

网络出版时间:2012-07-18 10:51

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120718.1051.020.html>

施用硫肥和硒肥对茎瘤芥产量及抗氧化作用的影响

王丽霞^{1,2}, 汤举红², 罗庆熙³, 段九菊⁴

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2 长江师范学院, 重庆 涪陵 408000;

3 西南大学 园艺学院, 重庆 北碚 400700; 4 山西省农业科学院 园艺研究所, 山西 太原 030031)

【摘要】【目的】了解不同硫、硒肥施用量对茎瘤芥(*Brassica juncea* var. *tumida*)干物质量、硫、硒含量及叶片保护酶活性和代谢物质含量的影响,以探明茎瘤芥对硫、硒肥的生理响应机制。【方法】以茎瘤芥“涪杂 1 号”为供试品种,采用盆栽试验研究了硫(S) (0, 50, 100 mg/kg)、硒(Se) (0, 1, 3 mg/kg)不同用量处理组合(S₀Se₀(CK)、S₅₀Se₁、S₅₀Se₃、S₁₀₀Se₁、S₁₀₀Se₃)对茎瘤芥不同部位干物质量和硫、硒积累及叶片抗氧化能力的影响。【结果】与 S₀Se₀ 相比,施用硫、硒肥能明显提高茎瘤芥根、膨大茎和叶片及单株干物质量。施用硫、硒的处理均能明显提高茎瘤芥各部位对硫、硒的吸收与积累,且硫和硒主要积累在茎瘤芥地上部分膨大茎和叶中。施用硫、硒的处理明显提高了各部位的有机硒和无机硒含量,其中膨大茎和叶中的有机硒含量明显高于无机硒;5 个处理中, S₅₀Se₃ 处理根、膨大茎和叶中的有机硒与无机硒含量均最高。超氧化物歧化酶(SOD)活性以 S₁₀₀Se₁ 处理最高,谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性以 S₅₀Se₃ 处理最高;而抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化氢酶(CAT)活性随着硫、硒肥用量的增加变化不大。施用硫、硒肥后,茎瘤芥叶片中 MDA 含量较高,抗坏血酸(AsA)和过氧化氢(H₂O₂)含量较低。【结论】施用硫、硒肥能提高茎瘤芥单株干物质量,促进硒的吸收与积累,对 SOD 和 GSH-Px 活性及 MDA 含量有明显影响。综合分析认为, 50 mg/kg S+3 mg/kg Se 是硫、硒肥施用的最佳组合。

【关键词】 茎瘤芥;有机硒;硫;谷胱甘肽过氧化物酶;抗坏血酸

【中图分类号】 S143.7;S637.306⁺.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)08-0151-06

Effects of application of sulfur and selenium into stem mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*) on its yield and antioxidation

WANG Li-xia^{1,2}, TANG Ju-hong², LUO Qing-xi³, DUAN Jiu-ju⁴

(1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Yangtze Normal University,

Fuling, Chongqing 408000, China; 3 College of Horticulture, Southwest University, Beibei, Chongqing 400700, China;

4 Institute of Horticulture, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: 【Objective】 This study was conducted to investigate the potential feasibility of tuber mustard as a source of selenium(Se) on the base of the effect of relative treatments on the yield, accumulation of selenium and sulfur(S), and antioxidation of tuber mustard. 【Method】 “Fuza 1” as a experiment material, field trail was used. S(0, 50, 100 mg/kg) and Se(0, 1, 3 mg/kg) were combined to five groups, signed as S₀Se₀, S₅₀Se₁, S₅₀Se₃, S₁₀₀Se₁, S₁₀₀Se₃, and added to the soil, separately, where tuber mustard was grown. The effects of S and Se on plant dry weight(DW), S and Se’s contents in root, tuber, and leaf, and antioxidation of leaf, were investigated on the stem mustard. 【Result】 The results showed that the dry weights of root, tuber, leaf, and total plant were all significantly increased when S and Se fertilizer was applied. Each

* [收稿日期] 2011-12-31

[基金项目] 重庆市教委科技项目(KJ081305)

