

硒对镉胁迫下不同基因型油菜镉积累、光合特性及抗氧化活性的影响

屈婵娟¹, 吴志超^{1,3}, 赵小虎^{1,2,3*}, 贾 芬¹, 田小平¹, 杨 晶¹, 彭 玲¹

(1.华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2.环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学), 天津 300071; 3.农业部农产品质量安全检测与评价重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要:为研究硒对油菜镉毒害的缓解作用,采用水培实验研究了硒($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对镉($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下不同基因型(“WH-19”和“WH-95”)油菜镉含量、光合特性及抗氧化活性的影响。结果表明:与镉单施相比,硒的添加并未显著改变“WH-19”油菜根、茎、叶中镉含量,显著降低了“WH-95”油菜根、茎、叶中镉含量,分别降低了 8.51%、34.61%和 46.14%;“WH-19”的净光合速率和蒸腾速率显著提高,分别提高了 18.96%和 22.77%,气孔导度略有提高,胞间二氧化碳浓度显著降低至镉单独作用时的 72.61%;“WH-95”的净光合速率和蒸腾速率略有提高,气孔导度无显著变化,胞间二氧化碳浓度显著降低为镉单独作用时的 85.96%;“WH-19”的 SOD 活性显著降低了 29.03%,CAT 活性和 POD 活性无显著变化;“WH-95”的 CAT 活性略有提高,为镉单独作用时的 1.09 倍,SOD 活性和 POD 活性无显著变化。硒对镉胁迫下不同基因型油菜镉含量和抗氧化酶活性的影响不同,而对 2 个品种油菜光合特性的影响趋势基本一致,不同基因型油菜的光合能力均得到提高,缓解了镉对油菜的毒害。

关键词:油菜;硒;镉;积累;光合特性;抗氧化酶活性

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)05-0490-08

doi: 10.13254/j.jare.2015.0043

Effects of Selenium (Se) on Cadmium (Cd) Accumulation, Photosynthetic Characteristics and Activities of Antioxidant Enzymes in Different Genotypes of Rape Under Cadmium (Cd) Stress

QU Chan-juan¹, WU Zhi-chao^{1,3}, ZHAO Xiao-hu^{1,2,3*}, JIA Fen¹, TIAN Xiao-ping¹, YANG Jing¹, PENG Ling¹

(1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 2.Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Nankai University), Ministry of Education, Tianjin 300071, China; 3.Key Laboratory of Testing and Evaluation for Agro-product Safety and Quality, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A hydroponic experiment was performed to investigate the mechanisms of Se mitigation of Cd toxicity in oilseed rapes. The effects of $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se on Cd accumulation, photosynthetic characteristics and activities of antioxidant enzymes in two genotypes of rape (WH-19 and WH-95) under $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd stress were studied. The results showed that: Se application significantly decreased Cd contents in roots, stems and leaves in WH-95 with the decrease rates of 8.51%, 34.61% and 46.14% respectively compared with only Cd treatment, while no significant differences were observed in WH-19. Se greatly increased the net photosynthetic rate and the transpiration rate by 18.96% and 22.77% respectively, and significantly decreased the intercellular CO_2 concentrations to 72.61% in WH-19 compared with only Cd treatment. As for WH-95, only the intercellular CO_2 concentrations were significantly decreased to 85.96% under Se application, while other three photosynthetic characteristics showed no greatly changed; Se significantly decreased SOD activity in WH-19 by 29.03%, while no significant differences were observed in the activities of CAT and POD; For WH-95, 9% increase was found in CAT activity, while no marked differences were found in the activities of SOD and POD compared with only Cd treatment. Overall, Se alleviated Cd toxicities in the two oilseed rapes by enhancement of the photosynthetic system. However, the Cd accumulation and the antioxidative system showed different responses to Cd stress.

Keywords: rape; selenium; cadmium; accumulation; photosynthetic characteristics; activities of antioxidant enzymes

收稿日期:2015-02-07

基金项目:国家自然科学基金(31201501);环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学)开放课题基金(KL-PPEC-2013-08);农业部农产品质量安全检测与评价重点实验室开放基金(NK201302)

作者简介:屈婵娟(1994—),女,主要从事环境污染与修复研究。E-mail: 1048122875@qq.com

*通信作者:赵小虎 E-mail: xzhao@mail.hzau.edu.cn

近年来镉污染日益严重,已成为农田土壤环境中的普遍污染物。环境中的镉十分稳定,浓度过高将对植物造成严重的毒害^[1]。如何缓解甚至消除镉对植物的毒害作用已引起人们的广泛关注^[2]。已有许多学者对镉中毒的缓解措施进行了研究,已有报道的镉毒缓解剂包括硅^[3-4]、锌^[5]、铁^[6]、钙^[7]、磷^[8]以及竹炭^[9]等。

