

文章编号:1000-8551(2020)10-2335-08

硒镉交互作用对西葫芦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响

郭 锋* 吴伟锋 冯 瑜 许剑敏 马祥爱

(山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801)

摘要: 硒能够缓解镉胁迫对植物产生的毒害。为探明硒(Se)和镉(Cd)交互作用对植物的影响,本研究以西葫芦为材料,采用沙培的方式,研究了不同浓度 Se(0.5、2.0 和 4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与 Cd(0.2、0.4 和 0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)交互作用对西葫芦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响。结果表明,单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度的增加,其对西葫芦幼苗的生长和抗氧化酶活性具有一定的促进作用。Se 与 Cd 交互作用对西葫芦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响与 Se 和 Cd 的浓度有关。不同浓度 Se 与低中浓度 Cd(0.2 和 0.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)交互作用可使 Cd 胁迫下西葫芦幼苗苗高、鲜重和干重显著增加,与高浓度 Cd(0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)交互作用却抑制了西葫芦幼苗的生长。与单一 Cd 胁迫相比,不同浓度 Se 与 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 交互作用可显著提高西葫芦幼苗 SOD 和 POD 活性,不同浓度 Se 与 0.4 和 0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 交互作用抑制了西葫芦幼苗 SOD 和 POD 活性,且 Cd 浓度越高,差异越明显。在高浓度(0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Cd 胁迫下,Se 浓度越高,2 种元素的交互作用对西葫芦幼苗生长和抗氧化酶活性产生的抑制作用越大。Cd 胁迫下,外源 Se 可以降低西葫芦幼苗 Cd 含量,同时提高 Se 含量。较低浓度的 Se 能够有效缓解 Cd 对西葫芦幼苗造成的毒害作用,综合来看,2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Se 与 Cd 的交互作用对西葫芦幼苗的生长和抗氧化酶活性的促进作用最强。本研究表明施加外源 Se 缓解 Cd 胁迫对植物的毒害时,应同时考虑 Cd 的污染程度和施加 Se 的量,为 Cd 污染治理提供了一定的参考依据。

关键词: 硒; 镉; 交互作用; 西葫芦幼苗

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.10.2335

镉(Cd)是一种对植物、动物和人类具有较高毒性的重金属污染物之一。土壤中 Cd 具有较强的流动性和较高的生物有效性^[1-3],容易被植物通过根部吸收运输至其他部位产生损伤作用,不仅会影响植物的正常生长发育和产量^[4-8],还会富集到植物的可食部分,通过食物链对人类健康造成威胁^[1],因此应积极探索有效的方法以缓解 Cd 对植物的损害以及减少其富集量。研究发现,对农作物施加外源矿物质元素,如硅(Si)、硒(Se)、锌(Zn)等,可以作为一种安全有效的方法来缓解 Cd 对植物的毒害作用,同时可以增加农作物体内这类矿质营养元素的含量^[9-12]。

硒(Se)是动物和人类必需的营养元素之一。现

尚无证据表明 Se 是高等植物的必需微量元素,但研究发现在各种环境胁迫下,Se 能保护植物免受危害^[13-14]。如 Cd 胁迫下,外源 Se 能够缓解 Cd 对植物的毒害作用,减少对 Cd 的吸收和富集^[5, 14-15]。然而有研究认为 Se 对 Cd 胁迫下植物的生长发育呈现双重浓度效应,低剂量 Se 能够促进植物生长,高剂量 Se 作为氧化强化剂反而对植物产生伤害^[16-18]。由于 Se 和 Cd 在植物体内存在一定的剂量效应,因此探讨缓解 Cd 胁迫的最佳 Se 浓度具有非常重要的研究意义。

目前,外源 Se 对 Cd 胁迫缓解作用的研究在菜心^[19]、豆瓣菜^[20]、油菜^[21-22]、烟草^[23]、向日葵^[24]、水稻^[25]、黄瓜^[18]、菠菜^[26]等作物中已有报道,但关于

收稿日期:2019-04-08 接受日期:2019-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11575104),山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放课题(2015003)

作者简介:郭锋,女,副教授,主要从事土壤生态及重金属污染修复方面研究。E-mail:shfgf@126.com

* 通讯作者:同第一作者。

Se 缓解 Cd 胁迫对西葫芦 (*Cucurbita pepo* L.) 毒害的相关研究鲜有报道。西葫芦作为一种大众消费的蔬菜,在我国各地全年均有种植和销售。本研究以西葫芦幼苗为研究对象,利用沙培法研究不同浓度 Se 和 Cd 交互作用对西葫芦幼苗生长、抗氧化酶活性及 Cd 和 Se 含量的影响,阐明 Se 与 Cd 交互作用之间的关系和剂量效应,探求缓解 Cd 胁迫的最佳外源 Se 浓度,以期为缓解作物中 Cd 毒害的同时提高 Se 含量的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试西葫芦品种为早青一代,购自山西省太谷县艺荣蔬菜种苗经营部;供试 Cd^{2+} 以氯化镉 ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) 形态加入, Se^{4+} 以亚硒酸钠 ($\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 形态加入,均为分析纯。