[作者简介] 王丽霞(1977—),女,山西平遥人,讲师,主要从事园艺植物生理研究。E-mail: tangcx0117@163.com

[通信作者] 汤举红(1969—),男,四川荣县人,副教授,主要从事植物生态研究。

treatment of addition of S and Se all could improve the absorption of S and Se, which was mostly accumulated in overground parts and the content of organic Se in leaf and tuber was higher than that of inorganic Se. The treatment of $S_{50}Se_3$ had the best effect on the accumulation of inorganic and organic Se. The activity of SOD was the highest in the treatment of $S_{100}Se_1$ and that of GSH-Px the highest in the $S_{50}Se_3$ treatment, while the activity of APX and CAT was low in each treatment. The content of MDA in leaf was largely higher than that of AsA and H_2O_2 . 【Conclusion】 S and Se fertilizer could facilitate mustard yield and the accumulation of S and Se in root, tuber and leaf. S and Se fertilizer mainly influenced the activity of SOD and GSH-Px. The group of $S_{50}Se_3$ (50 mg/kg S+3 mg/kg Se) was considered to be the optimal combination for application.

Key words: stem mustard; organic selenium; sulfur; glutathione peroxidase; ascorbate

茎瘤芥(*Brassica juncea* var. *tumida*)是原产我国的地方特色品种,其膨大的茎既可鲜食,又可腌制榨菜,是长江以南地区的主栽蔬菜之一。茎瘤芥产品主要供应国内市场和出口东南亚国家,生产需求量大,市场前景广阔。但是传统的茎瘤芥栽培技术简单,施肥方法单一,难以满足市场对产品食用与保健价值多元化的要求。

硒是人体必需的微量元素,通过农艺强化技术来提高作物硒素水平,是目前国际上采用的通过饮食补硒的有效方法^[1-3]。许多资料表明,芸薹属植物是硒富集植物^[4-5],其中芥菜(Indian mustard)是典型的硒富集植物^[6-7],而作为芥菜的变种茎瘤芥的硒富集特点还未见报道。硒与硫是同族元素,二者物理、化学性质相似,硫、硒通过竞争根毛细胞膜上的硫运转载体进入根系,再通过硒代氨基酸、硒蛋白结合体等形式被植物体固定^[8]。同时,硒也是植物体内谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性部位,可催化过氧化物的还原反应,从而减少自由基对生物膜氧化的伤害。

关于施用硒肥对作物抗氧化能力的研究在花生^[9]、小麦^[10]、小白菜和菠菜^[11-13]、叶用芥菜^[14]及大蒜^[15]等作物上已有报道,但硫、硒配施对茎瘤芥抗氧化能力影响的研究还未见报道。本试验以亚硒酸钠(Na_2SeO_3)与硫酸钠(Na_2SO_4)作为硒肥与硫肥的来源,研究不同用量硒肥和硫肥组合对茎瘤芥产量及硫、硒含量和叶片抗氧化能力的影响,旨在探明茎瘤芥对硫、硒肥的生理响应机制。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验从 2009-10 开始,在重庆涪陵农业示范基地进行。先大田育苗,待幼苗长到四叶一心时,移栽盆中(10 cm×20 cm×8 cm),每盆 1 株。茎膨大开

始时(12-06)进行 S 和 Se 处理,2010-02 收获全株。供试土壤为基地原有栽培土,土壤为紫色土,有机质含量 11.2 g/kg,碱解氮含量 112.65 mg/kg,速效磷含量 32.74 mg/kg,速效钾含量 51.32 mg/kg,有效硒含量 0.014 mg/kg。供试茎瘤芥品种为“涪杂 1 号”(购买于当地市场),土壤施入的基肥有尿素 80 mg/kg、过磷酸钙 800 mg/kg、氯化钾 60 mg/kg。盆栽试验每盆装土 7 kg,施入 S (以 Na_2SO_4 形式施入)含量分别为 0, 50, 100 mg/kg, Se (以 Na_2SeO_3 形式施入)含量分别为 0, 1, 3 mg/kg, 共 5 个组合: 0 mg/kg S+0 mg/kg Se、50 mg/kg S+1 mg/kg Se、50 mg/kg S+3 mg/kg Se、100 mg/kg S+1 mg/kg Se、100 mg/kg S+3 mg/kg Se, 分别表示为 S_0Se_0 (对照, CK)、 $S_{50}Se_1$ 、 $S_{50}Se_3$ 、 $S_{100}Se_1$ 、 $S_{100}Se_3$ 。分 3 次(12-06, 12-13, 12-20)浇灌根部。每处理 5 盆, 3 次重复, 随机排列。

