

卞威尔斯, 闫家普, 崔良, 等. 施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1094–1101.

BIAN Wei-le-si, YAN Jia-pu, CUI Liang, et al. The effect of selenium on cadmium accumulation, chemical forms and the resistance of peanuts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1094–1101.

施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响

卞威尔斯¹, 闫家普¹, 崔良², 张磊^{1*}

(1.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2.青岛市环保局城阳分局, 山东 青岛 266109)

摘要:采用温室盆栽试验,研究了低镉(Cadmium, Cd)浓度与高 Cd 浓度条件下,施硒(Selenium, Se)对花生生长、抗逆生理、Cd 吸收积累及 Cd 在花生植株中形态的影响。结果表明,不同 Cd 条件下施 Se 均显著影响花生生物量。施 Se 可以缓解细胞膜的损害,降低丙二醛的积累。Cd 胁迫抑制了花生的光合作用,随 Se 浓度增大,花生叶片光合速率呈现先升高后降低的趋势。Cd 污染条件下,随施 Se 浓度增大,花生叶片及根系 Cd 含量先降低后升高,且在 Se 浓度为 0.25 mg·kg⁻¹ 时效果最显著。在低 Cd 处理(3 mg·kg⁻¹)和高 Cd 处理(30 mg·kg⁻¹)条件下,施加 0.25 mg·kg⁻¹ Se 使花生地上部分及根系 Cd 含量分别下降了 12.71%、46.13% 和 21.29%、36.00%。花生植株中 Cd 形态以氯化钠提取态(F_{NaCl})、醋酸提取态(F_{HAc})和水提取态(F_w)为主要形态。施 Se 处理可提高花生根部 F_{HAc} 和 F_w 提取态 Cd 的分配比例。研究结果显示,适量施 Se 可有效降低花生植株体内活性态 Cd 的比例,减少 Cd 的吸收。

关键词: 硒; 镉; 生物量; 光合效应; 化学形态

中图分类号: X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)06-1094-08 doi:10.11654/jaes.2017-1436

The effect of selenium on cadmium accumulation, chemical forms and the resistance of peanuts

BIAN Wei-le-si¹, YAN Jia-pu¹, CUI Liang², ZHANG Lei^{1*}

(1.College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2.Chengyang Branch, Qingdao Environmental Protection Bureau, Qingdao 266109, China)

Abstract: This paper investigates the influence of selenium on growth, physiological resistance, accumulation and chemical forms of cadmium(Cd) in peanuts under varied treatments of Cd(0, 3, 30 mg·kg⁻¹) through a series of experiments. Results showed that, application of Se influences peanut biomass significantly for all different Cd levels, and Se amendment decreased the accumulation of MDA and cell membrane damage. Cd stress significantly reduced the net photosynthesis rate of peanuts, and the net rate of photosynthesis first increased and then decreased with increasing Se levels. Under Cd pollution(3, 30 mg·kg⁻¹), Cd concentrations in the peanut plants first decreased, then increased with increasing Se levels. The lowest Cd concentration in peanuts occurred when treated with 0.25 mg·kg⁻¹ Se application. When soil Cd concentrations were 3 mg·kg⁻¹ and 30 mg·kg⁻¹, Cd concentrations in the shoots and roots decreased by 12.71%, 46.13% and 21.29%, 36.00%, respectively, under 0.25 mg·kg⁻¹ Se treatment. NaCl, HAc, and water-extractable Cd were predominant in peanuts. Application of Se increased HAc and water-extractable Cd. Results showed that moderate Se application could effectively inhibit Cd activity and decrease Cd transportation and accumulation in peanut plants.

Keywords: selenium; cadmium; biomass; photosynthesis; chemical form

Cd 是毒性最强的重金属元素之一, 可造成重大环境污染, 且具有较高的积累性和生物迁移性, 易被

植物吸收富集。过量 Cd 积累会使植物 Cd 含量超标, 影响植物生长, 甚至通过食物链危害人体健康^[1]。花生

收稿日期: 2017-10-20 录用日期: 2018-01-26

作者简介: 卞威尔斯(1991—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 从事重金属污染迁移及控制研究。E-mail: 18306390807@163.com

* 通信作者: 张磊 E-mail: zhanglei_zhxy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101094, 41101472)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41101094, 41101472)

富含优质的脂肪、蛋白质及其他微量元素,是世界上重要的油料作物之一,更是中国植物油和植物蛋白的重要来源,花生安全问题与人体健康息息相关^[2]。然而近年来随着工业的发展,我国农田土壤 Cd 污染严重,花生 Cd 含量超标已成为人体健康和出口贸易面临的重要威胁之一,如何解决花生 Cd 污染问题越来越受到人们的关注^[3]。

Se 是人体必需的微量元素,缺 Se 或过量 Se 都会对人体产生损害。适量 Se 不但对人体健康有益,对植物的生长也有重要的作用^[4-5]。国内外部分学者研究认为,适量施 Se 对于植物生长、缓解 Cd 胁迫、抑制 Cd 吸收、增强植物抗逆性有着重要的意义^[6-7]。施 Se 与富 Se 产品的生产已经成为培育优质农作物的重要方法。

