

文章编号:1000-8551(2020)03-0661-08

硒镉伴生对富硒土壤柑橘生长及生理代谢的影响

孙协平^{1,2} 周广文² 罗友进^{2,*} 韩国强¹ 张玲玲¹¹长江师范学院现代农业与生物工程学院,重庆 408100;²重庆市农业科学院果树研究所,重庆 401329)

摘要:为保障富硒柑橘的安全生产,明确富硒土壤硒镉伴生现象对柑橘生长、硒镉吸收转运和抗氧化能力的影响,采用盆栽试验,以一年生大雅柑橘为试验材料,研究添加硒代蛋氨酸(SeMet, CK, 模拟富硒土壤)和添加 SeMet 与镉(模拟富硒土壤硒镉伴生)对富硒土壤柑橘的生长指标、硒镉含量、叶片还原型抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环效率的影响。结果表明,与 CK 相比,富硒土壤中,硒镉伴生增加了柑橘叶片叶绿素 a+b、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量,但对株高、新梢长度、新梢数量以及根茎叶的干物质量影响不显著;在富硒土壤中,硒镉伴生显著增加了大雅柑橘硒含量和硒的富集系数(BCF),降低了硒的转运系数(TF);硒和镉主要分布在根系,其次是叶片和茎;在 AsA-GSH 循环中,硒镉伴生使过氧化氢(H₂O₂)和还原型抗坏血酸(AsA)含量显著上升,脱氢抗坏血酸(DHA)含量上升但未达到显著水平,抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)活性和脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性显著上升,而 GSH 和氧化型谷胱甘肽(GSSG)含量下降,AsA/(AsA+DHA)和 GSH/(GSH+GSSG)比值降低,谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性显著降低。本研究为阐明镉胁迫对富硒土壤柑橘的生理影响机制提供了理论依据。

关键词:柑橘; 硒代蛋氨酸(SeMet); 镉; 生长; 抗坏血酸-谷胱甘肽氧化循环

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.03.0661

硒(selenium, Se)是人和动物必需的微量元素,具有营养和解毒双重生物学功能,被誉为生命保护剂,在提高人体免疫力和预防癌症方面起着积极作用^[1]。我国是农业大国,但超过 70%的国土面积处于缺硒水平,容易导致人体硒摄入不足,使得人体免疫力下降,引发各种病症^[2-3]。为了提高国民对硒的摄入量,富硒农业孕育而生,即通过硒生物转化方法,利用富硒地区丰富的硒资源或者通过根部施肥和叶面喷硒措施来发展种植业,生产富硒农产品,亦或通过喂食富硒饲料来发展养殖业,生产富硒动物产品。

随着经济社会的发展、矿产的开发和矿物废料的利用,镉(cadmium, Cd)已成为环境的主要污染物之一^[4]。镉对植物的毒害作用主要表现在抑制植物生长,降低作物产量,其对人体的毒害作用主要是通过人体进食含镉植物的可食部分而影响人体健康。研究指

出硒与镉存在一定的伴生关系,富硒地区存在重金属污染的威胁^[5]。罗友进等^[3]研究三峡库区(重庆段)发现,硒与土壤中的镉、铬、砷等均存在显著正相关。低浓度硒能够抑制重金属的吸收起到拮抗作用,通过增加蛋白质的积累(如提高谷酰基激酶活性和降低脯氨酸氧化酶活性)可减缓镉毒害导致的活性氧胁迫;高浓度硒反而促进重金属的吸收起到协同作用^[5-7]。

富硒地区土壤硒含量一般介于 0.4~3.0 mg·kg⁻¹之间,我国部分地区土壤属于富硒土壤^[5,8],但易被植物吸收的硒酸盐、亚硒酸盐、小分子有机硒等仅占土壤总硒量的 0.4%~14.6%^[9-11],其中植物有机硒的生物学功能远超过无机硒^[12]。因此,富硒土壤中不一定能够生产出富硒农产品。人工强化富硒是目前生产富硒产品的主要途径。如以聚硒植物槟榔青(*Spondias pinnata*)(硒的主要形态为硒代甲基半胱氨酸)改良土

收稿日期:2018-10-09 接受日期:2019-02-24

基金项目:国家自然科学基金(31901972),重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0618),2015年重庆市博士后科研项目(渝Xm2015126)

作者简介:孙协平,女,讲师,主要从事果树生理与生态研究。E-mail: xieping444@163.com

* 通讯作者:罗友进,男,助理研究员,主要从事土壤营养方面研究。E-mail: luoyoujin1984@163.com

壤能够连续几年生产出富含有机硒的西兰花和胡萝卜^[13]。柑橘是世界上栽培面积最广、产量最大的果树,发展富硒柑橘生产具有重要意义。本研究通过施用小分子有机硒(硒代蛋氨酸 SeMet)模拟富硒土壤,分析柑橘在硒镉伴生条件下的生长和生理变化,以期为富硒柑橘的安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以盆栽当年嫁接的大雅柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco. Daya) 为试验材料,其砧木为资阳香橙 (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) 由重庆市农业科学院提供。塑料盆体积为 10.0 L。