1.2 检测项目及其方法

将采收后的茎瘤芥植株用蒸馏水冲洗干净,吸干水分,一部分称质量,分离根、茎、叶不同部位,在 80 ℃烘箱中烘干 12 h,称干质量,用于硫、硒含量的测定;另一部分用液氮冷冻后于 -80 ℃保存,用于酶活性测定。其中硫含量测定采用 HNO_3 - $HClO_4$ 消化-硫酸钡比浊法^[16],总硒、有机硒和无机硒含量测定采用高建忠等^[17]的方法,GSH-Px 活性测定参照黄爱缨等^[18]的方法,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照何宇炯等^[19]的方法,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定参照 Chance 等^[20]的方法,过氧化氢(H_2O_2)含量测定采用陈拓等^[21]的方法,过氧化氢酶(CAT)活性测定用高锰酸钾滴定法^[22],丙二醛(MDA)含量测定采用分光光度法^[22],抗坏血酸(AsA)含量测定采用 2,4-二硝基苯肼法^[22]。

1.3 数据统计与分析

试验数据用“平均值(mean)±标准差(SD)”表

示,方差分析采用 OriginPro 8.5 进行 LSD 检验,检测显著水平设为 $P=0.05$,每组数据 3 次重复,采用 OriginPro 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同硫硒处理对茎瘤芥干物质量积累的影响

由表 1 可以看出,不同硫硒处理对茎瘤芥干物质量积累的影响不同。与 S_0Se_0 (对照) 相比, $S_{50}Se_1$ 、 $S_{50}Se_3$ 、 $S_{100}Se_1$ 处理均能显著提高茎瘤芥食

用部位膨大茎的干物质量,其中 $S_{50}Se_1$ 和 $S_{100}Se_1$ 的效果最好,与 S_0Se_0 相比,膨大茎干物质量分别提高了 36%,41%;同时这 3 个处理也能显著提高茎瘤芥根、叶的干物质量。与 S_0Se_0 相比, $S_{50}Se_1$ 、 $S_{50}Se_3$ 、 $S_{100}Se_1$ 、 $S_{100}Se_3$ 处理的茎瘤芥单株干物质量分别提高了 32.3%,24.6%,36.2%,23.4%,表明硫、硒配施能够促进茎瘤芥的生长,既可提高单株干物质量,又能提高可食部位膨大茎的干物质量。

表 1 不同硫硒处理对茎瘤芥根、膨大茎、叶干物质量积累的影响

Table 1 Effect of different concentrations of sulfur and selenium on the yield of tuber mustard

处理 Treatment	不同部位干物质量/(g·株 ⁻¹) Dry mass of different part			单株干物质量/g Total dry mass	较对照 增加比例/% Increment
	根 Root	膨大茎 Tuber	叶 Leaf		
S_0Se_0 (CK)	8.2±0.4 cd	30.2±2.1 cd	24.2±1.6 e	61.3±8.4 d	—
$S_{50}Se_1$	11.5±0.5 a	41.2±2.8 a	29.3±1.4 bc	81.1±6.3 a	32.3
$S_{50}Se_3$	10.5±0.4 a	37.3±1.7 b	27.8±2.8 cd	76.4±8.2 ab	24.6
$S_{100}Se_1$	10.2±0.5 ab	42.6±1.4 a	30.1±2.4 ab	83.5±4.9 a	36.2
$S_{100}Se_3$	9.6±0.3 bc	33.7±2.3 bc	33.1±2.7 a	75.7±5.2 bc	23.4

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。
Note: The different letters behind data represented significant difference at 0.05 level.