目前,对于 Se、Cd 交互作用的研究报道大多集中在水稻、小麦、油菜等作物^[8-10],关于 Se 影响花生 Cd 吸收抗性及植株中 Cd 形态的研究鲜有报道。本研究采用盆栽试验分析 Cd 胁迫下不同施 Se 浓度对花生 Cd 吸收积累、生长发育与逆境生理特性等,并通过花生植株体内 Cd 形态分析,来进一步阐释施 Se 对花生植株中 Cd 吸收转运的影响机理及解毒机制,以期对花生籽粒的 Cd 污染防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

根据前期研究,花生品种选择富 Se 品种花育 22 号。供试土样理化性状为 pH 值 8.17,有机质含量 $14.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $6.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $60.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 Cd 含量 $<0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Se 含量 $0.014 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 实验处理

将 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 用蒸馏水溶解配成稀溶液,均匀混于土壤中,静止熟化时间 50 d,期间保持土壤水分含量 60%左右。为探究低浓度 Cd 条件下花生植株内 Cd 的迁移及高浓度 Cd 对花生的胁迫作用,设定 3 个 Cd 浓度分别为 0.00 、 3.00 、 $30.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以分别模拟对照、低 Cd 污染与高 Cd 胁迫条件。土壤风干粉碎过 20 目筛,添加外源 Se($\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 配制的 Se 溶液)使土壤 Se 浓度为 0 、 0.25 、 0.5 、 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验设 12 个交互组,每组 6 个重复,共 72 盆。Cd、Se 浓度分别为 Cd0+Se0、Cd3+Se0、Cd30+Se0、Cd0+Se0.25、Cd3+Se0.25、Cd30+Se0.25、Cd0+Se0.5、Cd3+Se0.5、Cd30+Se0.5、Cd0+Se1.0、Cd3+Se1.0、Cd30+Se1.0。选择籽粒

饱满、大小均匀的花生种子洗净晾干,放入 $0.3\% \text{ H}_2\text{O}_2$ 溶液浸泡 30 min,然后置于智能人工气候箱中 28°C 下保湿催芽,待种子发芽后,选取 4 株长势相近的花生幼苗移植于塑料盆中,每盆添加 900 g 土壤,培养 35 d。培养条件为玻璃温室自然光下培养。白天温度 ($30\sim35^\circ\text{C}$),晚上温度 ($20\sim25^\circ\text{C}$);湿度控制在 70% 左右。

1.3 指标测定

1.3.1 干质量的测定

所采样品在 120°C 下杀青 30 min,然后在 75°C 下烘干 24 h 至恒质量,测定地上部和根部干质量。

1.3.2 细胞膜透性的测定

取 0.20 g 叶肉样品,剪碎放入 20 mL 刻度试管中,加入 15 mL 蒸馏水,置真空干燥器中抽气 20 min 后,测定浸出液的电导值,再煮沸 40 min,测定电导值,以相对电导率(煮沸前外渗液电导值/煮沸后外渗液电导值 $\times 100\%$)表示细胞膜透性。

1.3.3 丙二醛(MAD)含量的测定

取 0.20 g 叶肉样品,加 5% 三氯乙酸(TCA) 5 mL ,研磨后在 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min。取上清液 2 mL ,加 0.67% 硫代巴比妥酸(TBA) 2 mL ,混合水浴煮沸 30 min,冷却后再离心。分别测定上清液在波长 450 、 532 、 600 nm 处的吸光度值,按公式 $C=6.45 \times (A_{532}-A_{600})-0.56 \times A_{450}$ 算出丙二醛浓度。

1.3.4 植物样中 Cd 含量的测定

将烘干植物样品粉碎,称取 0.50 g 样品放入聚四氟乙烯内罐中,加 4 mL HNO_3 ,放反应釜经高压釜法 $120\sim130^\circ\text{C}$ 消解 4 h,冷至室温,赶酸至 $1\sim2 \text{ mL}$ 后,转移并定容到 10 mL 。用石墨炉原子吸收分光光度计(AA-7000 Shimadzu Japan)进行测定。

1.3.5 植物样中 Cd 的化学形态分析

采用化学试剂逐步提取法。准确称取鲜样 2.0 g ,加入 20 mL 提取剂研磨匀浆后转入 50 mL 的塑料离心管中,提取剂为: 80% 乙醇、去离子水、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钠、 2% 醋酸和 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸。在 25°C 恒温振荡 22 h 后, $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,倒出上清液,再加入 10 mL 提取剂, 25°C 恒温振荡 1 h, $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,倒出上清液。合并 2 次的上清液于 50 mL 的三角瓶中。为研究 Cd 污染条件下 Cd 化学形态的变化,本文选取 Cd 3 、 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 两个浓度处理进行比较分析。

