

陈绕生,薛林宝. 纳米硒、铜对干旱胁迫下番茄生长、光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):127-134.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.021

纳米硒、铜对干旱胁迫下番茄生长、光合特性及产量的影响

陈绕生¹, 薛林宝²

(1. 江苏联合职业技术学院植物工程系, 江苏淮安 223200; 2. 扬州大学园艺园林与植保学院, 江苏扬州 225009)

摘要:随着农业技术的发展,越来越多的纳米技术已应用于农业生产中,然而纳米肥料对植物的影响尚不清楚。采用盆栽试验,研究干旱胁迫下施用纳米铜(Cu NPs)、纳米硒(Se NPs)对番茄生长、光合生理特性及产量的影响。结果表明,干旱胁迫(DS)条件下番茄干物质累积、根系形态、光合生理代谢及产量皆受到显著影响。DS条件下,与对照(CK)相比,施用Cu NPs(CU)、Se NPs(SE)及二者结合施用(CU+SE)处理均可有效增加番茄植株地上部、根系干物质累积量及根系性状指标,提高光合色素(叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素)含量、光合特征参数、叶绿素荧光参数及上调表达光合作用基因(*PetE*、*Psb28*),处理间整体呈CK<CU<SE<CU+SE。正常水分(WW)条件下,与CK相比,施用Cu NPs、Se NPs可提高光合生理参数,但对植株生长参数及产量无明显影响。与WW条件下的CK相比,DS条件下纳米材料处理(CU、SE、CU+SE)植株生长及光合生理特征参数整体较低;产量变幅为-4.53%~-0.22%,且处理间差异不显著。可见干旱胁迫下施用Cu NPs、Se NPs可促进番茄植株生长发育、提高光合作用及维持产量,以二者结合施用处理效果较好。

关键词:纳米颗粒;番茄;干旱胁迫;荧光参数;基因表达水平;产量

中图分类号:S641.201

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2022)12-0127-08

随着温室效应带来的气候持续变暖,干旱性问题已成为全球植物生长和粮食安全生产面临的主要威胁之一^[1]。目前,世界上有大面积耕地处于干旱或半干旱状态,干旱胁迫可对植物生长发育及生理代谢产生显著影响,包括水分利用效率、养分吸收、光合效率、总叶绿素含量以及激素水平等^[2],从而对农作物的生长发育、产量及品质等具有不利影响。目前针对缓解干旱环境下作物生长发育的相关技术已报道了微生物策略、保水剂研发及品种培育等^[3-4]。为增加作物种子活力、抗逆性以及提高粮食品质,施用硅(Si)、铜(Cu)以及硒(Se)等有益

元素已成为农业生产中的必要措施^[5]。随着农业技术的发展,越来越多的纳米农药、纳米肥料已应用于农业生产中,为提高作物生产力和作物保护提供了新思路。

最近的研究表明,由于纳米颗粒(<100 nm)类似于蛋白质等生物分子,能够穿过细胞膜^[6],其物理、化学性质与大颗粒的常规种类存在功能差异^[7]。因此与养分有效态相比,纳米颗粒(NPs)形式的元素生物利用度和功能效率在植物生长和代谢方面效果更佳^[7]。目前,在农业生产中以Se、Cu、锌(Zn)等为主的几种类型的纳米材料已逐渐得到运用^[8]。且研究发现,纳米硒(Se NPs)具有潜在的抗氧化活性,在花生(*Arachis hypogaea* L.)的栽培中,Se NPs可增加花生植株的抗氧化酶和非酶抗氧化剂活性^[9];提高黄瓜作物中用于渗透保护的光合能力、脯氨酸和总可溶性碳水化合物的积累^[10]。目前与植物相关的研究中,纳米铜(Cu NPs)是目前运

收稿日期:2021-11-28

基金项目:江苏省创新课题(编号:SN1703)。

作者简介:陈绕生(1973—),男,江苏淮安人,硕士,副教授,主要从事园艺生产研究。E-mail:1048483719@qq.com。

通信作者:薛林宝,博士,教授,主要从事园林、园艺研究。E-mail:xlbb@yzcn.net。

[25] 葛俊杰,王延红,刘长仲. 南方根结线虫初始接种量对番茄生长的影响及防治指标研究[J]. 甘肃农业大学学报,2016,51(5): 57-61.

[26] 王永强,李英东,郭正红,等. 臭氧水对土壤微生物群落的影响[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),2018,47(6):688-696.

[27] 陈展,王效科,段晓男,等. 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响[J]. 生态学报,2007,27(5):1803-1808.

[28] 扈进冬,吴远征,魏艳丽,等. 木霉拌种剂对小麦根际土壤真菌群落多样性的影响[J]. 山东科学,2019,32(1):46-51.

用最多的纳米材料类型,并且已表明低浓度使用时具有最佳效果;施用 10 mg/L Cu NPs 可以减少番茄植株对 Na^+ 的吸收与积累,有助于缓解盐胁迫带来的损伤^[11]。此外,10 mg/L Cu NPs 亦可诱导植物的抗氧化防御系统,诱导抗氧化化合物的合成^[12]。

番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 是一种在全球广泛种植的蔬菜,已成为茄科作物遗传和抗逆性研究的模式植物。大多数番茄品种对于干旱环境敏感,尤其是在早期生长阶段。光合作用是植物生长和作物产量的基础,已经在不同植物中观察到 Cu、Se 对于干旱条件下植物叶片的光合作用具有显著的促进作用^[5,13]。然而,关于干旱胁迫下 Cu NPs、Se NPs 对光合作用的调节机制知之甚少。本研究基于前人关于 Cu NPs、Se NPs 施用水平的研究,探索干旱胁迫下 Cu NPs、Se NPs 对番茄植株生长、光合特性、光合作用基因表达水平及番茄果实品质的影响。