1.2 试验设计

参照文献[27]的方法和浓度设计。将过 16 目筛的细沙于干燥箱中 130°C 高温灭菌 24 h,按照表 1 的浓度组合将配制好的 CdCl_2 溶液与 Na_2SeO_3 溶液分别喷洒于细沙中,不断搅拌使 2 种溶液与细沙混合均匀。把含有不同浓度 CdCl_2 和 Na_2SeO_3 的细沙分别装于塑料营养钵 ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) 中,平衡 1 周。精选饱满一致的西葫芦种子,用 0.1% HgCl_2 溶液消毒 10 min,流动自来水冲净,蒸馏水反复冲洗 5 次后,播种于塑料营养钵中,每钵播种 20 粒种子,试验共设置 12 个不同浓度组合,每个组合 3 次重复。采用完全随机区组排列,然后放入 HP-2808 型光照培养箱(哈尔滨东联电子有限公司)进行恒温光照培养,温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度为 60%~75%。试验期间采用称重法用去离子水及时补充损失水分,使营养钵细沙中 Cd^{2+} 和 Se^{4+} 浓度保持恒定,共培养 15 d 后第一片真叶展开时采集样品进行相关指标的测定。

1.3 测定项目与方法

每处理随机选取 10 株长势一致的植株,利用直尺测定幼苗的苗高;采用千分之一电子天平对所选植株称重,取其平均值为单株鲜重(g),然后于烘箱中 105°C 杀青 0.5 h, 70°C 烘干至恒重,称重即为干重;超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性测定:选取西葫芦幼苗叶片采用氮蓝四唑 (nitro-blue tetrazolium, NBT) 光化还原法测定[27];过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性测定:选取西葫芦幼苗叶片采用愈创木酚法测定[27];Cd 和 Se 含量测定:取西葫芦

幼苗地上部干样 1.00 g 经混酸(硝酸和高氯酸)消解,采用 AA240Z 石墨炉原子吸收分光光度计 (Varina, 美国)测定 Cd 含量,采用 AFS-230E 原子荧光光度计 (北京海光仪器有限公司)测定 Se 含量[28]。

表 1 不同浓度 Cd^{2+} 和 Se^{4+} 组合

Table 1 Different concentration combinations of Cd^{2+} and Se^{4+}

$\text{Cd}^{2+} + \text{Se}^{4+}$	$\text{Cd}^{2+} + \text{Se}^{4+}$	$\text{Cd}^{2+} + \text{Se}^{4+}$	$\text{Cd}^{2+} + \text{Se}^{4+}$
0.2+0	0.2+0.5	0.2+2.0	0.2+4.0
0.4+0	0.4+0.5	0.4+2.0	0.4+4.0
0.6+0	0.6+0.5	0.6+2.0	0.6+4.0

注: Cd 浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Se 浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Note: The unit of Cd concentration is $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the unit of Se concentration is $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

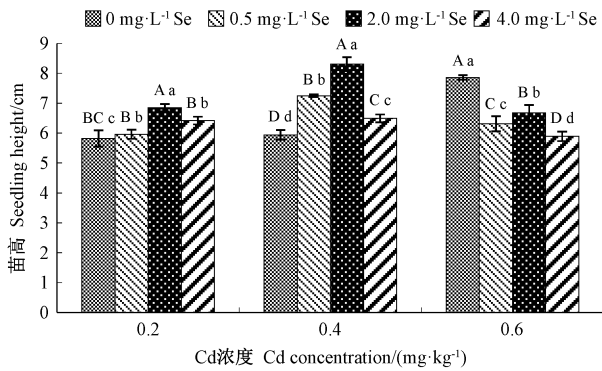
1.4 数据处理

本试验结果均为 3 次重复的平均值。利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理并制图,应用 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行显著性分析,1%和 5%水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗苗高的影响

由图 1 可知,单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度的增加,其对西葫芦幼苗生长有一定的促进作用。不同浓度 Se (0.5、2.0 和 $4.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与低中浓度 Cd (0.2 、 $0.4\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 交互作用使西葫芦幼苗的苗高均随着 Se 浓度增加呈先升高后降低的趋势,且均高于相应单一 Cd 胁迫下幼苗的苗高,且大部分处理间差异极显著, $2.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{Se}$ 与 0.2 、 $0.4\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{Cd}$ 交互作用对西葫芦幼苗生长的促进作用最强,其苗高较相应单一 Cd 胁迫增加了 17.70% 和 39.90%。不同浓度 Se 与高浓度 Cd ($0.6\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 交互作用下,西葫芦幼苗苗高均极显著低于相应单一 Cd 胁迫,分别下降了 19.72%、15.01% 和 25.06%,但幼苗苗高与 Se 浓度并未呈现严格的负相关性。表明不同浓度的 Se 与较低浓度 Cd 的交互作用能促进西葫芦幼苗的生长,且 Se 浓度越大,促进作用越强;但不同浓度 Se 与较高浓度 Cd 交互作用则抑制了幼苗的生长,且 Se 浓度越大,抑制作用越强,表现出 Se 与 Cd 协同毒害现象,可见 Se 与 Cd 交互作用在西葫芦幼苗生长过程发挥着双重效应。



