

DOI: 10.11766/trxb201912030593

程丹, 张红, 郭子雨, 张建军, 王志玲, 牛颜冰, 张春来, 吕晋慧. 硒处理对土壤理化性质及杭白菊品质的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1449–1457.

CHENG Dan, ZHANG Hong, GUO Ziyu, ZHANG Jianjun, WANG Zhiling, NIU Yanbing, ZHANG Chunlai, LÜ Jinhui. Effect of Selenium Application on Soil Physical and Chemical Properties and Quality of *Chrysanthemum morifolium* cv Hangbai[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1449–1457.

硒处理对土壤理化性质及杭白菊品质的影响*

程丹¹, 张红¹, 郭子雨¹, 张建军², 王志玲¹, 牛颜冰¹, 张春来¹,
吕晋慧^{1†}

(1. 山西农业大学林学院, 山西太谷 030801; 2. 山西阳城蟒河猕猴国家级自然保护区管理局, 山西阳城 048100)

摘要: 土壤磷素储存容量 (SPSC) 是基于磷饱和度 (DPS) 概念提出与发展的指标, 可以有效地评估及监测土壤磷素的存储状态以纳米硒为外源硒处理杭白菊, 分别采用土壤施硒 (T)、叶面喷施硒肥 (Y) 以及土壤与叶面相结合施硒肥 (T+Y) 3 种施硒方式, 以不施硒处理为对照 (CK), 研究不同施硒方式对土壤理化性质、杭白菊营养成分、硒含量和产量的影响。结果表明: 不同处理下土壤容重、土壤孔隙度和土壤含水量与 CK 无显著差异。T、Y、T+Y 处理下土壤脲酶活性显著低于 CK, 土壤蔗糖酶活性显著高于 CK, 土壤碱性磷酸酶活性和土壤过氧化氢酶活性与 CK 差异不显著。CK 处理下菊花花序中 Vc 含量显著高于其他处理。T、Y、T+Y 处理下黄酮和绿原酸含量显著高于 CK。T、Y 和 T+Y 处理下花序中硒含量极显著高于 CK。T+Y 处理下杭白菊单株开花量和单产量显著高于 CK。T、Y、T+Y 三种施硒方式相比, T+Y 处理下杭白菊富硒效果最佳。综合分析比较三种施硒方式对土壤理化性质、杭白菊营养成分、硒含量和产量的影响, 确定以土壤与叶面相结合施硒肥 (T+Y) 效果最佳。这一结果可为富硒杭白菊生产提供实践和理论依据。

关键词: 纳米硒; 土壤施硒; 叶面喷施; 杭白菊; 富硒; 产量

中图分类号: S151.9; S963.16 文献标志码: A

Effect of Selenium Application on Soil Physical and Chemical Properties and Quality of *Chrysanthemum morifolium* cv Hangbai

CHENG Dan¹, ZHANG Hong¹, GUO Ziyu¹, ZHANG Jianjun², WANG Zhiling¹, NIU Yanbing¹, ZHANG Chunlai¹, LÜ Jinhui^{1†}

(1. Department of Landscape Architecture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030801, China; 2. Administration Bureau of Manghe Macaque National Nature Reserve, Yangcheng, Shanxi, 048100, China)

* 现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-21)、山西农业大学科技创新基金项目 (2019yz003) 和山西农谷建设科研专项项目 (SXNGJSKYZX201702) 资助 Supported by the Special Fund for Modern Agricultural Industrial Technology System Construction (No. CARS-21), the Science and Technology Innovation Fund Project of Shanxi Agricultural University (No. 2019yz003) and the Agriculture Valley Construction Project of Shanxi Province of China (No. SXNGJSKYZX201702)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lvjinhui11@126.com

作者简介: 程丹 (1994—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要从事园林种质创新与应用。E-mail: 610966072@qq.com

收稿日期: 2019-12-03; 收到修改稿日期: 2020-02-29; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-04-03

Abstract: 【 Objective 】 Effects of selenium application on soil physical and chemical properties, nutrient elements of *Chrysanthemum morifolium* cv Hangbai, selenium content and yield of the plant, relative to application method were analyzed. 【 Method 】 In this experiment, nano-selenium was used as extraneous selenium for exploration of effect of its application on quality of *Chrysanthemum morifolium*. In terms of application of selenium, this experiment was designed to have four treatments, i.e. Treatment T (applying selenium as fertilizer into the soil (T); Treatment Y (spraying selenium solution onto leaves), Treatment (T+Y) (applying and spraying selenium together), and Treatment CK (no selenium applied as control. 【 Result 】 Results show that as compared with CK, selenium application, regardless of method, did not have much effect on soil bulk density, soil porosity and soil water content and on the activities of soil alkaline phosphatase and soil catalase, either, but did dull the activity of urease and stimulate that of sucrase significantly in the soil, lower the Vc content and increased the contents of flavonoids and chlorogenic acid and the Se content in the inflorescences of the plant. Besides, selenium application increased the number of flowers per plant, the dry biomass per flower and the yield of flowers per mu. The effect was the most significantly in Treatment T+Y. 【 Conclusion 】 Based on comprehensive comparison analysis of the effects of the three selenium application methods on soil physical and chemical properties, nutrient contents selenium content and yield of *Chrysanthemum morifolium*, it could be concluded that selenium application via both fertilization and foliar spraying is the most effective method for selenium application to *Chrysanthemum morifolium*. All the findings in the experiment may serve as a practical and theoretical basis for the production of Se-enriched *Chrysanthemum*.