1 材料与方法

1.1 供试地点与供试材料

试验于 2021 年 5—6 月在江苏联合职业技术学院园艺生长调控气候室进行。供试番茄品种为中蔬 6 号,来自河北省青县纯丰蔬菜良种繁育场。种子先采用 0.5% 次氯酸钠进行表面灭菌 25 min,然后浸入 55 ℃ 蒸馏水中 30 min,再在 28 ℃ 培养箱中双层润湿滤纸上催芽 2 d,然后播种在复合基质中,将其放置于 25 ℃ 光照培养箱中,光暗时间比为 14 : 10,相对湿度为 65% ~ 75%,培养至 4 叶期。

供试纳米硒、纳米铜直径分别为 5 ~ 18、35 ~ 42 nm,皆为球形,来自墨西哥萨尔蒂洛应用化学研究中心,两者皆使用壳聚糖作为稳定剂,其制备工艺参考文献[14]。将 Cu NPs、Se NPs 粉末加入超纯水中,超声(100 W、40 kHz)30 min,使粉末均匀分散于超纯水中形成悬浮溶液备用^[15]。

1.2 试验设计

试验设置:以基质水分含量为主处理,施用纳米材料为次处理。次处理为 CK(不施用 Cu NPs、Se NPs)、CU(仅施用 Cu NPs)、SE(仅施用 Se NPs)、CU + SE(施用 Cu NPs、Se NPs),以上处理皆基于培养基质正常含水率(WW)、干旱胁迫(DS),共 8 个处理组合。其中基质正常含水率为 $(80 \pm 5)\%$,干旱处理采用自然干旱法,基质含水率为 $(55 \pm 5)\%$,程度介于轻度至中度干旱;Se NPs、Cu NPs 相关处理浓度皆为 10 mg/L,各处理重复 5 次。

盆栽装置为塑料桶,盆高 20 cm,上口径 17 cm,底径 15 cm。采用泥炭土与蛭石(体积比为 2 : 1)作为培养基质,每盆 3 kg。按照上述处理设置土壤含水率,将 4 叶期的番茄幼苗转移至相应处理的培养基质中。Se NPs、Cu NPs 采用根施方式施入,为避免 Se NPs、Cu NPs 对幼苗产生冲击效应,采用 Se NPs、Cu NPs 分次施入的办法,即每间隔 3 d 施用 1 次,共 10 次,每次施用 10 mL,处理总用量为 100 mL。同时采用配备 ML2x 探头(ThetaProbe soil moisture devices,UK)的 HH2 土壤水分速测仪(HH2 moisture meter Delta - T Devices,UK)测定培养基质含水率,采用滴灌补充水分以确保基质水分在试验设定的范围内。此外,每 2 周向盆体中加入 50 mL 1/2 山崎番茄配方营养液。试验培养 101 d。

1.3 样品采集及测定分析

1.3.1 番茄生物量、根系形态参数及产量测定 培养结束后选取每个处理长势相同的植株,采用清水小心清洗以获得完整根系。采用 Epson Perfective V700 photo 扫描仪对根系进行扫描,并采用 WinRHIZO 根系分析系统(Regent Instruments LA2000,Canada)分析根系体积、总根长、根系表面积、根系平均直径等参数。

生物量测定:将番茄地上部、根系分离于 105 ℃ 杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒质量并称量记录。产量由结果数及果实年均质量构成,采用人工计数及称质量法记录。

1.3.2 光合色素含量、光合特征参数及荧光参数测定 光合色素含量及荧光参数测定于 Se NPs、Cu NPs 施用结束后的第 1 天,即移栽后 31 d 进行。测量最近完全展开的第 2 张叶片上的光合色素含量,光合色素包含叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素,三者皆采用丙酮-乙醇混合浸提,采用紫外分光光度计(UV - 2450,Shimadzu,Japan)分别在 665、649、470 nm 处测定,具体步骤参照高俊凤的方法^[16]。

采用 LI - 6200 便携式光合测定系统(LI - 6200;LI - COR, America)测定叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)等指标。叶室温度设置为 (25 ± 1) ℃, CO_2 浓度为 380 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,光量子密度为 900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

采用配备叶绿素荧光系统的光合作用系统(LI - 6200;LI - COR, America)测量第 2 张完全展开的叶片的叶绿素荧光参数。经过 30 min 暗处理,测定暗适应的最小荧光(F_0)、饱和最大荧光(F_m)

及正常光照下的最小荧光(F_o')、荧光上升到能化类囊体的最大荧光(F_m')及稳态荧光(F_s),各处理重复 3 次。叶绿素荧光参数中,光系统 II (PS II) 的最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, 实际光化学效率 $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$, PS II 有效的量子效率 $E_q = (F_m' - F_o')/F_m'$, 光化学荧光猝灭系数 $q_p = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$ 。