1.3.6 光合特性的测定

于上午 $8:00\sim10:30$ 采用美国 PP Systems 公司

生产的 CIRAS-3 便携式光合仪测定花生第三完全展开叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)。测定时,叶室配备 LED 光源,设定红、绿、蓝、白四种光源的比例分别为 90%、0%、5%、5%,辐射强度设定为 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,CO₂ 浓度定为 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,叶室温度设为 27 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度设为 65%。

1.4 数据处理与统计

数据为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差。Excel 2007 进行数据处理及图表制作;应用 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行统计分析,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。

1.5 质量保证

为测定结果的准确性,减小误差,在测定 Cd 及各形态 Cd 时,每组实验均设置 3 个空白及平行实验。所用试剂均为优级纯,所用玻璃器皿均用 1:3 硝酸浸泡过夜。用国家标准物质 GBW 10049(GSB-17)进行质量控制,加标回收率范围 87.3%~98.5%。

2 结果与分析

2.1 花生生物量

不同 Cd 浓度条件下施 Se 对花生生物量的影响如图 1 所示。无 Cd 添加条件下施 Se 使花生生物量显著增加,Cd 污染条件下,随施 Se 浓度增加,花生地上部分生物量呈先增高后降低的趋势。根系生物量低 Cd 条件下施 Se 生物量呈增加趋势,高 Cd 条件下呈先增加后减少的趋势。在 Cd 浓度为 3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施加 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 花生地上部分生物量达到最大值,

相比于对照增加了 23.15%。Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施加 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 则使花生根系生物量达到最大。

2.2 叶片细胞膜透性

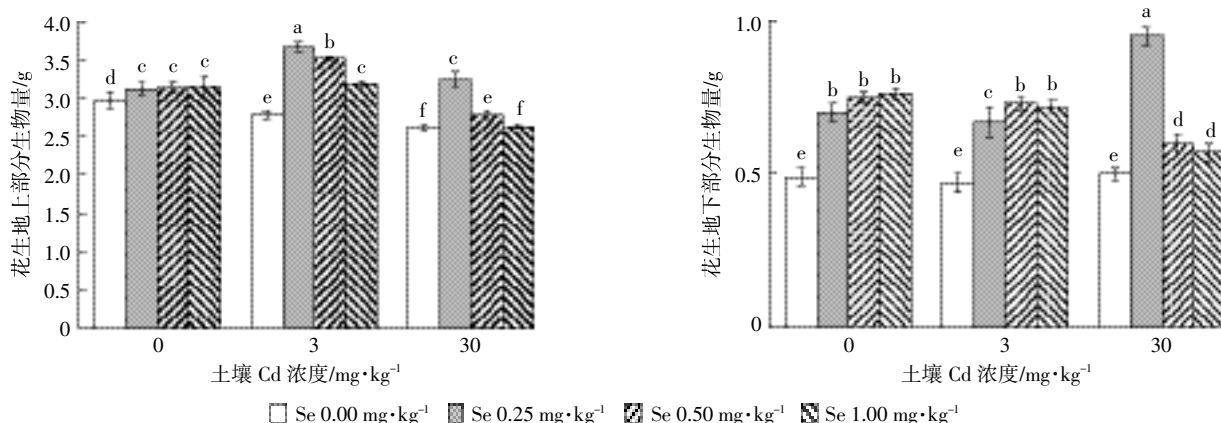
细胞膜透性常用来表征植物细胞受伤害的程度。当植物受到不良环境胁迫后,细胞质膜结构和功能会发生变化,电导率越大表明细胞质受损越严重。由图 2A 可以看出,在 Cd 浓度为 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时施 Se 无影响。单一 Cd 胁迫下,随着 Cd 浓度的增加,电导率增大,说明 Cd 对花生产生毒害作用。施加外源 Se 显著降低了叶片电导率,缓解了 Cd 的毒害作用。在施 Se 浓度为 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时效果最显著,在 Cd 浓度为 3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时电导率下降了 15.95%;Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时电导率下降了 22.65%。低 Cd 条件下,施 Se 浓度大于 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 细胞膜透性呈递增趋势,高 Cd 条件下则呈先高后低的趋势。

2.3 叶片丙二醛(MDA)含量

Cd 胁迫会造成植物的自由基过氧化损伤,加剧植物体内膜脂过氧化作用,导致植物中 MDA 的含量增加,MDA 积累越多表明植物的保护能力越弱。由图 2B 可以看出,施 Se 对植物 MDA 有显著影响,且不同浓度效果存在差异。低 Cd 条件下施 Se 对花生 MDA 积累影响不显著。当 Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Se 浓度为 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,花生叶片 MDA 含量显著上升。高 Cd 条件下,随着施 Se 浓度增加,MDA 含量呈先降低后升高的趋势,MDA 含量分别下降了 33.15%、23.12%和 15.71%。

2.4 花生的光合特性

Cd 胁迫下施 Se 对花生光合特性的影响如表 1



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

The different lowercase letters indicate significant difference among ($P<0.05$). The same below