硒是人体必需的微量元素,也是植物生长的有益元素。硒可通过抑制自由基的形成、与镉离子形成螯合蛋白、抑制植物对镉的吸收等途径减轻镉对植物的毒性效应,降低镉在植物体内的积累^[10-11]。已有的研究表明:土壤中添加亚硒酸盐和硒酸盐使玉米根部和地上部镉的质量分数显著降低^[12];水稻补施低质量分数硒可降低大米中镉的质量分数^[13];生菜叶面喷施硒,使生菜镉的吸收降低了 31.63%^[14]。油菜作为唯一的冬季油料作物,在我国人民膳食结构调整、畜牧业及饲料工业发展、农产品加工方面具有重要作用。研究缓解土壤镉污染对油菜毒害的措施,降低油菜中镉含量,同时通过油菜非食用部位对镉的富集进行土壤镉污染修复意义重大^[15]。然而,目前罕见有关硒对镉胁迫下油菜生理生化响应的影响以及对油菜各器官中镉含量的研究,且尚未获得一致的结论。

零星的研究表明,施以低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硒,能提高镉胁迫下油菜 SOD 和 POD 活性^[16]。本项目组前期结果显示:MS 培养条件下,添加 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硒在一定程度上恢复了 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉胁迫下油菜根系的生长,维系了油菜根系细胞的形态和细胞器的结构完整性^[17]。前期的研究证实了硒对油菜根系镉胁迫的缓解效果。然而,前期的研究停留在油菜根系上,且仅选用了—个油菜品种,尚不能揭示不同镉积累型油菜品种光合特性、抗氧化能力以及镉吸收积累等特征的差异。本研究在先前的预备实验结果基础上,分别以本课题组筛选的油菜品种为实验材料,采用水培实验方式,研究了 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硒对 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉胁迫下不同品种油菜根、茎、叶中镉积累、光合特性及抗氧化酶活性的影响,旨在为外源硒缓解油菜镉毒害机理的深入研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的不同基因型油菜分别为“WH-19”和“WH-95”,经过预备实验筛选得到,假定其分别为镉的低积累和高积累品种,由华中农业大学提供。

1.2 实验设计

水培实验于华中农业大学资源与环境学院盆栽场进行。选取饱满种子,用去离子水浸种 24 h,在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下催芽 24 h,萌发后播于装有石英砂的盆中,培养至 2 片真叶,选取健壮均一的幼苗移植于 $33 \text{ cm} \times 23 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ 的塑料盆中。每盆栽植 12 穴,每穴 1 株,加入 4 L 营养液,培养 1 周后用处理液继续培养。设置空白(CK)、镉处理($\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、硒处理($\text{Se } 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、镉+硒处理($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} + 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Se}$),共 4 个处理,各处理 3 次重复,每日用去离子水补充水分,每周更换一次处理液。实验中 Cd 和 Se 分别以分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2SeO_3 的形式加入。实验中 Cd 和 Se 的浓度参照本小组先前的预备实验结果确定。

1.3 测定方法

(1)镉(Cd)及硒(Se)含量的测定:将烘干植物样品粉碎,加 10 mL $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ (体积比为 4:1)的混合酸在 DB-2A 型智能控温电热板上消化,采用石墨炉原子吸收光谱法(日立公司 Z-2000,日本)测定^[18]。

(2)光合参数的测定:采用英国 PPSystems 公司生产的 Ciras-2 型便携式光合测定系统在 10:00~12:00 测定叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。测定时光强约 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $390 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,温度为 25°C 。

(3)抗氧化能力的测定:超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)的活性均按文献[19]的方法测定,即 SOD 活性采用硝基四氮唑兰光化还原法测定,POD 活性采用愈创木酚法测定, CAT 活性采用紫外吸收法测定。

1.4 数据处理

实验数据采用 WPS 表格进行制表,采用 Sigma Plot 10.0 进行作图,SPSS 20 进行方差分析(ANOVA),采用 LSD 进行 $P < 0.05$ 水平的显著性分析,结果以 3 次试验的平均值 $\pm$ 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 硒对镉胁迫下不同基因型油菜各器官中镉积累的影响

硒对镉胁迫下不同基因型油菜根、茎、叶中硒、镉含量见表 1。结合表 1,比较 2 个基因型油菜各器官对镉的吸收情况,可知:镉单独处理下,2 个基因型油菜根和茎中镉含量没有显著差异,仅“WH-95”叶片对镉的吸收显著高于“WH-19”叶片对镉的吸收,前者为后者的 1.36 倍;硒、镉共同处理下,“WH-19”各器

表 1 硒对镉胁迫下不同基因型油菜各器官中硒、镉含量的影响

Table 1 Effect of selenium on contents of selenium and cadmium in organs of different genotypes of rape

含量		CK		Cd 处理		Se 处理		Cd+Se 处理	
		WH-19	WH-95	WH-19	WH-95	WH-19	WH-95	WH-19	WH-95
各器官干重镉含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}(\text{DW})$	根	ND	ND	662.19 $\pm$ 21.87	685.15 $\pm$ 7.46**	ND	ND	721.14 $\pm$ 44.78#	626.85 $\pm$ 4.25
	茎	ND	ND	37.95 $\pm$ 2.95	44.64 $\pm$ 5.24**	ND	ND	47.15 $\pm$ 5.27##	29.19 $\pm$ 2.55
	叶	ND	ND	109.79 $\pm$ 9.73	149.48 $\pm$ 16.66***	ND	ND	112.51 $\pm$ 8.37##	80.51 $\pm$ 5.24
各器官干重硒含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}(\text{DW})$	根	ND	ND	ND	ND	134.14 $\pm$ 11.97	174.49 $\pm$ 14.87#	109.62 $\pm$ 13.13	172.12 $\pm$ 13.25##
	茎	ND	ND	ND	ND	12.07 $\pm$ 0.73**	18.36 $\pm$ 2.51***	9.11 $\pm$ 0.35	8.45 $\pm$ 1.01
	叶	ND	ND	ND	ND	12.69 $\pm$ 0.87*	26.04 $\pm$ 1.52###	9.90 $\pm$ 1.17	18.72 $\pm$ 1.94##