1.3.3 光合作用基因表达水平测定 光合作用基因表达水平测定于移栽后 31 d 进行,此后连续 6 d 进行基因表达监测。番茄叶片光合作用基因(*PetE*、*Psb28*)的特异性引物序列(表 1)参照 Zhang 等的研究^[17]。使用 RNeasy Plant Mini Kit (DP419, TIANGEN, 北京, 中国)按照试剂盒说明书提取总 RNA。RNA 浓度采用紫外可见分光光度法在 230、260、280 nm 处测定,并采用 1% 琼脂糖凝胶电泳检查其完整性。采用 PrimeScript™ RT reagent Kit 和

gDNA Eraser (TaKaRa, Shiga, Japan) 对总 RNA 进行逆转录构建 cDNA。将获得的 cDNA 用不含 RNase 的双蒸水 (ddH₂O) 稀释至 100 ng/μL, 然后使用 SYBR® Premix Ex Taq™ (TaKaRa Bio, Shiga, Japan) 将 1 μL cDNA 用于 qRT-PCR 分析。所有上述反应均在 BioRad CFX-96 实时 PCR 系统 (Bio-Rad, USA) 上进行。

反应体系:终体积为 25 μL,其中含有 12.5 μL SYBR® Premix Ex Taq™ II、1.0 μL 正向引物 (10 μmol/L)、1.0 μL 反向引物 (10 μmol/L)、1.0 μL cDNA 和 9.5 μL ddH₂O。反应条件:预变性 95.0 °C 5 min;变性 95.0 °C 10 s,退火 56.0 °C 30 s,延伸 72.0 °C 20 s,共 40 个循环。采用番茄的肌动蛋白基因 (*Actin*) 当作内参对照。采用 2^{-ΔΔC_T} 断层扫描方法计算目标基因的相对转录丰度。

表 1 光合作用相关基因的 qRT-PCR 引物序列信息

基因	引物序列(5'→3')	产物长度 (bp)
<i>Actin</i>	F-primer: 5'-GATGGTGTGACCCACAC-3'; R-primer: 5'-ATTCCAGCAGCTTCCATTC-3'	350
<i>PetE</i>	F-primer: 5'-GTTCCCAACACACGTCGTA-3'; R-primer: 5'-GACAGTAACCTTTGCCAACCA-3'	194
<i>Psb28</i>	F-primer: 5'-GATTGTGCCTATCCCGTTC-3'; R-primer: 5'-ATCAAACCTGAATATAGCCAT-3'	257

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2013 进行数据整理,采用 SPSS 19.0 软件中邓肯多重比较法对试验数据进行统计分析 ($\alpha=0.05$),采用 Origin 8 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄植株干物质累积和根系形态特征的影响

由表 2 可知,正常持水量处理 (WW) 条件下各处理的干物质累积量及根系性状参数皆高于干旱胁迫 (DS) 条件下的所有处理,表明干旱胁迫对植株生长具有不利影响。就本试验数据来看,无论在 WW 还是 DS 条件下,地上部干物质、根系干物质及根系性状指标 (总根长、根系表面积、根系直径、根系体积) 皆表现为 CK < CU < SE < CU + SE,表明适量施用 Se NPs、Cu NPs 均可对植株生长具有促进作用,且二者组合使用处理效果最佳。与 DS 条件下的 CK 相比,DS 条件下的 CU、SE、CU + SE 处理效果不一;整体而言,以 DS 条件下的 CU、SE 处理小于 WW 条件下的 CK,DS 条件下的 CU + SE 处理大于 WW 条件下的 CK,上述指标中 DS 条件下的 CU、

SE、CU + SE 处理较 WW 条件下的 CK 变幅分别为 -4.94% ~ 7.21%、-12.73% ~ 31.74%、-29.07% ~ -2.85%、-4.91% ~ 21.79%、-3.36% ~ 5.88%、-13.33% ~ 8.58%。

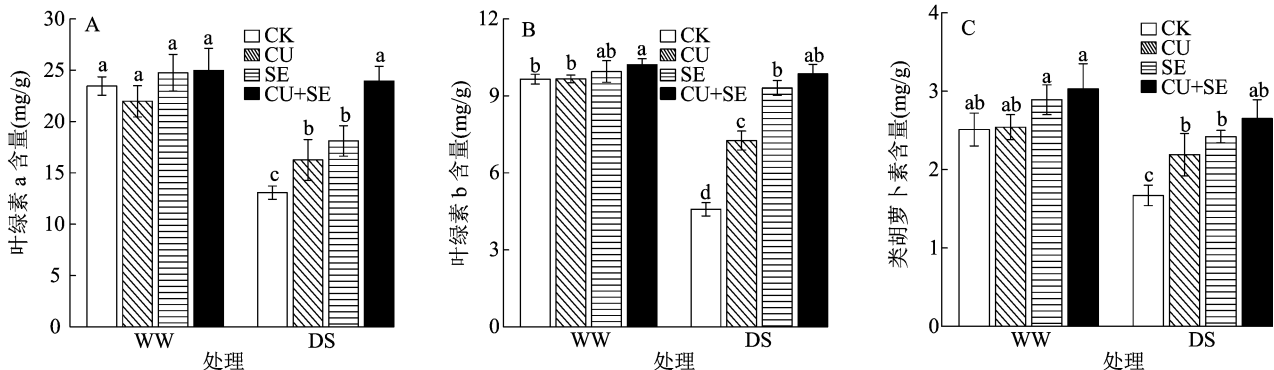
2.2 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄叶片光合色素的影响

由图 1-A 可知,叶绿素 a 含量在 WW 与 DS 的各处理中,整体来看,除 CU + SE 间无显著差异外,其余处理皆以 WW 处理显著大于 DS 处理;且无论在 WW 还是 DS 条件下,各处理皆呈 CK、CU < SE < CU + SE,其中在 WW 条件下各处理差异不显著,而在 DS 条件下,CU + SE 处理显著大于其他处理。由图 1-B 可知,叶绿素 b 含量整体以 WW 处理大于 DS 处理,且无论在 WW 还是 DS 条件下,各处理皆呈 CK < CU < SE < CU + SE,且两者条件下的 CK、CU 处理分别显著比 CU + SE 处理小 5.58%、5.48% (WW) 和 53.55%、26.37% (DS)。由图 1-C 可知,WW 条件下各处理的类胡萝卜素含量皆高于 DS 条件下的相应处理,在 WW 条件下 CK、CU 处理小于 CU + SE,但处理间均差异不显著;在 DS 条件下亦以 CK 处理最小,施用纳米颗粒处理 (CU、SE、