图 1 花生地上部分和根系生物量

Figure 1 Biomass of shoots and roots of peanut

所示。由表 1 可以看出,单一 Cd 浓度条件下,随着 Cd 浓度的增大花生的净光合速率呈递减的趋势。与对照相比 Cd3 和 Cd30 处理组分别降低了 15.99% 和 31.82%。不同 Cd 浓度条件下,随着施 Se 浓度增加花生净光合速率均呈先增高后降低的趋势,且在 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时花生净光合速率提升最显著。低 Cd 条件下施加 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se 花生净光合速率提升了 10.69%,高 Cd 条件下提升了 19.73%。低 Cd 胁迫对花生蒸腾速率无显著影响,高 Cd 胁迫显著降低了花生叶片的蒸腾速率。低 Cd 及高 Cd 条件下,随施 Se 浓度增加,蒸腾速率均呈现先增高后降低的趋势,且在 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时蒸腾效率最高。低 Cd 对细胞间 CO_2 浓度无显著影响,施 Se 后呈先降低后升

高的趋势,当 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时细胞间 CO_2 浓度最低。Cd 胁迫降低了花生的气孔导度,施 Se 后呈先升高后降低的规律,且在 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时效果最显著。

2.5 花生 Cd 含量

由表 2 可以看出,花生根系 Cd 含量高于地上部分。施 Se 可以显著减低花生地上部分及根系中的 Cd 含量,且 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时效果最显著。低 Cd 条件下施加 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se 使花生地上部分及根系 Cd 含量分别下降了 12.71% 和 46.13%;高 Cd 条件下则分别下降了 21.29% 和 36.00%。Cd 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着施 Se 量增加,花生叶片 Cd 含量呈先降低后升高的趋势,根系则在 Se 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和

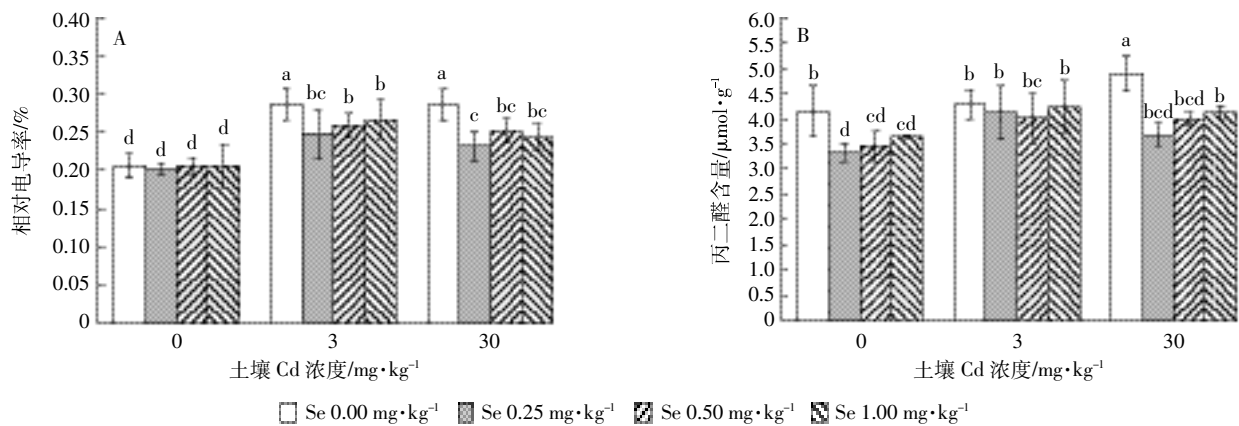


图 2 花生叶片相对电导率和丙二醛含量

Figure 2 Relative electrolytic leakage and MDA content of shoots of peanut

表 1 Cd 胁迫下施 Se 对花生光合效应的影响

Table 1 Effects of selenium on the photosynthetic efficiency in peanut under the stress of cadmium

实验处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthetic rate/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	细胞间隙 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	气孔导度 Stomatal conductance/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Cd0+Se0	25.27±0.45b	5.66±0.23a	296.33±10.02ab	352.33±4.51c
Cd0+Se0.25	27.13±0.57a	5.86±0.23a	204.33±10.97e	465.00±5.00a
Cd0+Se0.5	23.40±0.56c	5.73±0.19a	218.00±9.17e	368.67±1.15b
Cd0+Se1	21.00±0.92d	5.20±0.15b	278.0±12.29cd	303.3±4.16f
Cd3+Se0	21.23±0.78d	5.65±0.15a	294.33±9.07ab	313.00±10.54ef
Cd3+Se0.25	23.50±0.79c	5.78±0.11a	204.33±9.02e	361.00±3.61bc
Cd3+Se0.5	20.63±0.68d	5.03±0.20b	269.33±5.03d	319.00±7.00e
Cd3+Se1	13.60±0.26g	4.41±0.13cd	273.67±4.93cd	197.00±7.00h
Cd30+Se0	17.23±0.45e	4.61±0.04c	305.33±3.06a	291.33±8.33g
Cd30+Se0.25	20.63±0.78d	5.07±0.20b	267.00±2.00d	330.33±3.79d
Cd30+Se0.5	15.77±0.90f	4.22±0.17d	301.00±10.26a	286.00±4.36g
Cd30+Se1	11.40±0.26h	4.14±0.12d	285.67±1.15bc	174.67±7.77i