Key words: Nano-selenium; Selenium fertilization; Foliar spraying; *Chrysanthemum morifolium* cv Hangbai; Se-enrichment; Yield of *Chrysanthemum* flower

硒为人体所必需的微量元素。医学研究已经证实中国成人每日平均硒摄入量仅为 26.63 μg , 远低于中国营养学会所推荐的人均每日硒摄入量 50 μg ^[1]。目前, 国内外关于通过外源施硒生产富硒粮食物、富硒蔬菜、富硒水果、富硒茶、富硒中药材和富硒菊花等研究已取得一定成效^[2-9]。

杭白菊作为富硒能力较强的植物, 是较为理想的富硒载体^[8]。张愨等^[9]研究发现对杭白菊进行叶面喷施硒肥处理可有效提高杭白菊花序中硒含量; 于云霞等^[10]试验结果表明亚硒酸钠处理显著提高了滁菊花序中总黄酮和绿原酸的含量。田秀英和王正银^[11]研究发现施用适量的硒能提高药用菊花的产量。因此, 通过科学施硒生产富硒菊花, 对提高菊花品质、产量和经济价值, 以及改善人体硒营养状况具有重要意义。而土壤是植物生产的基地^[12], 刘敏等^[13]研究表明水稻根系、茎叶和籽粒中的硒含量均与土壤硒含量成正比。王艳茹等^[14]研究发现土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性是影响菊花活性成分含量的重要因子。研究硒处理下土壤理化性质的变化对有效调控茶用菊花硒生物强化具有重要意义。

外源施硒的方式一般包括土壤施硒、叶面喷施硒肥及土壤与叶面相结合施硒肥, 三种施硒方式均能有效提高植物体内硒累积量^[3-7]。陈火云等^[15]研

究结果显示, 土壤施硒、叶面喷施硒肥、土壤与叶面相结合施硒肥三种施硒方式均显著提高了油菜籽粒中硒含量。赵勇钢^[16]研究发现对枣树进行土壤施硒和叶面喷施硒肥处理均显著提高了红枣果实中硒含量。

纳米硒表面积较大, 具有更高的吸收利用效率和生物学活性, 是更加安全有效的硒源材料, 有关纳米硒在茶菊上的应用尚未见报道。为此, 本研究以杭白菊为试验材料, 以纳米硒为硒源, 比较三种不同施硒方式对土壤理化性质、杭白菊营养成分、硒含量和产量的影响, 筛选出较为合理的施硒方案, 为科学高效生产富硒杭白菊提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究以杭白菊为试验材料, 由山西农业大学菊花创新团队扦插繁殖。供试硒肥为纳米硒, 由山西大学提供。

1.2 试验设计

于 2018 年 4 月 11 日将扦插苗定植于试验田中, 期间进行浇水、去顶、除草等栽培管理, 6 月开始进行试验处理, 11 月采集样本进行样品测定。本试

验共设置 4 个处理。(1) 对照 (CK): 不施硒肥; (2) 处理 T: 在杭白菊营养生长期土施纳米硒, 施用量为 $0.003 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; (3) 处理 Y: 在杭白菊营养生长期至花芽分化前期叶面喷施纳米硒, 施用量为 $0.003 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 喷施 3 次 (2018 年 6 月 22 日, 7 月 12 日, 8 月 1 日), 喷施间隔期为 20 d。(4) T+Y: 处理 T 与处理 Y 相结合, 在杭白菊营养生长期土施纳米硒, 施用量为 $0.0015 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 同时于生长期至花芽分化前期叶面喷施纳米硒, 施用量为 $0.0015 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 研究方法

土壤样品采集: 采集 0~20 cm 的耕作层土壤 1 kg。置于干燥通风的场所自然风干, 去除杂物, 过 0.15 mm 筛, 备用。

植物样品采集: 2018 年 11 月 11 日随机采集各处理杭白菊花序若干, 于 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温下烘干, 粉碎后测定花序中营养成分和硒含量。

