

镉胁迫下甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活性及根系活力变化差异研究

孔维萍, 唐桃霞, 任凯丽, 程 鸿, 岳宏忠
(甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过探究镉胁迫下不同甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活力及根系活力变化, 为筛选抗镉甜瓜种质提供参考。以野生甜瓜、薄皮甜瓜及厚皮甜瓜为试材, 在苗期用不同浓度镉溶液培养后, 检测甜瓜幼苗叶片相关酶活及根系活力变化差异。结果表明, 镉胁迫下甜瓜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT、APX 活性均低于对照不添加 Cd²⁺。随着 Cd²⁺浓度增大, 薄皮甜瓜和厚皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性大幅下降, 而野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性略有回升, 且在 Cd²⁺中高浓度 (50~100 mg/L) 时均以野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性最高, 薄皮甜瓜的幼苗叶片的 SOD 活性最低。各处理下野生甜瓜幼苗叶片的 POD 活性均最高, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 POD 活性均最低, 随 Cd²⁺胁迫浓度的增大, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 POD 活性均下降, 但降幅不大。Cd²⁺胁迫浓度为 0 mg/L 时, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性最高, 野生甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性最低; 随 Cd²⁺胁迫浓度的增大, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性降幅最大。各处理下野生甜瓜幼苗叶片的 APX 活性均最高, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 APX 活性最低, 而野生甜瓜幼苗叶片的 APX 活性随 Cd²⁺浓度增大降幅较大。当 Cd²⁺胁迫浓度为 0 mg/L 时, 野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最低, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最高; 随 Cd²⁺胁迫浓度的增大, 野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量呈变化不明显, 薄皮甜瓜则逐步递减, 厚皮甜瓜呈先降后升又略下降趋势。各处理下均以厚皮甜瓜幼苗叶片的 MDA 含量最高, 随 Cd²⁺胁迫浓度的增大, 野生甜瓜幼苗叶片的 MDA 含量呈先降后升趋势, 薄皮甜瓜的 MDA 含量呈逐步递减趋势, 厚皮甜瓜的 MDA 含量先升后降又略上升。在相同 Cd²⁺胁迫浓度处理下, 野生甜瓜根系活力最强, 薄皮甜瓜根系活力降幅最大。由此可见, 镉胁迫下薄皮甜瓜幼苗叶片的酶活性降幅较大, 厚皮甜瓜次之, 野生甜瓜幼苗叶片的酶活性降幅相对较小, 且各处理下均以野生甜瓜根系活力最强, 这说明参试的薄皮甜瓜对镉胁迫较敏感, 野生甜瓜抗镉性较厚皮甜瓜、薄皮甜瓜强。

关键词: 甜瓜; 幼苗叶片; 镉胁迫; 抗氧化酶; 活性; 根系活力

中图分类号: S651 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2024)12-1147-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.12.013

Differences of Leaf Antioxidant Enzymes Activities and Root Vigor of Melon Seedlings under Cadmium Stress

KONG Weipin, TANG Taoxia, REN Kaili, CHANG Hong, YUE Hongzhong
(Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: This study explored the changes of antioxidant enzyme activities and root vigor in different melon seedling leaves under cadmium (Cd) stress so as to provide references for selecting Cd-resistant melon germplasm. Wild, thin-skinned and thick-skinned melons were used as experimental materials. After cultivation with different concentrations of cadmium solutions during the seedling stage, the variations in enzyme activity and root vigor in the leaves of different melon seedlings were detected. Results showed that under cadmium stress, the activities of SOD, POD, CAT, and APX in melon seedling leaves were all lower than the control without added Cd²⁺. As the Cd²⁺ concentration increased, the SOD activity in thin-skinned and thick-skinned melon seedlings decreased significantly, while the SOD activity in wild melon seedlings slightly increased. At medium to high Cd²⁺ concentrations (50 to 100 mg/L), the SOD activity in wild melon seedling leaves was the highest, and the SOD activity in thin-skinned melon seedlings was the lowest. Under all treatments, the POD activity in wild melon seedling leaves was the highest, and that in thin-skinned melon seedlings was the lowest. With the increasing concentration of Cd²⁺ stress, the POD activity in the leaves of