2.2 不同硫硒处理对茎瘤芥不同部位硫、硒积累的影响

由图 1 可见,不同硫硒处理茎瘤芥不同部位的硫、硒含量较对照明显增加,且硫和硒主要积累在地上部分膨大茎和叶中。5 个处理中, $S_{100}Se_1$ 处理茎瘤芥的根、膨大茎、叶的硫含量均最高,与 S_0Se_0 相

比,分别增加了 7.8, 5.3, 4.7 倍; $S_{50}Se_3$ 处理的茎瘤芥根、膨大茎、叶的硒含量均最高,与 S_0Se_0 相比,分别增加了 43.5, 51 和 60.7 倍。可知与 S_0Se_0 相比,施用硫、硒的处理均显著提高了茎瘤芥对硫、硒的积累,但不同处理对硫硒积累的影响不同,这可能与植株不同部位对硫、硒的吸收存在竞争有关。

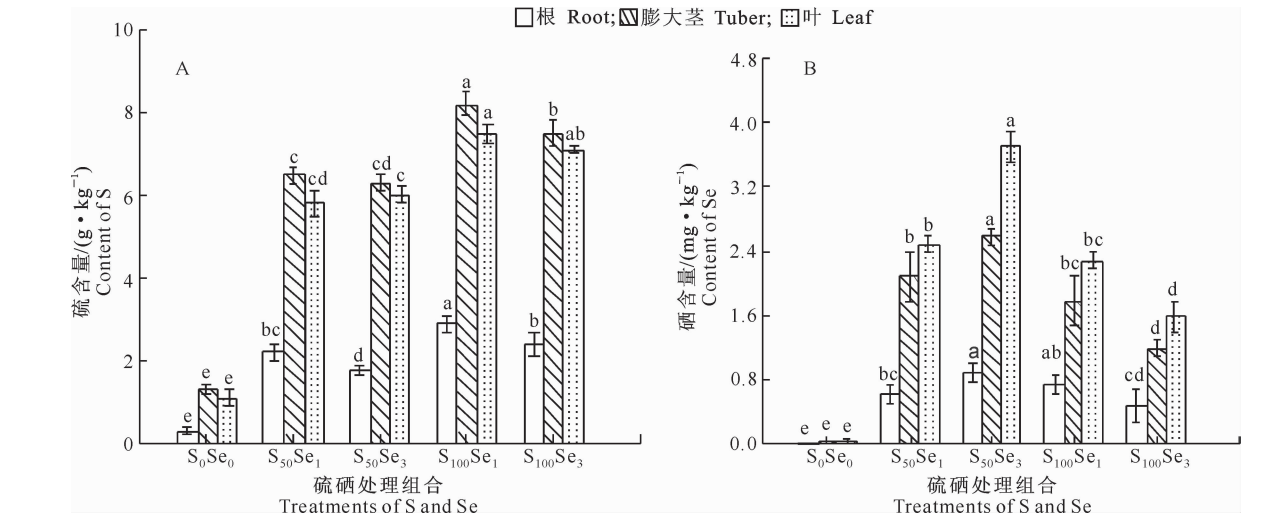


图 1 不同硫硒处理对茎瘤芥根、膨大茎、叶片硫(A)和硒(B)积累的影响
柱状图上标不同小写字母者表示同一部位不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同
Fig.1 Accumulation of sulfur and selenium in root,tuber,and leaf of stem mustard at different treatments levels
The different letters in histogram means significant difference at 0.05 level. The same as follows

