

硒对铬胁迫下茄子生理特性及铬吸收的影响

刘晓娟¹, 程滨^{1,2}, 赵瑞芬², 滑小赞², 王森², 王钊², 任哲斌^{1,3}

(1.山西大学生物工程学院,太原 030006;2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所,
太原 030031;3.山西省农业科学院果树研究所,太原 030031)

摘要:为探讨硒对茄子中铬胁迫的缓解作用,采用土培盆栽方式,研究了不同铬胁迫水平下,施加不同浓度的硒对茄子生长、生理特性及铬吸收的影响。结果表明,随着铬浓度增加,单一铬处理植株生长明显受到抑制,铬毒害表现为株高、根长、根、茎、叶干重及叶绿素含量受抑制。随着铬浓度的增加,叶片中的叶绿素和可溶性蛋白呈下降趋势,丙二醛(MDA)含量呈上升趋势,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性呈先上升后下降的趋势。铬硒混合处理结果表明硒有减轻茄子铬毒害的作用,不同浓度的铬胁迫下,施加不同浓度的硒缓解效果不同,10,20,40,80 mg/kg的铬处理下,分别施用12,24,48,48 mg/kg的硒缓解效果较好,茄子的株高、根长、生物量均有所增加,叶绿素含量、可溶性蛋白含量显著提高,丙二醛含量和植株体内铬的积累降低。

关键词: 铬胁迫; 硒; 茄子; 铬吸收; 生理特性

中图分类号: S3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)04-0357-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.050

Effects of Selenium on the Physiological Characteristics and Chromium Uptake of Eggplant Under Chromium Stress

LIU Xiaojuan¹, CHENG Bin^{1,2}, ZHAO Ruifen²,

HUA Xiaozan², WANG Sen², WANG Zhao², REN Zhebin^{1,3}

(1.College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006;

2.Institute of Agricultural Environment & Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences,

Taiyuan 030031; 3.Institute of Fruit Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031)

Abstract: To investigate the alleviation of selenium (Se) on the chromium (Cr) toxicity in eggplant, the effects of different concentration of Se on the growth, physiological characteristics and Cr uptake by eggplant under different Cr stress levels were studied by pot experiments. The results showed that with the treatment of single Cr, the plant growth was significantly inhibited with the increase of Cr concentration. The Cr toxicity showed that the plant height, root length, shoot and dry weight and chlorophyll content were inhibited. With the increase of Cr concentrations, the chlorophyll and soluble protein in leaves showed a downward trend, and the content of malondialdehyde (MDA) increased, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased first and then decreased. The results of Cr-Se mixed treatment showed that Se could alleviate the Cr toxicity of eggplant. Under different concentrations of Cr stress, Se applied with different concentrations showed different alleviation effects. Studies showed that under the treatment of 10, 20, 40 and 80 mg/kg Cr, the good alleviation effects could be obtained when applied with 12, 24, 48 and 48 mg/kg Se respectively. The plant height, root length and biomass of eggplant increased, chlorophyll and soluble protein contents increased significantly, MDA and Cr accumulation in plant decreased.

Keywords: Cr stress; Se; eggplant; Cr uptake; physiological characteristics

收稿日期: 2019-03-05

资助项目: 山西省重点研发计划重点项目“主要农业生态区域农业面源污染关键技术与集成示范”(201603D21110-1-2); 山西省青年科技研究基金项目“太原市菜地土壤和蔬菜重金属现状调查及其健康风险评估”(201601D202071); 山西省重点研发计划(社会发展领域)项目“污灌农田土壤重金属Cd迁移转化规律及其机理研究”(201803D31209-1)

第一作者: 刘晓娟(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事重金属铬的迁移转化研究。E-mail: 352098189@qq.com

通信作者: 程滨(1963—), 女, 研究员, 研究生导师, 主要从事植物营养学研究。E-mail: chengbin0709@163.com

铬是 VI—B 族中的一种过渡元素,在自然界中一般以复合物的形式存在,主要以 Cr(Ⅲ)和 Cr(Ⅵ)2 种价态稳定存在。不同价态的铬,其毒性不一样,Cr(Ⅲ)极易被土壤胶体吸附或形成沉淀,活性较差,不易转移,对植物毒性相对较小,土壤和水生环境中较为常见,也是人类生长所必需的微量元素^[1-4]。Cr(Ⅵ)其常见形式为铬酸盐(CrO_4^{2-})和重铬酸盐($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$),在一定的阈值内,其具有化学活性强、移动性大、生物毒性强且持久、易被植物吸收等特点,能在植物体内残留对植物产生毒害,并通过食物链的富集危害人类健康,是国际上公认的强致癌物之一^[5-11]。随着人类活动的日益加剧,如铬渣露天堆放和制革工业将废水、废气排放等导致土壤铬污染日益严重。有研究^[12]发现,我国年产铬已超过 16 万 t,每年新排放铬渣约 60 万 t,历年累积堆存铬渣近 600 万 t,铬严重污染的土壤达 1 250 多万 t。