收稿日期: 2024-04-19; 修订日期: 2024-06-12

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(22CX8NA030); 甘肃省农业科学院生物育种专项(2022GAAS05); 国家自然科学基金项目(31301795); 嘉峪关市科技计划项目(23-25)。

作者简介: 孔维萍(1975—), 女, 甘肃永靖人, 副研究员, 主要从事西甜瓜遗传育种工作。Email: wpk33@126.com。

通信作者: 岳宏忠(1976—), 男, 甘肃合水人, 研究员, 主要从事瓜类蔬菜遗传育种工作。Email: tianyuan2828@163.com。

different melon materials decreased, but the decrease was not significant. When the Cd^{2+} concentration was 0 mg/L, the CAT activity in thin-skinned melon seedling leaves was the highest, while that in wild melon seedlings was the lowest. As the Cd^{2+} concentration increased, the CAT activity in thin-skinned melon seedling leaves decreased the most. Under all treatments, the APX activity in wild melon seedling leaves was the highest, and the APX activity in thin-skinned melon seedling leaves was the lowest. The APX activity in wild melon seedling leaves decreased significantly with increasing Cd^{2+} concentration. When the Cd^{2+} stress concentration was 0 mg/L, the Pro content in wild melon seedling leaves was the lowest, and that in thin-skinned melon seedling leaves was the highest. As the Cd^{2+} concentration increased, the Pro content in wild melon seedling leaves showed no significant change, while the Pro content in thin-skinned melon steadily decreased, and in thick-skinned melon, it decreased initially, then slightly increased, and decreased again. Under all treatments, the MDA content in thick-skinned melon seedling leaves was the highest. As the Cd^{2+} stress concentration increased, the MDA content in wild melon seedling leaves showed a decreasing and then increasing trend, while the MDA content in thin-skinned melon steadily decreased, and that in thick-skinned melon increased initially, then decreased, and slightly increased again. At the same Cd concentration, wild melon exhibited the strongest root vigor, while thin-skinned melon showed the largest decrease in root vigor. It can be concluded that under cadmium stress, thin-skinned melon seedlings showed the largest decrease in enzyme activity, followed by thick-skinned melon, while wild melon seedlings exhibited a relatively smaller decrease. Furthermore, wild melon consistently showed the strongest root vigor under all treatments, indicating that thin-skinned melon is more sensitive to cadmium stress, while wild melon has stronger cadmium resistance compared to thick-skinned and thin-skinned melons.

Key words: Melon; Seedling leave; Cadmium stress; Antioxidant enzyme; Vigor; Root activity

镉(cadmium, Cd)是一种毒性较大的重金属,人体若摄入过量的镉,就会有致畸、致癌的风险。随着工业“三废”排放、化肥农药滥用、污水灌溉及城镇污泥的使用,使得环境镉污染越来越严重,因此植物抗、耐镉机理方面的研究越来越受到人们的重视^[1-2]。作物中镉残留和抗镉机制方面的研究比较多^[3-7]。镉胁迫对甜瓜幼苗生长的影响目前也有研究^[8-9],主要涉及光合系统和抗氧化酶活性变化等内容。植物对镉胁迫应激反应因基因型而异,本试验选取3份不同类型甜瓜单系材料为试材,开展了不同镉浓度胁迫下幼苗叶片抗氧化酶活性变化差异研究,旨在为筛选抗耐镉甜瓜种质资源提供数据支撑,为选育抗镉甜瓜新品种奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试镉源为 $CdCl_2 \cdot 5H_2O$ (分析纯试剂),由 Sigma 公司生产。种子萌发袋(每袋 50 mL)购自北京启维益成科技有限公司。供试材料为厚皮甜瓜白兰瓜(H)、薄皮甜瓜白脆瓜(B)、野生甜瓜泡状瓜(Y),均

为多年自交选纯单系材料,其来源及特性见表 1。

1.2 试验方法

试验分别设置镉溶液胁迫浓度为 0 (CK)、25、50、100 mg/L。将正常露白的甜瓜种子置于种子萌发袋萌发孔处,内盛 50 mL 1/8 的霍格兰氏营养液,营养液每 48 h 更换 1 次。约 7 d 后子叶展开,2 叶 1 心时按试验设计添加不同浓度 $CdCl_2 \cdot 5H_2O$ 的 1/8 霍格兰氏营养液培养,每天更换新的培养液。处理 8 d 后取样检测生理生化指标进行对比分析。

