

镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿质元素吸收的影响

宇克莉, 邹 婧, 邹金华

(天津师范大学生命科学学院, 天津 300387)

摘 要:通过水培实验研究了在 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} mol·L⁻¹ 浓度下, Cd²⁺胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统、丙二醛(MDA)含量、Cd 积累及矿质元素吸收的影响, 同时讨论了 Cd²⁺毒害的作用机理。结果表明, 中、低浓度(10^{-6} 、 10^{-5} mol·L⁻¹)Cd²⁺胁迫下, 玉米幼苗 MDA 含量与对照组相比没有显著变化; 高浓度(10^{-4} mol·L⁻¹)Cd²⁺胁迫后, MDA 含量显著升高($P<0.05$)。Cd²⁺胁迫初期, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性均升高; 随着胁迫时间的延长, 除叶片中 SOD 和 CAT 活性略有上升外, 其他抗氧化酶活性逐渐下降, 高浓度组抗氧化酶活性下降最明显。植物吸收的 Cd 主要积累在根部, Cd²⁺胁迫能干扰玉米对 Fe、Cu、Zn、Mg 等养分的吸收。

关键词: Cd; 玉米; 抗氧化酶系统; 丙二醛; 矿质元素

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)06-1050-07

Effects of Cadmium Stress on Antioxidant Enzyme System and Absorption of Mineral Elements in Maize Seedlings

YU Ke-li, ZOU Jing, ZOU Jin-hua

(College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The effects of different concentrations of Cd²⁺ (10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} mol·L⁻¹) on antioxidant enzyme system, and malondialdehyde content in maize seedlings were investigated using water culture method, as well as the Cd accumulation and its effects on mineral element uptake by ICP-AES. The results indicated that the content of MDA was not affected significantly when maize seedlings were stressed by 10^{-6} and 10^{-5} mol·L⁻¹ of Cd²⁺ in comparison with the control, and increased significantly by 10^{-4} mol·L⁻¹ of Cd²⁺ ($P<0.05$). The activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and catalase(CAT) in maize seedlings increased at the early days, and decreased with prolonging duration of Cd treatment except for SOD and CAT in leaves, and decreased the most at the highest concentration. Cadmium absorbed by the seedlings accumulated mostly in roots, and the Cd²⁺ stress affected absorption of Fe, Cu, Zn and Mg. The contents of Fe, Cu, Zn of leaves were not affected significantly at 10^{-6} and 10^{-5} mol·L⁻¹ of Cd²⁺. Cadmium stimulated the absorption of Fe, Cu and Zn in roots, especially Fe in roots. The content of Mg in roots and leaves was stimulated by lower concentration of Cd²⁺ and inhibited by higher concentration of Cd²⁺. The mechanism of Cd²⁺ toxicity was briefly discussed in the end.

Keywords: cadmium; maize; antioxidant enzyme system; MDA; mineral elements

由于工业和农业的飞速发展, 人类活动导致的环境污染问题不断增加。目前, 世界各国的土壤都存在不同程度的重金属污染, 中国仅因污灌受重金属污染的耕地面积近 2 000 万 hm², 约占总耕地面积的 1/5, 其中镉(Cd)污染耕地 1.33 万 hm²。因此重金属 Cd 污染已经成为一个重要的环境问题^[1-2]。不适当的工业排污使得大量 Cd 进入土壤-植物生态系统, 并通过食

物链危及人类健康。Cd 不是生物体生长发育的必需元素, 却极易被植物吸收。当 Cd 在植物体内积累达到一定浓度时, 就会干扰离子间原有的平衡系统, 阻碍正常离子的吸收、运输、渗透和调节等过程, 影响植物的正常生理代谢活动^[3-5]。Cd 能够影响植物的光合系统^[6], 抑制植物的光合作用, 引起植物氧化胁迫和膜的损伤^[7], 改变活性氧代谢的有关酶系如抗氧化酶系的活性^[8], 从而抑制植物的生长^[9]。

津单 2 号是一个极具推广前途的优良玉米新品种, 其因抗病、抗倒伏、抗旱性、耐低温、高淀粉含量(74.51%)等优良特征, 而得到充分肯定^[10], 但关于重

收稿日期: 2009-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972331)

作者简介: 宇克莉(1963—), 女, 天津市人, 高级工程师, 主要从事逆境植物学研究。E-mail: hsxxykl@126.com

金属对其毒害实验的研究未见报道。本研究以津单2号玉米为实验对象,系统地研究了重金属Cd胁迫对其抗氧化酶活性及矿质元素吸收的影响,探讨抗氧化酶系统在作物抵抗重金属胁迫中的作用,为进一步了解植物对Cd的抗性机理提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 材料培养及处理