注:不同小写字母表示处理间显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

表 2 花生地上部分和根系 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Cadmium content of shoots and roots of peanut($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

实验处理 Treatments	地上部分 Shoot	根系 Root
Cd0+Se0	0.15±0.02g	2.98±0.08g
Cd0+Se0.25	0.30±0.01g	1.35±0.01g
Cd0+Se0.5	0.27±0.01g	2.53±0.02g
Cd0+Se1	0.25±0.01g	2.73±0.03g
Cd3+Se0	21.20±0.20e	170.62±1.53d
Cd3+Se0.25	18.81±0.11f	116.76±1.42f
Cd3+Se0.5	21.08±1.59e	130.46±0.86e
Cd3+Se1	20.13±1.90f	119.19±1.70f
Cd30+Se0	121.00±2.30b	468.62±2.24a
Cd30+Se0.25	99.76±3.41d	344.57±2.70c
Cd30+Se0.5	101.77±2.17c	357.82±1.00b
Cd30+Se1	123.78±19.1a	344.29±2.11c
双因素分析 Significant text		
Cd	***	***
Se	***	***
Cd×Se	***	***

注:*. $P<0.05$, **. $P<0.01$, ***. $P<0.001$ 。下同。Note:*. $P<0.05$, **. $P<0.01$, ***. $P<0.001$. The same below.

1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降。双因素分析表明,单独 Cd 处理,单独 Se 处理及 Cd 与 Se 交互均对花生植株内 Cd 含量有极显著的影响。

2.6 花生 Cd 化学形态

植物对重金属的耐受程度及重金属在植物体内的迁移特性通常与重金属的化学形态关系密切。结果显示(表 3),花生地上部分大体呈现出 F_{NaCl} 态含量最高, F_{W} 、 F_{HAc} 、 F_{E} 次之, F_{HCl} 最低的规律。根系在无 Cd 和低 Cd 条件下 F_{NaCl} 态最高, F_{W} 和 F_{E} 次之, 随后 F_{HAc} 、 F_{HCl} 含量最低(表 4)。而高 Cd 条件下根系 F_{HAc} 含量显

著上升。各形态 Cd 含量远高于叶片。随着 Cd 浓度的上升,不同形态 Cd 含量均有所升高。通过双因素分析可以看出,对于花生叶片中 F_{NaCl} 主要受 Cd 浓度变化影响,而单独 Se 浓度及 Se、Cd 交互处理对其均无显著影响。此外,Se、Cd 交互对 F_{HCl} 影响不显著。对于花生根系而言,不同处理对根系中的各形态 Cd 含量均有极显著影响($P<0.001$)。

由图 3 可以看出,在 Cd3 处理组,随着 Se 浓度的增加,花生叶片 F_{NaCl} 所占百分比从 34.32% 上升至 46.92%、42.25%、39.68%。在 Cd30 处理组,花生叶片 F_{NaCl} 所占百分比从 26.68% 上升至 38.24%、35.39%、33.64%。由图 4 可以看出,在不同 Cd 浓度下,随施 Se 浓度增加,叶片 F_{NaCl} 呈现先增加后降低的趋势,而根系则先降低后升高。当根系中 F_{NaCl} 降低时, F_{HAc} 分配比例上升。其他形态 Cd 分配比例变化不大。这说明不同 Cd 浓度条件下,施硒增加叶片中惰性 Cd,减少 Cd 的迁移。而根系中除 F_{NaCl} 影响较大外, F_{HAc} 也是影响花生根系 Cd 含量的重要因素。

3 讨论

研究表明,Cd 会对植物造成毒害,施 Se 可以提升植物抗逆性,缓解 Cd 胁迫。在本研究中,施 Se 后花生叶片生物量呈先升高后下降的趋势,且在低 Cd 浓度下施加 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 效果最显著。低 Cd 条件下根系生物量呈递增趋势,而高 Cd 浓度下,根系生物量则呈先升高后降低的趋势,且在 Se 浓度为 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时生物量达到最大值。这与王海男等^[11]的研究一致,即施加微量 Se 可以促进作物生长。Cd 胁迫的毒害作用往往体现为对细胞膜的损害,生成过量自

