

·作物水肥高效利用·

文章编号: 1672-3317(2023)12-0001-06

亚硒酸钠对苦荞光合特性及抗氧化酶活性的影响

马红梅^{1,2,3}, 王彩琴^{1,3}, 吴昕阳^{1,3}, 陆佳昊^{1,3}, 白春雨^{1,3}, 武文玥^{1,3}, 武志明²

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801;

2.山西农业大学 工学院 省部共建有机旱作农业国家重点实验室(筹), 太原 030031;

3.山西农业大学 农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801)

摘 要:【目的】探究亚硒酸钠对苦荞光合特性及抗氧化酶活性的影响。【方法】基于盆栽试验, 分别设置 CK(0 mg/kg)、Se₅(5 mg/kg)、Se₁₀(10 mg/kg)、Se₂₀(20 mg/kg)、Se₄₀(40 mg/kg) 共 5 个亚硒酸钠施用量, 研究亚硒酸钠施用量对苦荞株高、鲜质量、干质量、光合特性和抗氧化酶活性的影响。【结果】①当亚硒酸钠施用量在 5~10 mg/kg 时, 施硒显著增加苦荞生物量; 与 CK 相比, 5 mg/kg 亚硒酸钠施用量的地下部干质量、鲜质量增加 66.28%、80.00%, 10 mg/kg 亚硒酸钠施用量的苦荞株高增加 7.05%。②施硒改善了苦荞光合特性。与 CK 相比, 5~10 mg/kg 亚硒酸钠施用量的苦荞净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素量平均显著增加 7.57%、32.70%、28.12%、6.96%。同时 5 mg/kg 亚硒酸钠施用量的苦荞胞间 CO₂ 摩尔分数显著下降 13.95%, CO₂ 同化能力提升。施用亚硒酸钠对苦荞盛花期光合特性的影响最显著。③施硒对苦荞抗氧化酶活性影响作用较大; 5 mg/kg 亚硒酸钠施用量处理过氧化氢酶活性, 较 CK 增幅最大, 为 3.29%; 10 mg/kg 亚硒酸钠施用量处理的超氧化物歧化酶和过氧化物酶较 CK 显著增加 261.74%、88.63%。④当亚硒酸钠施用量为 20、40 mg/kg 时, 苦荞生长发育受到抑制。【结论】5~10 mg/kg 亚硒酸钠施用量能提高苦荞光合特性和抗氧化酶活性, 盛花期效果尤为显著。

关键词: 苦荞; 亚硒酸钠; 光合特性; 抗氧化酶活性

中图分类号: Q945.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023043

OSID: 

马红梅, 王彩琴, 吴昕阳, 等. 亚硒酸钠对苦荞光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 1-6.
MA Hongmei, WANG Caiqin, WU Xinyang, et al. Effects of Sodium Selenite Application on Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activity of Tartary Buckwheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 1-6.

0 引言

【研究意义】苦荞 (*Fagopyrum tataricum*), 即鞑靼荞麦, 一年生栽培植物, 为蓼科 (Polygonaceae) 荞麦属中仅有的 2 个栽培种之一, 因籽粒有 3 条纵沟, 又称三角麦。苦荞营养价值丰富且保健功效多样, 内含槲皮素、芦丁等黄酮类物质, 是我国重要的杂粮资源^[1]。随着全球气候变暖, 苦荞在生长过程中经常遭受干旱、高温等环境胁迫, 易造成苦荞生长不良, 产量下降。因此, 如何通过微量元素增强苦荞抗逆能力、促进生长、提高品质、增加产量等已极具现实意义。【研究进展】硒作为人类和动物必不可少的微量营养元素之一, 与人体健康息息相关, 具有抗氧化、增强机体免疫、调节基础代谢等多种功能^[2]。Rotruck 等^[3]研究证实, 硒是动物和人体谷胱甘肽过氧化物酶的组成成分。由于土壤缺硒、环境污染、饮食习惯等原因,