实验所用津单2号玉米由天津农科院提供。选取饱满、大小一致的玉米籽粒浸种24 h,在培养箱(25℃)中黑暗恒温培养72 h后,选择生长一致的幼苗分成4组,每组30株幼苗。其中1组用Hoagland营养液培养作为对照组,其余3组分别在Hoagland营养液中加入不同浓度的 Cd^{2+} ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,化学纯),使其最终浓度分别为 10^{-6} 、 10^{-5} 、 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验周期为15 d,每隔5 d更换培养液,整个实验过程中对培养液通气。

1.2 取材及测定指标

每隔5 d把玉米幼苗的第二片叶子和根分别取材用于测定抗氧化酶的活性及丙二醛(MDA)含量,每个培养组重复5次。

Cd处理15 d后收获材料,分别进行干燥、研磨,以测定玉米幼苗叶片及根系中Mg、Fe、Cu、Zn、Cd等元素的含量。

1.2.1 丙二醛含量的测定

硫代巴比妥酸(TBA)法测定MDA含量^[11]。

1.2.2 酶液提取及SOD、CAT、POD等保护酶活性测定

取材称重并记录,将材料置于预冷研钵中,加入5 mL $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH 7.8)冰浴研磨成匀浆,用冷冻离心机在4℃下 $10\,000 \times g$ 离心20 min,上清液即为酶液。采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定SOD活性^[11]、愈创木酚法测定POD活性^[11]、过氧化氢分解量法测定CAT活性^[12]。

1.2.3 元素含量的测定

采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 湿法消化法^[13]处理样品,每个样品重复3次。电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)测定各样品中Cd、Fe、Cu、Zn、Mg的含量。

1.3 数据处理

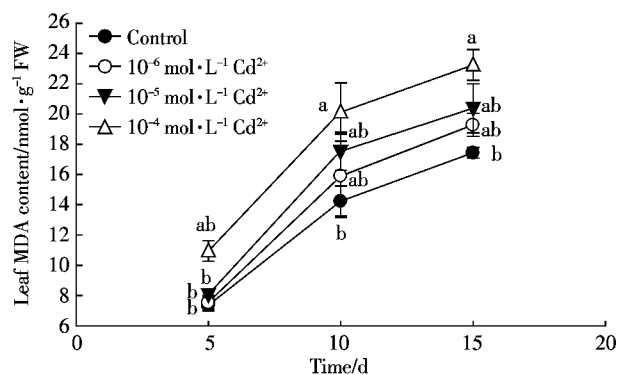
得到的所有实验数据均用SigmaPlot 9.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗MDA含量的影响

实验结果表明,与对照相比, 10^{-6} 、 $10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗中的MDA含量影响不显著(如图1,图2所示)。而 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 处理组玉米幼苗中的MDA含量显著高于对照,尤其是根中的MDA含量上升更加明显。这说明,高浓度的 Cd^{2+} 胁迫导致玉米幼苗体内膜质过氧化加剧。



字母不同表示差异显著($n=5$, $P<0.05$),下同。

Values with different letters differ significantly from each other ($n=5$, $P<0.05$), the same below.

图1 Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗叶片MDA含量的影响

Figure 1 Effects of Cd^{2+} on MDA content in the leaves of maize seedling

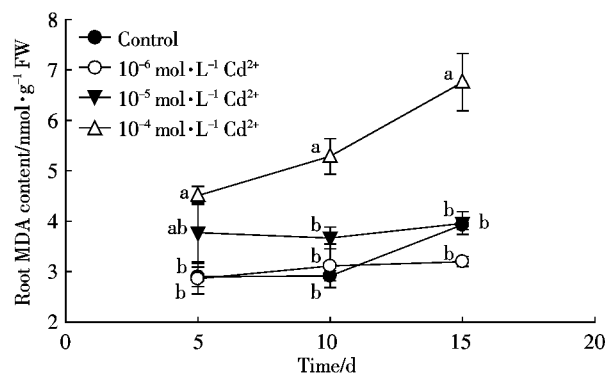


图2 Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗根MDA含量的影响

Figure 2 Effects of Cd^{2+} on MDA content in the roots of maize seedling

2.2 Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗SOD活性的影响

实验结果表明, Cd^{2+} 胁迫下玉米幼苗叶片SOD活性均显著变化($P<0.05$)(图3),其中, $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 胁迫5~10 d时,SOD活性最大。随着胁迫时间的延长,对照组及 10^{-6} 、 $10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 处理组玉米幼苗叶片的SOD活性呈上升趋势;而 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 处理15 d时,玉米幼苗叶片SOD活性急剧下降,与对照组叶片中SOD活性无显著性差异。