表 3 花生叶片内不同化学形态的 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Contents of different chemical forms of Cd in shoots of peanut($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理水平 Treatments	F_{E}	F_{W}	F_{NaCl}	F_{HAc}	F_{HCl}
Cd3+Se0	0.61±0.02d	0.53±0.07c	0.86±0.00b	0.44±0.04d	0.08±0.03d
Cd3+Se0.25	0.20±0.05d	0.43±0.23c	0.86±0.04b	0.30±0.01d	0.05±0.01d
Cd3+Se0.5	0.37±0.10d	0.47±0.16c	0.90±0.10b	0.34±0.03d	0.06±0.02d
Cd3+Se1	0.58±0.03d	0.51±0.12c	1.02±0.01b	0.44±0.05d	0.06±0.01d
Cd30+Se0	3.40±0.57a	3.78±0.22a	4.11±0.25a	2.65±0.23a	0.49±0.16a
Cd30+Se0.25	1.93±0.19c	2.20±0.10b	3.86±0.26a	1.88±0.07c	0.26±0.08c
Cd30+Se0.5	1.99±0.15c	2.48±0.77b	3.91±0.24a	2.34±0.46b	0.33±0.01bc
Cd30+Se1	2.86±0.07b	2.57±0.21b	3.92±0.30a	1.88±0.31c	0.40±0.06ab
双因素分析 Significant text					
Cd	***	***	***	***	***
Se	***	**	NR	**	*
Cd×Se	**	**	NR	**	NR

由基。丙二醛是膜脂过氧化的产物,其含量可表征细胞膜受害程度^[12]。本实验结果表明,Cd 胁迫对花生产生了毒害作用,施 Se 显著降低了叶片电导率;高 Cd 浓度下,随着施 Se 浓度增加 MDA 含量先降低后升高,这说明低浓度 Se 缓解了 Cd 的毒害作用。但高浓度 Se 反而增强了叶片的过氧化,这可能是由于施 Se

表 4 花生根系内不同化学形态 Cd 含量(mg·kg⁻¹)
Table 4 Contents of different chemical forms of Cd in roots of peanut(mg·kg⁻¹)

处理水平	F _E	F _W	F _{NaCl}	F _{HAc}	F _{HCl}
Cd3+Se0	1.33±0.03c	0.84±0.09c	7.63±0.14e	0.76±0.08d	0.09±0.01d
Cd3+Se0.25	0.80±0.05c	0.74±0.05c	2.97±0.46f	0.63±0.03d	0.05±0.01d
Cd3+Se0.5	0.86±0.08c	0.77±0.03c	3.43±0.49f	0.68±0.09d	0.05±0.01d
Cd3+Se1	0.85±0.33c	0.64±0.08c	4.21±0.06f	0.80±0.05d	0.36±0.00d
Cd30+Se0	6.53±0.18a	14.68±0.53a	107.23±2.06a	36.24±0.70a	10.42±0.02a
Cd30+Se0.25	6.17±0.82a	11.09±0.90b	51.56±1.21d	19.00±1.33c	8.22±0.06b
Cd30+Se0.5	6.45±1.38a	11.28±1.38b	97.63±1.20b	20.65±1.82c	2.59±0.84c
Cd30+Se1	4.66±0.29b	14.95±1.46a	89.61±1.49c	30.19±1.72b	2.98±0.38c
双因素分析 Significant text					
Cd	***	***	***	***	***
Se	**	***	***	***	***
Cd×Se	NR	***	***	***	***

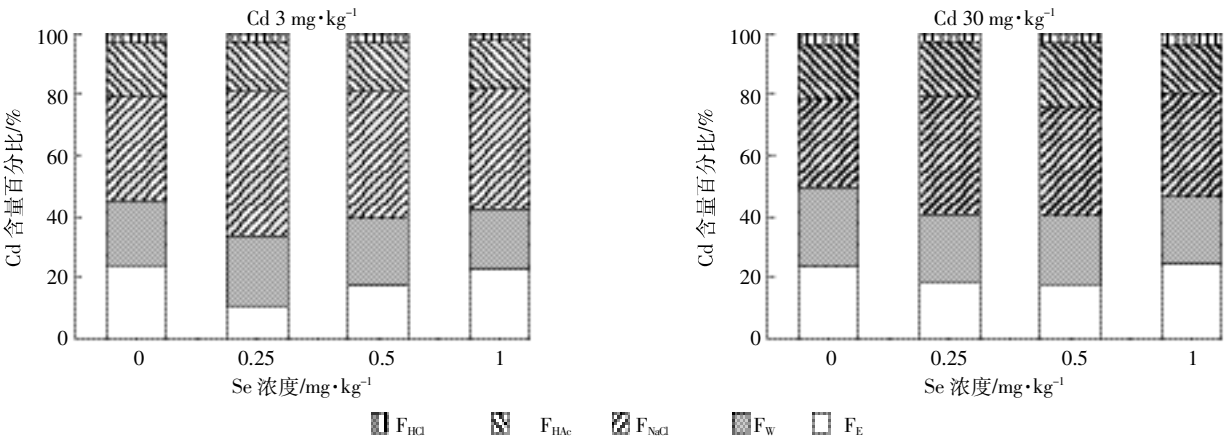


图 3 花生叶片内不同化学形态 Cd 含量百分比
Figure 3 Percent distribution of different chemical forms of Cd in leaves of peanut