2.3 不同硫硒处理对茎瘤芥有机硒与无机硒含量的影响

由图 2 可见,与 S_0Se_0 相比,不同硫硒处理均明

显提高了茎瘤芥各部位的有机硒和无机硒含量,随着硫、硒肥用量的增加,各部位表现出相似的吸收与转化规律,即 $S_{50}Se_3$ 处理茎瘤芥各部位的有机硒与

无机硒含量均最高。在膨大茎和叶中,有机硒含量比无机硒高,为无机硒含量的 2~3 倍;而在茎瘤芥根中,无机硒的含量比有机硒高。

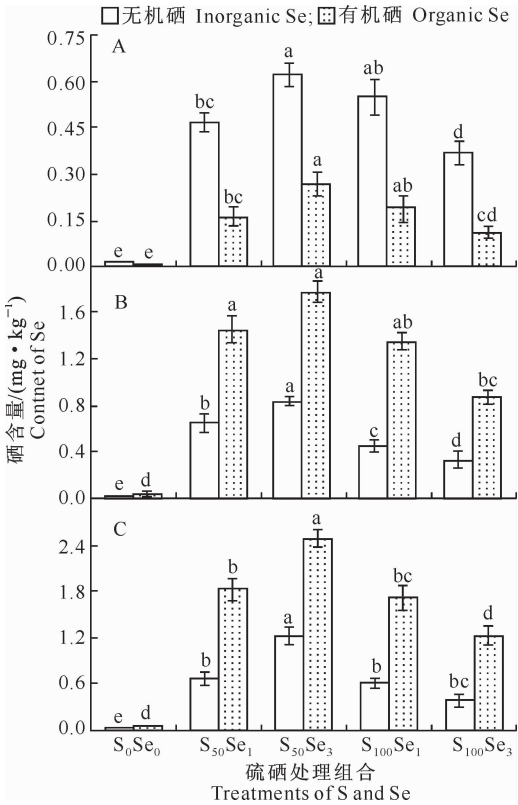


图 2 不同硫硒处理对茎瘤芥根(A)、膨大茎(B)、叶片(C)中有机硒与无机硒含量的影响
Fig. 2 Organic and inorganic selenium contents in root (A), tuber (B), and leaf (C) of mustard at different levels

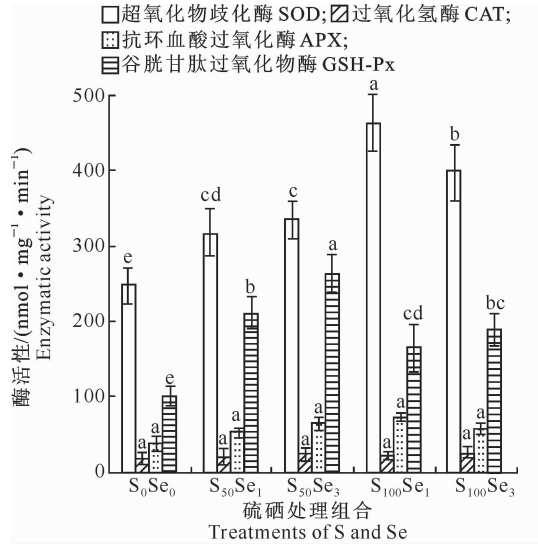


图 3 不同硫硒处理对茎瘤芥叶片保护酶活性的影响
Fig. 3 Variations of the protect enzymatic activity of leaf under the treatment gradients of sulfur and selenium

2.4 不同硫硒处理对茎瘤芥叶片保护酶活性的影响

由图 3 可知,不同硫硒处理对茎瘤芥叶片保护酶活性的影响不同,其中 SOD 和 GSH-Px 的活性随着硫、硒肥用量的增加均呈现出先增大后减小的趋势,SOD 活性以 S₁₀₀Se₁ 处理最高,而 GSH-Px 的活性以 S₅₀Se₃ 处理最高。APX 和 CAT 活性随硫、硒肥用量的增加变化不大。

2.5 不同硫硒处理对茎瘤芥叶片代谢物质含量的影响

从图 4 可看出,茎瘤芥叶片中的 MDA 含量明显高于 H₂O₂ 和 AsA,且随着硫、硒肥用量的增大而增加。不同硫、硒处理对 AsA 含量影响不大,对 H₂O₂ 含量有一定影响,H₂O₂ 含量随着硫、硒肥用量的增大呈先增加后减小的变化趋势,其中以 S₅₀Se₃ 处理的 H₂O₂ 含量最高。