1.3 指标测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法,以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活力单位^[10-11];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚比色法测定,提取缓冲液代替测定液测定 ΔOD_{470ck} ,以 OD_{470} 每增加 1 为一个酶活力单位^[10-11];过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢分解法测定,提取缓冲液代替测定液测定 ΔOD_{240ck} ,以 OD_{240} 每分钟减少 1 为一个酶活力单位^[10-11];抗坏血酸过氧化物酶(APX)采用 Grace

表 1 试验材料来源及生物学特性

名称	类型	来源	主要特性
白兰瓜	厚皮甜瓜(H)	美国中北区植物引种站	果实椭圆形,白皮绿肉,肉质酥软多汁,果肉中心可溶性固形物含量约 156 g/kg,单果质量约为 2 350 g。
白脆瓜	薄皮甜瓜(B)	天水地方品种	果实卵形,白皮白肉,肉质酥脆,果肉中心可溶性固形物含量约 138 g/kg,单果质量约为 450 g。
泡状瓜	野生甜瓜(Y)	美国中北区植物引种站	果实椭圆形,黄绿皮,果皮密集黄绿刺,果肉白色,中心可溶性固形物含量约 43 g/kg,单果质量约为 43 g。

SG(1996)的方法^[10-11]; 可溶性蛋白(Pro)含量测定采用考马斯亮蓝 G250 法, 以牛血清蛋白为标准蛋白^[10-11]; 丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[10-11]; 根系活力测定采用 TTC 法^[10-11]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件对试验数据进行整理, 运用 SPSS 22.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性

植物在长期的进化过程中, 体内同时存在 2 种主要的抗氧化系统, 可以及时清除机体内过多的活性氧, 以维持自由基代谢的动态平衡^[12-14]。SOD 在活性氧清除系统中起主要作用, 它催化 $2O_2^{-2}+2H^+=H_2O_2+O_2$ ^[12-14]。Cd²⁺ 胁迫浓度为 0 mg/L (CK) 时, 野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性最大, 薄皮甜瓜的 SOD 活性和厚皮甜瓜相当。Cd²⁺ 胁迫浓度为 25 mg/L 时, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性略高于 CK, 而野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性大幅下降, 约为 CK 的 57%; 厚皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性基本不变。但随着 Cd²⁺ 胁迫浓度继续增大, 薄皮甜瓜和厚皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性大幅下降, 而野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性略有回升, 且以野生甜瓜的 SOD 活性最高, 薄皮甜瓜的 SOD 活性最低 (图 1 A)。在 Cd²⁺ 胁迫浓度为 100 mg/L 时, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性显著低于