表 2 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄植株干物质累积和根系形态特征的影响

主处理	次处理	地上部干质量 (g)	根系干质量 (g)	总根长 (cm)	根系表面积 (cm ²)	根系直径 (mm)	根系体积 (cm ³)
WW	CK	241.06 ± 8.69c	43.82 ± 1.73d	3 773.16 ± 350.43b	739.40 ± 29.23d	1.19 ± 0.11a	51.54 ± 2.21c
	CU	266.64 ± 10.82b	52.17 ± 0.94c	3 779.86 ± 422.45b	817.40 ± 31.35c	1.19 ± 0.08a	52.15 ± 1.09c
	SE	282.18 ± 9.24ab	52.63 ± 1.36c	4 464.27 ± 150.09a	866.56 ± 12.12b	1.35 ± 0.09a	63.98 ± 1.24a
	CU + SE	297.54 ± 6.71a	64.64 ± 2.17a	4 915.84 ± 614.26a	999.16 ± 36.25a	1.36 ± 0.13a	63.09 ± 3.15a
DS	CK	140.22 ± 9.67d	29.47 ± 1.45f	2 329.77 ± 346.51c	406.59 ± 23.12e	0.99 ± 0.07b	35.26 ± 0.91e
	CU	229.16 ± 13.23c	38.24 ± 1.06e	2 676.22 ± 200.53c	703.06 ± 49.56d	1.15 ± 0.10ab	44.67 ± 2.29d
	SE	235.87 ± 6.42c	45.15 ± 2.02d	3 229.44 ± 299.86b	735.03 ± 22.57d	1.26 ± 0.11a	51.93 ± 1.20c
	CU + SE	258.44 ± 5.55b	57.73 ± 1.58b	3 665.71 ± 456.83b	900.55 ± 20.45b	1.24 ± 0.07a	55.96 ± 1.26b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。



柱上不同小写字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)。下图同
图1 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄叶片光合色素含量的影响

CU + SE) 分别显著比 CK 提高 31.14%、44.91%、58.68%。

2.3 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄叶片光合特征参数的影响

由图 2 可知,处于干旱胁迫条件下各处理的叶部净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率及气孔导度皆低于正常含水量处理。与其对应的 CK 相比,无论是在 WW 还是 DS 条件下,Cu NPs 和 Se NPs 皆整体提高了上述光合特征参数,尤其是在 DS 条件下。WW 条件下,CU 和 SE 处理的 P_n 、 C_i 、 T_r 、 G_s 分别较 CK 提高了 6.99%、26.78%、2.20%、9.09% 和 8.80%、27.99%、4.16%、31.82%;在 DS 条件下 CU 和 SE 处理则分别较 CK 提高了 57.95%、29.99%、7.55%、60.00% 和 61.50%、54.63%、27.99%、110.00%。且无论在 WW 还是 DS 条件下,CU + SE 处理皆大于 CK、CU、SE 处理,且在 DS 条件下 CU + SE 处理在任一光合指标中皆显著大于 CK。

2.4 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄叶片叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知,处于干旱胁迫条件下各处理的叶

片 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、实际光化学效率 (Φ_{PSII})、PS II 有效量子效率 (E_q) 及光化学淬灭系数 (q_p) 皆低于正常含水量处理。与其对应的 CK 相比,无论是在 WW 还是 DS 条件下,Cu NPs 和 Se NPs 皆整体提高了上述荧光参数,且 Cu NPs 与 Se NPs 组合施用 (CU + SE) 处理下各荧光参数皆具有较大值。在 WW 条件下, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 E_q 、 q_p 皆呈 CK < CU、SE < CU + CE,且除了 F_v/F_m 外,其他参数中皆表现为 CU、SE、CU + CE 处理显著大于 CK。在 DS 条件下,各荧光参数呈 CK < CU < SE < CU + CE,且在 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 E_q 、 q_p 任一指标中 CU、SE、CU + CE 处理均显著大于 CK,尤其是 E_q ,这 3 个处理分别显著比 CK 提高 89.74%、92.31%、100.00%。

2.5 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄叶片光合作用基因表达的影响

由图 4 可知,在 Cu NPs、Se NPs 施用结束后连续 6 d 的相对丰度监测中,无论在质体蓝素基因 (*PetE*) 还是光系统 II 反应中心 Psb28 蛋白基因 (*Psb28*) 皆表现为 WW 处理大于 DS 处理,表明干旱胁迫会影响光合作用基因的转录翻译。在 WW 条