供试药品 L-硒代蛋氨酸 (SeMet) 和氯化镉 (CdCl_2) 均为分析纯,成都化夏化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

本试验于 2015 年 8 月在重庆市农业科学院高新技术园的避雨棚中进行。供试基质为紫色壤土、草炭土以及珍珠岩,其体积比为 10:10:1。筛选长势较好、整齐一致的盆栽大雅幼苗进行硒处理。根据前期试验结果,即香橙砧木在 2.0~4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硒处理下,植株的生长指标及体内抗氧化水平较高^[14],本试验设计盆栽土壤硒含量为 3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据 GB 15618-1995^[15] 土壤二级污染界限,将土壤镉含量设为 0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据盆栽土壤体积、SeMet、 CdCl_2 的分子量计算施用量,将试剂溶解于 1.0 L 水中缓慢倒入盆中,使对照 (control, CK) 盆栽土壤硒含量为 3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而处理的盆栽土壤硒含量为 3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、镉含量为 0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以模拟硒镉伴生。试验材料统一日常管理,238 d 后,结束试验,采集叶片并用液氮速冻,于 -40℃ 冰箱储存并用于相关指标的测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标和干重 每个处理选 4~6 株整齐一致的橘苗,洗净带回实验室,测定株高、新梢总长度、新梢数量。新梢总长度为每个新梢长度的总和,新梢数量为当年萌发的新梢个数;测定后将植株分成根、茎、叶三部分,洗净擦干后 105℃ 杀青 15~20 min,60℃ 烘干 72 h 称重。称量各器官干重后装袋储存。

1.3.2 硒和镉含量 硒和镉元素采用原子荧光光度法测定,烘干样品委托青岛科标检测研究院有限公司测定。

1.3.3 硒和镉富集系数 柑橘对硒/镉的富集系数 (biological concentration factor, BCF) 定义为柑橘干物

质体内硒/镉的平均含量与土壤中硒/镉含量的比值。按照公式计算:

$$BCF = C_i / C_{ei} \quad (1)$$

式中, C_i 代表柑橘干植物体内硒/镉平均含量(根据根、茎、叶硒/镉浓度以及各器官干重计算); C_{ei} 代表土壤硒/镉的含量(土壤硒/镉含量除以土壤容重)。

1.3.4 硒和镉转运系数 柑橘对硒/镉的转运系数 (translocation factor, TF) 定义为柑橘叶片或茎的硒/镉含量与柑橘根系硒/镉含量的比值。按照公式计算:

$$TF = C_{ls} / C_r \quad (2)$$

式中, C_{ls} 代表柑橘叶片或茎的硒/镉含量; C_r 代表柑橘根系的硒/镉含量。

1.3.5 叶绿素和过氧化氢 (H_2O_2) 含量 叶绿素和 H_2O_2 含量均采用丙酮提取法测定,具体参考蔡永萍^[16]的方法。

1.3.6 抗坏血酸-谷胱甘肽循环物质与酶 还原型抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA)、氧化型脱氢抗坏血酸 (ascorbic acid, DHA)、谷胱甘肽 (glutathione, GSH)、氧化型谷胱甘肽 (oxidized glutathione, GSSG)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GPX)、谷胱甘肽还原酶 (glutathione reductase, GR)、抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbic acid peroxidase, APX)、脱氢抗坏血酸还原酶 (dehydrogenation of ascorbic acid reductase, DHAR) 均采用酶联免疫吸附法 (enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 测定,委托青岛科标检测研究院有限公司完成。

