	24.4±0.69de	0.49±0.01a
	C0.1	9.6±0.07cd	583.3±24.0cd	47.1±0.6a	44.3±0.2cd	24.7±0.15de	0.49±0.01a
	C0.5	9.6±0.10cd	580.0±19.5cde	47.5±0.7a	44.4±0.0cd	25.5±2.32cd	0.48±0.02a
CK		9.0±0.48e	536.7±28.5e	47.5±0.8a	44.3±0.2cd	23.0±0.18e	0.49±0.02a

### 3 讨论

小麦是中国主要粮食作物之一,苗全、苗齐和苗壮是小麦获得高产的基础,因此出苗率和出苗质量是小麦高产栽培管理的重要指标之一<sup>[13]</sup>。出苗质量也会影响小麦最佳群体结构的构建。高质量出苗可提高幼苗抗逆能力,可使小麦安全越冬,为高产优质创造条件。研究证明,用纳米碳点材料处理作物种子可以提高其发芽率、发芽势等相关指标<sup>[14]</sup>。植株鲜重和干重可反映小麦幼苗生长状况<sup>[15]</sup>。本研究中,用纳米碳点浸种和拌种后,小麦出苗率有较大幅度增加,播种后 20 d 出苗率进一步提升。纳米碳点也促进了小麦幼苗生长,幼苗的株高、地上部鲜重、最大根长和根鲜重较 CK 明显增加。小麦幼苗根系的伸长有利于植株对养分和水分的吸收和利用。纳米碳点的上述作用可能是因为其能够穿刺小麦根细胞壁,提高细胞和根组织的吸水能力,从而促进种子萌发、组织和个体生长发育<sup>[16]</sup>,有利于小麦快速形成壮苗和安全越冬,对中后期植株生长发育也会有积极的作用。

淀粉酶普遍存在于植物体内,特别是禾谷类种子萌发后淀粉酶活性最强,因而淀粉酶活性高

低可以衡量种子萌发速率,还可作为农作物抗逆性评价的生化指标<sup>[17]</sup>。本研究表明,施用纳米碳点可提高小麦幼苗 α-淀粉酶、β-淀粉酶活性,且淀粉酶活性随着小麦播种后天数的增加而增强。其中,浸种处理对淀粉酶活性的提高作用优于拌种和叶面喷施处理,但相同施用方式下不同碳点浓度间无显著差异。

可溶性糖是植物的主要碳素营养,是构建植物细胞的重要物质,为植物各种生命活动提供能量,叶片中可溶性糖含量的高低是反映植株生长特性和光合能力的重要生理指标<sup>[18]</sup>。可溶性糖可为植物提供大量的能量和代谢中间产物,其累积量会直接影响植物后续的营养生长、生殖生长以及两者的转变过程<sup>[19]</sup>。研究发现,添加纳米碳点可提高叶片的可溶性糖含量<sup>[20]</sup>。本研究中,与 CK 相比,施用纳米碳点提高了小麦幼苗的可溶性糖含量。小麦的可溶性糖在不同施用方式下存在差异,其中浸种处理的增加幅度最大,相同施用方式下不同碳点浓度间无显著差异,表明纳米碳点在本试验设计的浓度范围对小麦幼苗生长发育均有促进作用,在该浓度范围之外的效果如何仍需进一步试验分析。播后 20 d,三种施用方式的可溶性糖含量增加依然较明显。可溶性糖含量可

以为蛋白质、氨基酸、脂肪的合成和积累提供碳架,并可通过氧化磷酸化作用为它们的合成和积累提供必需的氧化还原动力<sup>[21-22]</sup>。因此,施用纳米碳点后小麦可溶性糖含量的提高可促进小麦幼苗生长和抗逆性,对后续籽粒产量和品质的提升也有正向作用。

抗氧化酶(POD、SOD和CAT)是植株体内活性氧清除系统中3种重要的保护酶,能够阻止活性氧(ROS)在植物体内的积累<sup>[23]</sup>。纳米碳点可作为一种植物生长调节物质,通过调控作物体内的抗氧化酶活性和MDA含量,进而参与多种非生物胁迫的应答<sup>[10]</sup>。MDA是膜质过氧化分解的产物之一,其含量可代表膜质过氧化程度,间接反映植物组织的抗氧化能力<sup>[24]</sup>。本研究发现,小麦幼苗的抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性总体表现为随着纳米碳点浓度的增加而不断增强,MDA含量则随着浓度的增加呈现明显下降的趋势,且三种施用方式下MDA含量都明显低于CK。前人研究认为,碳纳米管能够刺激水稻根部,使超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等活性随之上升,从而减轻氧化压力<sup>[25]</sup>。马兴立等研究结果显示,不同浓度的纳米碳点处理可显著降低花生幼苗叶片MDA含量,提高幼苗可溶性糖含量,增强花生幼苗SOD、POD、CAT的活性<sup>[14]</sup>。本研究结果与前人研究一致。