硒(Se)是动物和人体不可缺少的微量元素,在维持人体免疫功能和降低癌症风险方面起着重要作用^[4,13]。硒(Se)虽然不是植物生长必需的元素,但是可以影响植物的生长发育,抵御植物体内自由基伤害,提高植物抗逆能力,与重金属拮抗作用^[14-15]。近年来,硒(Se)被用于保护受重金属影响的植物,但其作用机制尚不完全清楚。国内外专家围绕 Se 与重金属的相互作用展开了大量研究^[16-18]。大量研究^[15-16,19-21]表明,植物体内的 Se 可以通过与金属离子、谷胱甘肽结合,并以 Se—金属—谷胱甘肽复合物的形式将重金属排出体外。低质量浓度的 Se 还可以通过调节植物超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和脯氨酸量来缓解重金属对植物的伤害,高浓度的 Se 则对植物生长有抑制作用^[22-23]。

茄子(*Solanum melongena* L.)属茄子科,茄子属,为一年生草本植物。茄子耐湿、耐热,适应性强,较容易栽培,是北方地区夏秋季的主要蔬菜之一。本研究以茄子为试验对象,采用土培盆栽方式,探讨硒对铬毒害的抑制和缓解的机理,为 Se 缓解铬胁迫对植物造成毒害的机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 4 月 7 日至 8 月 28 日在山西农业科学院农业环境与资源研究所进行。以山西省寿阳地区的褐土为试验用土,取表层(0—20 cm)的土壤,采样时间为 2017 年 9 月。供试茄子(*Solanum melongena* L.)品种为“黑丽圆茄”,由山西晋满丰种业有限公司提供。供试 Se 为 Na_2SeO_3 ,Cr 为 K_2CrO_4 ,试验中所用试剂均为分析纯。

1.2 试验方法

将供试土壤自然风干,磨细后过 2 mm 筛,每盆装入 2.5 kg 干土,按不同处理统一 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 Na_2SeO_3 混合溶液,使土壤成黏稠状,充分混匀。试验设 4 个 Cr 水平,分别为 10,20,40,80 mg/kg(分别表示为 Cr10、Cr20、Cr40、Cr80);4 个 Se 水平,浓度分别为 0,12,24,48 mg/kg(分别表示为 Se0、Se12、Se24、Se48),1 个不加任何溶液的空白处理;共 17 个处理,每个处理设 4 次重复。各处理土壤在室内平衡 40 天后用于试验。将籽粒饱满的茄子种子用 2% 的 NaClO 溶液消毒 10 min 后,用蒸馏水冲洗干净,分别播种于营养土内进行育苗,待长到三叶一心时,选择长势相同的幼苗移入不同处理的盆中 3 株,缓苗后留取 2 株。70 天后收获测定相关指标。收获后分别用自来水和去离子水冲洗整个植株,用滤纸吸去植株水分,称量单株鲜重,然后将根、茎、叶部分开称量其鲜重,在 105 ℃下杀青 30 min,50 ℃烘干至恒质量,用电子天平称取各部分质量。烘干样品粉碎过 0.2 mm 筛,用于测定重金属铬含量。

1.3 测定指标与方法

叶绿素含量采用 SPAD 仪直接测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用硝基四氮唑蓝(NBT)还原法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G—250 染色法^[24]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)加热比色法^[25]测定;Cr 含量采用原子荧光法^[26]测定。

1.4 数据分析

采用 SPSS 16.0 和 Excel 2016 软件进行数据分析和统计分析,用 Excel 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 Se 对 Cr 胁迫下茄子生长的影响

由表 1 可知,单一的 Cr 处理均对茄子的株高、根长及生物量有抑制作用,且浓度越高,抑制作用越显著($P < 0.05$)。表现为 Cr10、Cr20、Cr40、Cr80 处理下,株高分别比对照低 38.37%,53.97%,66.23%,75.03%;根长分别比对照降低 24.55%,55.20%,84.79%,71.38%;根干重分别比对照降低 42.72%,72.82%,65.62%,92.23%;茎干重分别比对照降低 35.25%,67.24%,85.44%,92.19%;叶干重分别比对照降低 36.35%,64.21%,81.75%,92.64%。在 Cr 为 80 mg/kg 处理下,茄子的生长受到胁迫损害严重,成活率较低。

加入不同浓度的 Se 后,对 Cr 胁迫的缓解效果不同。Cr10 处理下,Cr10Se12 处理对茄子的缓解效果最佳,其茄子的株高、根长及茎、叶、根干重分别是

Cr10 处理的 1.20,1.25,1.35,1.39,1.47 倍;Cr20 处理下,Cr20Se24 处理下株高、根长及茎、叶、根干重分别是 Cr20 的 1.10,1.19,1.38,1.23,1.34 倍;Cr40Se48 处理下株高、根长及茎、叶、根干重分别是 Cr40 的 1.13,1.14,1.16,1.24,1.24 倍;Cr80Se48 处理

下株高、根长及茎、叶、根干重分别是 Cr80 的 1.25,1.09,1.34,1.20,1.15 倍。说明 Cr 主要通过影响其根系生长,抑制植株生长,导致生物量降低,适量的 Se 能减轻根部吸收土壤中的 Cr,从而减轻对其地上部的毒害,提高植物对铬的耐性。