1.4 数据统计与分析

每个处理检测 4 个重复,利用 Origin 8.5 软件作图和数据分析,其中显著性差异采用 LSD 法,显著水平为 $P < 0.05$ 。

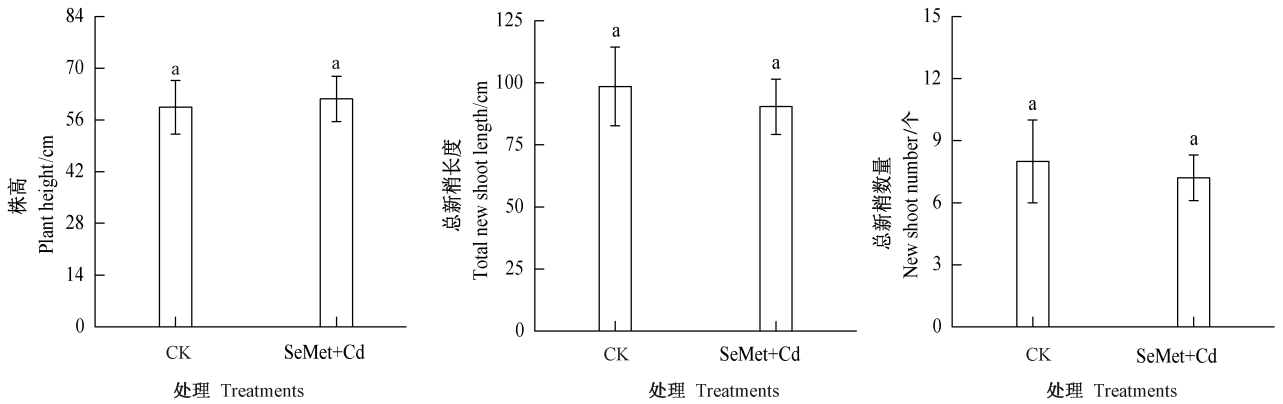
2 结果与分析

2.1 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘生长的影响

由图 1 可知,硒镉伴生处理的株高为 61.7 cm,富硒土壤 (CK) 为 59.4 cm;硒镉伴生处理的新梢总长度为 90.4 cm,CK 为 98.6 cm;硒镉伴生处理的新梢数量为 7 个,CK 为 8 个。硒镉伴生增加了大雅柑橘的株高,降低了新梢总长度和新梢数量,但均未达到显著水平 ($P > 0.05$),说明硒镉伴生对大雅柑橘的生长参数影响不显著。

2.2 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘干重的影响

由表 1 可知,CK 的大雅根干重为 12.2 g,硒镉伴生处理的根干重为 12.3 g;CK 的茎干重为 10.8 g,而



注: CK: 富硒土壤; SeMet+Cd: 硒镉伴生。不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: CK: Se-enriched soil. SeMet+Cd: Cd-Se associated soil. Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

图 1 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘株高、新梢总长度、新梢数量的影响

Fig.1 Effect of Se-Cd treatment on plant height, total new shoot length, new shoot number of Daya citrus in SeMet-enriched soil

硒镉伴生处理下降至 10.7 g; CK 的大雅叶干重为 7.7 g, 而硒镉伴生的叶干重为 7.3 g。两处理根、茎、叶的干重均未达到差异显著水平($P > 0.05$), 表明硒镉伴生对柑橘干物质的积累影响不大。

表 1 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘根、茎、叶片和总干重的影响

Table 1 Effect of Se-Cd treatment on root, stem, shoot, and total dry mass of Daya citrus in Se-enriched soil

处理 Treatments	根系干重 Root dry mass	茎干重 Stem dry mass	叶片干重 Leaf dry mass	总干重 Total dry mass
对照 CK	12.18±1.66a	10.76±1.11a	7.67±1.10a	30.60±1.97a
硒镉伴生 SeMet+Cd	12.28±2.07a	10.71±1.57a	7.33±2.34a	30.32±2.32a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as following.

2.3 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘硒和镉含量的影响

由图 2-A 可知, 硒镉伴生处理根、茎、叶的硒含量分别为 16.7、0.5、3.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 分别增加 9.5、0.1、1.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅表现为根>叶>茎, 其中根和叶的硒含量与 CK 差异显著($P < 0.05$)。CK 的柑橘镉含量为 0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而硒镉伴生处理根、茎、叶的镉含量分别为 2.9、0.2、0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2-B), 均显著高于 CK ($P < 0.05$), 增幅也表现为根>叶>茎。说明富硒土壤硒镉伴生条件下, 镉的存在促进了硒的吸收, 且镉主要分布在根系中。

2.4 富硒土壤硒镉伴生对大雅柑橘硒和镉富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF) 的影响

由表 2 可知, 硒镉伴生处理显著增加了硒的 BCF ($P < 0.05$), 而 TF 则呈下降趋势, 其中两处理硒的 $\text{TF}_{(\text{stem}/\text{root})}$ 达到显著水平 ($P < 0.05$)。硒镉伴生处理中镉的 BCF 低于硒; 但镉的 $\text{TF}_{(\text{leaf}/\text{root})}$ 低于硒, 而 $\text{TF}_{(\text{stem}/\text{root})}$ 高于硒。说明富硒土壤硒镉伴生提高了硒的富集能力, 却降低了其转运能力。

2.5 富硒土壤硒镉伴生对大雅柑橘叶片色素和 H_2O_2 含量的影响

由表 3 可知, 硒镉伴生处理增加了大雅叶片叶绿素 a+b、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量, 分别较 CK 高 17.3%、18.6%、14.5%、15.2%, 其中, 叶绿素 a、类胡萝卜素和叶绿素 a+b 含量与 CK 达到差异显著水平 ($P < 0.05$); 硒镉伴生处理叶片 H_2O_2 含量较 CK 显著增加 45.5% ($P < 0.05$)。说明硒镉伴生促进叶片色素合成, 提高了 H_2O_2 含量。