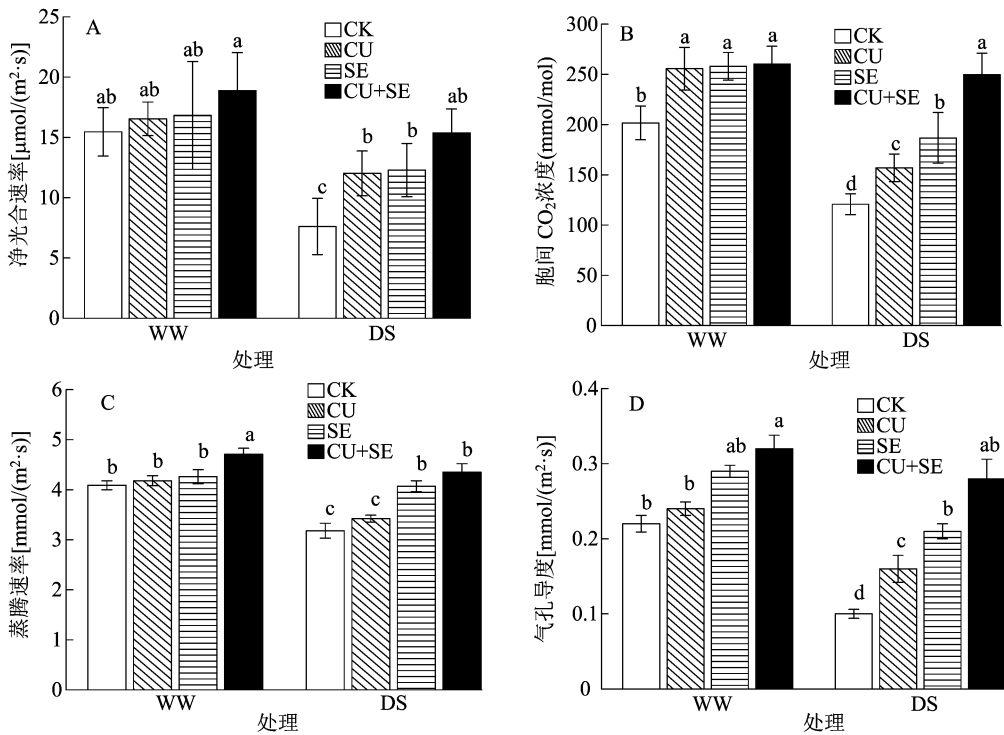


图2 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄叶片光合特征参数的影响

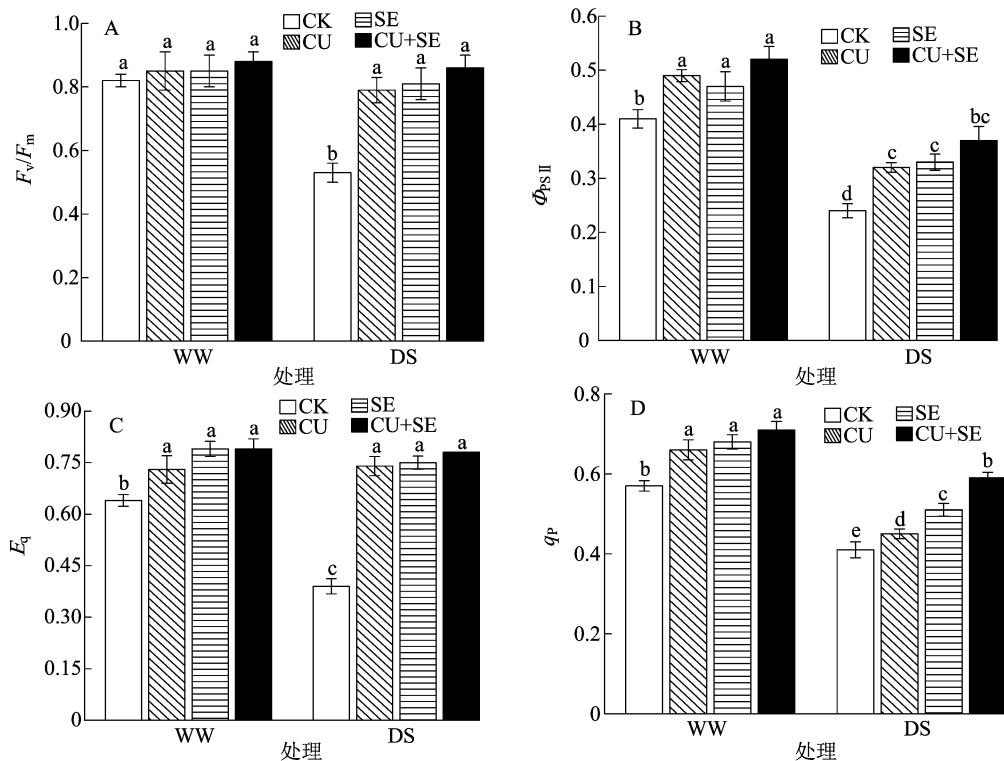


图3 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄叶片叶绿素荧光参数的影响

件下,CK、CU、SE 处理的 *PetE* 相对丰度在 6 d 中波动较小,而 CU + SE 处理呈整体增长趋势,CU + SE 处理的 *PetE* 相对丰度在 6 d 时较 1 d 时增长 32.23%,两者间差异明显;在 DS 条件下,CK 的

PetE 相对丰度呈整体下降趋势,SE 处理呈稳定趋势,CU 与 CU + SE 处理呈上升趋势,尤其表现在 CU + SE 处理中,6 d 时,CK、CU、SE 处理的 *PetE* 相对丰度分别显著比 CU + SE 处理低 63.76%、12.84%、