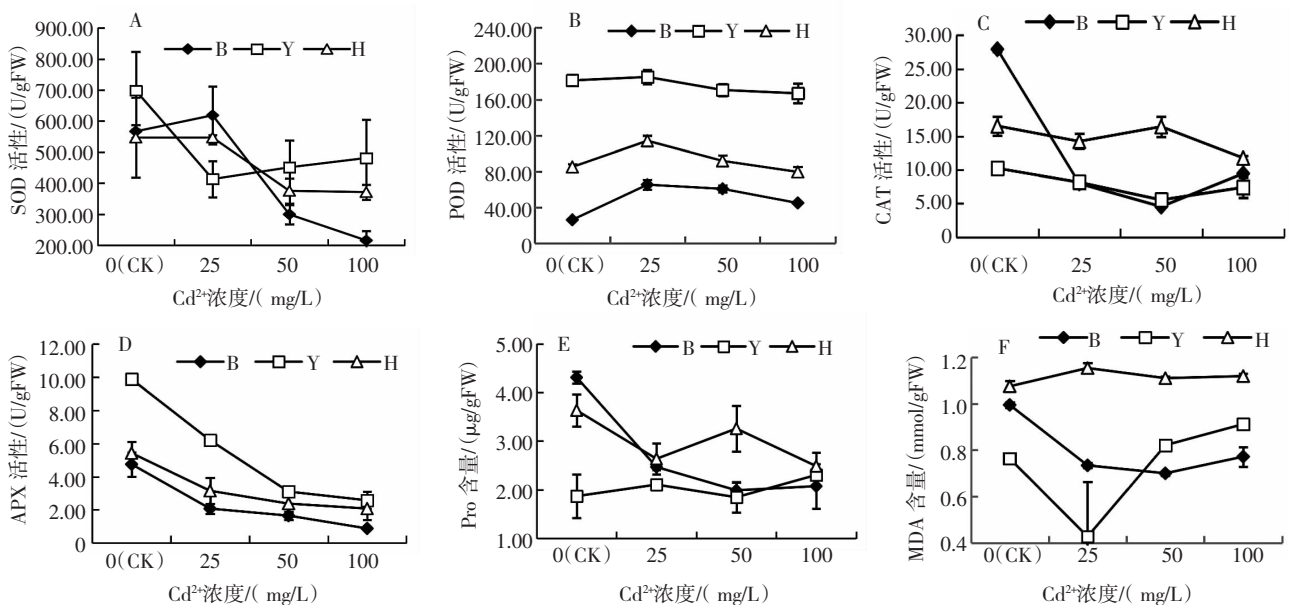
野生甜瓜和厚皮甜瓜。

2.2 过氧化物酶(POD)活性

POD 可催化 H₂O₂ 与酚类的反应形成 H₂O^[12-14]。各 Cd²⁺ 胁迫浓度处理下均以野生甜瓜幼苗叶片的 POD 活性最高, 约为薄皮甜瓜的 3 倍, 厚皮甜瓜的 2 倍。Cd²⁺ 胁迫浓度为 25 mg/L 时, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 POD 活性均高于 CK。随 Cd²⁺ 胁迫浓度的增大, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 POD 活性均下降, 但降幅不大 (图 1 B)。薄皮甜瓜幼苗叶片 POD 活性各处理间差异均达显著水平, 相同 Cd²⁺ 胁迫浓度处理下不同甜瓜材料幼苗叶片的 POD 活性差异也均达显著水平。

2.3 过氧化氢酶(CAT)活性

CAT 是一种含 Fe 的血蛋白酶类, 催化 H₂O₂ 分解成水和氧, CAT 活性的提高能更有效地清除 H₂O₂, 与 SOD 均可对植物生长起保护作用^[12-14]。在 CK 条件下, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性最高, 野生甜瓜的最低。Cd²⁺ 胁迫浓度为 25 mg/L 时, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 CAT 活性均下降, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性下降明显, 约为 CK 的 29%。Cd²⁺ 胁迫浓度继续增加时, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 CAT 活性均趋于平稳 (图 1 C)。除 CK 外, 厚皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性在不同 Cd²⁺ 胁迫浓度处理下显著高于薄皮甜瓜和野生甜瓜。



(Y 野生甜瓜, B 薄皮甜瓜, H 厚皮甜瓜)

图 1 不同水平镉胁迫下甜瓜幼苗叶片的生理指标

2.4 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性

APX 是叶绿体中清除 H_2O_2 的主要酶^[12-14]。不同 Cd^{2+} 胁迫浓度处理下均以野生甜瓜幼苗叶片的 APX 活性均最高,薄皮甜瓜的最低;随着 Cd^{2+} 胁迫浓度的变大,不同甜瓜材料幼苗叶片的 APX 活性均呈下降趋势,其中以野生甜瓜的 APX 活性降幅最大,当 Cd^{2+} 胁迫浓度为 100 mg/L 时,幼苗叶片的 APX 活性约为 CK 的 1/3,而薄皮甜瓜和厚皮甜瓜幼苗叶片的 APX 活性下降幅度基本相当(图 1 D)。不同甜瓜材料幼苗叶片的 APX 活性在 CK 条件下与其余 Cd^{2+} 胁迫浓度处理间差异均达显著水平。