3 讨论

硒是自然界土壤中广泛分布的化学元素,主要存在的化学价态有 2⁻, 4⁺ 和 6⁺[23]。硒是人类所必需的微量元素,适当补硒可以预防心脏病、癌症和一些慢性疾病[24]。2003 年,美国农业部提出人体每日硒推荐摄入量为 50~70 μg[25]。由于硒不是植物必需的营养元素,根据植物对硒的耐受性,可将植物分成硒敏感植物(Non-accumulator)、硒指示植物(Se-indicator)、硒富集植物(Se-accumulator)[4]。通过人工施用硒肥,筛选出适宜的富硒农作物来作为人体补硒的有效来源,是当前科学研究的一个重要方向。

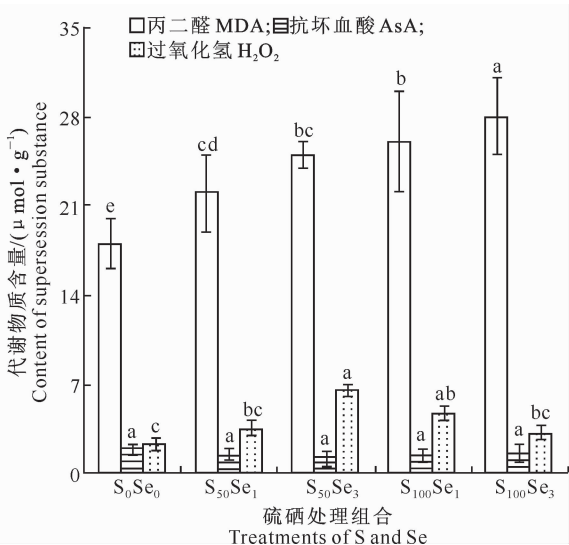


图 4 不同硫硒处理对茎瘤芥叶片代谢物质含量的影响
Fig. 4 Variation of metabolism materials in leaf at the different treatment levels

硫是植物必需的大量元素,硫与硒元素之间存在着竞争吸附和竞争转运关系,而硫、硒不同施用量,对植物生长和硒积累的影响不同。在本试验中, $S_{50}Se_1$ 、 $S_{50}Se_3$ 和 $S_{100}Se_1$ 处理均能显著提高茎瘤芥根、膨大茎和叶的干物质量,这可能与硫的充足供应有关,硫是植物叶片类囊体膜上光合系统电子传递链的组成部分,施用充足的硫,可以提高光合作用的效率,促进植物生长;此外,也可能与硒的含量较低有关。李登超等^[11]报道,低浓度硒可以促进菠菜的生长,而高浓度硒则抑制了蛋白质的正常代谢,降低了菠菜的产量。本研究中,硒、硫的积累主要集中在茎瘤芥地上部分叶片和膨大茎中, $S_{100}Se_1$ 处理促进了植株对硫的最大吸收, $S_{50}Se_3$ 处理促进植株对硒的最大吸收,但是高含量硫和硒组合 $S_{100}Se_3$ 处理的茎瘤芥植株,其硫、硒含量并不是最高,这可能与硫、硒之间的竞争吸附和转运有关。

硒通过植物体的吸收与转化,大多以硒代氨基酸(如硒代胱氨酸(CySeSeCy)、硒代蛋氨酸(Se-Met))和硒蛋白等形式被固定下来,同时通过二甲基硒醚(DMSe)的挥发从气孔排除。植物能提供的有机硒含量高是评价植物补硒能力的重要指标^[15]。本试验结果表明,茎瘤芥根系中的硒以无机硒为主,而叶片和膨大茎中的硒以有机硒为主,有机硒占总硒的 60%~80%,以每天消耗茎瘤芥加工产品 45 g 计算,按照本试验中膨大茎的最低硒含量 1.2 mg/kg 推算,茎瘤芥可提供的补硒量为 54 $\mu\text{g}/\text{d}$,完全能够满足 50~70 $\mu\text{g}/\text{d}$ 的硒推荐量。