造成我国 70% 的人口缺硒。硒在预防部分癌症、克山病、不育症和延缓衰老中发挥着重要作用^[4-6]。Alfthan 等^[7]研究认为, 每天摄入 100~200 μg 硒, 可以降低患癌风险。植物是人体硒摄入的主要来源, 也是自然界硒形态循环转化的重要媒介^[8]。硒作为植物必需的营养元素, 适量补硒既能促进植物生长, 又能生产富硒作物, 利于人们对微量元素的利用, 过量补硒则会导致植物中毒^[9-10]。硒以主动运输方式进入植物根系质层表面硫酸盐输送通道, 通过木质部从植物根系转运到地上各部分生殖器官^[11]。索艳敏等^[12]研究表明, 硒元素质量浓度影响植物生长。王永勤等^[13]研究表明, 叶面喷硒质量浓度为 10 mg/kg 与土壤施硒量为 0.01 g/m² 时, 大蒜产量显著高于其他处理。周大寨等^[14]研究发现, 土壤硒施用量在 8~24 mg/kg 时, 可促进花椰菜生长, 对其抗氧化和抗逆性也会产生积极作用。Nawaz 等^[15]研究表明, 叶面补硒能维持叶片膨压和气体交换特性, 增强抗氧化系统活性, 促进小麦养分吸收, 提高小麦产量。王晋民等^[16]在外源硒对胡萝卜生理特性研究中表明, 叶面亚硒酸钠喷施质量分数 < 1.0 mg/kg 时, 能提高胡萝卜有机硒富集程度, 并且

收稿日期: 2023-02-12

修回日期: 2023-08-06

基金项目: 山西重点研发项目 (201903D221029); 省部共建有机旱作农业国家重点实验室培育基地项目 (202105D121008-3-4)

作者简介: 马红梅 (1974-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事植物营养与农产品安全、旱地作物-土壤互作与调控研究。E-mail: mahongmei0405@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

不会对其生理生化及产量等因素产生负效应。【切入点】硒可调节植物生长发育,增强植物抗病抗逆能力。植物抵御逆境能力提高的同时,会消耗大量有机物质提供能量,此时抗氧化酶能力和光合能力就变得极为重要。然而,有关施硒水平对苦荞光合特性和抗氧化酶活性的影响却鲜有报道。【拟解决的关键问题】为此,设置不同亚硒酸钠施用量,研究其对苦荞光合特性及抗氧化酶活性影响,探讨施硒对苦荞生长发育的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为昔阳苦荞。供试土壤属于石灰性褐土,质地为壤土,采自山西农业大学西校门的试验田,土壤质量含水率 4.81%,田间质量持水率为 21.51%,全氮量为 209.51 mg/kg,硝态氮量为 15.84 mg/kg,速效磷量为 148.29 mg/kg,速效钾量为 4.55 mg/kg,有机质量为 8.25 g/kg, pH 值为 8.25。

供试肥料为亚硒酸钠 (Na_2SeO_3), 磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)、尿素 ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)。

1.2 试验设计

按照单因素随机区组的排列方法,开展盆栽试验,于 2022 年 5—8 月在山西省晋中市太谷县山西农业大学资源环境试验站进行。土样过 2 mm 筛孔装盆 (26.50 cm×17.00 cm), 每盆装土 12.50 kg, 设 5 个处理, 分别为 CK (0 mg/kg)、 Se_5 (5 mg/kg)、 Se_{10} (10 mg/kg)、 Se_{20} (20 mg/kg)、 Se_{40} (40 mg/kg), 每个处理重复 3 次, 硒肥、底肥和土壤一起混匀拌入盆中。底肥磷酸二氢钾 (KH_2PO_4) 和尿素 ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) 施用量为 1.00 g/盆。每盆播种籽粒均匀且饱满的苦荞种子 50 粒, 播种深度为 4.00 cm, 待苗高 7~10 cm 时适当间苗, 保留 30 株。每隔 3 d 采用称质量法对盆栽进行补水, 保证土壤含水率占田间持水率的 70.00% 左右。

1.3 指标测定

于苦荞的现蕾期 (5 月 31 日)、盛花期 (6 月 29 日)、结实期 (7 月 7 日) 从每组处理随机选取 3 株苦荞, 使用 LCpro-T 便携式光合仪测量其功能叶 (顶部展开的第 3 片叶子) 的净光合速率 (A)、蒸腾速率 (E)、胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 和气孔导度 (g_s)。采用张宪政^[17]的丙酮-乙醇混合液法测定叶绿素量。并在盛花期采用氮蓝四唑法 (NBT)^[18]测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; 采用碘量滴定法^[19]测定过氧化氢酶 (CAT) 活性; 采用愈创木酚法^[20]测定过氧化物酶 (POD) 活性。苦荞收获后采用直接测量法测定苦荞地上部的株高。将采集的苦荞根、茎分离, 根样用

自来水洗净后自然晾干, 采用称质量法测定地上部和地下部鲜质量。将根、茎装入信封, 于 105 °C 烘箱中杀青 20 min, 80 °C 烘干至恒质量, 测定地上部和地下部干质量。