注:大写字母和小写字母分别表示在相同浓度 Cd 胁迫下不同浓度 Se 之间在 0.01 和 0.05 水平下有极显著和显著差异。下同。

Note: Different capital and lowercase letters mean significant difference between different concentrations of Se at 0.01 and 0.05 level under the Cd stress with the same concentration respectively.

The same as following.

图 1 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗苗高的影响

Fig.1 Interactive effects of selenium and cadmium on the seedling height in zucchini seedlings

2.2 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗生物量的影响

由图 2 可知,不同浓度硒镉交互作用对西葫芦幼苗生物量产生的影响与苗高的影响相似,单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度的增加,西葫芦幼苗的鲜重和干重呈升高趋势。不同浓度 Se 与 Cd 交互作用下西葫芦幼苗的鲜重和干重总体高于相应单一 Cd 胁迫,且对鲜重的影响大于干重。影响最大的交互作用组合分别是 Cd0.2+Se2.0、Cd0.4+Se2.0 和 Cd0.6+Se0.5。与单一 Cd 胁迫相比,低中浓度 Cd(0.2、0.4 mg·kg⁻¹)与不同浓度 Se 交互作用后鲜重的变化呈极显著差异,高浓度 Cd(0.6 mg·kg⁻¹)与不同浓度 Se 交互作用后鲜重的变化差异未达极显著水平;不同浓度 Cd 与不同浓度 Se 交互作用后干重的变化均不显著。由此可见,较低浓度 Cd 胁迫下,低中浓度 Se 可显著缓解 Cd 毒害对西葫芦幼苗生物量积累的抑制作用,使其生物量显著或极显著增加,高浓度 Se 的缓解作用不明显;但在高浓度 Cd 胁迫下,不同浓度 Se 对西葫芦幼苗生物量的促进作用较小,大部分处理西葫芦幼苗生物量的积累增长率降低,并呈现负增长。

2.3 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗 SOD 活性的影响

SOD 是植物抗氧化系统的一个重要组成部分,能够有效清除外界胁迫下在植物体内产生的活性氧(reactive oxygen species, ROS),减轻膜质过氧化反应并维持细胞膜的完整性,其活性可以反映植物对 Cd

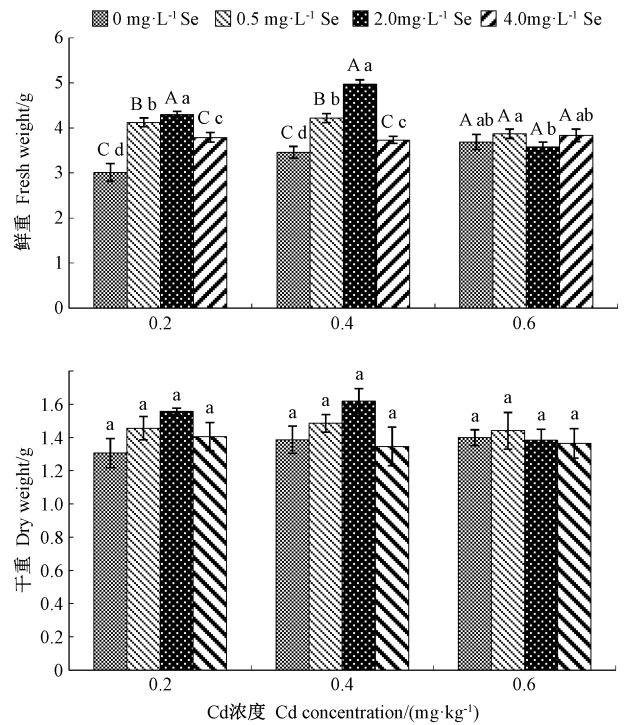


图 2 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗生物量的影响

Fig.2 Interactive effects of selenium and cadmium on the fresh weight and dry weight in zucchini seedlings

胁迫适应能力的大小。由图 3 可知,单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度增加,西葫芦幼苗 SOD 活性随之提高。不同浓度 Se 与低浓度 Cd(0.2 mg·kg⁻¹)交互作用下西葫芦幼苗 SOD 活性均大于相应单一 Cd 胁迫,并随着 Se 浓度的增加而提高,表示出一定的正相关,其 SOD 活性分别是相应单一 Cd 胁迫的 1.01、1.25 和 1.86 倍。不同浓度 Se 与中高浓度 Cd(0.4、0.6 mg·kg⁻¹)交互作用下,西葫芦幼苗中 SOD 活性均低于相应单一 Cd 胁迫,0.4 mg·kg⁻¹Cd 与不同浓度 Se 交互作用下,西葫芦幼苗 SOD 活性较相应单一 Cd 胁迫分别降低了 13.80%、15.38%和 11.56%,但差异不显著;0.6 mg·kg⁻¹Cd 与不同浓度 Se 交互作用下,西葫芦幼苗 SOD 活性较相应单一 Cd 胁迫分别显著降低了 32.22%、21.96%和 23.34%。