表 1 硒对铬胁迫下茄子株高、根长及生物量的影响

Cr 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	Se 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	株高/cm	根长/cm	根干重/g	茎干重/g	叶干重/g
0	0	25.10±0.55 ^a	12.67±0.68 ^a	0.77±0.05 ^a	1.30±0.23 ^a	1.77±0.05 ^a
	0	15.47±0.32 ^d	9.56±0.07 ^d	0.44±0.02 ^d	0.80±0.01 ^d	1.13±0.03 ^d
	12	18.62±0.70 ^b	11.97±0.30 ^b	0.65±0.04 ^b	1.10±0.06 ^b	1.57±0.06 ^b
10	24	17.89±0.29 ^b	11.72±0.37 ^{bc}	0.61±0.02 ^b	1.07±0.06 ^{bc}	1.52±0.04 ^{bc}
	48	17.41±0.10 ^c	10.60±0.36 ^c	0.51±0.02 ^c	0.90±0.03 ^c	1.33±0.03 ^c
	0	11.55±0.46 ^g	5.68±0.31 ^g	0.21±0.02 ^g	0.43±0.02 ^g	0.63±0.04 ^g
20	12	13.28±0.71 ^{fg}	6.13±0.13 ^f	0.27±0.01 ^f	0.57±0.01 ^f	0.75±0.02 ^f
	24	14.59±0.22 ^e	7.29±0.25 ^e	0.37±0.02 ^e	0.78±0.01 ^e	0.93±0.03 ^e
	48	14.03±0.50 ^f	6.68±0.18 ^e	0.31±0.02 ^f	0.69±0.01 ^e	0.88±0.05 ^e
40	0	8.48±0.49 ^h	4.36±0.16 ^h	0.12±0.01 ^h	0.19±0.01 ^h	0.31±0.01 ⁱ
	12	9.17±0.13 ^{gh}	5.12±0.09 ^h	0.14±0.01 ^h	0.21±0.03 ^h	0.40±0.02 ^h
	24	11.04±0.33 ^{gh}	5.54±0.20 ^f	0.18±0.02 ^{gh}	0.32±0.02 ^g	0.46±0.03 ^h
80	48	12.51±0.32 ^f	6.33±0.19 ^g	0.22±0.02 ^g	0.36±0.01 ^g	0.57±0.04 ^g
	0	6.27±0.42 ⁱ	3.63±0.12 ⁱ	0.06±0.01 ⁱ	0.09±0.01 ⁱ	0.13±0.01 ^k
	12	6.69±0.24 ⁱ	4.36±0.17 ^j	0.08±0.02 ⁱ	0.11±0.01 ⁱ	0.16±0.03 ^k
	24	7.93±0.13 ⁱ	5.01±0.14 ⁱ	0.12±0.02 ^{hi}	0.15±0.01 ^{hi}	0.25±0.04 ^j
	48	9.91±0.63 ^{gh}	5.45±0.20 ^h	0.13±0.01 ^h	0.21±0.02 ^h	0.29±0.01 ^j

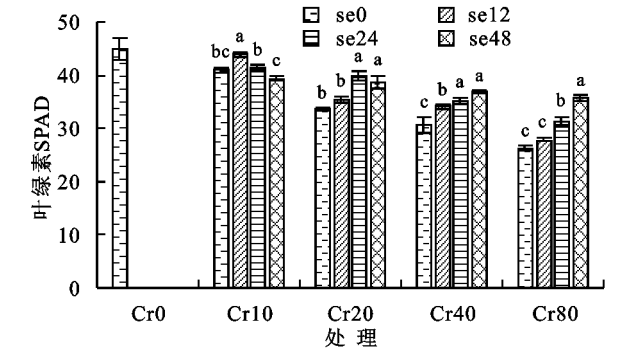
注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

2.2 Se 对 Cr 胁迫下茄子生理特性的影响

2.2.1 Se 对 Cr 胁迫下茄子叶绿素含量的影响 由图 1 可知,单一 Cr 处理下,茄子叶片中的叶绿素含量随 Cr 浓度的增加而降低,形态上就发生明显的变化,表现出叶片变小,植株明显变矮,叶色变淡及黄化现象。在单一 Cr 10,20,40,80 mg/kg 处理下,叶绿素含量分别比对照降低 9.1%,25.1%,31.9%,41.5%。Cr40、Cr80 处理下,植株叶片发生明显的变化,叶片变小,变窄,尤其是在 80 mg/kg 处理下,叶片出现严重的黄化现象。在加入不同浓度的 Se 后,对 Cr 胁迫的缓解效果不同。与单一的 Cr10、Cr20、Cr40、Cr80 处理相比,分别加入 12,24,48,48 mg/kg 的 Se,使得叶片中的叶绿素含量提高 7.3%,18.5%,8.0%,35.6%。说明 Cr 胁迫破坏了茄子的叶绿体结构,叶绿素含量降低,光合作用减弱,适量的 Se 能调控 Cr 胁迫下叶绿素的合成,抑制 Cr 对叶绿素的伤害。