注:表中数据为“均值 $\pm$ 标准误”(n=3)。表中数据进行同一品种在不同处理下的显著性比较,其中“***”表示在 $P<0.01$ 水平上存在差异;“*”表示在 $P<0.05$ 水平上存在差异;“ND”表示没有检测出对应元素含量。表中数据还进行不同品种在同一处理下的显著性比较,其中“##”表示在 $P<0.01$ 水平上存在差异;“#”表示在 $P<0.05$ 水平上存在差异。

官中镉含量均显著高于“WH-95”对应器官中镉含量,前者分别是后者的 1.15、1.62 倍和 1.40 倍,即硒镉互动下“WH-19”吸收镉的能力强于“WH-95”;与镉单独处理相比,添加硒对“WH-19”各器官中镉含量没有显著影响,却显著降低了“WH-95”各器官中镉含量,“WH-95”根、茎、叶中镉含量分别降低了 8.51%、34.61%和 46.14%,即添加硒对 2 个基因型油菜镉含量的影响不同。

同时比较 2 个基因型油菜各器官对硒的吸收情况,可知:硒单独处理下,“WH-95”根、茎、叶中硒含量均显著高于“WH-19”对应器官中硒含量,前者分别是后者的 1.30、1.52 倍和 2.05 倍,表明“WH-95”吸收硒的能力强于“WH-19”;硒、镉共同处理下,“WH-95”根和叶中硒含量均显著高于“WH-19”对应器官中硒含量,前者分别是后者的 1.57 倍和 1.89 倍,2 个基因型油菜茎中硒含量没有显著差异;与硒单独处理相比,添加镉在一定程度上降低了 2 个基因型油菜根中硒含量,同时显著降低了 2 个基因型油菜茎和叶中硒含量,即镉的存在对 2 个基因型油菜吸收硒有抑制作用。

2.2 硒对镉胁迫下不同基因型油菜光合特性的影响

2.2.1 硒对镉胁迫下不同基因型油菜净光合速率(P_n)的影响

硒对镉胁迫下不同基因型油菜 P_n 的影响见图 1A。由图 1A 可知,镉单独处理显著降低了“WH-19”的 P_n ,降低程度达 15.85%;与镉单独处理相比,硒的添加显著提高了“WH-19”的 P_n ,提高了 18.96%,使其 P_n 和对照水平一致;硒单独处理下“WH-19”的 P_n 显著高于对照,为对照的 1.14 倍。表明添加硒解除了镉对“WH-19” P_n 的抑制作用。与此同时,镉单独处理

显著降低了“WH-95”的 P_n ,降低程度达 20.60%;与镉单独处理相比,添加硒在一定程度上提高了“WH-95”的 P_n ,但未达显著水平,且仍略低于空白对照;硒单独处理下“WH-95”的 P_n 和对照水平一致。表明添加硒缓解了镉对“WH-95” P_n 的毒害作用。

2.2.2 硒对镉胁迫下不同基因型油菜蒸腾速率(Tr)的影响

如图 1B 所示,镉单独处理显著降低了“WH-19”的 Tr ,降低程度达 47.29%;与镉单独处理相比,硒的添加显著提高了“WH-19”的 Tr ,提高了 22.77%,但仍显著低于对照,仅为对照的 64.71%;硒单独处理下“WH-19”的蒸腾速率显著低于对照,为对照的 61.65%。表明添加硒在一定程度上减轻了镉对“WH-19” Tr 的抑制作用,但该毒害作用并未解除。与此同时,镉单独处理显著降低了“WH-95”的 Tr ,降低程度达 12.76%;与镉单独处理相比,硒的添加在一定程度上提高了“WH-95”的 Tr ,但和对照差异并不显著,为对照的 91.84%;硒单独处理下“WH-95”的 Tr 显著高于对照,为对照的 1.26 倍。表明添加硒缓解了镉对“WH-95” Tr 的毒害作用。

2.2.3 硒对镉胁迫下不同基因型油菜气孔导度(G_s)的影响

如图 1C 所示,镉单独处理显著降低了“WH-19”的 G_s ,降低程度达 54.05%;与镉单独处理相比,硒的添加在一定程度上提高了“WH-19”的 G_s ,但仍显著低于对照,仅为对照的 54.05%;硒单独处理下“WH-19”的 G_s 显著降低于对照,为对照的 56.76%。表明添加硒在一定程度上减轻了镉对“WH-19” G_s 的抑制作用,但该毒害作用并未解除。与此同时,镉、镉+硒处理下“WH-95”的 G_s 水平与对照一致;硒单独处理下