2.6 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘抗坏血酸-谷胱甘肽循环物质的影响

AsA 和 GSH 是植物体内的抗氧化物质, 在清除 H_2O_2 过程中起着重要作用。由图 3 可知, 硒镉伴生处理的大雅柑橘叶片 AsA 含量较 CK 显著增加 8.6% ($P < 0.05$); GSH 含量较 CK 显著降低 14.0% ($P < 0.05$); DHA 含量较 CK 增加 10.0%, 但未达到显著水平 ($P > 0.05$); GSSG 含量较 CK 显著降低 7.0% ($P < 0.05$)。AsA/(AsA+DHA) 和 GSH/(GSH+GSSG) 比值是反映植物体内抗氧化水平的重要参数之一, 硒镉伴生处理

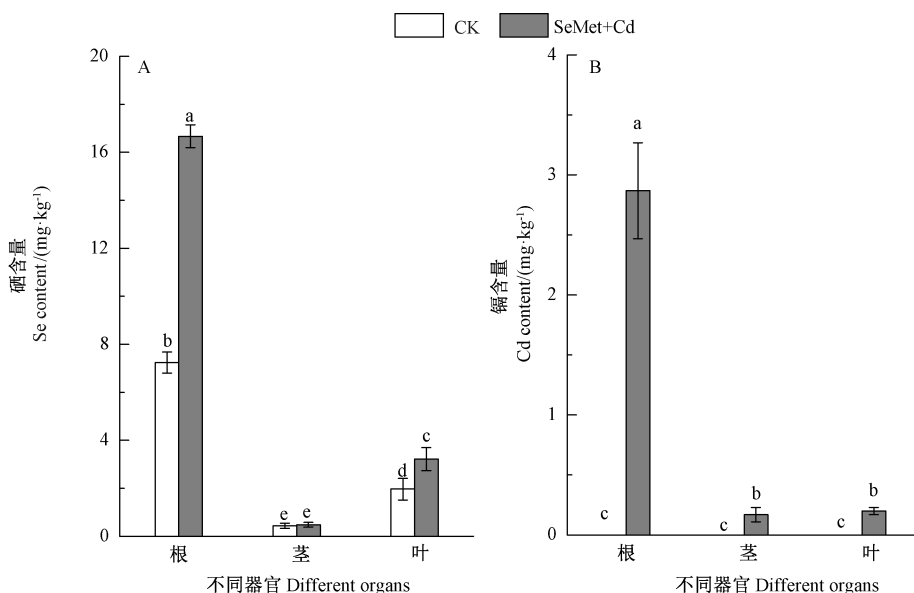


图 2 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘叶片、茎和根硒和镉含量的影响

Fig.2 Effect of Se-Cd treatment on Se and Cd contents of Daya citrus leaf, stem, and root in Se-enriched soil

表 2 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘硒、镉富硒系数和转运系数的影响

Table 2 Effect of Se-Cd treatment on BCF and TFs of Se and Cd of Daya citrus in Se-enriched soil

处理 Treatments	硒 Se			镉 Cd		
	富集系数 BCF	叶/根转运系数 TF _(leaf/root)	茎/根转运系数 TF _(stem/root)	富集系数 BCF	叶/根转运系数 TF _(leaf/root)	茎/根转运系数 TF _(stem/root)
CK	1.16±0.16b	0.28±0.08a	0.06±0.01a	-	-	-
硒镉伴生 SeMet +Cd	2.59±0.32a	0.20±0.05a	0.03±0.01b	0.29±0.06	0.11±0.03	0.09±0.04

表 3 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘叶片色素和过氧化氢含量的影响

Table 3 Effect of Se-Cd treatment on pigment and H₂O₂ content in leaves of Daya citrus in Se-enriched soil

处理 Treatments	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content	叶绿素 a+b 含量 Chlorophyll a+b content	过氧化氢含量 H ₂ O ₂ content
CK	1.94±0.18b	0.83±0.09a	0.33±0.03b	2.77±0.25	1.34±0.21b
硒镉伴生 SeMet +Cd	2.30±0.23a	0.95±0.12a	0.38±0.03a	3.25±0.35	1.95±0.31a

下,AsA/(AsA+DHA)和GSH/(GSH+GSSG)比值均较CK降低,且均未达显著水平($P>0.05$)。由上可知,硒镉伴生会影响AsA-GSH氧化循环,但总体抗氧化水平差异不显著。

2.7 硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘抗坏血酸-谷胱甘肽循环(AsA-GSH)酶活性的影响