2.2.2 Se 对 Cr 胁迫下茄子 MDA 含量的影响 MDA 积累量的高低反映细胞膜脂过氧化作用的强弱,一定程度上反映植物的伤害程度。由图 2 可知,就单一 Cr 处理而言,随着 Cr 浓度的增加,茄子叶片中 MDA 含量(以鲜重计)显著增加,Cr 浓度越高,当 Cr 为 80 mg/kg 时达到峰值,为对照处理的 2.54 倍,说明高浓度下茄

子细胞膜脂过氧化程度严重。低铬处理(10,20 mg/kg)下,加 Se 均降低 MDA 叶片中的 MDA 含量,分别加入 12,24 mg/kg 的 Se 效果最佳,与单一 Cr 处理相比,MDA 含量显著下降(P<0.05),最大降幅分别为 21.9%,33.3%;高铬处理(40,80 mg/kg)下,叶片中的 MDA 含量随 Se 逐渐下降,在加入 48 mg/kg Se 时,MDA 含量达到最低值,分别降低 20.4%,24.5%,且加入 12 mg/kg 的 Se 之后 MDA 的含量与未加硒的 MDA 含量无显著差异(P>0.05)。这说明 Cr 使细胞膜脂过氧化,适宜浓度的 Se 一定程度上能缓解 Cr 胁迫下细胞膜脂过氧化的损伤。



注:图中不同小写字母表示同一 Cr 水平下不同 Se 处理之间的显著性差异(P<0.05)。下同。

图 1 Se 对 Cr 胁迫下茄子叶片中叶绿素含量的影响

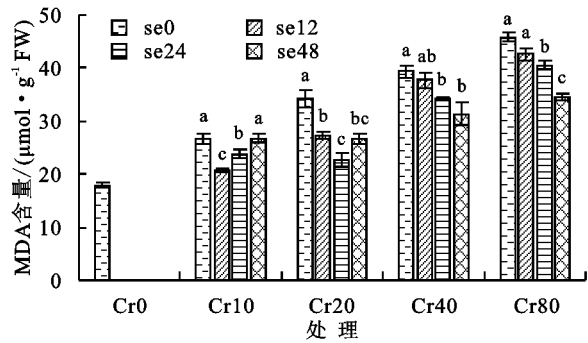


图 2 Se 对 Cr 胁迫下茄子叶片中 MDA 含量的影响

2.2.3 Se 对 Cr 胁迫下茄子 3 种抗氧化酶活性的影响 重金属胁迫导致了植物体内的活性氧自由基大量产生,SOD、POD、CAT 是植物体内抗氧化酶系统的重要组成部分,在一定范围内清除过多的活性氧自由基,保护细胞免受毒害^[26]。

从图 3 可以看出,单一 Cr 处理茄子叶片中的 SOD、POD 和 CAT 的含量(均以鲜重计)随着 Cr 浓度的增加均表现为先增加后降低的趋势。Cr40 处理下茄子叶片中的 SOD、POD、CAT 含量达到最大值,分别比对照提高 25.0%,81.0%,51.6%;而 Cr80 处理下茄子叶片中的 SOD、POD、CAT 含量达到最低值,分别比对照降低 13.1%,27.5%,13.5%。说明 80 mg/kg 处理下,铬胁迫超出了茄子的耐受能力,导致茄子受到伤害,从而破坏抗氧化酶正常的催化能力。

在不同浓度 Cr 胁迫下处理下,茄子叶片中 SOD、POD 和 CAT 的含量随着 Se 浓度的增加而呈不同的趋势。≤40 mg/kg 的 Cr 处理下,SOD、POD、CAT 酶活性随着硒处理浓度的增加呈先降低后增加的趋势。其中,Cr 浓度为 40 mg/kg 时,加入 48 mg/kg 的 Se 缓解效果最为显著。与 40 mg/kg 的 Cr 处理相比,施用 48 mg/kg 的 Se,SOD、POD、CAT 活性酶含量降低 14%,22%,13%。但在 Cr80 处理下,茄子叶片中 SOD、POD 和 CAT 的含量随着 Se 浓度的增加而增加,其中加入 48 mg/kg Se 的 SOD、POD 和 CAT 含量分别增加 14%,60%,13.5%。说明 Se 缓解 Cr 对茄子生长的抑制作用,使得保护性酶(SOD、CAT 和 POD)的活性得到改善。

2.2.4 Se 对 Cr 胁迫下茄子可溶性蛋白含量的影响 从图 4 可以看出,重金属胁迫影响植物体内的蛋白质代谢,导致蛋白质的合成受阻。随着 Cr 胁迫浓度的提高,茄子叶片中可溶性蛋白含量逐渐降低。Cr80 处理下,叶片中可溶性蛋白含量达到最低值,比对照降低 34.5%。在 Cr80Se48 处理下,可溶性蛋白含量达到最大值,是 Cr80 的 1.15 倍。说明过量的 Cr 累积于茄子体内,使细胞结构遭到破坏,导致可溶性蛋