“WH-95”的Gs显著高于对照,为对照的1.23倍。由此可看出:镉的存在抑制了硒对“WH-95”Gs的增强作用,使得添加硒对镉胁迫下“WH-95”的Gs没有显著影响。

2.2.4 硒对镉胁迫下不同基因型油菜胞间二氧化碳浓度(Ci)的影响

如图1D所示,镉单独处理显著提高了“WH-19”的Ci,提高了28.00%;与镉单独处理相比,硒的添加显著降低了“WH-19”的Ci,降低程度达27.39%,并且显著低于对照水平,仅为对照的92.94%;硒单独处理下“WH-19”的Ci与对照水平一致。表明硒抑制了由镉所引起的“WH-19”Ci的升高,并且使其低于对照水平,对植物生长有益。硒对镉胁迫下“WH-95”Ci的降低趋势同“WH-19”,与镉单独处理相比,硒的添加显著降低了“WH-95”的Ci,降低程度达14.04%,仅为对照的95.82%,表明在Ci方面,添加硒缓解了镉对“WH-95”的毒害作用。

从油菜光合特性参数的整体变化上看,硒的添加降低了镉对“WH-19”净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的抑制作用,降低了由镉毒害所引起的“WH-19”胞间高水平的二氧化碳浓度,提升了镉胁迫下“WH-19”的光合能力;通过显著降低镉毒害增加的“WH-

95”胞间二氧化碳浓度,提升了镉胁迫下“WH-95”的光合能力。

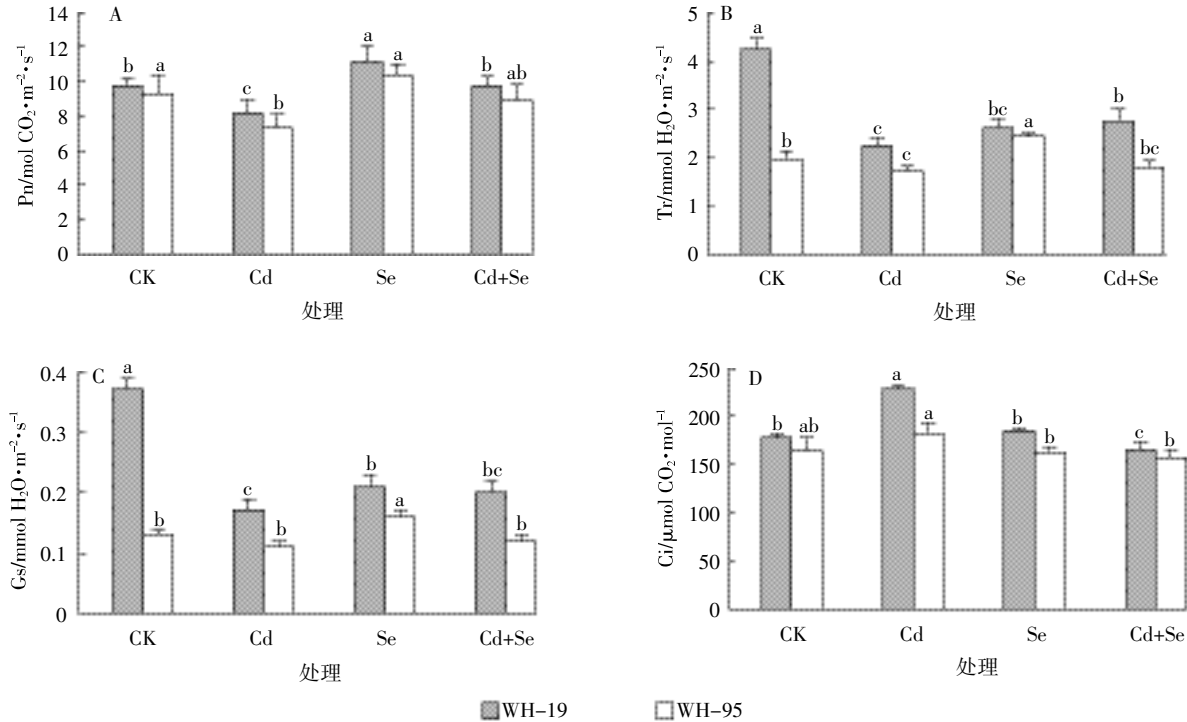
2.3 硒对镉胁迫下不同基因型油菜抗氧化活性的影响

2.3.1 硒对镉胁迫下不同基因型油菜超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

硒对镉胁迫下不同基因型油菜SOD活性的影响见图2A。由图2A可知,镉单独处理显著提高了“WH-19”的SOD活性,提高程度达52.27%;硒、镉+硒处理下“WH-19”的SOD活性水平与对照一致。表明镉的存在诱导了“WH-19”SOD活性的提高,同时硒显著消除了镉胁迫对“WH-19”SOD活性的诱导。对“WH-95”的SOD活性而言,镉、硒、镉+硒处理均显著高于对照,但这三者之间并无显著差异,分别是对照的1.39、1.41倍和1.54倍,表明外源镉硒的存在均诱导了“WH-95”SOD活性的提高,且硒并不能显著消除镉胁迫对“WH-95”SOD活性的诱导。