由图4可知,硒镉伴生处理APX活性较CK显著提高23.0%($P<0.05$),而GPX活性较CK显著降低了13.0%($P<0.05$);硒镉伴生处理的DHAR活性和GR活性较CK分别显著提高了58.0%、13.0%($P<0.05$)。上述结果表明,大雅柑橘对硒镉伴生逆境环境产生了应激反应,APX、DHAR、GR酶活性显著上升

而GPX活性显著下降。

3 讨论

大量研究表明,镉胁迫会抑制种子的萌发、植株的生长以及作物产量的形成^[17]。镉虽然不是植物的必需元素,但镉对一些植物生长存在剂量效应,即在一定范围内,镉能促进植物的生长。这在水稻、小麦、白菜等植物上已得到相关证实^[18-19]。但植物对镉存在耐受阈值,且因植物不同而存在差异,有研究表明柑橘属于耐镉植物^[20]。本研究发现大雅柑橘在富硒条件下添加0.6 mg·L⁻¹镉并未显著降低植株的生长,这也印

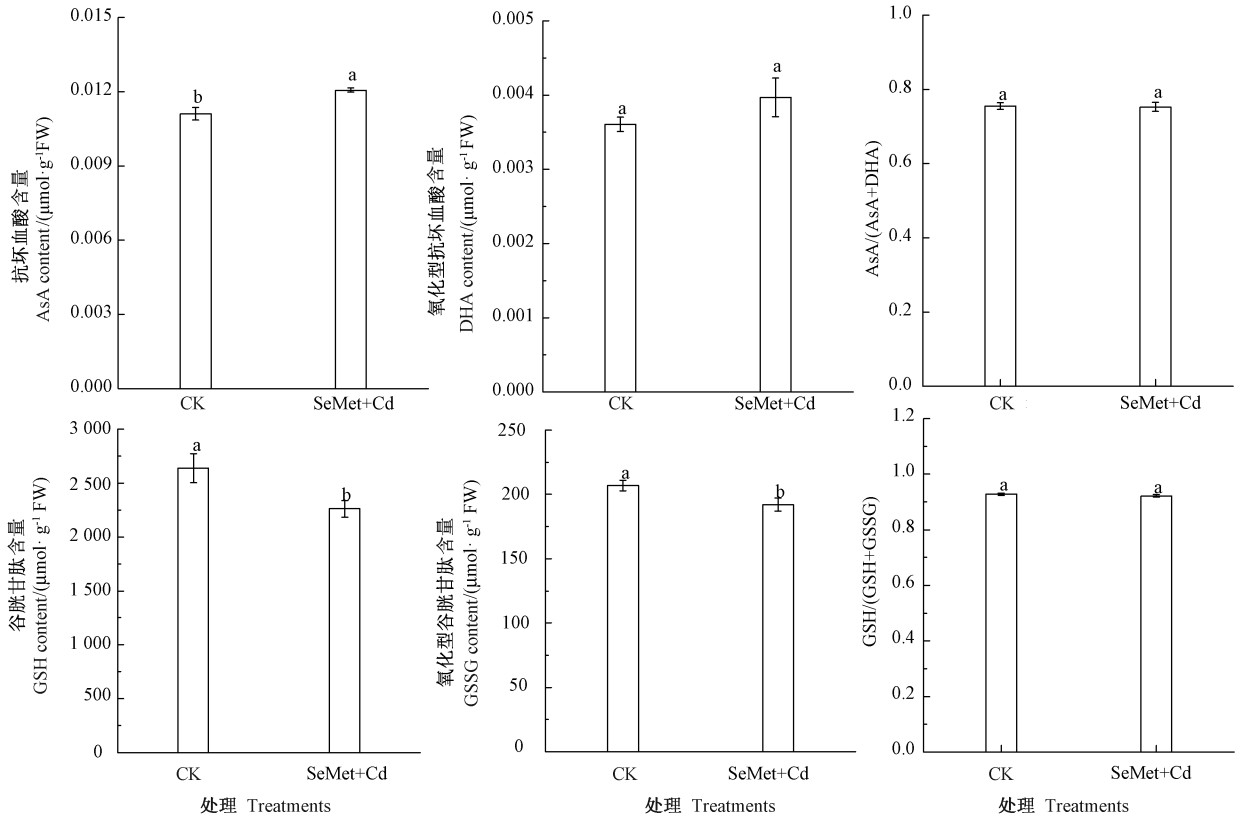


图3 硒隔伴生对富硒土壤大雅柑橘叶片 AsA、DHA、AsA/(AsA+DHA)、GSH、GSSG、GSH/(GSH+GSSG) 的影响
Fig.3 Effect of Se-Cd treatment on AsA, DHA, AsA/(AsA+DHA), GSH, GSSG, GSH/(GSH+GSSG) of Daya citrus in Se-enriched soil