白质含量下降,适量的 Se 可以抑制蛋白质的分解。

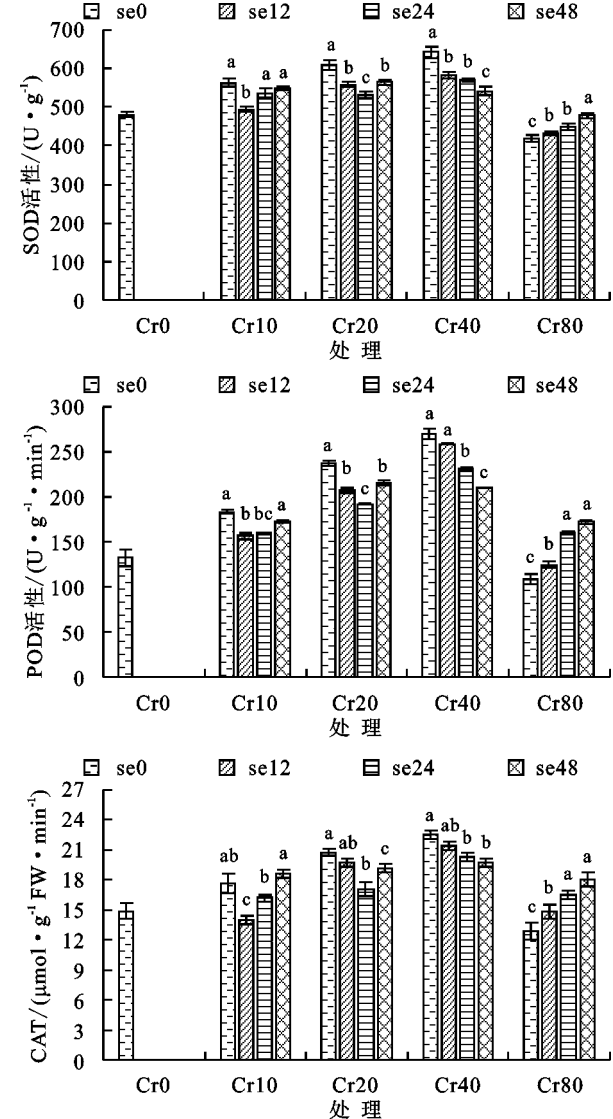


图 3 Se 对 Cr 胁迫下茄子叶片中 SOD、POD、CAT 含量的影响

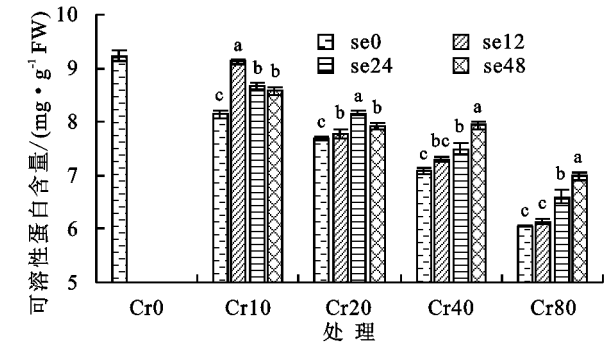


图 4 Se 对 Cr 胁迫下茄子叶片中可溶性蛋白含量的影响

综上所述,说明一定浓度的 Se 能通过维持内源性保护酶的活性来缓解 Cr 对体内代谢(ROS 代谢)的影响。

2.3 Se 对茄子吸收 Cr 的影响

由图 5 可知,铬含量在茄子不同器官中累积量不同,其依次为根>茎>叶,表明 Cr 更容易在茄子根部积累。茄子根、茎、叶中 Cr 含量(以干重计)均随 Cr

浓度的增加而增加,在 Cr80 处理下,茄子根、茎、叶中的铬含量达到最大值。

一定 Cr 浓度下,茄子根、茎、叶中 Cr 含量随 Se 浓度的增加而呈不同的趋势。具体表现为:在 Cr≤20 mg/kg 时,根、茎、叶中铬含量随 Se 浓度的增加呈先降低后增加的趋势,在 Cr10Se12、Cr20Se24 处理下效果最佳。在 Cr≥40 mg/kg 时,根、茎、叶中铬含量随 Se 浓度的增加呈逐渐降低的趋势,Cr40Se48 处理分别比 Cr40 处理降低 55.6%,22.4%,47.1%;Cr80Se48 处理分别比 Cr80 处理降低 16.3%,22.5%,39.4%。说明适宜浓度的 Se 对根、茎、叶对 Cr 的吸收存在拮抗作用,且能抑制茄子根部的铬向地上部的转移。