2.3.2 硒对镉胁迫下不同基因型油菜过氧化氢酶(CAT)活性的影响

如图2B所示,与对照相比,镉、硒、镉+硒处理均显著降低了“WH-19”CAT活性,但这三者之间并无显著差异,分别降低了21.84%、18.89%和30.85%,表明外源镉硒的存在均抑制了“WH-19”CAT的活性,



图中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上同一品种不同处理下的差异显著性。下同

图1 硒对镉胁迫下不同基因型油菜光合参数的影响

Figure 1 Effect of selenium on photosynthetic characteristics in different genotypes of rape under cadmium stress

硒并不能显著消除镉胁迫对“WH-19”CAT 活性的诱导。与此同时,镉单独处理显著降低了“WH-95”的 CAT 活性,降低程度达 11.73%;与镉单独处理相比,硒的添加在一定程度上提高了“WH-95”CAT 的活性;硒单独处理下“WH-95”的 CAT 活性水平与对照一致。表明添加硒缓解了镉胁迫对“WH-95”CAT 活性的降低。

2.3.3 硒对镉胁迫下不同基因型油菜过氧化物酶(POD)活性的影响

如图 2C 所示,镉单独处理显著降低了“WH-19”的 POD 活性,降低程度达 34.14%,硒的添加并未显著恢复其活性;但硒单独处理下“WH-19”的 POD 活

性并未降低,甚至有高于对照的趋势,为对照的 1.06 倍。由此可看出:硒尚不足以恢复镉对“WH-19”POD 活性的降低。对“WH-95”的 POD 活性而言,与对照相比,镉、硒、镉+硒处理均显著降低了“WH-95”POD 活性,但这三者之间并无显著差异,分别为对照的 51.79%、46.57%和 55.31%,表明外源硒镉的存在均抑制了“WH-95”POD 的活性,硒并不能显著消除镉胁迫对“WH-95”POD 活性的诱导。

从油菜抗氧化活性的相关参数变化来看,硒的添加对“WH-19”镉胁迫下抗氧化酶活性的影响不显著,显著恢复了“WH-95”CAT 的活性;硒单独作用有助于提高“WH-19”SOD 活性。

3 讨论

硒是油菜体内谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成部分,因此外源硒的供应可能会使油菜体内 GSH-Px 的底物之一 GSH 的含量增加,而 GSH 富含巯基,巯基可与镉结合,钝化细胞中的镉,从而降低镉可能引起的毒害作用^[20-21]。植物体内的硒也可与镉结合形成镉-硒-蛋白质复合体,从而将镉排出体外^[22]。本实验中,油菜“WH-95”受镉胁迫后,添加外源硒降低了油菜各器官中镉的含量,可能是硒通过诱导巯基与镉结合或者直接与镉结合形成镉-硒-蛋白质复合体,使得镉含量降低;也有研究直接表明外源硒能明显降低植物对镉的吸收^[23-24]。另外,本实验也得出镉的存在对 2 个基因型油菜吸收硒有抑制作用,这与刘燕等^[16]关于低硒浓度(低于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下,硒、镉呈现拮抗作用的结论也是一致的。本实验中,与镉单独处理相比,添加硒对“WH-19”各器官中镉含量水平无影响,降低了“WH-95”各器官中镉含量;与此同时,硒单独处理时,“WH-95”各器官对硒的吸收能力强于“WH-19”,可能是因为这 2 个基因型油菜对硒的吸收能力不同导致镉胁迫下添加硒的作用效果不同。结合硒在 GSH-Px 中的作用,推断硒不能被“WH-19”有效吸收,从而不能很好地降低“WH-19”各器官中镉含量。

镉胁迫引起植物叶片净光合速率(Pn)降低有两种原因:气孔因素和非气孔因素。当胞间二氧化碳浓度(Ci)和气孔导度(Gs)同时下降时,气孔因素是主要的;当 Ci 升高而 Gs 下降时,非气孔因素是主要的^[25]。由本实验研究结果可知,镉胁迫降低了“WH-19”叶片的 Pn,同时使“WH-19”叶片的 Ci 升高、Gs 降低,可以推断“WH-19”光合速率下降的主要原因是非气