目前在农业上大部分纳米碳点试验都是在与肥料结合的基础上展开。有研究结果显示,纳米碳点与肥料配施可明显增加农作物产量<sup>[26-27]</sup>。在本试验中,与CK相比,浸种、拌种和喷施处理对小麦产量均有明显的提升效应。从产量构成看,浸种和拌种处理增产的原因主要是大幅增加了有效穗数,叶面喷施处理的有效穗数略有增加,但三种处理对穗粒数和千粒重影响相对较小,表明促进小麦成穗是碳点对小麦产量提升的主因。这或许是因为纳米碳点的吸附效应,纳米碳点可主动携带大量的水分,在植物吸收水分和碳点的过程中,会携带大量氮、磷、钾等元素进入植物体内,从而改善植株营养状况,促进分蘖发生和有效穗形成,最终提高产量<sup>[28-29]</sup>。本研究结果还表明,三种施用方式中,浸种不管在出苗率或农艺性状上和生理特征上的最终效果都优于拌种或叶面喷施,可能原因是浸种使种子与碳点能充分接触并吸收利用,可更好发挥其作用,叶面喷施受施用时的环境如温度、风力、降水等因素,影响碳点的吸收。

尽管本研究中碳点对小麦的生长有促进作用,但前人也观察到其对作物生长的抑制作用<sup>[30]</sup>。因此,对碳点在小麦上的应用效果及其机理仍需展开系统深入的研究,包括种子和植株对碳点的吸收和运输,植株内碳点的积累和分配,碳点促进种子萌发和增产的生理和分子机理。

## 4 结论

本试验条件下,在合适的碳点浓度范围内(0.02~0.5 mg·mL<sup>-1</sup>),浸种、拌种和叶面喷施均能促进小麦幼苗生长发育和增加产量。利用碳点水溶液浸种和拌种能大幅增加小麦播种后出苗率,浸种、拌种和出苗后叶面喷施均能促进幼苗地上部和根系生长,同时提高了幼苗碳代谢和抗氧化酶活性,增加了幼麦苗可溶性糖含量,降低了MDA含量,增强植株抗逆性,从而形成壮苗,有利于产量形成。从增产效果而言,用碳点浸种和拌种对小麦出苗率和生长的积极作用更显著,生产上可以根据实际情况选用合适的施用方式。

### 参考文献:

- [1]李波,魏亚凤,季桦,等.稻草还田与不同耕作方式对小麦出苗以及产量的影响[J].中国农学通报,2012,28(24):122.  
LI B, WEI Y F, JI H, *et al.* Effects of rice straw returned to the field and different tillage methods on seeding emergence and yield of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(24): 122.
- [2]SOLTANI A, ROBERTSON M J, TORABI B, *et al.* Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1-4): 156.
- [3]卢秉林,车宗贤,包兴国,等.留茬免耕播种对河西绿洲灌区春小麦出苗和产量的影响[J].应用生态学报,2021,32(9):3249.  
LU B L, CHE Z X, BAO X G, *et al.* Effects of no-tillage sowing with crop stubbles on seeding emergence and yield of spring wheat in Hexi Oasis Irrigated Area, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3249.
- [4]贾广杰.小麦、花生、玉米间作套种高产高效栽培技术探析[J].种子科技,2023,41(18):64.  
JIA G J. Analysis on high-yield and high-efficiency cultivation techniques of wheat, peanut and corn intercropping [J]. *Seed Science & Technology*, 2023, 41(18): 64.
- [5]董元杰,陈为峰,贺明荣.缓释外源一氧化氮(NO)与缓释水杨酸(SA)对盐胁迫下冬小麦生理特性的影响[J].土壤通报,2018,49(3):623.  
DONG Y J, CHEN W F, HE M R. Effects of slow release exogenous nitric oxide and slow release salicylic acid on physiological characteristics of winter wheat under salt stress [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3): 623.
- [6]高安.小麦不同种衣剂效果对比[J].安徽农业科学,2016,44(16):46.  
GAO A. Comparative test on the effects of different seed-dressing agents of wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural*