测定方法: 土壤容重采用环刀法测定, 土壤容重=烘干土质量/环刀容积^[17]; 土壤孔隙度/%=1-容重/土粒密度 $\times 100\%$ (土粒密度采用平均值 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 计算)^[17]; 土壤含水量采用烘干法测定^[17]; 土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定^[17]; 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定^[17]; 土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[17]; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[17]; 杭白菊黄酮含量采用分光光度法测定^[18]; 杭白菊绿原酸

含量采用紫外分光光度法测定^[18]; 杭白菊 Vc 含量采用钼蓝比色法测定^[18]; 杭白菊硒含量采用电感耦合等离子质谱 (ICP-MS) 法测定^[19]。单株开花量采用“S”形布点统计开花量, 取平均数; 单朵花干物质质量测定, 烘干时要掌握烘干温度, 烘干工艺: 先将鲜花平铺在锡纸上, 使其保证鲜花为薄薄的一层 (有利于烘焙时的散热), 然后将其烘箱打开, 温度设置为 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}\sim 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行烘烤 6 h, 在此过程中, 前两个小时应注意烘箱内的除湿, 使水分及时散去 (有利于花在烘干过程能保持着很好的品相), 在烘干结束时, 应等烘箱自然降温后才能打开烘箱, 以免花朵的返潮, 烘干后称量取平均数; 单产量: 单株开花量 \times 单朵花干物质质量 $\times 60\ 000$ (以每公顷种植 60 000 株计算)。

1.4 数据处理

数据处理、制图和统计采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件进行, 显著性检验采用单因素方差分析邓肯 (Duncan) 法。

2 结 果

2.1 硒处理对土壤理化性质的影响

由表 1 可知, T、Y、T+Y 处理下土壤容重、土壤孔隙度、土壤含水量与 CK 均无显著差异。T、Y、T+Y 处理间差异不显著。表明硒处理对土壤容重、土壤孔隙度及土壤含水量均无显著影响。

表 1 不同硒处理下的土壤物理性质

Table 1 Effects of Se application on soil physical properties relative to treatment

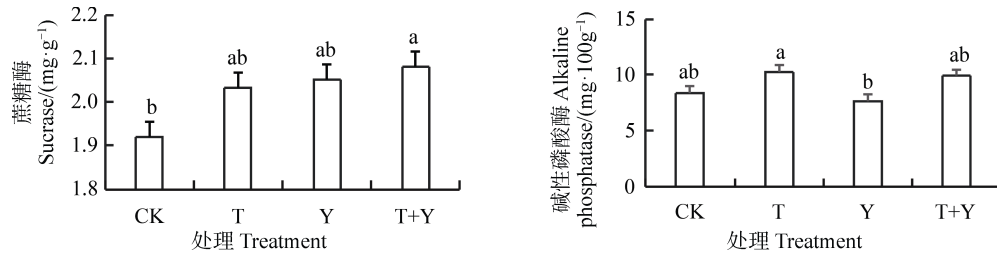
处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤孔隙度 Soil porosity/%	土壤含水量 Soil water content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	0.881 \pm 0.096a	66.77% \pm 0.096a	306.4 \pm 0.096a
T	1.009 \pm 0.044a	61.92% \pm 0.406a	237.2 \pm 0.406a
Y	0.928 \pm 0.049a	64.99% \pm 0.491a	266.0 \pm 0.491a
T+Y	0.953 \pm 0.040a	64.03% \pm 0.439a	289.5 \pm 0.439a

注: 同一列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。Notes: Different lowercase letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$). The same below.

由图 1 可知, T、Y、T+Y 处理下土壤蔗糖酶活性高于 CK, 分别较 CK 提高了 5.85%、6.86%和 8.35%, 其中 T+Y 处理下土壤蔗糖酶活性显著高于 CK。T、Y、T+Y 处理间土壤蔗糖酶活性无显著差

异。表明不同施硒处理均能提高土壤蔗糖酶活性。

不同施硒处理土壤碱性磷酸酶活性变化如图 1 所示, 与对照相比, T、Y、T+Y 处理下土壤碱性磷酸酶活性与 CK 均无显著差异。其中 Y 和 T 处理下



注: 图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示极显著差异 ($P < 0.01$)。下同。Notes: Different lowercase letters in the figure mean significant difference ($P < 0.05$), and different uppercase letters mean extremely significant difference ($P < 0.01$). The same below.