由于硒是 GSH-Px 的组成元素,在高等植物中起着重要的抗氧化作用。本试验结果表明,当硫硒组合处理中硫肥用量相同时,GSH-Px 活性随着硒肥用量的增大而增加;当硫硒组合处理中硒肥用量相同时,GSH-Px 活性随着硫肥用量的增大而降低,这与 Cartes 等^[26]的研究结果一致。此外,SOD、APX 和 CAT 的活性对不同用量硫、硒肥的响应不同,这 3 种保护酶中,SOD 的活性最高,且以 $S_{100}Se_1$ 处理的 SOD 活性最高;而 APX 和 CAT 活性均较低,其对不同用量硫、硒肥的响应不明显。本研究中,与其他代谢物质相比, H_2O_2 的含量较低,较多的 H_2O_2 可能与活性较高的 GSH-Px 反应,从而降低了与 CAT 的结合,使 CAT 的活性降低。AsA 作为 APX 的底物,其含量高低也影响着 APX 的活性。本试验中,不同用量硫、硒肥对茎瘤芥叶片 AsA 含量的影响不大,AsA 含量较低,这可能导致了 APX 的活性较低。本试验结果显示,不同硫硒处理的

MDA 含量较高,可能与硫、硒肥的用量高有关。一般土壤中有效硫含量为 10~30 mg/kg,可溶性硒含量为 0.01 mg/kg,而本试验土壤中施入的硫、硒含量分别相当于土壤硫、硒正常值的 2~5 倍和 100~300 倍,高含量的硫、硒肥促进植物产生了膜脂过氧化作用,从而促进了 SOD 酶活性及 MDA 含量的增加。

[参考文献]

- [1] 黄开勋,刘琼,徐辉碧. 硒蛋白的抗氧化性研究与第 21 个氨基酸的发现 [J]. 无机化学学报,2008,24(18):1213-1218.
Huang K X, Liu Q, Xu H B. Antioxidation of selenoproteins and discovery of 21 (st) natural amino acid [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2008, 24(18): 1213-1218. (in Chinese)
- [2] Banuelos G S, Hanson B D. Use of selenium-enriched mustard and canola seed meals as potential bioherbicides and green fertilizer in strawberry production [J]. Hortscience, 2010, 45: 1567-1572.
- [3] Kopsell D, Sams C. Selenization of basil and cilantro through foliar applications of selenate-Se and selenite-Se [J]. Hortscience, 2008, 43: 1201-1202.
- [4] White P J, Bowen H C, Marshall B, et al. Extraordinarily high leaf selenium to sulfur ratios define 'Se-accumulator' plants [J]. Annals of Botany, 2007, 100: 111-118.
- [5] Yawata A, Oishi Y, Anan Y, et al. Comparison of selenium metabolism in three brassicaceae plants [J]. Journal of Health Science, 2010, 56: 699-704.
- [6] Ogra Y, Okubo E, Takahira M. Distinct uptake of tellurate from selenate in a selenium accumulator, Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. Metallomics, 2010, 2: 328-333.
- [7] Rani N, Dhillon K S, Dhillon S K. Critical levels of selenium in different crops grown in an alkaline silty loam soil treated with selenite-Se [J]. Plant and Soil, 2005, 277: 367-374.
- [8] Stroud J L, Li H F, Lopez-Bellido F J, et al. Impact of sulphur fertilisation on crop response to selenium fertilization [J]. Plant and Soil, 2010, 332: 31-40.
- [9] 翟红强,赵会杰. 硒对花生抗氧化作用的初步研究 [J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 58-62.
Zhai H Q, Zhao H J. Preliminary study on antioxidation of peanut as affected by selenium [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1): 58-62. (in Chinese)
- [10] 宋家永,王海红,朱喜霞,等. 叶面喷硒对小麦抗氧化性能及籽粒硒含量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 178-181.
Song J Y, Wang H H, Zhu X X, et al. Effect of spraying selenium to the leaves on the performance of antioxidation of wheat and grain selenium content [J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 178-181. (in Chinese)
- [11] 李登超,朱祝军,韩秋敏,等. 硒对菠菜、小白菜生长及抗氧化活性的研究 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, 21(1): 5-8.