1.4 数据处理

使用 SPSS 25.0 (One-Way ANOVA) 进行方差分析, 使用 Microsoft Excel 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 亚硒酸钠施用量对苦荞生长指标的影响

由表 1 可知, 随着亚硒酸钠施用量增加, 苦荞株高、鲜质量和干质量均呈先升高后降低的趋势。 Se_{10} 处理荞麦株高最大为 83.50 cm, 与其他处理差异显著。 Se_5 处理和 Se_{10} 处理的地上部鲜质量最高, 分别为 102.70、105.20 g/株, Se_{10} 处理较 CK、 Se_{40} 处理显著增加 38.73%~40.83%; Se_5 处理和 Se_{10} 处理的地下部鲜质量最高, 分别为 13.50、13.37 g/株, 二者与 CK、 Se_{40} 处理差异显著。 Se_{10} 处理地上部干质量最高为 33.80 g/株, 较 CK、 Se_{20} 、 Se_{40} 处理显著增加 28.52%~39.50%; Se_5 处理地下部干质量最高, 为 5.77 g/株, 与 CK、 Se_{40} 处理差异显著。

表 1 亚硒酸钠施用量对苦荞生长指标的影响

处理	株高/(cm 株 ⁻¹)	鲜质量/(g 株 ⁻¹)		干质量/(g 株 ⁻¹)	
		地上部	地下部	地上部	地下部
CK	78.00±0.00b	75.83±22.69b	6.53±5.13b	25.57±1.05bc	3.47±2.11b
Se_5	79.33±2.08b	102.70±6.02a	13.50±0.50a	32.10±4.95ab	5.77±0.35a
Se_{10}	83.50±1.32a	105.20±5.90a	13.37±2.07a	33.80±4.64a	5.60±0.92a
Se_{20}	80.00±2.00b	84.97±10.95ab	8.67±1.53ab	26.30±4.25bc	4.07±0.15ab
Se_{40}	76.83±2.02b	74.70±12.80b	5.83±2.96b	24.23±2.15c	2.73±0.91b

注 表中不同字母表示各处理在 $P<0.05$ 水平差异显著, 下同。

2.2 亚硒酸钠施用量对苦荞光合特性的影响

2.2.1 亚硒酸钠施用量对苦荞光合参数的影响

由图 1 可知, 随着亚硒酸钠施用量增加, 苦荞净光合速率呈先升高后降低的趋势。现蕾期、盛花期、结实期均苦荞净光合速率以 Se_5 处理最高, 分别为 19.78、5.32、3.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$, 较相同生育期 CK 分别增加 5.55%、16.15%、20.13%, 且与 Se_{40} 处理相比差异显著。各处理不同生育期苦荞的蒸腾速率、气孔导度、净光合速率变化趋势相同, 均在 Se_5 处理或 Se_{10} 处理达到最大值。胞间 CO_2 摩尔分数呈先降低后升高的趋势。与 CK 相比, 盛花期 Se_{10} 处理胞间 CO_2 摩尔分数降低幅度最大, 现蕾期与结实期均以 Se_5 处理胞间 CO_2 摩尔分数最低, 分别为 281.67、324.00 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 且与 CK、 Se_{20} 、 Se_{40} 处理差异显著。苦荞净光合速率随生育期的推进主要以下降趋势为主, 与

现蕾期和盛花期相比，结实期 CK、Se₅、Se₁₀、Se₂₀ 处理苦荞的净光合速率分别下降 30.56%~83.03%、28.20%~80.68%、30.67%~81.63%、15.91%~78.44%。随生育期推进，蒸腾速率除 Se₄₀ 处理呈下降趋势外，其余处理均呈先降低后升高趋势。与现蕾期相比，盛

花期 Se₅ 处理苦荞蒸腾速率降幅最小，为 16.39%。随生育期推进，除 CK、Se₅ 处理的胞间 CO₂ 摩尔分数呈先升高后降低趋势外，其他处理均呈上升趋势。与盛花期相比，结实期 CK、Se₅ 处理苦荞的胞间 CO₂ 摩尔分数分别下降 7.67%、13.29%。