图1 硒处理下土壤蔗糖酶活性和土壤碱性磷酸酶活性
Fig. 1 Soil sucrose activity and soil alkaline phosphatase activity relative to treatment

土壤碱性磷酸酶活性与 T+Y 均无显著差异, T 处理下土壤碱性磷酸酶活性显著高于 Y。不同施硒处理对土壤碱性磷酸酶活性均无显著影响。

如图 2 所示, T、Y、T+Y 处理下土壤脲酶活性显著低于 CK, 分别较 CK 降低了 18.95%、35.37%

和 12.51%。不同处理下土壤脲酶活性高低依次为 CK>T+Y>T>Y, 其中 T、T+Y 处理下土壤脲酶活性显著高于 Y, 分别为 Y 处理的 1.25 倍和 1.35 倍。不同施硒处理后土壤脲酶活性受到抑制, 其中 Y 对土壤脲酶活性的抑制作用最为显著。

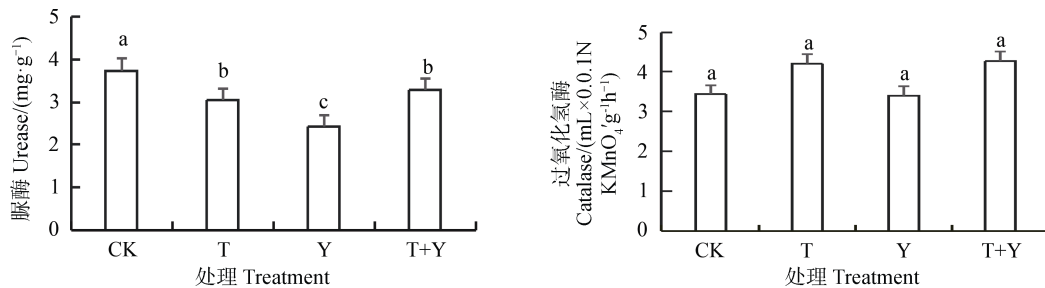


图2 硒处理下土壤脲酶活性和土壤过氧化氢酶活性
Fig. 2 Soil urease activity and soil catalase activity relative to treatment

不同施硒处理对土壤过氧化氢酶活性的影响如图 2 所示。与对照相比, T、Y、T+Y 处理下土壤过氧化氢酶活性与 CK 均无显著差异。T、Y、T+Y 处理间土壤过氧化氢酶活性均无显著差异。不同施硒处理对土壤过氧化氢酶活性均无显著影响。

2.2 硒处理对抗白菊营养成分的影响

由图 3 可知, T、Y、T+Y 处理下 Vc 含量与 CK 处理差异达极显著水平。其中 CK 处理下 Vc 含量极

显著高于其他处理, 为 $126.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。T、Y、T+Y 处理间 Vc 含量均无显著差异。施用纳米硒降低了杭白菊 Vc 含量。

由图 3 可知, T、Y、T+Y 处理下黄酮含量与 CK 处理差异达极显著水平。其中 Y、T+Y 处理下黄酮含量极显著高于 T, Y 和 T+Y 处理间黄酮含量无显著差异。施用纳米硒可有效提高杭白菊黄酮含量, 其中 Y 和 T+Y 处理对黄酮含量的提高最为显著。

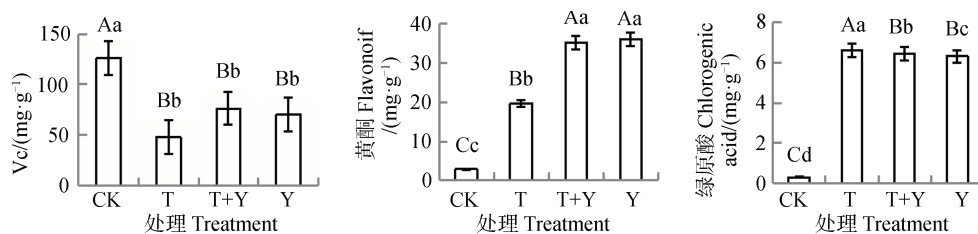


图3 硒处理下杭白菊 Vc、黄酮和绿原酸含量
Fig. 3 Vc content, flavonoid content and chlorogenic acid content in chrysanthemum flower tea relative to treatment

由图 3 可知, T、Y 和 T+Y 处理下绿原酸含量极显著高于 CK。不同硒处理间相比, T 处理下绿原酸含量显著高于 Y、T+Y, Y 和 T+Y 处理间绿原酸含量无显著差异。施用纳米硒可有效提高杭白菊绿原酸含量。

2.3 硒处理对杭白菊花序中硒累积的影响

由图 4 可知, 不同处理杭白菊花序中硒含量在 $0.01 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内。T、Y 和 T+Y 处理下杭白菊花序中硒含量极显著高于 CK, 分别较 CK 提高了 358.2%、595.6%和 663.3%。T、Y、T+Y 处理间杭白菊花序中硒含量差异达极显著水平, 其中

T+Y、Y 处理下杭白菊花序中硒含量极显著高于 T, T+Y 处理下杭白菊花序中硒含量显著高于 Y。土壤与叶面相结合施硒肥促进杭白菊花序富硒, 单一施肥方式下, 叶面喷施硒肥较土壤施硒能更有效提高杭白菊花序中硒累积。