- Sciences*, 2016, 44(16): 46.
- [7] 汪梦竹, 慕小倩, 李玉菲, 等. 油菜和小麦种苗根系对乙草胺的耐性差异分析[J]. 植物保护学报, 2017, 44(2): 337.  
WANG M Z, MU X Q, LI Y F, *et al.* Analysis of acetochlor tolerance in root of *Brassica napus* L. and *Triticum aestivum* L. [J]. *Journal of Plant Protection*, 2017, 44(2): 337.
- [8] 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.  
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.
- [9] 陆长梅, 张超英, 温俊强, 等. 纳米材料促进大豆萌芽、生长的影响及其机理研究[J]. 大豆科学, 2002, 21(3): 168.  
LU C M, ZHANG C Y, WEN J Q, *et al.* Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism [J]. *Soybean Science*, 2002, 21(3): 168.
- [10] LI G, XU J, XU K. Physiological functions of carbon dots and their applications in agriculture: A review [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(19): 2684.
- [11] LI Y, XU X, WU Y, *et al.* A review on the effects of carbon dots in plant systems [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2020, 4(2): 437.
- [12] 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.
- [13] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 河西灌区不同耕作与秸秆还田方式对春小麦出苗及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 180.  
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, *et al.* Effect of tillage and straw retention mode on seedling emergence and yield of spring wheat in the Hexi Irrigation Area [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 180.
- [14] 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.  
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.
- [15] 张靖, 张超一, 宋海妹. 海藻提取物作为拌种增效剂对小麦种子生长发育的影响[J]. 肥料与健康, 2023, 50(2): 44.  
ZHANG J, ZHANG C Y, SONG H M. Effects of seaweed extract as seed dressing synergist on the growth and development of wheat seeds [J]. *Fertilizer & Health*, 2023, 50(2): 44.
- [16] 姜余梅, 刘强, 赵怡情, 等. 碳纳米管对水稻种子萌发和根系生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(5): 1010.  
JIANG Y M, LIU Q, ZHAO Y Q, *et al.* Effects of carbon nanotubes on seed germination and root growth of rice [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(5): 1010.
- [17] 张冲. 植物淀粉酶活力研究[J]. 现代农业科技, 2011(9): 13.  
ZHANG C. Research on activity of plant amylase [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(9): 13.
- [18] 陆成彬, 张伯桥, 高德荣, 等. 施氮量与追肥时期对弱筋小麦扬麦9号产量和品质的影响[J]. 扬州大学学报, 2006, 27(3): 62.  
LU C B, ZHANG B Q, GAO D R, *et al.* Effect of nitrogen application rate and topdressing stage on grain yield and quality of weak-gluten wheat [J]. *Journal of Yangzhou University*, 2006, 27(3): 62.
- [19] 王辉, 孙耀清, 杨乐, 等. 3种茶花叶片可溶性糖与可溶性蛋白含量的年变化[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 105.  
WANG H, SUN Y Q, YANG L, *et al.* Annual changes of soluble sugar and soluble protein contents in leaves of three *Camellia* species [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(11): 105.
- [20] FAN L L, WANG Y H, SHAO X W, *et al.* Effects of combined nitrogen fertilizer and nano-carbon application on yield and nitrogen use of rice grown on saline-alkali soil [J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, 10(1): 558.
- [21] 张运红, 赵小明, 尹恒, 等. 寡糖浸种对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(6): 16.  
ZHANG Y H, ZHAO X M, YIN H, *et al.* Effects of seed soaking with oligosaccharides on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(6): 16.
- [22] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 857.  
ZHANG Y X, ZHANG L P. Effects of heavy metals on membrane lipid peroxidation, proline and soluble sugar in roots of *Hordeum vulgare* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 857.
- [23] 严重玲, 洪业汤, 林鹏, 等. 酸雨胁迫下, 稀土元素对菠菜膜保护系统作用[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 543.  
YAN C L, HONG Y T, LIN P, *et al.* The effect of acid rain stress on membrane protective system of spinach and the conservation of rare earth elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(4): 543.
- [24] 乔绍俊, 李会珍, 张志军, 等. 盐胁迫对不同基因型紫苏种子萌发、幼苗生长和生理特征的影响[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4): 499.  
QIAO S J, LI H Z, ZHANG Z J, *et al.* Effect of salinity on seed germination, seedling growth and physiological changes in *Perilla frutescens* [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(4): 499.
- [25] 颜识涵. 碳纳米管促进玉米和水稻种子萌发生长的分子机制[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.  
YAN S H. Molecular mechanism of carbon nanotubes promoting germination and growth of corn and rice seeds [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [26] 李嘉欣, 武雪萍, 李晓秀, 等. 纳米碳添加对土壤速效养分和小油菜产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 108.  
LI J X, WU X P, LI X X, *et al.* Effect of nanocarbon addition on soil available nutrients and yield of *Brassica chinensis* L. [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 108.
- [27] 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.  
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.
- [28] 王艳, 韩振, 张志明, 等. 纳米碳促进大豆生长发育的应用研究[J]. 腐植酸, 2010(4): 17.  
WANG Y, HAN Z, ZHANG Z M, *et al.* Effect of nano-carbon on soybean growth [J]. *Humic Acid*, 2010(4): 17.
- [29] 刘安勋, 廖宗文. 纳米材料对水团簇的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15780.  
LIU A X, LIAO Z W. Effects of nano-materials on water clusters [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(36): 15780.
- [30] CHEN J, DOU R, YANG Z, *et al.* The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Nanotoxicology*, 2016, 10(6): 818.