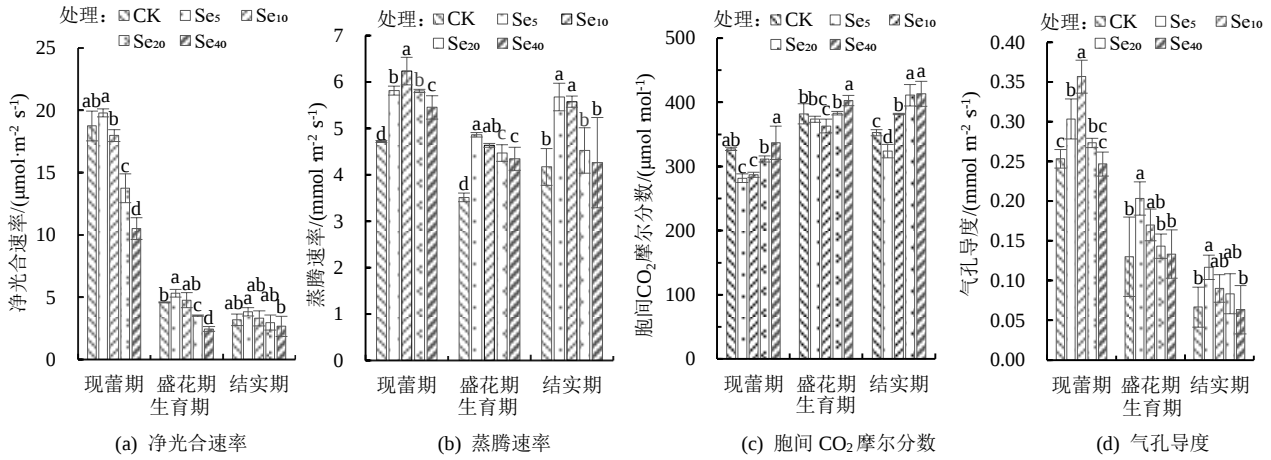


图1 亚硒酸钠施用量对苦荞光合参数的影响

Fig.1 Effect of disodium selenite on light and parameters of tartary buckwheat

2.2.2 亚硒酸钠施用量对苦荞叶绿素量的影响

由图 2 可知，苦荞叶绿素量随着亚硒酸钠施用量的增加整体呈先升高后降低的趋势。现蕾期 Se₅ 处理苦荞叶绿素量最大为 1.87 mg/g，且与 CK、Se₂₀、Se₄₀ 处理差异显著。盛花期 Se₅ 处理叶绿素量最高，为 1.42 mg/g，较相同生育期 CK 显著增加 11.81%，较相同生育期 Se₁₀、Se₂₀、Se₄₀ 处理增加 16.39%~17.35%。结实期各处理间叶绿素量差异不显著。随着苦荞生育期推进，各处理叶绿素量均呈下降趋势，与盛花期和现蕾期相比，结实期 CK、Se₅、Se₁₀、Se₂₀、Se₄₀ 处理苦荞叶绿素量分别下降 22.83%~41.31%、28.87%~85.15%、15.57%~42.46%、16.39%~35.03%、23.14%~40.00%。

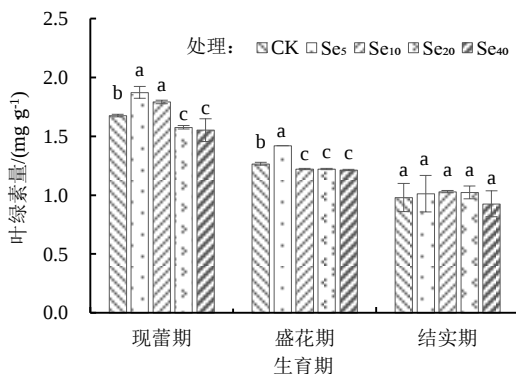


图2 亚硒酸钠施用量对苦荞叶绿素量的影响

Fig.2 Effects of sodium selenite on chlorophyll content of tartary buckwheat

2.3 亚硒酸钠施用量对苦荞盛花期抗氧化酶活性的影响

2.3.1 亚硒酸钠施用量对苦荞 SOD 活性的影响

由图 3 可知，随着亚硒酸钠施用量增加，苦荞

SOD 活性呈先升高后降低的趋势。Se₁₀ 处理 SOD 活性最高，为 84.61 U/(g h)，与 CK、Se₅ 处理相比，盛花期时 Se₁₀ 处理苦荞 SOD 活性显著增加 185.36%~261.74%；与 Se₂₀、Se₄₀ 处理相比，Se₁₀ 处理苦荞 SOD 活性显著增加 30.33%~158.90%。除 Se₅、Se₄₀ 处理，其他处理苦荞盛花期 SOD 活性差异显著，且各处理苦荞 SOD 活性均高于 CK。