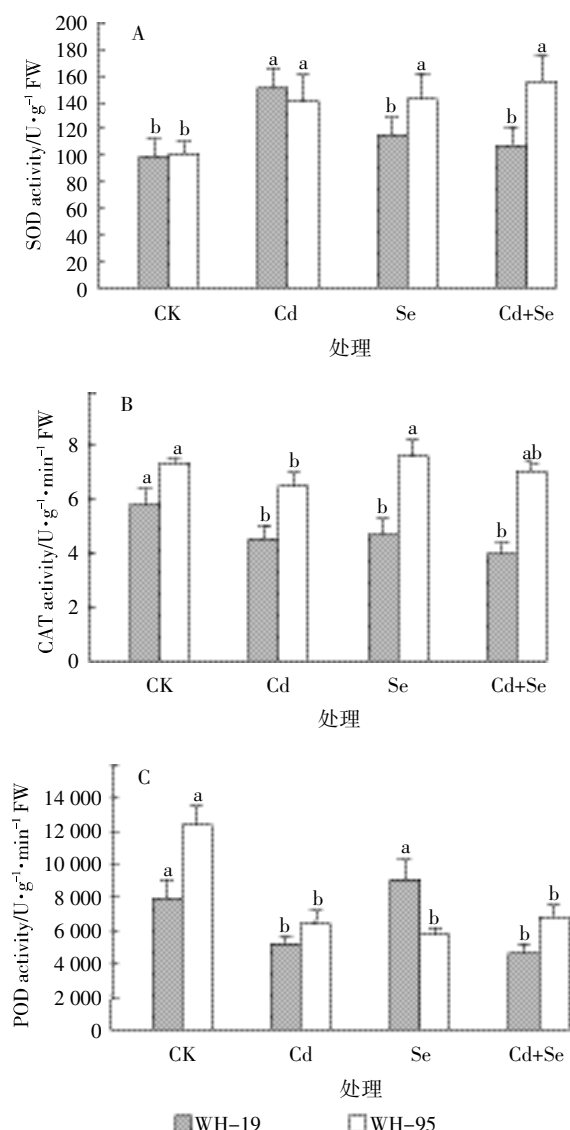


图 2 硒对镉胁迫下不同基因型油菜抗氧化酶活性的影响
Figure 2 Effect of selenium on activities of antioxidant enzymes in different genotypes of rape under cadmium stress

孔因素。本实验中, 硒的添加在不同程度上提高了“WH-19”叶片的 P_n 、 Tr 和 G_s , 降低了“WH-19”叶片的 C_i , 表明硒对镉胁迫引起的“WH-19”光合活性的下降具有一定的缓解作用, 可有效提高镉胁迫下“WH-19”叶片的光合能力。这与石贵玉等^[26]关于硒对镉胁迫下罗汉果组培苗光合特性影响的研究结果基本一致。与此同时, 虽然镉单独作用降低了“WH-95”的光合活性, 而硒的添加也提高了“WH-95”的光合活性, 但硒或镉作用下, “WH-95”的光合特性值变化并无“WH-19”明显, 可能由于镉胁迫下“WH-95”叶片净光合速率降低的气孔和非气孔因素作用相当所致。本实验中, 硒单独作用下, “WH-19”的 P_n 提高, Tr 和 G_s 降低, C_i 水平无变化; 同时“WH-95”的 P_n 水平无变化, Tr 和 G_s 提高, C_i 降低。2 种基因型油菜的 P_n 与 Tr 、 G_s 或 C_i 没有明显的对应关系, 可能是因为不同基因型的油菜对硒的相应机制不同所致, 有待下一步深入研究。

镉胁迫会诱导植物产生大量的氧自由基, 而植物体内 SOD、CAT 及 POD 等组成的抗氧化酶系统具有有效清除氧自由基、抵御镉对植物毒害的功能^[27-28]: SOD 和 POD 的共同作用能把体内具潜在危害的 O_2^- 和 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 , 并能减少羟自由基 ($\cdot OH$) 的形成; POD 和 CAT 共同作用催化 H_2O_2 形成水; 3 种活性氧防御酶共同作用, 可有效地阻止 O_2^- 和 H_2O_2 在植物体内积累^[28]。由此可见, 镉胁迫下, 植物体内 SOD、CAT 和 POD 共同抵御镉毒害引起的氧化损伤。本实验中镉单独作用提高了不同基因型油菜的 SOD 活性, 可能是由于植物体在镉胁迫下启动自身防御系统, 通过提高 SOD 活性来清除镉诱导产生的大量氧自由基; “WH-19”抗氧化酶系统中 SOD 活性降低, 可能是由于添加硒有效降低了油菜体内的活性氧自由基, 从而降低了清除氧自由基的酶(SOD)活性下降。植物体内的活性氧和自由基的产生与清除作用的平衡受保护酶类及小分子抗氧化剂两类物质的调控^[29-30], 可能正是由于植物自身的防御系统、外源硒镉的互作、以及油菜品种基因型差异等因素共同作用的结果, 导致添加硒对镉胁迫下不同基因型油菜抗氧化系统的调节表现出并不一致的效果。该调控过程是一个复杂的机制, 有待深入研究。此外, 植物细胞内的镉可与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合, 还能取代金属蛋白中的必需元素(钙、镁、锌和铁元素), 导致生物大分子构象改变、酶活性丧失及必需元素缺乏, 干扰细胞的正常代谢过程^[31], 这也可能是镉单独作用甚至

硒、镉共同作用下, 不同基因型油菜抗氧化酶系统中 CAT 和 POD 活性降低的一个原因。

4 结论

(1) 在重金属镉污染 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 硒 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 能降低油菜“WH-95”各器官中镉含量, 对“WH-19”各器官中镉含量的影响不显著。油菜“WH-95”各器官中硒的富集显著高于“WH-19”。2 个基因型油菜中硒、镉含量整体上呈现拮抗作用。“WH-19”可能为低硒富镉品种, “WH-95”可能为低镉富硒品种。

(2) 综合 4 种光合参数的变化情况看, 2 个基因型油菜受镉单独胁迫下光合能力均降低, 添加硒可通过提高油菜净光合速率和蒸腾速率、降低胞间二氧化碳浓度等途径消除或减缓镉毒害, 使得油菜的光合能力得到提高。