2.4 硒处理对杭白菊产量的影响

由表 2 可知, T、Y 和 T+Y 处理下杭白菊单株开花量和单产量均高于 CK。其中 T+Y 处理下杭白菊单株开花量和单产量均显著高于 CK。T、Y、T+Y 处理间杭白菊单株开花量、单朵花干物质质量和单产量差异不显著。

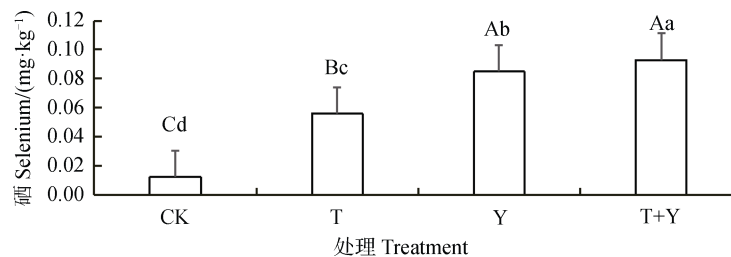


图 4 硒处理下杭白菊硒含量

Fig. 4 Selenium content in chrysanthemum flower tea relative to treatment

表 2 不同硒处理的杭白菊产量

Table 2 Yield of chrysanthemum flower relative to treatment

处理	单株开花量	单朵花干物质质量	单产量
Treatment	Number of flowers per plant	Dry biomass weight per flower/g	Yield per unit area/ (kg·hm ⁻²)
CK	284.0±10.29b	0.195±0.029a	3 323±41.15b
T	317.3±13.38ab	0.245±0.005a	4 664±17.06ab
Y	308.3±16.50ab	0.237±0.025a	4 384±34.64ab
T+Y	332.3±10.68a	0.245±0.038a	4 885±46.76a

3 讨 论

3.1 硒处理对土壤理化性质的影响及可能的原因

关于不同施硒处理对土壤理化性质的影响, 赵建平^[20]研究发现, 活性硒元复合肥能明显降低油茶成林的土壤容重, 提高土壤田间持水量, 且对土壤容重的影响随硒浓度的增加呈现先增后减的趋势。本研究结果表明在不同施硒方式下, 不同施硒处理对土壤容重、土壤孔隙度和土壤含水量均无显著影响, 但纳米硒处理后土壤容重有所增加, 土壤孔隙度和土壤含水量均有所下降(表 1)。硒可以与黏土矿物水化分解成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等发生

沉淀反应。与土壤单粒结构相比较, 土壤团聚体的总孔隙度较大。本研究中硒处理后土壤容重增加、土壤孔隙度降低, 可能是纳米硒施入土壤后与土壤的无定形铁、铝发生沉淀反应, 导致氧化铁、氧化铝的活化度降低, 胶结作用减弱, 不利于土壤团聚结构形成, 造成土壤孔隙度下降, 土壤更加紧实, 从而使得土壤贮水能力变弱。

关于不同施硒处理对土壤蔗糖酶活性的影响, 樊俊等^[21]研究发现, 低浓度和高浓度硒酸钠、亚硒酸钠均对土壤蔗糖酶活性表现出抑制效果。而史雅静等^[22]研究结果显示, 低剂量有机硒对土壤蔗糖酶活性有激活作用, 高剂量有机硒对土壤蔗糖酶活性

的影响, 随培养时间的延长而表现出先激活后抑制的变化。可见硒处理对土壤蔗糖酶活性的影响效果因硒源类型不同而存在差异。本研究中硒处理显著提高了土壤蔗糖酶活性(图1), 可能是纳米硒增加了土壤微生物数量, 而微生物数量的增加促进了土壤蔗糖酶的合成与分泌^[23], 从而提高了土壤蔗糖酶活性; 另一方面可能是根系活力提高, 根系代谢增强, 根系分泌物增加, 促进了土壤蔗糖酶的分泌及土壤微生物的繁殖, 从而提高了土壤蔗糖酶活性^[24]。

本研究中不同施硒处理对土壤碱性磷酸酶活性均无显著影响; 三种施硒方式相比, 土壤施硒及土壤与叶面相结合施硒处理下, 土壤碱性磷酸酶活性高于叶面喷施硒肥(图1)。这与许舒娴^[25]关于硒处理对土壤酸性磷酸酶活性的影响研究结果一致。可能土壤中施入适量硒促进了土壤微生物数量增加^[22], 从而促进了土壤碱性磷酸酶活性提高^[23]。

纳米硒处理后土壤脲酶活性受到抑制; 三种施硒方式相比, 叶面喷施硒肥对土壤脲酶活性的抑制作用最为显著, 土壤施硒及土壤与叶面相结合施硒肥处理下土壤脲酶活性显著高于叶面喷施硒肥(图2)。土壤脲酶活性的变化不仅受土壤硒含量的影响, 可能与土壤微生物的数量、硒在植物体内的代谢机理及植物硒与土壤硒的互作有关。