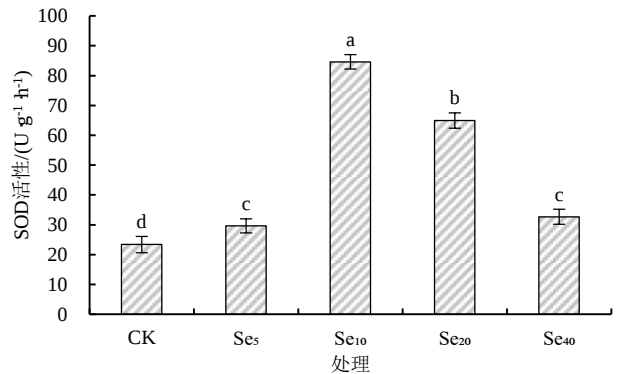


图3 亚硒酸钠施用量对苦荞 SOD 活性的影响

Fig.3 Effect of sodium selenite on SOD activity of tartary buckwheat

2.3.2 亚硒酸钠施用量对苦荞 CAT 活性的影响

由图 4 可知，随着亚硒酸钠施用量的增加，苦荞 CAT 活性呈先升高后降低的趋势。盛花期 Se₅ 处理苦荞 CAT 活性最大，为 0.11 mg/(g min)，较 Se₂₀、Se₄₀ 处理显著增加了 190.74%~255.67%。且 Se₁₀、Se₂₀、Se₄₀ 处理苦荞 CAT 活性均低于 CK。

2.3.3 亚硒酸钠施用量对苦荞 POD 活性的影响

由图 5 可知，随着亚硒酸钠施用量的增加，苦荞 POD 活性呈先升高后降低的趋势。盛花期 Se₁₀ 处理 POD 活性最高，为 29.86 U/(g min)，且与 CK、Se₅、

Se₂₀、Se₄₀ 处理苦荞 POD 活性差异显著。与 CK 相比，Se₄₀ 处理苦荞 POD 活性显著降低 54.57%。

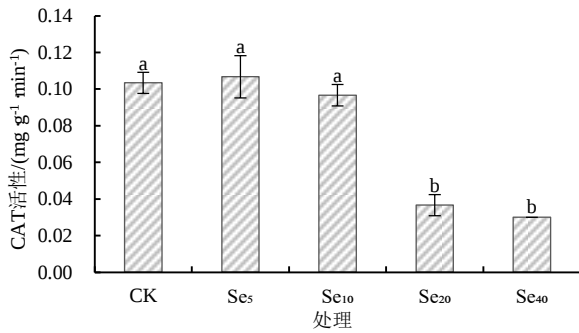


图4 亚硒酸钠施用量对苦荞 CAT 活性的影响

Fig.4 Effect of sodium selenite on CAT activity of tartary buckwheat

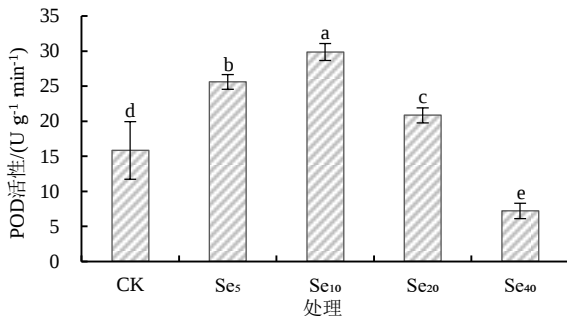


图5 亚硒酸钠施用量对苦荞 POD 活性的影响

Fig.5 Effect of sodium selenite on POD activity of tartary buckwheat

3 讨论

3.1 施硒提高苦荞生物量

本研究表明，当亚硒酸钠施用量在 5~10 mg/kg 时，施用亚硒酸钠有利于提高苦荞生物量。在苦荞生长早期，低亚硒酸钠施用量使抗氧化酶活性增加，种子新陈代谢增强，促进叶芽生长，而高亚硒酸钠施用量则表现出抑制作用。苦荞生长过程中，高亚硒酸钠施用量与其他元素的协同作用下降，根系生长受到抑制，造成苦荞生长发育受阻，株高变低。这与田秀英等^[21]研究结果相似，适宜亚硒酸钠施用量一方面可改善土壤肥力，增加土壤有效硒量、有效磷量、有效钾量，另一方面可提升苦荞生物量。硒施用量对烤烟生长也会产生影响，即低剂量硒处理促进植株生长，高剂量硒处理抑制植株生长^[22]，这与本研究结果一致。综上，亚硒酸钠适宜施用量可提高苦荞生物量。

3.2 施硒增加苦荞光合参数及叶绿素量

叶绿素合成是一系列酶促反应，Fe、Zn、Mn、Cu 等参与叶绿素合成过程^[23]。Rückgauer 等^[24]认为，适宜施硒量会促进植物对 Ca、Mg、P、K、Mn、Mo、Zn 等元素吸收。适宜施硒量能提高生菜^[23]、水稻^[25]、紫花苜蓿^[26]等植物中光合参数及叶绿素量，有利于改善植物的光合特性，促进植物生长发育。本研究表明，