(3) 硒的添加对镉胁迫下 2 个基因型油菜的影响不同: 降低了“WH-19”SOD 活性, 提高了“WH-95”CAT 活性, 对 2 个基因型油菜其他抗氧化酶活性的影响不显著。硒对镉胁迫下不同基因型油菜抗氧化酶系统的影响差异原因有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111 (4): 811-815.
- [2] 刘 洋, 张玉烛, 方宝华, 等. 栽培模式对水稻镉积累差异及其与光合生理关系的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(5): 450-455. LIU Yang, ZHANG Yu-zhu, FANG Bao-hua, et al. Relationship between cadmium uptake characteristics and photosynthetic physiology under different cultivation models of rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(5): 450-455. (in Chinese)
- [3] 张丽娜, 宗良纲, 任 恩, 等. 硅对低镉污染水平下水稻幼苗生长及吸收镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 494-499. ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, REN Cai, et al. Effects of Si on rice seedling growth and uptake of Cd in the low level of Cd pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 494-499. (in Chinese)
- [4] 周建华, 王永锐. 硅营养缓解水稻幼苗 Cd、Cr 毒害的生理研究[J]. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(1): 11-15. ZHOU Jian-hua, WANG Yong-rui. Physiological studies on poisoning effects of Cd and Cr on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings through inhibition of Si nutrition[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1999, 5(1): 11-15. (in Chinese)
- [5] 原海燕, 黄苏珍, 郭 智, 等. 锌对镉胁迫下马蔺生长、镉积累及生理抗性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2111-2116. YUAN Hai-yan, HUANG Su-zhen, GUO Zhi, et al. Effects of Zn on the growth, Cd accumulation and physiological resistance of *Iris lactea* var.

- chinensis* under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2111–2116. (in Chinese)
- [6] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd, Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. *生态学报*, 1992, 12(2): 147–154.
LI Yuan, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Effects of cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(2): 147–154. (in Chinese)
- [7] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 78–87.
WANG Hong, ZHOU Wei, LIN Bao. Effects of Ca on growth and physiological characteristics of maize under Cd stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 78–87. (in Chinese)
- [8] 区惠平, 周柳强, 刘昔辉, 等. 不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1220–1225.
QU Hui-ping, ZHOU Liu-qiang, LIU Xi-hui, et al. Effects of phosphorus fertilization on cadmium bioavailability in soil maize system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1220–1225. (in Chinese)
- [9] 张启伟, 王桂仙. 竹炭对水相中镉(II)的吸附行为及机理[J]. *沈阳化工学院学报*, 2009, 23(1): 4–8.
ZHANG Qi-wei, WANG Gui-xian. Adsorption behavior and mechanism of the bamboo-charcoal for Cd(II) in aqueous solution[J]. *Journal of Shenyang University of Chemical Technology*, 2009, 23(1): 4–8. (in Chinese)
- [10] 陈平, 余土元, 陈惠阳, 等. 硒对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. *广西植物*, 2002, 22(3): 277–282.
CHEN Ping, YU Tu-yuan, CHEN Hui-yang, et al. Effects of Se on the growth and some physiological characteristics of rice seedlings under Cd stress[J]. *Guihaia*, 2002, 22(3): 277–282. (in Chinese)
- [11] Yadava S K, Dhotea M, Kumarb P, et al. Differential antioxidative enzyme responses of *Jatropha curcas* L. to chromium stress[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180: 609–615.
- [12] Shanker K, Mishra S, Srivastava S, et al. Effect of selenite and selenate on plant uptake of cadmium by maize (*Zea mays*) [J]. *Bulltin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 56(3): 419–424.
- [13] 谭周磁, 陈嘉勤, 薛海霞. 硒(Se)对降低水稻重金属 Pb、Cd、Cr 污染的研究[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2000, 23(3): 80–83.
TAN Zhou-ci, CHEN Jia-qin, XUE Hai-xia. Studies on the pole of selenium (Se) in decreasing Pb, Cd and Cr pollution to rice[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2000, 23(3): 80–83. (in Chinese)
- [14] 吕选忠, 宫象雷, 唐勇. 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, TANG Yong. Antagonistic effect of foliar application of Se or Zn on absorption of Cd in lettuce[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 868–870. (in Chinese)
- [15] 王兴明, 涂俊芳, 李晶, 等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 102–106.
WANG Xing-ming, TU Jun-fang, LI Jing, et al. Effect of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 102–106. (in Chinese)
- [16] 刘燕, 蒋光霞. 硒对镉、铅复合污染下油菜重金属抗性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11096–11098.
LIU Yan, JIANG Guang-xia. Effects of Se on heavy metal-resistance of *Brassica napus* under compound pollution of Cd and Pb[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(21): 11096–11098. (in Chinese)
- [17] 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*, 2014, 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*, 2014, 35(8): 2597–2604. (in Chinese)
- [18] Wu Zhi-chao, Zhao Xiao-hu, Sun Xue-cheng, et al. Xylem transport and gene expression play decisive roles in cadmium accumulation in shoots of two oilseed rape cultivars (*Brassica napus*) [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 1217–1223.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210–228.
GAO Jun-feng. Experimental guide of physiology of plant[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 210–228. (in Chinese)
- [20] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 镉硫交互处理对水稻吸收累积镉及其蛋白巯基含量的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 728–733.
AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, YAN Wei-dong, et al. Effects of sulfate and cadmium interaction on cadmium accumulation and content of nonprotein thiols in rice seedling[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 728–733. (in Chinese)
- [21] 庞晓辰, 王辉, 吴泽赢, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1679–1685.
PANG Xiao-chen, WANG Hui, WU Ze-ying, et al. Alleviation by selenium of cadmium toxicity to rice and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1679–1685. (in Chinese)
- [22] 方继宇, 贾永霞, 张春梅, 等. 马缨丹对镉的生长响应及其富集、转运和亚细胞分布特点研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1677–1682.
- [23] Fang Ji-yu, Jia Yong-xia, Zhang Chun-mei, et al. Effects of cadmium on growth response of *Lantana camara* L. and its accumulation, translocation and subcellular distribution of Cd[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1677–1682. (in Chinese)
- [24] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012: 235–236, 343–351.
- [25] Farquhar C D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, 33: 317–345.
- [26] 石贵玉, 黄雅丽, 王巧贞, 等. 镉胁迫下硒对罗汉果组培苗光合特性的影响[J]. *广西植物*, 2013, 33(4): 435–438.
SHI Gui-yu, HUANG Ya-li, WANG Qiao-zhen, et al. Effects of Se on photosynthetic characteristics of *Siraitia grosvenorii* seedling under Cd²⁺ stress[J]. *Guihaia*, 2013, 33(4): 435–438. (in Chinese)
- [27] 张晓璟, 刘吉振, 徐卫红, 等. 磷对不同辣椒品种镉积累、化学形态及生理特性的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 1171–1176.