2.5 可溶性蛋白(Pro)含量

可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物质和营养物质,其含量越高说明植物的代谢活动越强^[15-17]。可溶性蛋白增加对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用,可溶性蛋白(Pro)含量的高低常被用作筛选植物抗性指标之一^[12-14]。当 Cd^{2+} 胁迫浓度为 0 mg/L(CK)时,以野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最低,薄皮甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最高。随 Cd^{2+} 胁迫浓度的变大,野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量变化趋势不明显,薄皮甜瓜的 Pro 含量呈逐步递减趋势,厚皮甜瓜呈先降后升又略下降趋势,这可能是甜瓜幼苗抵抗镉损伤能力差异造成的。 Cd^{2+} 胁迫浓度达到 100 mg/L 时,薄皮甜瓜、厚皮甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量均较 CK 明显下降,而野生甜瓜的 Pro 含量较 CK 略有上升。由此可

见,高浓度镉胁迫严重抑制了薄皮甜瓜、厚皮甜瓜幼苗叶片的可溶性蛋白(Pro)的合成(图 1 E)。薄皮甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量在 CK 处理下与其余 Cd^{2+} 胁迫浓度处理间差异均达显著水平,厚皮甜瓜和野生甜瓜的不同 Cd^{2+} 胁迫浓度处理间差异均不显著。

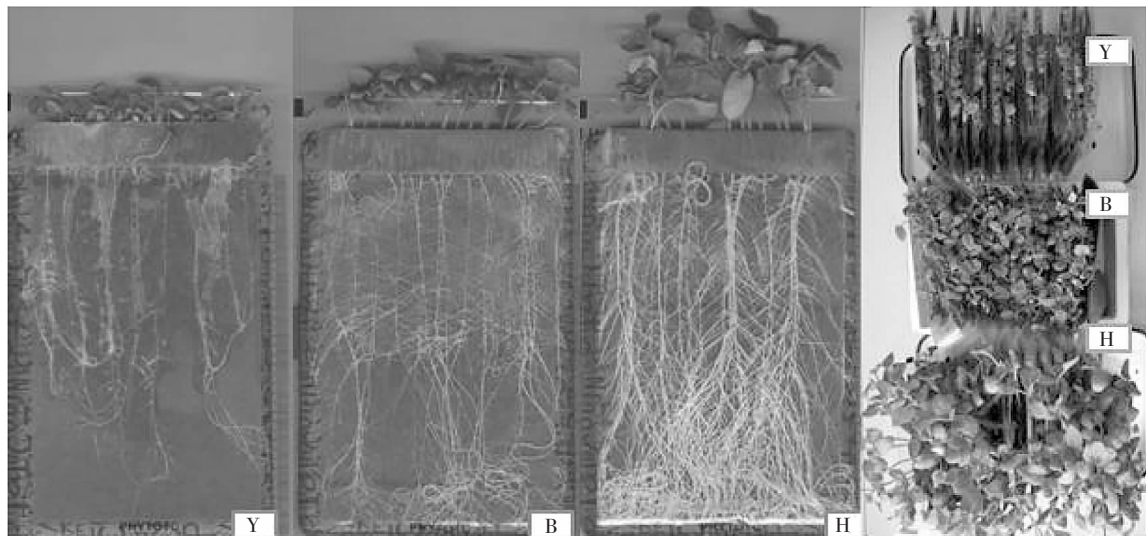
2.6 丙二醛(MDA)含量

MDA 是膜脂过氧化作用的主要产物之一,通常利用它的含量作为脂质过氧化指标,反映细胞膜脂过氧化的程度。低浓度(25 mg/L) Cd^{2+} 处理下,以野生甜瓜幼苗叶片 MDA 含量最低,中高浓度(50~100 mg/L) Cd^{2+} 处理下,以薄皮甜瓜幼苗叶片 MDA 含量最低;厚皮甜瓜 MDA 含量在各处理条件下均最大,且基本处于恒定的水平。随 Cd^{2+} 胁迫浓度的变大,野生甜瓜幼苗叶片的 MDA 含量呈先降后升趋势,薄皮甜瓜呈逐步递减趋势,厚皮甜瓜呈先升后降又略上升趋势(图 1 F)。薄皮甜瓜 MDA 含量 CK 与其他处理间差异显著,其余材料各处理间差异不显著。