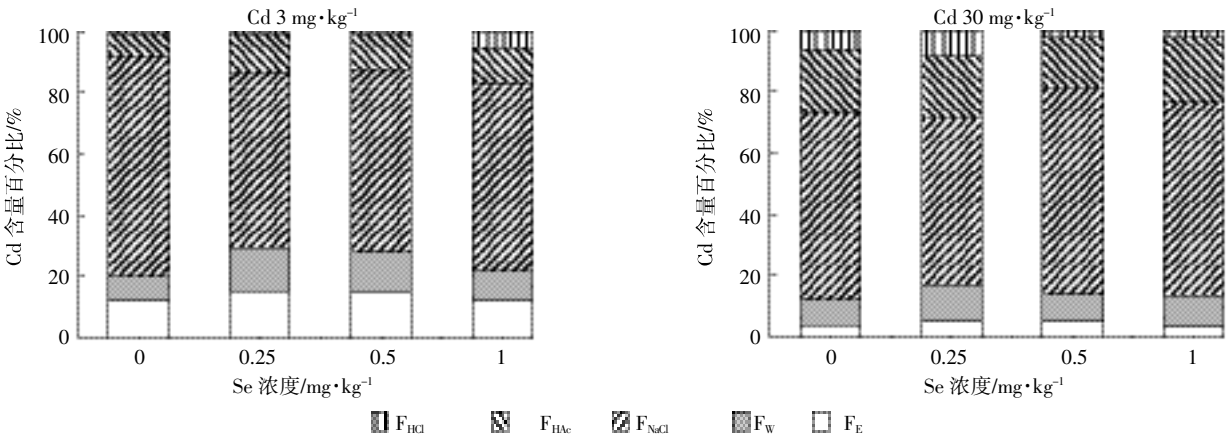


图 4 花生根系内不同化学形态 Cd 含量百分比
Figure 4 Percent distribution of different chemical forms of Cd in roots of peanut

提高了花生叶片中 CAT、SOD 和 POD 等酶的活性,且增加了谷胱甘肽过氧化物酶,从而减少因自由基过氧化引起的细胞膜的损害^[13]。另外,不合理施加 Se 及作物 Se 耐受性的不同也可导致高浓度 Se 对作物造成损害^[14]。

光合作用是植物生长的基础。适量施 Se 可以缓解 Cd 对光合作用的抑制作用^[15]。这可能是 Se 提高了部分酶抗氧化能力,从而增强了植物的抗逆性^[16-17]。有研究表明,逆境胁迫下使植物光合作用受阻可能由气孔限制和非气孔限制两种因素导致。Farquhar 等^[18]认为,当气孔导度下降时,细胞间 CO₂ 浓度下降,才表明光合作用受到气孔限制的影响。本研究显示,在低 Cd 和高 Cd 条件下,随施 Se 浓度的增加,花生净光合速率呈先升高后下降的趋势。施加 Se 0.5 mg·kg⁻¹ 和 1.0 mg·kg⁻¹,气孔导度与细胞间 CO₂ 浓度变化呈相反的趋势,这说明它们光合效率是受非气孔限制因素的影响。

适量施 Se 可以降低重金属含量。有研究表明施 Se 可以降低小麦体内砷含量和大蒜体内汞含量^[19-20]。本实验研究结果表明,不同 Cd 条件下施加 0.25 mg·kg⁻¹ Se 对花生 Cd 含量有显著影响。这可能是由于施 Se 诱导产生特殊蛋白,与花生体内 Cd 螯合,或是增加了惰态 Cd 的含量,从而降低了植物体内 Cd 的含量^[21]。植物体内重金属含量分布常与其化学形态密切相关。重金属在植物体内分为活性态和非活性态两种形态。活性态有水溶性态、离子交换态等。非活性态有氯化钠态、盐酸盐态、醋酸盐态、残渣态等^[22]。氯化钠主要提取活性较低与蛋白结合的重金属^[23]。本实验中花生地上部分及根系中 Cd 主要以氯化钠态存在,乙酸态、水提取态次之。这表明有相当一部分 Cd 形成了活性较低的难溶性化合物,自由态的 Cd 含量相对较低,以致它的毒害作用变小^[24]。低 Cd 及高 Cd 条件下,施 Se 使叶片内 F_{NaCl} 含量呈先生高后降低的趋势,施加适量 Se 使更多的 Cd 固定于叶片的细胞壁中。此外,液泡储存重金属也被认为是植物耐受性的重要机制^[25]。研究表明,施 Se 后根系中 F_w 百分含量先上升后下降,说明根系中还有部分 Cd 固定于液泡中。Cd 污染条件下施加适量 Se 可以使花生体内 Cd 的迁移能力降低,减少细胞膜脂化作用,增强光合速率,缓解 Cd 的胁迫作用。

4 结论

(1)Cd 胁迫会影响花生的生长发育。施 Se 可以

缓解 Cd 胁迫对光合作用的抑制,减小对生物量的影响,降低叶片细胞膜透性和丙二醛含量。

(2)低 Cd 条件下,施 Se 显著降低了花生叶片及根系 Cd 含量,高 Cd 条件下,随施 Se 浓度增加叶片呈先降低后升高的趋势,根系则呈现降低趋势。

(3)土壤中加入 Se 溶液,花生根系中活性、毒性较高的乙醇提取态和水提取态 Cd 比例减少,而活性较弱、毒性较低的 Cd 提取态比例增加,这有利于降低 Cd 对花生植株的相对毒性。因此,Se 对 Cd 化学形态转化可能是花生施硒后应对 Cd 胁迫的重要机制之一。