- ZHANG Xiao-jing, LIU Ji-zhen, XU Wei-hong, et al. Effect of phosphor on accumulation and chemical forms of cadmium and physiological characterization in different varieties of *Capsicum annuum* L. [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1171-1176. (in Chinese)
- [28] 薛 永, 王苑颀, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 528-534.
- XUE Yong, WANG Yuan-yuan, YAO Quan-hong, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 528-534. (in Chinese)
- [29] 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.
- GUO Feng, FAN Wen-hua, FENG Liang-rui, et al. Effects of selenium (Se) on the physiological characteristics, element contents, uptake and transportation of Cd in spinach under Cd stress[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 524-531. (in Chinese)
- [30] 周 坤, 刘 俊, 徐卫红, 等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1592-1599.
- ZHOU Kun, LIU Jun, XU Wei-hong, et al. Effect of exogenous zinc on activity of antioxidant enzyme, accumulation and chemical forms of cadmium in different varieties of tomato[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1592-1599. (in Chinese)
- [31] 惠俊爱, 党 志. 土壤不同镉浓度对玉米 CT38 生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 884-889.
- HUI Jun-ai, DANG Zhi. Effects of different cadmium concentrations in soil on growth and antioxidant enzyme activities of maize CT38[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 884-889. (in Chinese)

《草业科学》2015 年征订启事

• 欢迎投稿 ☆ 欢迎订阅 ☆ 欢迎刊登广告 •

《草业科学》1984 年创刊,由中国科学技术协会主管、中国草学会和兰州大学草地农业科技学院主办,是面向国内外公开发行的综合性科技期刊。本刊为“中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”和 CSCD 核心库来源期刊,并被《中国核心期刊(遴选)数据库》、中国科学期刊文献数据库、英国 CABI、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、中国科技期刊数据库、《中国生物学文摘》和“中国生物学文献数据库”收录为固定源期刊。2015 年《草业科学》入选第四期(2015-2017)中国科协精品科技期刊工程学术质量提升项目。近几年,《草业科学》相继获得“全国畜牧兽医优秀期刊一等奖”、“全国优秀农业期刊贰等奖”和“中国精品科技期刊”等荣誉。据 2014 年版科技部中国科技信息所《中国科技期刊引证报告》,总被引频次和影响因子分别为 2 294 和 0.775,在草原类期刊中综合排名第 2。

《草业科学》主要刊载国内外草业科学及其相关领域,如畜牧学、作物学、园艺学、生物学、林学、环境工程与科学、经济学和管理学等领域的创新性理论研究、技术开发、成果示范推广等方面的论文、综述、专论和学科前沿动态等。本刊结合草业科学学科发展和科技期刊的定位,目前主要设有专论、前植物生产层、植物生产层、动物生产层、后生物生产层、基层园地、业界信息等栏目,不仅为高校、科研单位的师生提供交流平台,同时为基层科技人员的成果交流创造机会。另外,本刊广告服务项目范围为畜牧机械、草种、化学药剂、仪器设备以及科研机构、重点实验室、高科技农业企业的形象广告等。

《草业科学》为月刊,大 16 开本,亚芬纸印刷,彩色封面覆膜,国内外公开发行,邮发代号 54-51,每期定价 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系订阅。

标准刊号:ISSN 1001-0629 CN 62-1069/S 邮发代号:54-51

地址:兰州市城关区嘉峪关西路 768 号《草业科学》编辑部 邮编:730020

电话:0931-8912486

传真:0931-8912486

E-mail:cykx@lzu.edu.cn

网址: <http://cykx.lzu.edu.cn>