2.7 根系活力

根是植物体中最重要的络合重金属的部位,也是最易受重金属毒性影响的部位。在整个培养过程中观察发现厚皮甜瓜植株生长健壮,根密且粗壮,生物产量最大,充满了整个培养空间;野生甜瓜整体长势最弱,根系生长量小(图 2)。

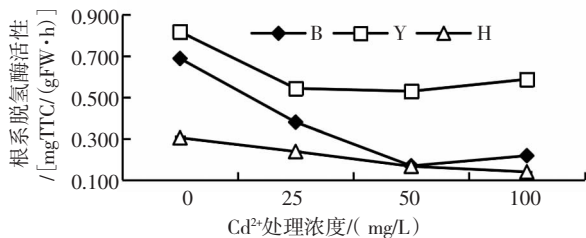
在同等浓度 Cd^{2+} 处理下,野生甜瓜根系活力最强,约为厚皮甜瓜的 3 倍,随 Cd^{2+} 浓度加大,



(Y 为野生甜瓜, B 为薄皮甜瓜, H 为厚皮甜瓜)

图 2 不同浓度镉胁迫对甜瓜幼苗水培的影响

野生甜瓜根系活力先大幅下降而后略有上升; 薄皮甜瓜根系活力的降幅最大, 100 mg/L Cd²⁺ 浓度下其活力仅为对照的 1/6; 厚皮甜瓜根系活力整体呈缓慢递减趋势(图3)。高浓度镉胁迫下甜瓜幼苗根系变黄、变褐、根尖坏死等胁迫症状, 厚皮甜瓜表现尤为突出。甜瓜幼苗根系活力同一材料各处理间差异均显著。



(Y 为野生甜瓜, B 为薄皮甜瓜, H 为厚皮甜瓜)

图3 不同浓度镉胁迫下甜瓜幼苗的根系活力

3 结论与讨论

植物抗氧化酶主要包括 SOD、POD、APX 和 CAT, 能相互协助清除重金属胁迫下产生的活性氧, 减轻细胞结构受损, 从而缓解植物受害症状。本研究中, 3 种类型甜瓜试材抗氧化酶活性随着镉处理浓度的增加整体呈下降趋势, 其中 SOD 活性和 POD 活性在低浓度镉胁迫下稍有提升, 这表明甜瓜植株叶片细胞自我保护机制启动。而后随镉胁迫浓度增大持续下降。而 APX、CAT 活性呈持续下降趋势, 这与张永平等^[9]的研究结果镉胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性整体先升后降的变化趋势不一致。高浓度镉胁迫下, 抗氧化酶活性整体下降, 严重时影响瓜苗正常生长, 这可能是 O₂⁻ 和 H₂O₂ 在植物体内的积累速度大于抗氧化酶的清除速度, 活性氧持续积累, 加剧了膜脂的过氧化^[12-13]。不同作物乃至同一作物不同基因型在镉胁迫下其抗氧化性酶活性变化规律均有差异^[14, 18-19]。野生甜瓜幼苗长势弱, 叶片 Pro 含量最小, 代谢活动最弱, 而薄皮甜瓜和厚皮甜瓜 Pro 含量降幅较大, 高浓度镉严重抑制了可溶性蛋白的合成。MDA 含量反映细胞膜脂过氧化的程度, 厚皮甜瓜 MDA 含量在各处理下均最高, 证明其在镉胁迫下细胞膜脂过氧化程度重, 植株生长势强, 代谢旺盛, 镉胁迫产生的膜损伤也重。

本试验结果表明, 胁迫下甜瓜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT、APX 活性均低于对照不添加