证了上述观点。

硒主要具有提高植物抗逆性、调节植物生物钟、缓解重金属胁迫等显著作用^[21],其生物功能不仅取决于硒浓度,而且与硒形态密切相关^[22]。当硒、镉两种元素同时存在于土壤中,两种元素的含量及存在形态均是影响植物对硒镉元素吸收的决定性因素^[23]。大雅柑橘对硒的吸收富集能力远高于镉,而在转运载体方面,植物根系吸收 SeMet 可能需要硝酸盐转运蛋白的参与^[24],而植物对镉的吸收主要通过锌铁转运蛋白^[25-26],推测硒和镉通过不同的通道进入植物体。然而它们之间也存在一定的拮抗与协同作用,即适量浓度的硒能够降低植物镉含量,而当硒提升到一定浓度会与镉吸收有协同效应^[27]。本研究中,硒镉伴生促进了富硒土壤大雅柑橘对 SeMet 的吸收,提高了硒的 BCF,表现出一定的协同作用。硒与镉在大雅柑橘中主要储存在根系,其次是叶片和茎,可知根部是两者的主要储存部位。这与沈潇等^[28]对核桃幼苗的研究结果相似,但也有一些植物吸收的镉主要储存到地上部^[29],可见不同植物对镉分配有一定的差异。

硒、镉互为地球化学伴生元素,富硒地区也常伴随

重金属污染。研究表明外源硒处理可通过调控抗氧化系统来缓解镉毒害作用^[7]。叶绿素是判断镉损伤的一个重要生理参数^[30]。本研究结果表明,在富硒土壤中,硒镉伴生处理显著提高了大雅柑橘叶片 H_2O_2 含量,叶绿素含量也呈上升趋势,这与柑橘对镉胁迫有一定的耐受性有关。Khan 等^[7]研究指出镉胁迫下施用硒能够增加 GR 和 GPX 活性以降低活性氧胁迫,进而促进植物生长。GPX 和 APX 是清除 H_2O_2 的两种主要酶类^[31]。本研究中硒镉伴生处理增加了 APX 活性,而降低了 GPX 活性,这可能与本试验的土壤富含硒有关。外源硒处理能够提高植物的 AsA-GSH 循环效率,进而提高其抗逆性^[32]。Wu 等^[33]研究表明施用外源硒能够增加 GSH 和 AsA 含量,增加 GR 和 DHAR 活性,提高 AsA-GSH 循环效率;施硒能够提高香橙幼苗的生长,但不同形态硒对 AsA-GSH 相关物质含量和酶活性影响差异显著^[14]。本研究中,CK 较不添加硒的空白对照提高了 AsA-GSH 相关物质含量和酶活性(数据未提供),硒镉互作处理增加了 AsA 和 DHA 含量,降低了 GSH、GSSG 含量以及 AsA/(AsA+DHA) 和 GSH/(GSH+GSSG) 的比值。在 AsA-GSH 循环中,