参考文献:

- [1] Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 389(1):37-45.
- [2] 李娟,史衍玺.富 Se 花生中 Se 的赋存形态研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(21):57-59.
LI Juan, SHI Yan-xi. Analysis of selenium speciation in Se-rich peanuts[J]. *Food Science*, 2012, 33(21):57-59.
- [3] 王凯荣,张磊.花生 Cd 污染研究进展[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12):2757-2762.
WANG Kai-rong, ZHANG Lei. Research advances in cadmium pollution of peanut[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12):2757-2762.
- [4] Lenz M, Lens P N L. The essential toxin; the changing perception of selenium in environmental sciences[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(12):3620-3633.
- [5] Paul D, Dey S. Selenium content and uptake in crops as affected by soil selenium content and implications on human health[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45(4):429-436.
- [6] 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.
PENG Ling, JIA Fen, TIAN Xiao-ping, et al. The role of selenium in alleviating cadmium stress on root tip of rape seedlings[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8):2597-2604.
- [7] Qing X J, Zhao X H, Hu C X, et al. Selenium alleviated chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*) leaves[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 114:179-189.
- [8] 刘春梅,罗盛国.硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1):190-199.
LIU Chun-mei, LUO Sheng-guo. Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1):190-199.
- [9] 宋敏,徐文竞.外源脯氨酸对镉胁迫下小麦幼苗生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1):129-134.
SONG Min, XU Wen-jing. Effects of exogenous proline on the growth of wheat seedlings under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied E-*

- cology, 2013, 24(1):129-134.
- [10] 吕选忠, 宫象雷. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):868-870.
- LÜ Xuan-zhong, GONG Xiang-lei. Antagonistic effect of foliar application of Se or Zn on absorption of Cd in lettuce[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):868-870.
- [11] 王海南, 刘汉湖. 硒对油菜镉中毒缓解作用的研究[J]. 山东农业科学, 2012, 44(4):62-64.
- WANG Hai-nan, LIU Han-hu. Research on alleviation of cadmium pollution to rape by selenium[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(4):62-64.
- [12] Li Y H, Sun H F, Li H R, et al. Dynamic changes of rhizosphere properties and antioxidant enzyme responses of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) grown in mercury-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(6):972-977.
- [13] 翁伯琦, 黄东风, 熊德忠, 等. 施用硒肥对圆叶决明生长、酶活性及其叶肉细胞超显微结构的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12):2810-2817.
- WENG Bo-qi, HUANG Dong-feng, XIONG De-zhong, et al. Effects of selenium on plant growth, enzyme activity and blade cell submicro-structure of *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12):2810-2817.
- [14] Feng R W, Wei C Y. Antioxidative mechanisms on selenium accumulation in *Pteris vittata* L. a potential selenium phytoremediation plant[J]. *Plant Soil Environ*, 2012, 58(3):105-110.
- [15] Pagliano C, Raciolo M, Vecchia F D, et al. Evidence for PS II donor-side damage and photoinhibition induced by cadmium treatment on rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B:Biolog*, 2006, 84(1):70-78.
- [16] Kumar M, Bijo A J, Baghel R S, et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 51:129-138.
- [17] Malik J A, Goel S, Kaur N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 77:242-248.
- [18] Farquhar G D, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Review of Plant Physiology*, 1982, 33:317-345.
- [19] Hu Y, Huang Y Z, Liu Y X, et al. Interactive effects of different inorganic As and Se species on their uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21:3955-3962.
- [20] Zhao J T, Gao Y X, Li Y F, et al. Selenium inhibits the phytotoxicity of mercury in garlic (*Alhum sativum*) [J]. *Environmental Research*, 2013, 125:75-81.
- [21] He J Y, Ren Y F, Zhu C, et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Rice Science*, 2008, 15(4):319-325.
- [22] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(1):286-294.
- XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, et al. Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):286-294.
- [23] 周小勇, 仇荣亮, 李清飞, 等. 锌对长柔毛委陵菜中铅的分布和化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10):2064-2071.
- ZHOU Xiao-yong, QIU Rong-liang, LI Qing-fei, et al. Effects of zinc on distribution and chemical form of lead in *Potentilla griffithii* var. *velutina* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10):2064-2071.
- [24] Zembala M, Filek M, Walas S, et al. Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress[J]. *Plant and Soil*, 2009, 329(1/2):457-468.
- [25] Da-Rosa-Correa A X, Rorig L R, Verdinelli M A, et al. Cadmium phytotoxicity: Quantitative sensitivity relationships between classical-endpoints and antioxidative enzyme biomarkers[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357(1/2/3):120-127.