Cd²⁺。随着 Cd²⁺ 浓度增大, 薄皮甜瓜和厚皮甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性大幅下降, 而野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性略有回升, 且在 Cd²⁺ 中高浓度 (50~100 mg/L) 时均以野生甜瓜幼苗叶片的 SOD 活性最高, 薄皮甜瓜的幼苗叶片的 SOD 活性最低。各处理下野生甜瓜幼苗叶片的 POD 活性均最高, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 POD 活性均最低, 随 Cd²⁺ 胁迫浓度的增大, 不同甜瓜材料幼苗叶片的 POD 活性均下降, 但降幅不大。Cd²⁺ 胁迫浓度为 0 mg/L 时, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性最高, 野生甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性最低; 随 Cd²⁺ 浓度的增大, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 CAT 活性降幅最大。各处理下野生甜瓜幼苗叶片的 APX 活性均最高, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 APX 活性最低, 而野生甜瓜幼苗叶片的 APX 活性随 Cd²⁺ 浓度增大降幅较大。当 Cd²⁺ 胁迫浓度为 0 mg/L 时, 野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最低, 薄皮甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量最高; 随 Cd²⁺ 胁迫浓度的变大, 野生甜瓜幼苗叶片的 Pro 含量呈变化不明显, 薄皮甜瓜则逐步递减趋势, 厚皮甜瓜呈先降后升又略下降趋势。各处理下均以厚皮甜瓜幼苗叶片的 MDA 含量最高, 随 Cd²⁺ 胁迫浓度的变大, 野生甜瓜幼苗叶片的 MDA 含量呈先降后升趋势, 薄皮甜瓜的 MDA 含量呈逐步递减趋势, 厚皮甜瓜的 MDA 含量呈先升后降又略上升趋势。在相同 Cd²⁺ 胁迫浓度处理下, 野生甜瓜根系活力最强, 薄皮甜瓜根系活力降幅最大。由此可见, 镉胁迫下薄皮甜瓜叶片的酶活性降幅较大, 厚皮甜瓜次之, 野生甜瓜叶片的酶活性降幅相对较小, 且各处理下均以野生甜瓜根系活力最强, 这说明参试的薄皮甜瓜对镉胁迫较敏感, 野生甜瓜抗镉性较厚皮甜瓜、薄皮甜瓜强, 可进一步开展野生材料抗镉分子机理研究, 为转育出抗镉核心甜瓜种质奠定基础。

参考文献:

- [1] 张 军, 束文圣. 植物对重金属镉的耐受机制[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(1): 1-8.
- [2] 赵菲佚, 翟禄新, 陈 荃, 等. Cd Pb 复合处理下对植物膜的伤害初探[J]. 兰州大学学报, 2002, 38(2): 115-120.
- [3] 史 静, 潘根兴, 夏运生, 等. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 832-837.

- [4] 柯玉琴, 潘廷国. NaCl 胁迫对甘薯叶片叶绿体超微结构及一些酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 1999, 25(3): 229-233.
- [5] 张涵洋, 李 爱, 张卫华, 等. 镉胁迫对西瓜幼苗生长及其叶片解剖结构和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(3): 401-409
- [6] 李贞霞, 任秀娟, 孙涌栋. 南瓜对镉的吸收积累特性研究[J]. 生态科学, 2006, 25(5): 423-425.
- [7] 姜晓君, 蒋 英. 镉胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生理指标的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(10): 27-30
- [8] 张永平, 范红伟, 杨少军, 等. 外源水杨酸对镉胁迫甜瓜幼苗生长与光合气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报 2014, 34(4): 0778-0785.
- [9] 张永平, 沈若刚, 姚雪琴, 等. 镉胁迫对甜瓜幼苗抗氧化酶活性和光合作用的影响[J]. 中国农学通报 2015, 31(34): 82-88.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 任艳芳, 何俊瑜, 刘 畅, 等. 镉胁迫对莴苣幼苗生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 494-497
- [13] 汪 洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 36-42.
- [14] 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 不同镉水平对白菜生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(3): 378-380.
- [15] 权建华, 刘玉玲, 许可红, 等. 辣椒根系分泌物对辣椒种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(4): 334-338.
- [16] 白锐琴. 2, 4-表油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒叶片生理指标及果实品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(2): 141-145.
- [17] 牛军强, 尹晓宁, 董 铁, 等. 基于主成分分析评价间伐改形对苹果叶片生理指标的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(7): 631-638.
- [18] YANG J X, GUO H T, MA Y B, et al. Genotypic variations in the accumulation of Cd exhibited by different vegetables [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(8): 1246-1252.
- [19] MOHAPATRAL S, DEY S K. Physiological response of *Hydrilla verticillata*(*l.f.*) royle exposed to cadmium stress [J]. Journal of life sciences, 2012(6): 55-60.