大量研究表明, 低浓度硒可促进土壤过氧化氢酶活性的提高, 高浓度硒对其有抑制作用^[26]。本研究中硒处理对土壤过氧化氢酶活性无显著影响; 三种施硒方式相比, 土壤施硒及土壤与叶面相结合施硒处理下, 土壤过氧化氢酶活性高于仅叶面喷施硒肥处理下过氧化氢酶活性(图2)。土壤中过氧化氢酶的变化可能是由于土壤中施加纳米硒加强了土壤有机质的分解与腐殖质的合成过程, 促进了土壤过氧化氢酶活性的提高, 使得土壤施硒及土壤与叶面相结合施硒处理土壤过氧化氢酶活性高于叶面喷施硒^[23]。

3.2 硒处理对抗白菊品质的影响

随着人们对硒的生物学意义越来越重视和关注, 开展了大量的研究工作。高德凯等^[27]认为叶面喷施富硒肥能显著提高冬枣的营养品质。邵旭日等^[28]研究发现施硒量大于7g时番茄Vc含量降低, 但是施硒量在0~7g时, 结果却截然相反。茶菊的主要营养成分包括黄酮、绿原酸和Vc等。本研究中, 硒处理后黄酮、绿原酸含量显著提高, 其中Y、T+Y

处理下黄酮含量显著高于T, T处理下绿原酸含量显著高于Y和T+Y(图3)。李永明^[29]发现硒用量小于等于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 能够提高菊花中黄酮和绿原酸含量, 改善菊花的药用品质。硒处理后Vc含量显著降低, 不同处理下Vc含量高低依次为: $T+Y > Y > T$ (图3)。王晋民等^[30]研究发现随Se浓度的增加, Vc含量下降, 降幅为7.4%~38.6%。有关硒如何影响黄酮、绿原酸和Vc含量的变化仍待进一步研究。

3.3 硒处理对抗白菊硒累积及产量的影响

研究结果表明, 不同施硒方式下, 杭白菊花序中硒含量均有大幅度提高(图4), 纳米硒可作为有效硒源被杭白菊所吸收利用。土壤施硒、叶面喷施硒肥、土壤与叶面相结合施硒肥三种施硒方式相比, 土壤与叶面相结合施硒肥杭白菊花序中硒含量最高(图4), 与陈火云等^[15]关于施硒方式对油菜籽粒中硒含量的研究结果一致, 说明单一施硒方式处理并未使杭白菊花序对硒的吸收达到最大吸收阈值。其中, 叶面喷施硒肥较土壤施硒更能有效提高杭白菊花序中硒含量, 与于荣^[31]的研究结果一致。其原因可能有以下两方面: 其一, 施入土壤的硒易被土壤有机质、土壤胶体等吸附固定, 从而降低其有效性。其二, 在不同施硒方式下, 植物对硒的吸收转运途径不同, 硒从叶面转运至花序中的过程相较通过根系吸收转运至花序的过程可能更加高效, 避免了在长距离运输过程中的损失^[32]。

关于不同施硒处理对抗白菊产量的影响, 彭涛等^[33]研究表明, 适宜浓度的硒可以提高小麦的产量。殷金岩等^[34]发现施用合适剂量的硒有助于提高马铃薯产量。本研究中, 硒处理后提高了杭白菊单株开花量、单朵花干物质量和单产量, 其中T+Y处理下杭白菊单株开花量和单产量较对照显著提高(表2)。刘芳等^[35]研究表明, 适宜硒浓度能够促进紫云英茎粗、根长、各部分鲜物质量和干物质量。合适浓度的外源硒可以促进植物生长发育和生理代谢, 有利于茶菊产量提高。

4 结 论

以纳米硒为硒源, 不同硒处理对土壤容重、土壤孔隙度及土壤含水量均无显著影响, 不同硒处理促进了土壤蔗糖酶活性的提高, 对土壤脲酶活性有抑制作

用,对土壤碱性磷酸酶活性和土壤过氧化氢酶活性无显著影响;硒处理提高了杭白菊花序中黄酮、绿原酸和硒含量, Vc 含量下降;硒处理均提高了杭白菊单株开花量和单产量。三种施硒方式相比,土壤与叶面相结合施硒肥处理下土壤酶活性较高、产量高、富硒效果最好。综上所述,通过外源施硒生产富硒茶菊应选择土壤与叶面相结合(T+Y)的方式。

参考文献 (References)