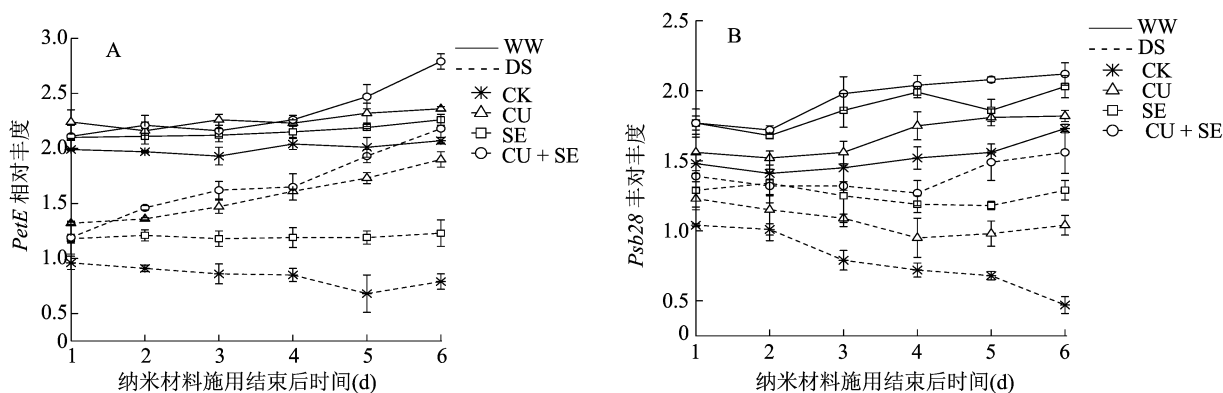


图4 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄叶片光合作用基因表达的影响

43.58% ;此时,DS 条件下 CU + SE 处理的 *PetE* 相对丰度与 WW 条件下 CK、CU 及 SE 处理相当。就 *Psb28* 相对丰度而言,连续 6 d 中皆以 WW 处理高于 DS 处理。在 WW 条件下,CK、CU、SE、CU + SE 处理皆呈整体升高趋势,但四者处理间差异较小;在 DS 条件下,CK、CU、SE 处理整体皆呈下降趋势,以 CK 表现最为明显,CU + SE 处理表现为整体升高趋势,但在为期 6 d 的监测中该处理的 *Psb28* 相对丰度皆低于 WW 条件下所有处理。

2.6 纳米硒、纳米铜对干旱胁迫下番茄产量的影响

图 5 展示了 Cu NPs、Se NPs 对干旱胁迫下番茄产量构成因子的影响。由图 5 - A 可知,在番茄结果数中整体以 WW 处理大于 DS 处理,整体而言,各处理结果数中以 DS 条件下的 CK 最低,显著低于 WW 和 DS 条件下的其他处理,同时 WW 和 DS 条件

下其他处理皆无显著差异。由图 5 - B 可知,在番茄果实平均质量中整体以 WW 处理大于 DS 处理,在 WW 条件下,各处理呈 CU + SE > SE > CU > CK,但处理间无显著差异;在 DS 条件下,各处理亦呈 CU + SE > SE > CU > CK,其中 CU、SE、CU + SE 处理间均无显著差异,三者较 CK 分别显著增加 4.86%、5.24%、6.36%。由图 5 - C 可知,产量仍以 WW 处理大于 DS 处理,且无论在 WW 处理还是 DS 处理中,皆表现为 CK < CU < SE < CU + SE,且 SE、CU + SE 处理均显著大于 CK;就所有处理的试验数据来看,DS 条件下施用纳米材料的处理(CU、SE、CU + SE)产量皆低于 WW 条件下的任一处理,其中与 WW 条件下的 CK 相比,DS 条件下施用纳米材料的处理(CU、SE、CU + SE)的产量分别下降 4.53%、3.21%、0.22%,但处理间皆差异不显著。

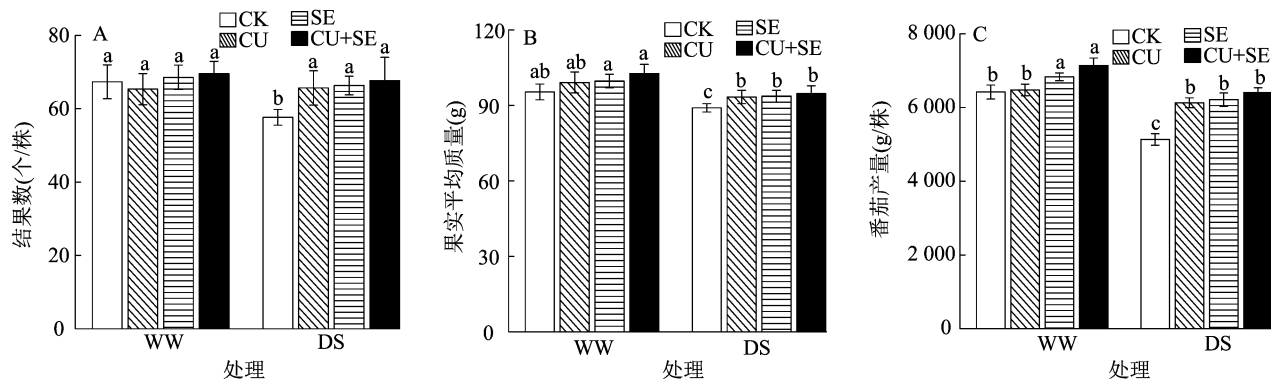


图5 Se NPs、Cu NPs 对干旱胁迫下番茄产量的影响

3 讨论与结论

干旱会对植株的生长发育、产量及品质产生不利影响,水资源短缺产生的干旱胁迫已成为全球性问题。纳米技术作为一种新兴技术,已逐渐应用于农业生产中,施用适量的纳米有益元素物质可以提高植物的抗旱性^[18]。然而,这些研究中的大多数集

中于对盐胁迫的耐受性,而在干旱环境中的研究较少。前人的研究表明,施用适量的 Se NPs 可以提高逆境环境中的植株生长^[19]。本研究表明,干旱胁迫下添加 Cu NPs、Se NPs 均显著增加了番茄植株的地上部、根系干物质累积量,表明干旱环境下施用 Cu NPs、Se NPs 是一种潜在的理想措施。根系是植物吸收水分和养分的主要营养器官,其形态特征是评