玉米幼苗根SOD的活性因 Cd^{2+} 胁迫浓度和胁迫

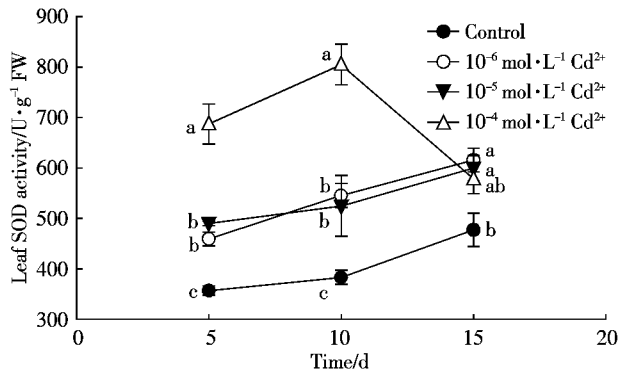
图3 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗叶片 SOD 活性的影响

Figure 3 Effects of Cd²⁺ on SOD activity in the leaves of maize seedling

时间的不同而异(图4)。Cd²⁺胁迫5~10 d时,不同浓度Cd²⁺处理的玉米根中SOD活性均有所增加。其中,10⁻⁶ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组根中SOD活性最大,与对照组相比差异显著($P<0.05$)。当Cd²⁺胁迫时间延长至15 d时,3个Cd²⁺处理组的玉米根中SOD活性均下降,此时,10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组根中SOD活性与对照组相比差异不显著,而10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组根中SOD活性显著低于对照($P<0.05$),说明高浓度、长时间的Cd²⁺胁迫会对玉米幼苗根的SOD造成伤害。

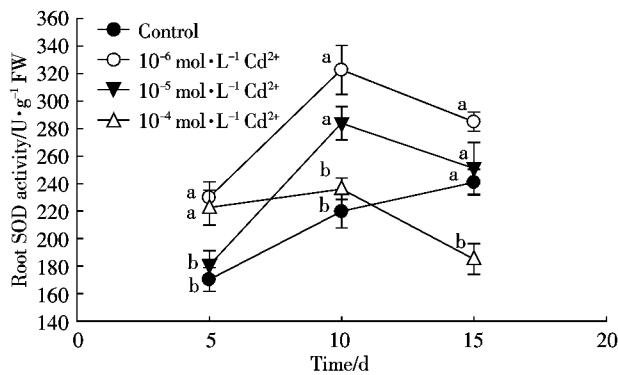
图4 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗根 SOD 活性的影响

Figure 4 Effects of Cd²⁺ on SOD activity in the roots of maize seedling

2.3 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗 POD 活性的影响

结果显示,玉米幼苗叶片POD的活性随着Cd²⁺胁迫浓度的上升而显著增强(如图5所示),在整个实验过程中,10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组叶片中POD活性最高,10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组POD活性次之,10⁻⁶ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组叶片中POD活性低于以上两组,但还明显高于对照组($P<0.05$)。当Cd处理15 d时,在10⁻⁴

mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫下,玉米幼苗叶片POD活性有所下降,但仍显著高于其他各组,此时,对照组POD活性上升,与10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫组POD活性相比差异不显著。

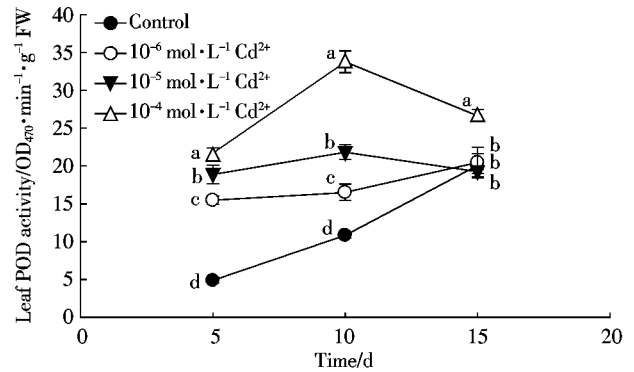
图5 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗叶片 POD 活性的影响

Figure 5 Effects of Cd²⁺ on POD activity in the leaves of maize seedling

由图6可以看出,10⁻⁶ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组玉米根中POD活性显著高于其他3组($P<0.05$)。整个实验过程中,10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组与对照组相比幼苗根中的POD活性均未出现显著变化。10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组玉米幼苗根POD活性在5~10 d时变化不大,在15 d时活性下降,显著低于其他3组($P<0.05$)。