当亚硒酸钠施用量为 5~10 mg/kg 时，施用亚硒酸钠可提高苦荞净光合速率、蒸腾速率、叶片气孔导度和叶绿素量。适宜亚硒酸钠施用量可间接抑制活性氧在整个植物体内的积累量和诱导植物在光合反应中所需部分的相关酶活性，进而影响植物光合作用^[27]。当亚硒酸钠施用量过高时，会降低各种光合指标。然而，造成植物叶片光合速率降低的自身原因主要有 2 个方面，一是受气孔导度影响的气孔限制，二是受叶肉细胞光合活性影响的非气孔限制^[28]。Farquhar 等^[29]认为在气孔导度下降时，胞间 CO₂ 摩尔分数同时下降，这主要是因为光合的气孔限制。这与本研究结果不同，当气孔导度下降时，胞间 CO₂ 摩尔分数呈上升趋势。故引起苦荞叶片光合速率降低的自身因素为非气孔限制。由于亚硒酸钠施用量过高，破坏了植物体内叶绿体结构，叶肉细胞光合活性下降，从而抑制叶片光合作用。这与金小琬等^[30]研究结果相近，表明硒施用量过高时能够破坏植物部分结构，降低叶绿素量。

盛花期不同亚硒酸钠施用量处理间苦荞蒸腾速率、胞间 CO₂ 摩尔分数及气孔导度差异显著高于现蕾期和结实期。苦荞在盛花期的养分需求要高于其他生育期，进而促进苦荞对亚硒酸钠的吸收，并提升光合作用，这与马红梅等^[8]、宋丽芳等^[31]研究结论相似。

3.3 施硒增强苦荞抗氧化酶活性

SOD、CAT、POD 是细胞抵御活性氧伤害的酶保护系统，在清除超氧自由基、过氧化氢和过氧化物方面起重要作用^[32]。本研究表明，当亚硒酸钠施用量在 5~10 mg/kg 水平下，施用亚硒酸钠利于提高苦荞抗氧化酶活性。随着亚硒酸钠施用量不断增加，CAT 活性在 Se₂₀、Se₄₀ 处理下显著低于 CK，Se₄₀ 处理 POD 活性显著低于 CK。由此可知，较高的亚硒酸钠施用量会使抗氧化酶活性下降，导致苦荞抗氧化能力减弱。这与杜慧玲等^[23]、李登超等^[33]研究结果一致，该试验进一步验证亚硒酸钠对苦荞体内 SOD、CAT、POD 活性影响存在剂量效应，苦荞可通过调节体内抗氧化酶活性，提升应对亚硒酸钠的能力。

4 结论

1) 亚硒酸钠施用量为 5~10 mg/kg 时，可促进苦荞光合特性及抗氧化酶活性，该现象在苦荞盛花期效果最显著，有利于提高植株抗逆性，促进苦荞生长发育和生物量增加。

2) 与 5~10 mg/kg 的亚硒酸钠施用量相比，当亚硒酸钠施用量超过 20 mg/kg，苦荞净光合速率、蒸腾速率、叶片气孔导度、叶绿素量及抗氧化酶活性均显著下降，从而抑制苦荞生长。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