- Li D C, Zhu Z J, Han Q M, et al. Effects of selenium on the growth and antioxidative activity in spinach and pakchoi [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2003, 21(1): 5-8. (in Chinese)
- [12] 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 D C, Zhu Z J, Xu Z H. Effects of selenium on antioxidative system and H_2O_2 content in spinach [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(6): 547-550. (in Chinese)
- [13] 李彦, 史衍玺, 张英鹏, 等. 盐胁迫条件下硒对小白菜抗氧化活性及膜脂过氧化作用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 749-753.
- Li Y, Shi Y X, Zhang Y P, et al. Effects of selenium on the antioxidant capacity and membrane lipid peroxidation of pakchoi cabbage under salt stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 749-753. (in Chinese)
- [14] 李娟, 朱祝军. 硒硫处理对叶用芥菜品质及抗氧化物质的影响 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 33(5): 539-543.
- Li J, Zhu Z J. Effects of selenium and sulfur treatments on nutritional quality and antioxidant substances of leaf mustard [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2007, 33(5): 539-543. (in Chinese)
- [15] 段咏新, 傅庭治, 傅家瑞. 硒在大蒜体内的生物富集及其抗氧化作用 [J]. 园艺学报, 1997, 24(4): 343-347.
- Duan Y X, Fu T Z, Fu J R. Studies on the biological accumulation and antioxidation of Selenium in garlic (*Allium sativum* L.) [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1997, 24(4): 343-347. (in Chinese)
- [16] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 143-145.
- Yu T R, Wang Z Q. Soil analytical chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1988: 143-145. (in Chinese)
- [17] 高建忠, 秦顺义, 黄克和. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定富硒酵母中的有机硒和无机硒 [J]. 分析科学学报, 2006, 22(2): 157-160.
- Gao J Z, Qin S Y, Huang K H. Determination of the organic and inorganic selenium contents in selenium-enriched yeast by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry [J]. Journal of Analytical Science, 2006, 22(2): 157-160. (in Chinese)
- [18] 黄爱纓, 吴珍龄. 水稻谷胱甘肽过氧化物酶的测定法 [J]. 西南农业大学学报, 1999, 21(4): 324-327.
- Huang A Y, Wu Z L. Determination of glutathione peroxidase in rice seedling [J]. Journal of Southwest Agriculture University, 1999, 21(4): 324-327. (in Chinese)
- [19] 何宇炯, 徐如涓, 赵毓橘. 表油菜素内酯对绿豆幼叶衰老的促进作用 [J]. 植物生理学报, 1996, 22(1): 58-62.
- He Y J, Xu R J, Zhao Y J. Enhancement of senescence by epibrassinolide in leaves of mung bean seedling [J]. Acta Physiologica Sinica, 1996, 22(1): 58-62. (in Chinese)
- [20] Chance B, Maehly A C. Assay of catalases and peroxidases [J]. Methods Enzymol, 1955, 2: 764-775.
- [21] 陈拓, 王勋陵. UV-B 辐射对小麦叶片代谢的影响 [J]. 西北植物学报, 1999, 19(2): 284-289.
- Chen T, Wang X L. Influence of enhanced UV-B radiation on H_2O_2 metabolism in wheat leaves [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 1999, 19(2): 284-289. (in Chinese)
- [22] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 356-364.
- Zhang Z L, Qu W J. Experimental guide for plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 356-364. (in Chinese)
- [23] Simmons D B D, Wallschlager D A. Critical review of the biogeochemistry and ecotoxicology of selenium in lotic and lentic environments [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, 24: 1331-1343.
- [24] El-Bayoumy K, Sinha R, Pinto J T, et al. Cancer chemoprevention by garlic and garlic-containing sulfur and selenium compounds [J]. Journal of Nutrition, 2006, 136: 864-869.
- [25] Fairweather-Tait S J, Bao Y P, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease [J]. Antioxidants and Redox Signaling, 2011, 14: 1337-1383.
- [26] Cartes P, Shene C, Luz-Mora M. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization [J]. Plant and Soil, 2006, 285: 187-195.