价植物胁迫耐受性的重要表征^[20]。本研究中,与正常含水率的对照相比,干旱胁迫下 CK 的总根长、根系表面积、根系直径、根系体积皆明显减小,施用 Cu NPs、Se NPs 后上述根系性状皆得到显著提升,尤其表现在 Cu NPs + Se NPs 处理(CU + SE)中。总根长、根系表面积、根系直径、根系体积的增加可增加根系对水分的吸收,从而改善水干旱胁迫下的水分状况^[21]。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,参与光能的吸收、转移、分配和转化过程,类胡萝卜素是重要的抗氧化剂,其可消散 PS II 捕光天线 II 中多余激发能量的重要物质,尤其是在胁迫环境中^[22]。在干旱胁迫环境中,PS II 光化学效率降低的原因可能与叶片光合色素含量减少有关^[23]。本研究中,添加 Cu NPs、Se NPs 显著缓解了干旱引起的叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量下降,这可有助于改善光合色素含量从而保证番茄叶片的光合作用。此外,在光合色素中,Cu NPs、Se NPs 处理的作用效果存在一定差异,这可能取决于纳米材料本身的物理特性,即物质特性、尺寸、制备工艺等决定了它们表面的电荷和自由能的特性^[24],因为纳米材料进入植物体首先在植物细胞表面对植物生理产生影响,这最终稳定细胞基础代谢从而缓解逆境对植株带来的不利影响^[8]。

作为生物量形成的生理基础,光合作用可为植物生长发育提供底物和能量,约 90% 的干物质通过光合作用转化^[25]。然而,不利的环境条件会影响光合性能。本研究表明,干旱胁迫整体降低了番茄叶片的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率及气孔导度。在逆境条件下,导致 P_n 下降的因素主要分为气孔限制和非气孔限制,当 P_n 和 C_i 同时降低时,表明由气孔限制引起,反之,则由类囊体细胞光合活性下降引起^[26]。前人的研究表明,轻度干旱下影响 P_n 的因素主要为气孔限制,而在中度、重度干旱胁迫下则为非气孔限制^[27]。本试验中添加 Cu NPs、Se NPs 皆整体提高了干旱胁迫环境中番茄叶片的 P_n ,同时 G_s 、 C_i 亦明显增加,表明 Cu NPs、Se NPs 通过调节气孔开合从而提高了番茄叶片的 P_n 。

叶绿素荧光参数是评价光合作用水平及其效率的重要表征^[28]。本研究中,与 WW 条件下相比,DS 条件下番茄的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 有所降低,而与 CK 相比施用 Cu NPs、Se NPs 处理的 F_v/F_m 均显著提高,表明 Cu NPs、Se NPs 皆可提高光化学反

应的上限。Chen 等的研究表明,添加适量的纳米物质可提高水稻在干旱条件下的 F_v/F_m ^[29],本研究的结论与之基本一致。这可能是由于 Se 和 Cu 本身是植物光化学及能量代谢主要蛋白质的催化物质,因此可以提高 PS II 中心捕获的激发能效率,减少激发能(耗散为热)在 PS II 天线中的散失。此外,无论在 WW 还是 DS 条件下,添加 Cu NPs、Se NPs 均显著提高了实际光化学效率、PS II 有效量子效率及光化学淬灭系数,这表明在干旱环境下施用 Cu NPs、Se NPs 提高了 PS II 反应中心的活力,从而激发了电子传输效率^[30],且提高光合产物转化为生物质能。这些结果表明,Cu NPs、Se NPs 可以减少干旱诱导对 PS II 的损伤,从而维持干旱条件下的干物质累积。

目前已发现在逆境环境中,施用纳米物质对植物的光合作用具有明显的促进作用^[8],但其调控机制仍然未知。质体蓝素是传递电子的主要功能物质,是光合电子传递链的主要成分^[31]。Psb28 蛋白是 PS II 色素蛋白复合物的重要亚基,与光依赖反应中的水分解密切相关。本研究表明,与 CK 相比,添加 Cu NPs、Se NPs 在培养 36 d 后显著上调了质体蓝素基因(*PetE*)及光系统 II 氧进化复合蛋白基因(*Psb28*)在干旱胁迫下的表达。因此,如本研究中观察到的,Cu NPs、Se NPs 上调 *PetE*、*Psb28* 的表达水平有助于增加电子传输速率和光化学效率。然而,在连续 6 d 的监测中,Cu NPs 与 Se NPs 对 *PetE*、*Psb28* 基因表现出的功能强度存在一定差异,单施 Cu NPs 处理的 *PetE* 相对丰度整体优于单施 Se NPs 处理,而 *Psb28* 的相对丰度则反之。这可能取决于纳米材料中的核心功能物质,Cu 是质体蓝素中重要的代谢物质及催化介质,因此在 *PetE* 基因表达中 Cu NPs 影响更大^[8,32];而在 PS II 中,Se 可修复逆境引起的叶绿体膜结构损伤、促进类囊体和机制结构重组及其膜流动性^[33],因此在 *Psb28* 基因表达中影响更大。