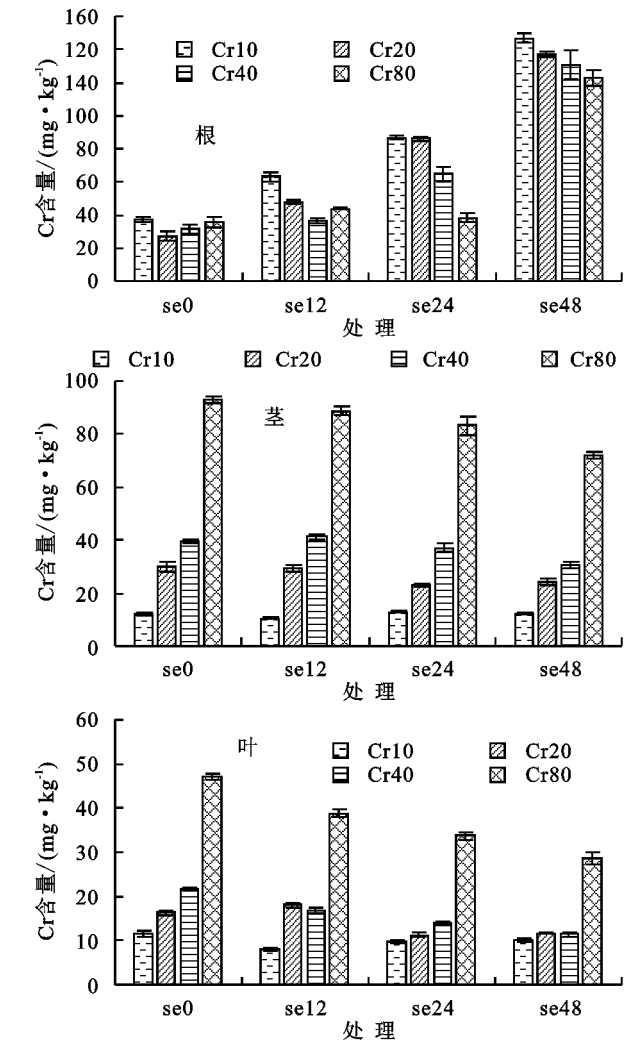


图 5 Se 对 Cr 胁迫下茄子根、茎、叶的 Cr 含量的影响

3 讨论

Cr 是生物毒性最强的重金属之一,当过量的 Cr 在植物体内积累,通过改变植物的生理指标而抑制植物的生长发育,而植物的根长、株高及生物量的变化能直接反映出植物对 Cr 的耐性。有关学者^[23,27-28]证实,Se 参与调控植物的光合和呼吸作用,介入植物体的新陈代谢过程,在一定剂量内可以缓解铬、镉、砷、

铅、镁和铜对植物的抑制作用。本研究结果表明,单一 Cr 污染对茄子根长、株高和生物量有抑制作用,并且抑制作用随着重金属 Cr 浓度的增加而增强。加入适宜浓度 Se 后,茄子的根长、株高和生物量均高于单一 Cr 胁迫。说明适宜浓度的 Se 可以有效缓解重金属 Cr 对茄子的抑制作用,且重金属 Cr 的浓度不同,Se 对茄子的缓解的剂量也不同。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量的变化直接反映植物光合作用的强弱,该指标作为植物抗逆性评价体系中植物在胁迫处理下对外界刺激响应^[29]。有研究^[30-31]表明,重金属会破坏叶绿体的结构,使得叶绿素分解。本研究中,单一 Cr 处理下茄子叶片中的叶绿素总含量随着 Cr 浓度的增加而呈下降趋势。这表明 Cr 对茄子的叶绿体结构造成伤害,导致植物光合作用减弱,植物的生长受到阻碍,最终造成茄子生物量整体呈下降趋势。同单一 Cr 胁迫相比,添加外源 Se 增加茄子叶绿素的含量,可能是由于 Se 的添加重新活化了细胞膜酶,使叶绿体的代谢运输等功能得到恢复^[32]。

植物在重金属胁迫下,自由基等氧化性物质增多,导致膜脂的过氧化作用,会损害生物膜的结构和功能,影响生物膜的完整性^[15]。有研究^[26]表明,Se 具有抗氧化作用,能够缓解重金属对植物的胁迫。MDA 是植物膜脂过氧化作用最重要的产物之一,MDA 含量反映膜脂过氧化作用的强弱,因此通常将其作为衡量植物膜脂过氧化程度的重要指标。本研究中,茄子叶片 MDA 含量均随着单一 Cr 处理浓度的增大而显著增加,说明重金属 Cr 对茄子造成了脂质过氧化伤害。SOD 活性的升高反映了逆境胁迫下植物体内活性氧自由基增多,细胞膜脂过氧化加剧^[33]。在一定程度下,植物通过提高 SOD 活性来抵御重金属的胁迫,高浓度重金属胁迫下植物体内活性氧自由基不能被有效清除。POD 活性反映了植物组织受到更严重的损伤和破坏,POD 和 CAT 共同作用能将 SOD 的歧化产物 H₂O₂ 催化形 H₂O,从而有效防止 O⁻和 H₂O₂ 的积累^[34]。本研究中,Cr 为 10,20,40 mg/kg 时,SOD、POD、CAT 大幅度增加,而在 80 mg/kg 处理下急剧下降,说明此时茄子产生大量的自由基,这些活性氧自由基消耗大量的 SOD、POD 和 CAT,铬胁迫超出茄子的耐受能力,从而导致茄子受到伤害。Cr 为 10,20,40 mg/kg 时,施加一定浓度的 Se 处理后,茄子叶片中 SOD、POD 和 CAT 均有不同程度的降低,其原因可能是添加外源 Se 后,Se 取代半胱氨酸中硫的位置转变为硒代半胱氨酸,成为