- [1] Zheng C. Effects of selenium element nutrition on growing development and selenium contents of flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010. [郑聪. 硒营养对烤烟生长发育及烟叶硒含量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.]
- [2] Deng Y. Effects of selenium nutrition on selenium content and yield of dryland wheat grain[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018. [邓洋. 硒营养对旱地小麦籽粒硒含量及产量的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [3] Li T, Sun F Y, Gong P, et al. Effects of nano-selenium fertilization on selenium concentration of wheat grains and quality-related traits[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 (2): 427—433. [李韬, 孙发宇, 龚盼, 等. 施纳米硒对小麦籽粒硒含量及其品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (2): 427—433.]
- [4] Li F, Huang M L, Li L Y, et al. Research progress of influence of selenium-enriched fertilizer on tea plant and new selenium fertilizer[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48 (3): 1—7. [李飞, 黄明丽, 李玲玉, 等. 富硒肥对茶树的影响及新型硒肥研究进展[J]. 河南农业科学, 2019, 48 (3): 1—7.]
- [5] Liu J X, Li Y F, Shi Y, et al. Effects of foliar spraying ecological nano-selenium on quality of lettuce [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60 (5): 803—806. [刘嘉兴, 李玉芬, 石玉, 等. 叶面喷施生态纳米硒对生菜品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60 (5): 803—806.]
- [6] Zhu L, Hu T, Liu D M, et al. Selenium-enriched ability of nine Chinese medicines herbal and selenium forms in rhizosphere soil in west Hunan[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2019, 45 (2): 162—165, 193. [朱磊, 胡婷, 刘德明, 等. 湘西 9 种中药材富硒能力及根际土壤硒形态研究[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 45 (2): 162—165, 193.]
- [7] Zhu S M. Response of fruit quality of different table grape varieties to exogenous selenium fertilizer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. [朱帅蒙. 不同葡萄品种果实品质对外源硒肥的响应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.]
- [8] Zhou J. Process selenium enriched *Flos chrysanthemi* and its antioxidative activity[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. [周晶. 菊花 (*Flos Chrysanthemi*) 的富硒作用及其抗氧化活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.]
- [9] Zhang M, Huan Y J, Tao Q, et al. Effects of selenium-enriching conditions on selenium contents in *Chrysanthemum*[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2001 (2): 150—153. [张慜, 郇延军, 陶谦, 等. 富硒条件对杭白菊硒含量的影响[J]. 无锡轻工大学学报: 食品与生物技术, 2001 (2): 150—153.]
- [10] Yu Y X, Shi Y D, Chen F D, et al. Effect of sodium selenite spraying methods on selenium-enriched effect of *Chrysanthemum* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47 (2): 131—134. [于云霞, 史亚东, 陈发棣, 等. 亚硒酸钠喷施方式对滁菊富硒效果的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (2): 131—134.]
- [11] Tian X Y, Wang Z Y. Effects of selenium application on content, distribution and accumulation of selenium, flavonoids and rutin in Tartary buckwheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (4): 721—727. [田秀英, 王正银. 硒对苦荞硒、总黄酮和芦丁含量、分布与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (4): 721—727.]
- [12] Lin D Y, Xie Y H. Soil Science[M]. 2nd Ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002, 49—50. [林大仪, 谢英荷. 土壤学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2002: 49—50.]
- [13] Liu M, Zhang R R, Zheng Y Y, et al. Edaphic and fertilizer factors influencing selenium uptake of crops: A review[J]. Soils, 2018, 50 (6): 1100—1104. [刘敏, 张瑞瑞, 郑韵英, 等. 影响作物吸收硒的土肥因素研究进展[J]. 土壤, 2018, 50 (6): 1100—1104.]
- [14] Wang Y R, Guo Q S, Shao Q S, et al. Effects of soil factors on active component content of *Chrysanthemum morifolium*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2010, 35 (6): 676—681. [王艳茹, 郭巧生, 邵清松, 等. 土壤因子对药用白菊花活性成分含量影响研究[J]. 中国中药杂志, 2010, 35 (6): 676—681.]
- [15] Chen H Y, Xie Y M, Zhou L, et al. Effects of selenium application methods on the growth and the seed selenium, cadmium and lead contents in rape[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48 (3): 49—54. [陈火云, 谢义梅, 周灵, 等. 施硒方式对油菜生长和籽粒硒、镉、铅含量的影响[J]. 河南农业科学, 2019,