此外,本研究表明,在番茄产量中,无论是否处于干旱胁迫环境,Cu NPs、Se NPs 均提高了番茄结果数、平均质量及产量。同时与正常水分条件的 CK 相比,干旱胁迫处理下施用 Cu NPs、Se NPs 及 Cu NPs + Se NPs 处理的产量分别降低 4.53%、3.21%、0.22%,但处理间皆无显著差异。综上,在干旱条件下施用 Cu NPs、Se NPs 皆可促进植株生长发育、改善光合作用及保证番茄产量,单施 Se NPs 优于单施 Cu NPs,且以二者组合施用效果最佳。

参考文献:

- [1] 刘 明,吕爱锋,武建军,等. 干旱对农业生态系统影响研究进展[J]. 中国农学通报,2014,30(32):165–171.
- [2] 温 琦,赵文博,张幽静,等. 植物干旱胁迫响应的研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):11–15.
- [3] 杨 阳,申双和,马绎皓,等. 干旱对作物生长的影响机制及抗旱技术的研究进展[J]. 科技通报,2020,36(1):8–15.
- [4] 曹本福,姜海霞,刘 丽,等. 丛枝菌根菌丝网络在植物互作中的作用机制研究进展[J]. 应用生态学报,2021,32(9):3385–3396.
- [5] 黄 阔,张永强,李国慧. 化学元素硅、硒对作物健康生长作用的研究进展[J]. 植物医生,2019,32(5):16–19.
- [6] Aslani F, Bagheri S, Muhd Julkapli N, et al. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 641759.
- [7] Hochella Jr M F, Lower S K, Maurice P A, et al. Nanominerals, mineral nanoparticles, and Earth systems [J]. Science, 2008, 319(5870):1631–1635.
- [8] González – García Y, Cárdenas – Álvarez C, Cadenas – Pliego G, et al. Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress [J]. Plants, 2021, 10(2):217.
- [9] Hussein H A A, Darwesh O M, Mekki B B. Environmentally friendly nano – selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 18:101080.
- [10] Zahedi S M, Abdelrahman M, Hosseini M S, et al. Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium – nanoparticles [J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 246–258.
- [11] Hernández – Hernández H, González – Morales S, Benavides – Mendoza A, et al. Effects of chitosan – PVA and Cu nanoparticles on the growth and antioxidant capacity of tomato under saline stress [J]. Molecules, 2018, 23(1):178.
- [12] Singh A, Singh N B, Hussain I, et al. Effect of biologically synthesized copper oxide nanoparticles on metabolism and antioxidant activity to the crop plants *Solanum lycopersicum* and *Brassica oleracea* var. *botrytis* [J]. Journal of Biotechnology, 2017, 262:11–27.
- [13] 韩承华,潘瑞瑞,刘 野,等. Cu、Zn 对水蕹菜生长的影响及 Se 的缓解作用[J]. 生态学杂志,2016,35(2):470–477.
- [14] Quiterio – Gutiérrez T, Ortega – Ortiz H, Cadenas – Pliego G, et al. The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria solani* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(8):1950.
- [15] 付宇童,孙 彤,王 林,等. 纳米铜对小油菜(*Brassica chinensis* L.) 种子发芽和幼苗生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2524–2531.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [17] Zhang Y, Shi Y, Gong H J, et al. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10):2151–2159.
- [18] 宋会明,贺敬芝,梁 军,等. 叶面喷施纳米硒肥对金丝小枣产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(4):203–207.
- [19] Morales – Espinoza M C, Cadenas – Pliego G, Pérez – Alvarez M, et al. Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under NaCl stress [J]. Molecules, 2019, 24(17):3030.
- [20] 张新生,卢 杰. 根系生物量及其对根际生态系统响应的研究进展[J]. 江苏农业科学,2021,49(17):39–45.
- [21] Shi Y, Zhang Y, Han W H, et al. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:196.
- [22] 王 峰,闫家榕,陈雪玉,等. 光调控植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 园艺学报,2019,46(5):975–994.
- [23] Song A L, Li P, Fan F L, et al. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high – zinc stress [J]. PLoS One, 2014, 9(11):e113782.
- [24] Wang X P, Li Q Q, Pei Z M, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on the growth, photosynthetic traits, and antioxidative enzymes in tomato plants [J]. Biologia Plantarum, 2018, 62(4):801–808.
- [25] Wang Y, Cai S Y, Yin L L, et al. Tomato HsfA1a plays a critical role in plant drought tolerance by activating *ATG* genes and inducing autophagy [J]. Autophagy, 2015, 11(11):2033–2047.
- [26] 王志伟,王 斌,张自阳,等. 盐胁迫对不同小麦品种萌发生长及光合特性的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2021, 49(6):8–13.
- [27] 杨继刚,石圣杰,赵平平,等. 蚕沙钝化修复复合重(类)金属污染土壤的效果及对小白菜生长的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(6):832–838.
- [28] 郭卫珍,张亚利,奉树成. NaCl 胁迫对 2 个山茶品种盐害及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(3):562–569.
- [29] Chen W, Yao X Q, Cai K Z, et al. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption [J]. Biological Trace Element Research, 2011, 142(1):67–76.
- [30] Zhu Y X, Guo J, Feng R, et al. The regulatory role of silicon on carbohydrate metabolism in *Cucumis sativus* L. under salt stress [J]. Plant and Soil, 2016, 406(1/2):231–249.
- [31] Sun R X, Yang C H. Structure and function of photosystem II and the environmental response of photosynthetic membrane [J]. Acta Biophysica Sinica, 2012, 28(7):537.
- [32] 田生科,李廷轩,肖肖娥,等. 植物对铜的吸收运输及毒害机理研究进展[J]. 土壤通报,2006,37(2):2387–2394.
- [33] 姜 英,曾昭海,杨麒生,等. 植物硒吸收转化机制及生理作用研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(12):4067–4076.