GPx 的活性中心,提高了 GPx 的活性,利用谷胱甘肽(GSH)使有毒的过氧化物还原为无害的羟基化合物,使过氧化物分解,清除自由基,修复分子损伤部位,维持细胞膜正常结构和功能^[35],从而导致茄子 SOD、POD 和 CAT 活性较单一 Cr 处理低,同时 MDA 含量下降。另外,Se 可能作为诱导物启动植物抗氧化系统的表达^[36],保护茄子免受氧化伤害。Cr 为 80 mg/kg 时,施加一定浓度的 Se 处理后,茄子叶片中 SOD、POD 和 CAT 均有增加,可能是 Se 缓解 Cr 对茄子生长的严重抑制作用,使得保护性酶(SOD、CAT 和 POD)的活性得到改善。可溶性蛋白大多是植物体内参与代谢过程的酶类,其含量可以反映出植物的总代谢情况^[37]。Cr 累积于茄子体内,使细胞结构遭到破坏,导致可溶性蛋白质含量下降。适量的 Se 抑制细胞膜的破坏,从而抑制蛋白酶的活性,减少蛋白质的分解。

越来越多的研究证明,低浓度的硒对重金属的毒性具有拮抗作用,而较高浓度的硒对重金属的毒性具有协同作用,并认为硒对重金属的拮抗作用是因硒减轻活性氧自由基对植物的损伤。于淑慧等^[38]研究发现,硒能限制水稻幼苗对 1 mg/L 镉的吸收,且随着硒(Se)浓度的增加,水稻地上部和根部镉的质量分数显著下降,而且地上部的降幅大于根部,主要是镉大部分累积在水稻根部;郭锋等^[32]研究表明,不同浓度的 Se 可以有效缓解 Cd 胁迫对菠菜造成的毒害,0.5,2 mg/kg 的 Cd 胁迫下,外源 Se 能有效的减轻 Cd 胁迫对菠菜的毒害作用的最佳浓度分别是 2,4 mg/L;赵秀峰^[17]研究发现,Se 能有效地减轻 Pb 胁迫对小白菜种子的毒害作用,在不同浓度 Pb (600,800,1 000 mg/kg)下,适宜的 Se 缓解浓度分别为 12.5,25,50 mg/kg。本研究发现,低浓度的铬 Cr 胁迫下,施加低浓度的 Se 后,植物对 Cr 的吸收量降低;施加高浓度的 Se 后,则植物对 Cr 的吸收量增大。进一步证明适宜浓度的 Se 能与 Cr 产生拮抗作用,缓解 Cr 对茄子的毒害,高浓度的 Se 能与 Cr 产生协同作用。

4 结论

通过盆栽试验得出,Cr 胁迫可以对茄子的生长产生一定程度的毒害作用,浓度越高,毒害作用越明显。不同浓度的 Cr 胁迫下,适宜浓度范围内的 Se 可以有效缓解 Cr 胁迫对茄子造成的毒害。当 Cr 浓度为 10 mg/kg 时,Se 的最佳缓解浓度为 12 mg/kg;当 Cr 浓度为 20 mg/kg 时,Se 的最佳缓解浓度为 24 mg/kg;当 Cr 浓度为 40,80 mg/kg 时,Se 的最佳缓解浓度为 48 mg/kg。最佳缓解条件下,茄子的株高、根长、生物量均有所增加,叶绿素含量、可溶性蛋白含

量均显著提高,丙二醛含量、抗氧化酶的活性和植株体内铬的积累降低。因此,可以考虑利用硒(Se)调控植物对重金属的吸收,从而降低重金属向食物链转移。但对于是否硒浓度的提高对茄子有毒害作用,还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王成文,许模,张俊杰,等.土壤 pH 和 Eh 对重金属铬(VI)纵向迁移及转化的影响[J].环境工程学报,2016,10(10):6035-6041.
- [2] 尹华,王锋,刘文.重金属铬在水环境中的迁移转化规律及其污染防治措施[J].农业与技术,2010,30(5):47-49.
- [3] 杨亚丽,李友丽,陈青云,等.土壤铅、镉、铬对蔬菜发育影响及迁移规律的研究进展[J].华北农学报,2015,30(增刊 1):511-517.
- [4] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J].Lancet,2000,356(9225):233-241.
- [5] Jinhyeong L, Jae-Hyun K, Keunsu C, et al. Investigation of the mechanism of chromium removal in (3-aminopropyl) trimethoxysilane functionalized mesoporous silica[J].Scientific Reports,2018,8(1):12078-12089.
- [6] Hugo V L. Contribution of local analysis techniques for the characterization of iron and alloying elements in nitrides: Consequences on the precipitation process in Fe-Si and Fe-Cr nitridealloys[J]. Materials, 2018, 11(8): 1409-1428.
- [7] 张子栋.六价铬毒性作用及其影响因素[J].生物技术世界,2013(8):71.
- [8] 谢文强.六价铬对人体急性与慢性危害探究[J].资源节约与环保,2016(7):131.
- [9] 戴宇,杨重法,郑袁明.土壤—植物系统中铬的环境行为及其毒性评价[J].环境科学,2009,30(11):3432-3440.
- [10] Stambulska U Y, Bayliak M M, Lushchak V I. Chromium(VI) toxicity in legume plants: Modulation effects of rhizobial symbiosis[J].BioMed Research International,2018(3):1-13.
- [11] Monu A, Bala K, Shweta R, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J].Food Chemistry,2008,111(4):811-815.
- [12] 王爱云,钟国锋,徐刚标,等.铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响[J].环境科学,2011,32(6):1717-1725.
- [13] Ismael M A, Elyamine A M, Zhao Y Y, et al. Can selenium and molybdenum restrain cadmium toxicity to pollen grains in Brassica napus? [J]. International Journal of Molecular Sciences,2018,19(8):2163-2188.
- [14] Hasanuzzaman M, Anwar H M, Fujita M. Selenium in higher plants: Physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance[J].Journal of Plant Sciences,2010,5(4):354-375.