- 48 (3): 49—54.]
- [16] Zhao Y G. Effects of exogenous selenium, water and fertilizer joint regulation on quality and yield of jujube [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011. [赵勇钢. 外源硒补给与水肥联合调控对红枣品质及产量的影响[D]. 北京: 中国科学院, 2011.]
- [17] Bao S D. Analysis for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [18] Lu W J, Li Y S. Experimental course on plant physiology[M]. Beijing: China Forestry Press, 2012. [路文静, 李奕松. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.]
- [19] Liao Q L, Ren J H, Xu W W, et al. Heterogeneity of Cd pollution in farmland soils at field scales[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (6): 1390—1400. [廖启林, 任静华, 许伟伟, 等. 田块尺度上的农田土壤 Cd 污染分布不均匀性[J]. 土壤学报, 2019, 56 (6): 1390—1400.]
- [20] Zhao J P. Effect of the active selenium on properties of soil physical and chemical of *Camellia oleifera* forest[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2011. [赵建平. 活性硒元对油茶林土壤理化性质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.]
- [21] Fan J, Wang R, Hu H Q, et al. Effects of exogenous selenium with different valences on Se forms, enzyme activities and microbial quantity of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (5): 137—141, 171. [樊俊, 王瑞, 胡红青, 等. 不同价态外源硒对土壤硒形态及酶活性、微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (5): 137—141, 171.]
- [22] Shi Y J, Shi Y J, Wang Y R, et al. Dynamic responses of soil enzymes to exogenous sodium selenite and selenomethionine[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (3): 1189—1196. [史雅静, 史雅娟, 王玉荣, 等. 土壤酶对外源有机硒和无机硒的动态响应[J]. 环境科学学报, 2018, 38 (3): 1189—1196.]
- [23] Wang X M, An Y, Qin L, et al. Path analysis of soil physicochemical factors and catalase activities under cadmium stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34 (11): 59—65. [王秀梅, 安毅, 秦莉, 等. 镉胁迫下土壤理化因子与过氧化氢酶活性的通径分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34 (11): 59—65.]
- [24] Li Q G, Zhang X W. Application methods of super absorbent polymers; Effect on root characters and growth of poplar seedlings and soil enzyme activities[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (14): 36—40. [李庆国, 张晓文. 保水剂施用方式对杨树苗根系特性和生长及土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (14): 36—40.]
- [25] Xu S X. The absorption and accumulation of selenium in *Camellia oleifera* and its effect on soil enzyme activities[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016. [许舒娴. 硒在油茶林中的吸收积累及对土壤酶活性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.]
- [26] Fan J. Transformation of selenium in soil and plants, and the mechanisms for the accumulation and resistance to selenium in tobacco plant[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [樊俊. 硒在土壤—植物中的转化及烟株对硒的富集和抗性机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [27] Gao D K, Liang Y L, Li W P, et al. Effect of spraying Se fertilizer on *Zizyphus jujuba* cv. Dongzao nutritional quality and its correlation analysis[J]. Northern Horticulture, 2015 (13): 37—39. [高德凯, 梁银丽, 李文平, 等. 叶面喷施富硒肥对冬枣营养品质的影响及相关性分析[J]. 北方园艺, 2015 (13): 37—39.]
- [28] Shao X R, Han Y Y, Qi C H, et al. Effects of different concentrations of selenium fertilizer on *Tomato* Quality[J]. Vegetables, 2017 (8): 25—28. [邵旭日, 韩莹琰, 齐长红, 等. 叶面施用不同浓度的硒肥对番茄果实品质的影响[J]. 蔬菜, 2017 (8): 25—28.]
- [29] Li Y M. Effects of copper, zinc and selenium on yield and quality of *Chrysanthemum morifolium* Ramat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. [李永明. 铜、锌、硒对药用菊花产量和药效成分的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.]
- [30] Wang J M, Zhao Z Z, Li G R. Effects of selenium application on the selenium content, yield and qualities of carrot[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (2): 240—244. [王晋民, 赵之重, 李国荣. 硒对胡萝卜含硒量、产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (2): 240—244.]
- [31] Yu R. Effects of different valence selenium and its applications on wheat yield and selenium content in the typical selenium deficient area of the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2015. [于荣. 黄土高原典型缺硒区不同价态硒和施硒方式对小麦产量和硒含量的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [32] Zhang C M, Zhou X B. Effects of different selenium application methods on Se utilization efficiency of rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (1): 186—194. [张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (1): 186—194.]

- [33] Peng T, Zhao W F, Gao Y, et al. Effect of different concentration of selenium rich liquid on wheat grain selenium content and yield[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015 (11): 19, 22. [彭涛, 赵伟峰, 高燕, 等. 不同浓度富硒营养液对小麦硒含量及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2015 (11): 19, 22.]
- [34] Yin J Y, Geng Z C, Li Z Y, et al. Effects of three fertilizers on uptake, transformation, yield and quality of potatoes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (3): 823—829. [殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯硒素吸收、转化及产量、品质的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35 (3): 823—829.]
- [35] Liu F, Zhou Q K, Zhou S B, et al. Effect of application of sodium selenite to soil on the growth and physiological indexes and selenium accumulation of *Astragalus sinicus*[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 129—136. [刘芳, 周乾坤, 周守标, 等. 施硒对紫云英生长、生理和硒积累特性的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47 (1): 129—136.]

(责任编辑：陈荣府)