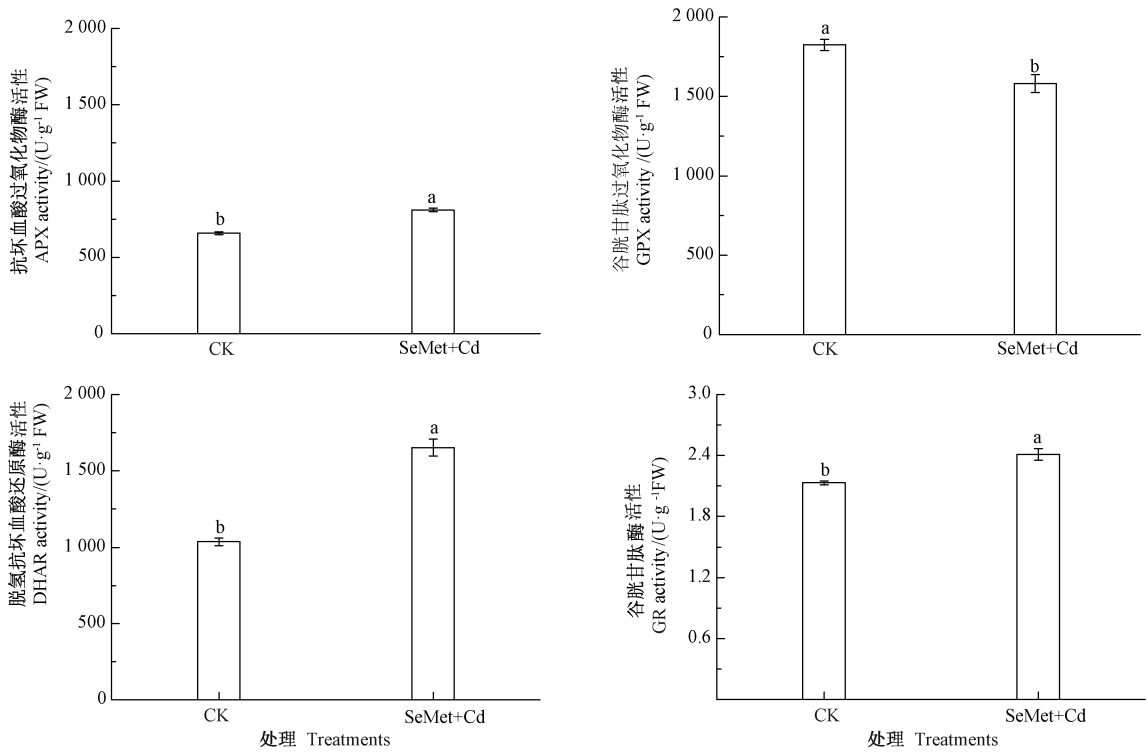


图4 富硒土壤硒镉伴生对富硒土壤大雅柑橘叶片 APX、DHAR、GPX、GR 活性的影响

Fig.4 Effect of Se-Cd treatment on APX、DHAR、GPX、GR activities of Daya citrus in Se-enriched soil

GPX 和 DHAR 消耗共同的底物 GSH 既可直接清除活性氧又能够与镉结合,进而降低镉的毒害^[34]。因此可以解释本研究中硒镉互作处理消耗掉一部分 GSH,进而降低了 GSH 含量。

4 结论

本研究结果表明,硒镉伴生对大雅柑橘生长指标影响不显著,但显著提高了大雅柑橘对硒的富集能力,降低了硒的转运系数;硒镉伴生提高了富硒土壤大雅柑橘叶片叶绿素含量,同时也显著提高了 H₂O₂ 含量,大雅柑橘通过调整 AsA-GSH 氧化循环来维持机体的稳定性。富硒土壤存在镉胁迫威胁,但本试验未对果实进行相关研究,下一步应明确富硒条件下镉对柑橘生理参数、果实品质影响的相关机理。

参考文献:

[1] Tapiero H, Townsend D M, Tew K D. The antioxidant role of selenium and seleno compounds [J]. *Biomedical Pharmacotherapy*, 2003, 57(3): 134-144

[2] Jabłońska E, Reszka E. Selenium and epigenetics in cancer: Focus on DNA methylation [J]. *Advances in Cancer Research*, 2017, 136: 193-234

[3] 罗友进, 韩国辉, 孙协平, 廖敦秀, 谢永红, 魏朝富. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 131-138

[4] 李涵, 王志伟, 孙波, 邹甜, 孙小武. 土壤镉含量对西瓜茎叶和果实镉含量的影响[J]. *果树学报*, 2017, 34(3): 337-343

[5] 孙协平, 谢永红, 胡佳羽, 陈元平, 王武, 史文景. 富硒土壤重金属污染研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2015(10): 146-148

[6] Jiang C Q, Zu C L, Shen J, Shao F W, Li T. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2015, 84(1): 71-77

[7] Khan M I R, Nazir F, Asgher M, Per T S, Khan N A. Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 173(3): 9-18

[8] 袁知洋, 项剑桥, 吴冬妹, 徐春燕, 黄彬, 段碧辉, 邹辉, 李春诚, 赵敏. 恩施富硒土壤区主要农作物硒镉特征以及和根系土壤镉关系研究[J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(6): 706-712

[9] Wright M T, Paeker D R, Amrhein C. Critical evaluation of the ability of sequential extraction procedures to quantify discrete forms of selenium in sediments and soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4709-4716

[10] Zhang Y, Moore J. Selenium fractionation and speciation in a wetland system [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, 30(8): 2613-2619