- [15] 袁思莉,余垚,万亚男,等.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.
- [16] 彭玲,贾芬,田小平,等.硒对油菜根尖镉胁迫的缓解作用[J].环境科学学报,2015,35(8):2597-2604.
- [17] 赵秀峰,程滨,霍晓兰,等.硒对铅、砷单一污染下小白菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国农学通报,2017,33(23):51-58.
- [18] Shanker K, Mishra S, Srivastava S, et al. Study of mercury-selenium (Hg-Se) interactions and their impact on Hg uptake by the radish (*Raphanussativus*) plant[J].Food and Chemical Toxicology,1996,34(9):883-886.
- [19] 张驰,吴永尧,彭振坤,等.硒对油菜苗期脯氨酸和丙二醛含量的影响[J].湖北农业科学,2003,16(2):45-47.
- [20] Isamu A, Anwar H, Macus T K. Elevated GSH level increases cadmium resistance through down regulation of Spl-dependent expression of the cadmium transporter ZIP8 [J].Molecular pharmacology,2008,74(3):823-833.
- [21] 廖琳,胡晓荣,李晖,等.生态环境中镉对生物体毒性作用机理及硒对该毒性拮抗作用的研究进展[J].四川环境,2002,21(2):21-24.
- [22] Wu Z L, Yin X B, Banuelos G S, et al. Indications of selenium protection against cadmium and lead toxicity in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J].Frontiers in Plant Science,2016,15(7):1875-1885.
- [23] Qing X J, Zhao X H, Hu C X, et al. Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*) leaves [J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2015,114:179-189.
- [24] 张志良.植物生理学实验指导[M].2版.北京:高等教育出版社,1990:297-320.
- [25] 赵世杰,许长成,邹琦,等.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.
- [26] 王丽萍,张健,胡红玲,等.3种土壤下巨菌草对镉胁迫的生理响应[J].农业环境科学学报,2015,34(12):2252-2260.
- [27] Muthu T. Selenium, putrescine, and cadmium influence health-promoting phytochemicals and molecular-level effects on turnip (*Brassica rapa* ssp. *rapa*) [J].Food Chemistry,2015,173:185-193.
- [28] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. Detoxification of antimony by selenium and their interaction in paddy rice under hydroponic conditions [J]. Microchemical Journal,2011,97(1):57-61.
- [29] 赵秀峰,张强,程滨,等.硒对砷胁迫下小白菜生理特性及砷吸收的影响[J].环境科学学报,2017,37(9):3583-3589.
- [30] 谷巍,施国新,杜开,等.汞、镉复合污染对轮叶狐尾藻的毒害影响[J].南京师大学报(自然科学版),2001,24(3):75-79.
- [31] 陈平,吴秀峰,张伟锋,等.硒对镉胁迫下水稻幼苗叶片元素含量的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(3):114-117.
- [32] 郭锋,樊文华,冯两蕊,等.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.
- [33] Wang R G, Chen S L, Ma H Y, et al. Genotypic differences in antioxidative stress and salt tolerance of three poplars under salt stress[J].Frontiers of Forestry in China,2006,1(1):82-88.
- [34] 王爱云,黄姗姗,钟国锋,等.铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响[J].环境科学,2012,33(6):2028-2037.
- [35] Ma P, Yan B, Zeng Q, et al. Oral exposure of Kunming mice to disononylphthalate induces hepatic and renal tissue injury through the accumulation of ROS. Protective effect of melatonin[J].Food and Chemical Toxicology,2014,68(6):247-256..
- [36] Mrittunja S, Lena Q M, Bala R, et al. Effects of selenium on arsenic uptake in arsenic hyper accumulator *Pterisvittata* L.[J].Bioresource Technology,2009,100(3):1115-1121.
- [37] 王欣,刘云国,艾比布·努扎艾提,等.苎麻对镉毒害的生理耐性机制及外源精胺的缓解效应[J].农业环境科学学报,2007,26(2):487-493.
- [38] 于淑慧,周鑫斌,王文华,等.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.