综上所述,低浓度 Cd 胁迫下,外源一定浓度 Se 可明显提高西葫芦幼苗 SOD 活性,从而减轻或缓解重金属 Cd 对西葫芦幼苗生长的抑制或毒害。但随着 Cd 浓度的增加,外源 Se 对重金属 Cd 胁迫下西葫芦幼苗 SOD 活性的影响效果越来越弱,可能是因为随着 Cd 浓度的增加 Se 对 Cd 的拮抗作用越来越弱,也有可能与 Se 和 Cd 的协同毒害作用有关。

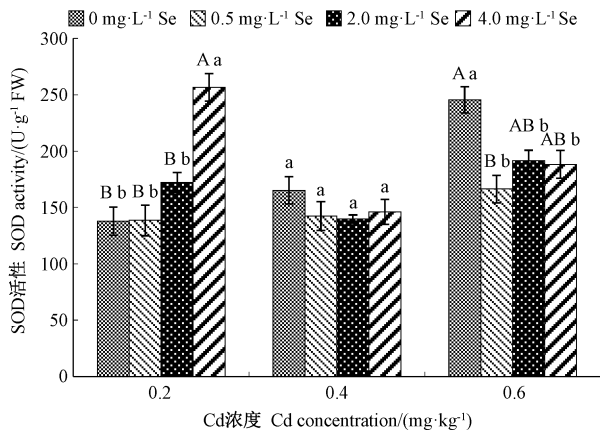


图3 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗 SOD 活性的影响

Fig.3 Interactive effects of selenium and cadmium on the SOD activity in zucchini seedlings

2.4 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗 POD 活性的影响

POD 是植物应对外界氧化胁迫的一种重要的酶,可以有效消除 H_2O_2 ,减轻氧化胁迫对植物体造成的伤害。由图 4 可知,单一 Cd 胁迫下,西葫芦幼苗 POD 活性的变化与 SOD 情况相似,即随着 Cd 浓度增加,西葫芦幼苗 POD 活性增加,表明 Cd 胁迫未超过西葫芦幼苗自身的防御能力,可以通过调节反应提高 POD 活性,使细胞免受或减轻 Cd 毒害。

与单一 Cd 胁迫相比,不同浓度 Se 可使低浓度 Cd ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 胁迫下西葫芦幼苗 POD 活性增加,而使中高浓度 Cd (0.4 、 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 胁迫下的 POD 活性降低。不同浓度 Se 与低浓度 Cd 交互作用中,西葫芦幼苗 POD 活性表现为 $Cd0.2+Se0.5 > Cd0.2+Se2.0 > Cd0.2+Se4.0$, $Cd0.2+Se0.5$ 与单一 Cd 胁迫 ($Cd0.2$) 和其他组合相比差异极显著,其他组合与相应单一 Cd 胁迫差异不显著。不同浓度 Se 与中浓度 Cd ($Cd0.4$) 交互作用下使西葫芦幼苗 POD 活性低于单一 Cd 胁迫,但是各组合与相应单一 Cd 胁迫及各组合间差异不显著。不同浓度 Se 与高浓度 Cd 交互作用可极显著降低西葫芦幼苗 POD 活性。较高浓度 Cd 胁迫下,随着 Se 浓度的增加,西葫芦幼苗 POD 活性呈降低趋势,但与 Se 浓度并未呈现严格的负相关。

2.5 不同浓度的硒和镉交互作用对西葫芦幼苗 Cd 和 Se 含量的影响

由图 5 可知,单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度增加西葫芦幼苗中 Cd 含量逐渐增加,Se 含量逐渐降低。外源 Se 能够降低西葫芦幼苗对 Cd 的吸收,施加不同

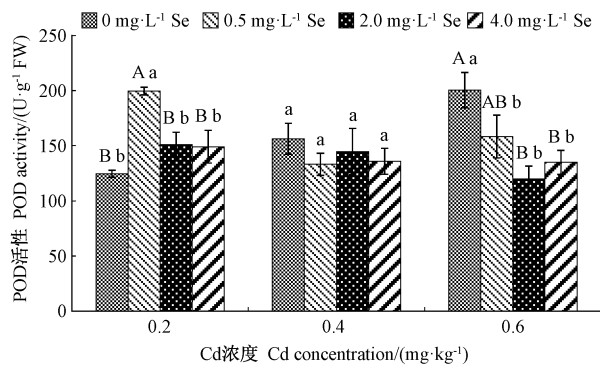


图4 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗 POD 活性的影响

Fig.4 Interactive effects of selenium and cadmium on the POD activity in zucchini seedlings