- [11] 王松山, 梁东丽, 魏威, 王丹. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823-830
- [12] 姚昭, 李红艳, 张云龙, 邓泽元. 有机硒、无机硒、VE 单独使用及有机硒与 VE 联用对大鼠体内抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 272-276
- [13] Bañuelos G S, Arroyo I S, Dangi S R, Zambrano M C. Continued selenium biofortification of carrots and broccoli grown in soils once amended with Se-enriched *S. pinnata* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:1-11
- [14] 孙协平, 罗友进, 周广文, 伊洪伟, 陈元平, 武峥, 谢永红. 硒的价态与浓度对香橙幼苗生长和 AsA-GSH 循环的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3527-3534
- [15] 国家环境保护局. GB 15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [16] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014
- [17] Ilyas S, Rehman A. Oxidative stress, glutathione level and antioxidant response to heavy metals in multi-resistant pathogen, *Candida tropicalis* [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(1): 1-7
- [18] 蒋汉明, 李书启, 韩希凤, 王华, 郭剑霞. 镉对植物生长的影响及植物耐镉机理研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2012, 19(5): 1-6
- [19] 尚宏芹, 高昌勇. 镉、汞胁迫对桔梗种子萌发、幼苗生理生化特性及镉、汞含量的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(6): 1211-1219
- [20] López-Climet M F, Arbona V, Pérez-Clemente R M, Gómez-Cadenas A. Effects of cadmium on gas exchange and phytohormone contents in citrus[J]. *Biologia Plantarum*, 2011, 55(1): 187-190
- [21] 袁思莉, 余垚, 万亚男, 王琪, 乔玉辉, 李花粉. 硒缓解植物重金属胁迫和累积的机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 545-550
- [22] Navarro-Alarcón M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 115-141
- [23] 潘丽萍, 刘永贤, 黄雁飞, 农梦玲, 兰秀, 鹿士杨, 陈锦平, 赵于莹, 梁潘霞, 熊柳梅, 江泽普, 邢颖, 廖青, 黄太庆. 土壤-植物体系中硒与重金属镉的相互作用[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 480-485
- [24] 邓坤. 水稻根系吸收和转运硒代蛋氨酸的机制研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015
- [25] Lux A, Martinka M, Vaculík M, White P J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 21-37
- [26] 马晓晓. 锌/镉超积累植物东南景天 (*Sedum alfredii* Hance) 两个锌转运蛋白基因的功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- [27] 于淑慧, 周鑫斌, 王文华, 常红, 周永祥. 硒对水稻幼苗吸收镉的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 17-22
- [28] 沈潇, 黄瑞敏, 过子倩, 许俊杰, 过晟鹏, 朱佳琪, 王正加. 镉胁迫对薄壳山核桃幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(8): 1627-1638
- [29] 向明文, 王丹, 姚天月, 陈立. 8 种植物对铊和镉的富集特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 594-601
- [30] Muradoglu F, Gundogdu M, Ercisli S, Encu T, Balta F, Jaafar H Z, Zia-UI-Haq M. Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b concentration, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry [J]. *Biological Research*, 2015, 48(1): 11.
- [31] Ozyigit I I, Filiz E, Vatanserver R, Kurtoglu K Y, Koc I, Öztürk M X, Anjum A A. Identification and comparative analysis of H₂O₂-scavenging enzymes (ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase) in selected plants employing bioinformatics approaches [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1-23
- [32] 孙协平, 罗友进, 周广文. 硒对甜樱桃叶片褪黑素和谷胱甘肽氧化还原循环的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4373-4381
- [33] Wu Z C, Liu S, Zhao J, Wang F H, Du Y Q, Zou S M, Li H M, Wen D, Huang Y D. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 133: 1-11
- [34] Yadav S K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants [J]. *South African Journal of Botany*, 2010, 76(2): 167-179

Effect of Selenium Cadmium Associated on Growth and Physiological Metabolism of Citrus in Se-enriched Soil

SUN Xieping^{1,2} ZHOU Guangwen² LUO Youjin^{2,*} HAN Guoqiang¹ ZHANG Lingling¹

(¹Shool of Modern Agricultural and Biological Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100;

²Fruit Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329)

Abstract: In order to ensure the safe production of selenium (Se)-enriched citrus, effect of cadmium (Cd) associated with Se-enriched soil on citrus growth, uptake and transport of Se and Cd, and antioxidant capacity were clarified. In this study, potted old Daya were employed as the experimental material and plants in selenomethionine (SeMet) condition were as the control for the Se-enriched soil, and in the addition of Cd condition as the simulation of the association of Cd-Se in Se-enrich soil as the treatment. The growth parameters, contents of Se and Cd, and the efficiency of cycle of ascorbic acid (AsA)-glutathione (GSH) in leaves were measured. The results showed that in the Se-enriched soil, the content of chlorophyll a+b, a, b and carotenoid in citrus leaves was increased by Cd-Se associated treatment, but no significant effects were found on plant height, length of new shoots, number of new shoots and dry matters of root, leaves and stems. In Se-enriched soil, Se-Cd associated treatment significantly increased the content of Se and the biological concentration factor (BCF) of Se, but decreased the translocation factor (TF) of Se. In addition, Se and Cd were mainly distributed in roots, followed by leaves and stems. In AsA-GSH cycle, hydrogen peroxide content was increased by Se-Cd associated treatment, and the contents of AsA and oxidation of ascorbic acid (DHA) were also increased. Meanwhile, the enzyme activities of ascorbic acid peroxidase (APX), the activity of glutathione peroxidase (GR) and dehydrogenation of ascorbic acid reductase (DHAR) were increased. The levels of GSH and oxidized glutathione (GSSG) and the activity of glutathione peroxidase (GPX) were reduced. The ratios of AsA/(AsA+DHA) and GSH/(GSSG+GSH) were not significantly reduced by Cd-Se associated treatment. This study provides theoretical basis for elucidating the physiological influence mechanism of Cd stress on Se-enriched soil.

Keywords: citrus, selenomethionine (SeMet), Cd, growth, AsA-GSH cycle