- [1] 朱云辉, 郭元新. 我国苦荞资源的开发利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 360-365.
ZHU Yunhui, GUO Yuanxin. Research progress in development and utilization of tartary buckwheat resource in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(24): 360-365.
- [2] 陈淑芳. 富硒发芽苦荞生理变化及其蛋白抗氧化活性研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2019.
CHEN Shufang. Study on physiological changes and antioxidant activity of protein in Se-enriched and sprouted tartary buckwheat[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2019.
- [3] ROTRUCK J T, POPE A L, GANTHER H E, et al. Selenium: biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 1973, 179(4 073): 588-590.
- [4] COLLINS J F. Molecular, genetic, and nutritional aspects of major and trace minerals[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [5] FERGUSON L R, KARUNASINGHE N, ZHU S T, et al. Selenium and its' role in the maintenance of genomic stability[J]. Mutation Research, 2012, 733(1/2): 100-110.
- [6] THIRY C, RUTTENS A, DE TEMMERMAN L, et al. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 767-784.
- [7] ALFTHAN G, XU G L, TAN W H, et al. Selenium supplementation of children in a selenium-deficient area in China[J]. Biological Trace Element Research, 2000, 73(2): 113-125.
- [8] 马红梅, 白春雨, 韩广明, 等. 亚硒酸钠对甜荞生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 26-32, 42.
MA Hongmei, BAI Chunyu, HAN Guangming, et al. Growth of sweet buckwheat in response to sodium selenite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 26-32, 42.
- [9] 钟松臻, 张宝军, 张木, 等. 硒对水稻光合作用及抗氧化作用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 134-139.
ZHONG Songzhen, ZHANG Baojun, ZHANG Mu, et al. Effects of selenium on photosynthesis and antioxidation of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(4): 134-139.
- [10] HAN D, LI X H, XIONG S L, et al. Selenium uptake, speciation and stressed response of *Nicotiana tabacum* L.[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 95: 6-14.
- [11] 陈松灿, 孙国新, 陈正, 等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 612-624.
CHEN Songcan, SUN Guoxin, CHEN Zheng, et al. Progresses on selenium metabolism and interaction with heavy metals in higher plants[J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(5): 612-624.
- [12] 索艳敏, 咎丽霞, 王超. 硒对植物生长作用的研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020(4): 60-62.
SUO Yanmin, ZAN Lixia, WANG Chao. Research progress of selenium on plant growth[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2020(4): 60-62.
- [13] 王永勤, 曹家树, 李建华, 等. 施硒对大蒜产量和含硒量的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(5): 425-429.
WANG Yongqin, CAO Jiashu, LI Jianhua, et al. Effect of selenium application on the yield of garlic and its selenium content[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(5): 425-429.
- [14] 周大寨, 唐巧玉, 张驰, 等. 硒对花椰菜幼苗叶绿素、脯氨酸及丙二醛含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2005, 44(2): 77-78, 107.
ZHOU Dazhai, TANG Qiaoyu, ZHANG Chi, et al. Effects of selenium on the contents of chlorophyll, proline and malondialdehyde in the seedlings of cauliflower[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2005, 44(2): 77-78, 107.
- [15] NAWAZ F, AHMAD R, ASHRAF M Y, et al. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113: 191-200.
- [16] 王晋民, 谭大风, 王艳萍, 等. 外源硒对胡萝卜生理生化特性、富硒性及其产量的影响[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2007, 23(2): 70-73.
WANG Jinmin, TAN Dafeng, WANG Yanping, et al. Effect of selenium on the feature of physiology and biochemistry, Se accumulation and yield of carrot[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2007, 23(2): 70-73.
- [17] 张宪政. 植物叶绿素含量测定—丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26-28.
- [18] 沈文飏, 徐朗莱, 叶茂炳, 等. 氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶活性的适宜条件[J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(2): 101-102.
SHEN Wenbiao, XU Langlai, YE Maobing, et al. The suitable conditions for determining sod activity by nitro blue tetrazolium(NBT) photoreduction method[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1996, 19(2): 101-102.
- [19] 潘勇军, 谢洪泉, 谭晓明, 等. 碘量滴定法测定过氧化氢溶液浓度的改进[J]. 理化检验-化学分册, 2003, 39(7): 404-405.
PAN Yongjun, XIE Hongquan, TAN Xiaoming, et al. Modification of the iodometric determination of concentration of hydrogen peroxide solution[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2003, 39(7): 404-405.
- [20] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
GAO Junfeng. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] 田秀英, 李会合, 王正银. 施硒对苦荞 N, P, K 营养元素和土壤有效养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 112-115.
TIAN Xiuying, LI Huihe, WANG Zhengyin. Effect of Se application on contents of nitrogen, phosphorus and potassium in Tartary buckwheat and content of available nutrients in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 112-115.
- [22] 韩丹, 熊双莲, 许自成, 等. 硒对烤烟生长、化学指标及矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 2 072-2 079.
HAN Dan, XIONG Shuanglian, XU Zicheng, et al. Effects of selenium on growth, chemical index and mineral nutrition contents of flue-cured tobacco[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(10): 2 072-2 079.
- [23] 杜慧玲, 冯两蕊, 牛志峰, 等. 硒对生菜抗氧化酶活性及光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 226-229.
DU Huiling, FENG Liangrui, NIU Zhifeng, et al. The effect of selenium on protection-enzyme activity and photosynthesis speed of lettuce[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 226-229.
- [24] RÜKGAUER M, NEUGEBAUER R J, PLECKO T. The relation between selenium, zinc and copper concentration and the trace element dependent antioxidative status[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2001, 15(2/3): 73-78.
- [25] 林匡飞, 徐小清, 金霞, 等. 硒对水稻的生态毒理效应及临界指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 678-682.
LIN Kuangfei, XU Xiaoqing, JIN Xia, et al. Eco-toxicological effects of selenium and its critical value on *Oryza sativa*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 678-682.
- [26] 代惠萍, 赵桦, 贾根良, 等. 硒对紫花苜蓿叶片光合特性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 363-365, 371.
DAI Huiping, ZHAO Hua, JIA Genliang, et al. Effects of Se stress on photosynthetic pigments in the leaves of *Medicago sativa* L.[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(19): 363-365, 371.
- [27] 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): 4 067-4 076.
JIANG Ying, ZENG Zhaohai, YANG Qisheng, et al. Selenium (Se)