浓度 Se (0.5 、 2.0 和 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 使西葫芦幼苗中 Cd 含量与相应单一 Cd 胁迫相比分别下降了 10.87% 、 18.91% 和 9.45% (Cd 胁迫浓度分别为 0.2 、 0.4 和 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下同), 12.14% 、 18.77% 和 4.29% 、 25.56% 、 24.28% 和 3.54% 。此外,外源 Se 提高了西葫芦幼苗中 Se 含量,低浓度 Cd ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 条件下,随着 Se 浓度增加,西葫芦幼苗中 Se 含量呈逐渐升高的趋势,不同浓度 Se (0.5 、 2.0 和 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与不同浓度 Cd 交互作用下西葫芦幼苗 Se 含量分别是相应单一 Cd 胁迫的 1.5 、 2.0 和 2.5 倍 (Cd 胁迫浓度分别为 0.2 、 0.4 和 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下同), 1.7 、 2.5 和 2.4 倍, 1.7 、 2.5 和 2.3 倍,但是不同浓度 Cd 处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

重金属 Cd 在环境中具有较强的移动性、生物有效性和较大的毒性,已成为目前最受关注的主要污染物之一^[1]。Cd 能影响植物的生长,植物对 Cd 胁迫最敏感的指标是苗高、鲜重和干重^[29]。但也有研究发现,低剂量 Cd 能够促进植物生长^[26]。本研究也得到了类似的结论,即随着 Cd 浓度增加,西葫芦幼苗苗高、鲜重和干重呈升高趋势。植物在 Cd 胁迫下能产生更多的 ROS,当过剩的 ROS 打破细胞自身氧化还原平衡,会导致膜质过氧化引起氧化损伤。为了应对 Cd 氧化胁迫,植物自身免疫系统会把 Cd 隔离在新陈代谢不活跃的部分(如根部细胞壁和叶子的液泡),从而抵御 Cd 诱发的氧化胁迫,这些免疫系统包括酶促和非酶促抗氧化系统。SOD 和 POD 是酶促抗氧化系统中 2 个关键的抗氧化物酶,能催化超氧自由基、 H_2O_2

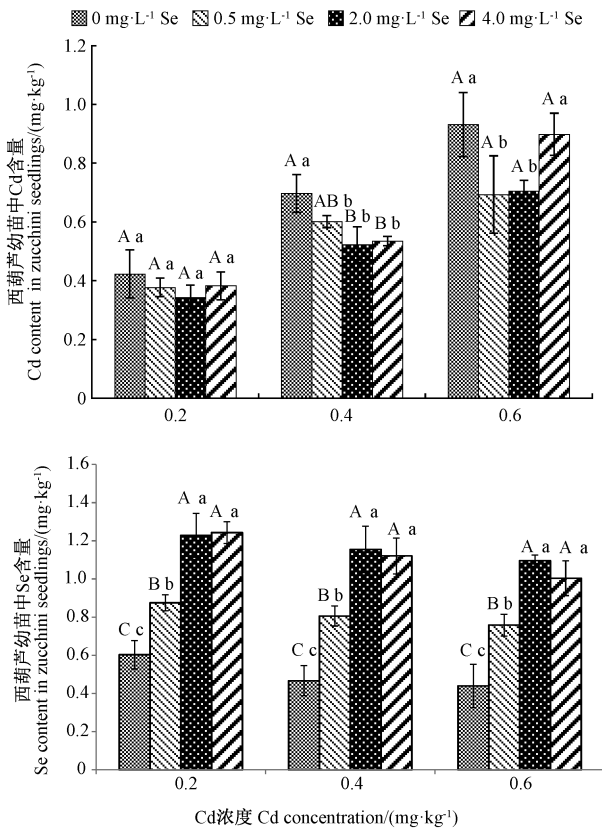


图5 不同浓度的硒镉交互作用对西葫芦幼苗 Cd 和 Se 含量的影响

Fig.5 Interactive effects of selenium and cadmium on Cd and Se concentration in zucchini seedlings

等有毒物质的分解,有效去除 ROS,减轻外界胁迫对植物的毒害^[2]。大量研究表明,Cd 胁迫能改变植物的抗氧化酶活性,但其变化趋势不一致,在辣椒叶子、豌豆叶子、大豆幼苗、黄瓜毛状根、洋麻幼苗中的研究发现,一定浓度的 Cd 胁迫可使 SOD 和 POD 活性升高^[30-33],但油菜幼苗研究结果表明 Cd 明显抑制了 SOD 的产生^[34],而在欧芹幼苗试验中发现低浓度 Cd 可促进 SOD 和 POD 活性提高,高浓度却抑制这 2 种酶的活性^[4]。在本研究选定的 Cd 浓度范围内,Cd 对西葫芦幼苗的生长和抗氧化酶活性具有一定的促进作用。Cd 胁迫对植物生长和抗氧化酶活性的影响产生差异的原因可能与 Cd 浓度、处理时间、植物基因型和植物所处生育期等有关。

Se 能有效缓解重金属的毒害作用^[13]。生物量的变化是反映外界胁迫对植物造成毒害效益的一个重要指标^[11]。关于 Se 与 Cd 交互作用对植物幼苗生长的影响已有相应报道^[24-25],但结论不一致。有研究认为,适宜剂量的 Se 与 Cd 交互作用能够促进植物幼苗的生长^[9,34-36],但也有研究认为 Se 与 Cd 交互作用是

一个“双重作用”过程,即低浓度 Se 能够与 Cd 相互作用缓解其对植物的毒害并刺激植物生长,高浓度 Se 作为“助氧化剂”会导致植物进一步受到伤害^[16-18]。本研究结果表明,不同浓度 Cd 与 Se 交互作用对西葫芦幼苗生长的影响不同,低中浓度 Cd 与 Se 交互作用能刺激西葫芦幼苗生长,高浓度 Cd 与 Se 交互作用会抑制西葫芦幼苗生长。Yu 等^[37]研究小白菜也得出了相似的结果,外源 Se 使低浓度 Cd ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下小白菜幼苗地上部鲜重增加了 58%,使高浓度 Cd ($20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下小白菜幼苗的鲜重降低了 27%,推测此时 Se 和高浓度 Cd 的协同作用增加了重金属对植物的毒害。

适量 Se 能够提高植物抗氧化性从而增强抵御重金属毒害的能力^[14],但关于 Se 与 Cd 交互作用对 SOD 和 POD 影响的结论不一。有研究表明,当 Cd 胁迫浓度较高时,Se 与 Cd 交互作用能增加这 2 种酶的活性^[22, 25],但也有减少的情况^[24];有报道称不同浓度 Se 与 Cd 交互作用对这 2 种酶活性的影响不同^[32, 37]。本研究也发现,不同浓度 Se 与低浓度 Cd 交互作用会提高西葫芦幼苗的 SOD 和 POD 活性,但不同浓度 Se 与中高浓度 Cd 交互作用抑制了西葫芦幼苗的 SOD 和 POD 活性,Cd 和 Se 浓度越高,抑制作用越强。究其原因,低浓度 Se 能够调节 ROS 的新陈代谢,清除过剩的氧自由基,减少膜质过氧化,提高抗氧化酶活性,缓解 Cd 诱发的氧化胁迫,而高浓度 Se 在植物体内进行同化作用时消耗了抗氧化剂,抑制了植物体内部酶的生物学功能,反而增加了 Cd 的毒性;此外也可能与高浓度 Se 影响了这 2 种抗氧化酶转录过程有关。

适量 Se 能够显著减少 Cd 在作物中的累积^[9,13,21,23],但 Se 对 Cd 积累的这种拮抗效应受 Cd 和 Se 浓度及形态等多种因素的影响^[5,14]。Saidi 等^[24]研究发现,随着 Se 浓度增加,向日葵幼苗叶片中 Cd 浓度呈先降低后逐渐升高的趋势,但均低于单一 Cd 胁迫;Feng 等^[17]研究发现,低浓度 Cd 胁迫下,随着外源 Se 浓度的增加能有效抑制水稻对 Cd 吸收,但在较高浓度 Cd 胁迫下,随着外源 Se 浓度的增加,水稻中 Cd 含量却逐渐增加。本研究结果表明,不同浓度 Se 降低了西葫芦幼苗中的 Cd 含量,抑制西葫芦幼苗吸收 Cd 的 Se 浓度为 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Se 能抑制植物对 Cd 的累积可能与 Se 在植物体内能诱导产生可以与 Cd 螯合的一些特殊蛋白有关,也可能与 Se 抑制 Cd 向作物地上部的迁移和转运有关^[9, 13-14]。

研究发现,Cd 胁迫下外源 Se 能促进植物对 Se 的吸收^[5, 17, 20, 22-23]。本研究同样发现随着 Se 浓度的增

加,西葫芦幼苗中 Se 含量逐渐增加,表明在施加外源 Se 缓解作物 Cd 毒害的同时可以增加作物体内的 Se 含量,从而改善作物品质。

4 结论

本研究发现,不同浓度 Se 与 Cd 交互作用对西葫芦幼苗的生长及抗氧化酶活性的影响存在“双重效应”,低浓度 Cd 胁迫下,可以通过施加外源 Se 来缓解 Cd 的毒害,但高浓度 Cd 胁迫下施加外源 Se 并不一定能缓解 Cd 的毒害。因此通过外源 Se 缓解 Cd 对农作物的毒害时,应充分考虑 Cd 的浓度并选择适量的 Se。本研究探讨了 Se 与 Cd 交互作用对西葫芦的影响,为探索 Cd 污染的治理以及毒害的缓解提供了一定的参考依据。但本试验仅从幼苗生长,SOD、POD 2 种抗氧化酶活性及幼苗体内 Se、Cd 含量几方面进行了研究,还应对 Se 与 Cd 交互作用的机理进行深入分析,特别是 2 种元素在作物中的吸收、转运、代谢和积累等方面,为有关降低 Cd 在作物中的积累同时提高 Se 营养水平的研究提供理论依据。