- uptake and transformation mechanisms and physiological function in plant: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 4 067-4 076.
- [28] 朱佳, 梁永超, 丁燕芳, 等. 硅对低温胁迫下冬小麦幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1 780-1 788.
- ZHU Jia, LIANG Yongchao, DING Yanfang, et al. Effect of silicon on photosynthesis and its related physiological parameters in two winter wheat cultivars under cold stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(9): 1 780-1 788.
- [29] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [30] 金小琬, 朱茜, 黄进, 等. 硒对叶绿体及光合作用的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(1): 288-294.
- JIN Xiaowan, ZHU Xi, HUANG Jin, et al. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(1): 288-294.
- [31] 宋丽芳, 冯美臣, 张美俊, 等. 外源硒对苦荞生长发育及子粒硒含量的影响[J]. 作物杂志, 2019(3): 150-154.
- SONG Lifang, FENG Meichen, ZHANG Meijun, et al. Effects of exogenous selenium on the growth and development of Tartary buckwheat and selenium content in grains[J]. Crops, 2019(3): 150-154.
- [32] VÍTOVÁ M, BIŠOVÁ K, HLAVOVÁ M, et al. Glutathione peroxidase activity in the selenium-treated alga *scenedesmus quadricauda*[J]. Aquatic Toxicology, 2011, 102(1/2): 87-94.
- [33] 李登超, 朱祝军, 徐志豪. 硒对菠菜抗氧化系统及过氧化氢含量的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(6): 547-550.
- LI Dengchao, ZHU Zhujun, XU Zhihao. Effects of selenium on antioxidative system and H_2O_2 content in spinach[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(6): 547-550.

Effects of Sodium Selenite Application on Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activity of Tartary Buckwheat

MA Hongmei^{1,2,3}, WANG Caiqin^{1,3}, WU Xinyang^{1,3}, LU Jiahao^{1,3}, BAI Chunyu^{1,3}, WU Wenyue^{1,3}, WU Zhiming²

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. College of Agricultural Engineering, State Key Laboratory of Integrative Sustainable Dryland Agriculture (in Preparation),

Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center of

Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: 【Objective】Selenium is a vital nutrient but deficient in many soils. Sodium selenium can be used as a selenium fertilizer. This paper investigates the impact of its application on photosynthesis and activity of antioxidant enzymes of Tartary buckwheat. 【Method】The experiment was conducted in pots using the variety Xiyang as the model plant. There were five treatments by mixing the sodium selenite with soil at a ratio (weight /weight) ranging from 0 (control) to 40 mg/kg. In each treatment, we measured the height, fresh and dried weight, photosynthetic parameters, and antioxidant enzyme activities of the crop. 【Result】①Applying sodium selenite can significantly increase biomass and height of the crop, compared to the control, but only when application ratio did not exceed 10 mg/kg. ② Compared to the control, applying sodium selenite increased net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and chlorophyll by 7.57%, 32.70%, 28.12% and 6.96% respectively, while reduced the intercellular CO_2 concentration by 13.95%. It was found that applying 5 mg/kg of sodium selenite increased CO_2 assimilation capacity. The effect of sodium selenite in improving the photosynthesis was most effective during the full flowering stage. ③Compared to the control, applying 5 mg/kg of sodium selenite increased activity of catalase by 3.29%; however, increasing the application to 10 mg/kg enhanced the activity of superoxide dismutase and peroxidase by 261.74% and 88.63%, respectively. ④The growth and development of Tartary buckwheat were inhibited when the concentration of disodium selenite was 20 mg/kg and 40 mg/kg. 【Conclusion】Our results show that applying sodium selenite to soil can improve photosynthesis and antioxidant enzyme activities of Tartary buckwheat, especially at the flowering stage, but only when the application ratio did not exceed 10 mg/kg.

Key words: tartary buckwheat; sodium selenite; photosynthetic characteristics; antioxidant enzyme activity

责任编辑: 白芳芳