参考文献:

[1] Muhammad R, Shafaqat A, Muhammad A, Muhammad I, Daniel C W T, Muhammad Z, Zahir A Z, Filip M G T, Yong S O. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. Chemosphere, 2017, 182: 90-105

[2] Liu L, Shang Y K, Li L, Chen Y H, Qin Z Z, Zhou L J, Yuan M, Ding C B, Liu J, Huang Y, Yang R W, Zhou Y H, Liao J Q. Cadmium stress in Dongying wild soybean seedlings: Growth, Cd accumulation, and photosynthesis [J]. Photosynthetica, 2018, 56 (4): 1346-1352

[3] Leila M, Davoud A, Ali A, Behrooz M, Mohammad P. Effects of cadmium stress on seedlings of various rangeland plant species (*Avena fatua* L., *Lathyrus sativus* L., and *Lolium temulentum* L.): Growth, physiological traits, and cadmium accumulation [J]. Journal of Plant Nutrition, 2017, 40 (15): 2127-2137

[4] Ulusu Y, Öztürk L, Elmastaş M. Antioxidant capacity and cadmium accumulation in parsley seedlings exposed to cadmium stress [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2017, 64 (6): 883-888

[5] Huang Q Q, Liu Y Y, Qin X, Zhao L J, Liang X F, Xu Y M. Selenite mitigates cadmium-induced oxidative stress and affects Cd uptake in rice seedlings under different water management systems [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 168: 486-494

[6] 鲜靖苹, 柴澍杰, 王勇, 牛奎举, 董文科, 马晖玲, 张然. 镉胁迫对草地早熟禾生长与生理代谢的影响 [J]. 核农学报, 2019, 33 (1): 176-186

[7] 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

[8] 王岑涅, 刘柿良, 李勋, 王丽萍, 张健. 镉胁迫对红椿 (*Toona ciliata* Roem.) 幼苗生长及碳、氮、磷、钾累积与分配的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (8): 1492-1499

[9] 卞威乐斯, 闫家普, 崔良, 张磊. 施硒对花生镉吸收与抗性及其化学形态的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (6): 1094-1101

[10] Shi Z Y, Yang S Q, Han D, Zhou Z, Li X Z, Liu Y, Zhang B. Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 7638-7646

[11] Mapodzeke J M, Sagonda T, Sehar S, Zhang X, Huang Y Q, Zvobgo G M, Aodzeka A, Lwalaba W W, Shamsi I H. Effects of zinc and silicon on cadmium toxicity and mineral element translocation in two rice (*Oryza sativa*) genotypes [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2018, 44 (3): 294-310

[12] Rajneesh K S, Poonam P, Ritika R, Anjana R, Arti G, Dubey R S. Exogenous application of calcium and silica alleviates cadmium toxicity by suppressing oxidative damage in rice seedlings [J]. Protoplasma, 2015, 252: 959-975

[13] Feng R W, Wei C Y, Tu S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 87: 58-68

[14] 陈松灿, 孙国新, 陈正, 陈福龙, 朱永官. 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

[15] 刘达, 涂路遥, 赵小虎, 尹俊钦, 吴志超, 胡承孝, 田小平, 杨晶. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (3): 999-1005

[16] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, Guo J K, Zheng X Q. A dual effect of Se on Cd toxicity: Evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice [J]. Plant Soil, 2014, 375 (1/2): 289-301

[17] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, Ding Y Z, Song Z G. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice [J]. Biological Trace Element Research, 2013, 151 (1): 113-121

[18] Haghighi M, Da Silva J A T. Influence of selenium on cadmium toxicity in cucumber (*Cucumis sativus* cv. 4200) at an early growth stage in a hydroponic system [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47 (2): 142-155

[19] 刘帅, 吴志超, 赵亚荣, 张卫杰, 王富华. 外源硒对镉胁迫下菜心 Fe、Mn、Cu、Zn 吸收与转运的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (3): 431-439

[20] 韩承华, 严吴炜, 朱丽丽, 张路, 李换平, 江解增, 周增辉, 张娜, 田秋芳, 石如琼, 潘瑞瑞, 刘野. 硒对镉胁迫下豆瓣菜生长、生理特性及镉积累的影响 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2017, 38 (1): 115-119

[21] Zhao Y Y, Hu C X, Wu Z C, Liu X W, Cai M M, Jia W, Zhao X H. Selenium reduces cadmium accumulation in seed by increasing cadmium retention in root of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J].

- Environmental and Experimental Botany, 2019, 158: 161-170
- [22] Maria F, Rütcka K, Helina H, Iwona S, Agnieszka J, Zbigniew M, Agnieszka G. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165: 833-844
- [23] Liu W X, Feng X, Shang S, Zhang G, Wu F B. Selenium reduces cadmium accumulation and alleviates cadmium-induced quality degradation in tobacco[J]. Plant Soil Environment, 2015, 61:444-450
- [24] Saidi I, Chtourou Y, Djebali W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171:85-91
- [25] Huang G X, Ding C F, Guo F Y, Zhang T L, Wang X X. The optimum Se application time for reducing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and its mechanism[J]. Plant Soil, 2018, 431:231-243
- [26] 郭锋, 樊文华, 冯两蕊, 许剑敏. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 524-531
- [27] 李合生, 孙群, 赵世杰, 章文华. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:164-165, 167-169
- [28] 樊俊飞. 不同基因型小麦对硒、铅和镉胁迫响应的差异研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018:16
- [29] Azizian A, Amin S, Mafoun M, Emam Y, Noshadi M. Response of corn to cadmium and drought stress and its potential use for phytoremediation [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15: 357-368
- [30] Agrawal S B, Mishra S. Effects of supplemental ultraviolet-B and cadmium on growth, antioxidants and yield of *Pisum sativum* L. [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72:610-618
- [31] Shamsi I H, Zhang G P, Hu H L, Xue Q Y, Hussain N, Ali E, Shen Q F, Zheng W T, Zhang Q C, Liu X Y, Jabeen Z, Lin X X. Assessment of the hazardous effects of Cd on physiological and biochemical characteristics of soybean genotypes [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2014, 16:41-48
- [32] 许立光. Se 对 Cd 胁迫下黄瓜毛状根生长、抗氧化酶活性及 Cd 吸收分布的影响[D]. 广州:华南师范大学, 2010: 31-34
- [33] Li F T, Qi J M, Zhang G Y, Lin L H, Fang P P, Tao A F, Xu J T. Effect of Cadmium stress on the growth, antioxidative enzymes and lipid peroxidation in two kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) plant seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(4): 610-620
- [34] Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, Szarejko I, Janiak A, Miszalski Z, Golda A. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(8): 833-844
- [35] Lin L, Zhou W H, Dai H X, Cao F B, Zhang G P, Wu F B. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235-236:343-351
- [36] Sun H Y, Dai H X, Wang X Y, Wang G H. Physiological and proteomic analysis of selenium-mediated tolerance to Cd stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133:114-126
- [37] Yu Y, Yuan S L, Zhuang J, Wan Y A, Wang Q, Zhang J S, Li H F. Effect of selenium on the uptake kinetics and accumulation of and oxidative stress induced by cadmium in *Brassica chinensis* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 162:571-580

Interactive Effects of Selenium and Cadmium on the Growth and Antioxidative Enzymes in Zucchini Seedling

GUO Feng* WU Weifeng FENG Yu XU Jianmin MA Xiang'ai

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: The selenium (Se) can alleviate the toxicity of cadmium (Cd) on plants. In order to investigate the effects of the interaction between Se and Cd on plants, a sand culture experiment was conducted to study the interactive effects of different concentration of selenium ($0.5, 2.0$ and $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and cadmium ($0.2, 0.4$ and $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on the growth, antioxidative enzymes, Cd and Se content in pumpkin seedlings. The results indicated that exposure to increasing Cd concentrations promoted the growth and the activity of antioxidant enzymes of pumpkin seedlings. The interactive effect of Se and Cd on growth and the activity of antioxidative enzymes for pumpkin seedlings mainly depended on the concentration of Se and Cd. When Cd treatment level was 0.2 and $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Se ($0.5, 2.0$ and $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) could significantly increase seedling height, fresh weight and dry weight of pumpkin seedlings. However, with Cd level reaching $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the addition of Se resulted in decreasing biomass of pumpkin seedlings. Compared with single Cd stress, the combination treatment of Se ($0.5, 2.0$ and $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and Cd level at $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ significantly enhanced, the activity of SOD and POD; Se ($0.5, 2.0$ and $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) inhibited the activity of SOD and POD when Cd levels were 0.4 and $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, furthermore, the higher the concentration of Cd was the more serious the inhibition was. There were the inhibitory effects of Se-Cd interaction on growth and activity of antioxidant enzyme in pumpkin seedlings under stress of Cd with $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The exogenous Se reduced Cd concentration and increased the Se concentration in zucchini seedlings under Cd stress. Se with lower levels could effectively alleviate Cd toxicity in zucchini seedlings. The optimum Se concentration is $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for Se-Cd interactions to promote the growth and antioxidant enzyme activity under Cd stress with low concentration. This study suggested that the Cd pollution degree and concentration of exogenous Se should be considered when Se is used to alleviate Cd toxicity on plant, which provided a certain reference for Cd pollution control.

Keywords: selenium, cadmium, interactive effect, pumpkin seedlings