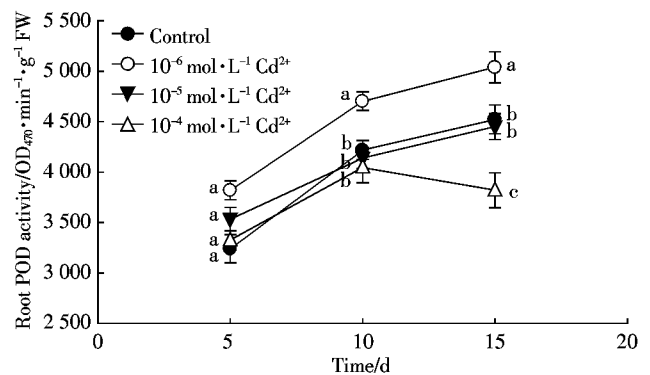
图6 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗根 POD 活性的影响

Figure 6 Effects of Cd²⁺ on POD activity in the roots of maize seedling

2.4 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗 CAT 活性的影响

图7展示了不同浓度Cd²⁺胁迫下玉米幼苗叶片CAT活性的变化。在整个实验过程中,10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理对玉米幼苗叶片CAT活性的影响不显著。10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫5 d后,叶片CAT活性显著

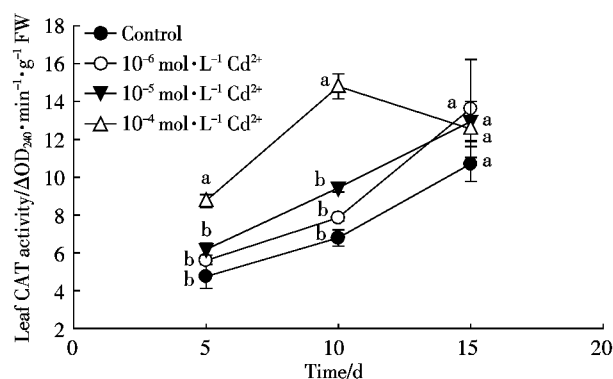
图7 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗叶片CAT活性的影响

Figure 7 Effects of Cd²⁺ on CAT activity in the leaves of maize seedling

增强,远高于其他3组,到15 d时CAT活性下降至对照水平。

由图8可以看出,不同浓度Cd²⁺胁迫下玉米幼苗根CAT活性均有所上升。其中,10⁻⁶ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫对根CAT活性的影响最小,仅在10 d时CAT活性显著增高($P<0.05$)。10⁻⁵、10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组玉米幼苗根的CAT活性在整个处理过程中均显著高于对照($P<0.05$)。说明玉米幼苗根CAT活性对Cd²⁺胁迫的反应更加敏感。

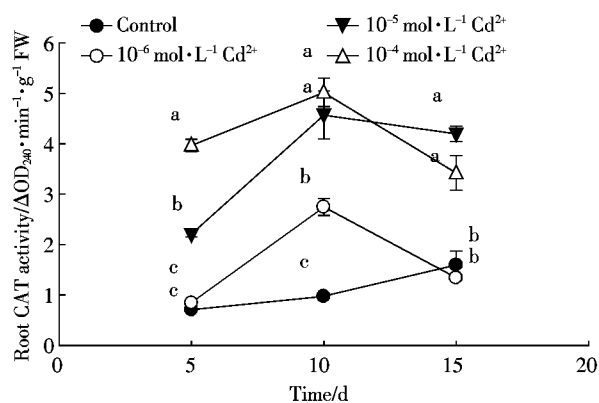
图8 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗根CAT活性的影响

Figure 8 Effects of Cd²⁺ on CAT activity in the roots of maize seedling

2.5 Cd²⁺胁迫对玉米幼苗中几种元素含量的影响

从表1可以看出,不同浓度Cd²⁺胁迫15 d后,对照组玉米幼苗体内Cd含量很少,在其他3个Cd²⁺处理组中玉米叶片及根中的Cd含量随着Cd²⁺处理浓度的升高而增加,且90%以上的Cd积累在根部。同时,Cd²⁺胁迫也影响了植物对其他元素的吸收。在不同浓度Cd²⁺处理后玉米幼苗叶片中Fe元素的含量没有发

生显著变化,而根中的Fe含量随着Cd²⁺胁迫浓度的上升大量增加,其中10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺处理组玉米幼苗根中的Fe含量为对照组的24.9倍。实验结果表明,中、低浓度(10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹)的Cd²⁺胁迫对玉米幼苗体内的Cu含量影响不显著,但在10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫下,玉米幼苗根中的Cu含量明显上升,为对照组根中Cu含量的9.5倍。表1还显示,10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫对玉米幼苗Zn含量的影响不显著,10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫下,玉米幼苗Zn含量显著增多,尤其是根部Zn含量的增多更为明显。而Cd²⁺处理后玉米幼苗Mg含量的变化与其他几种矿质元素不同,在10⁻⁶ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫下,玉米叶片和根中的Mg含量显著上升;在10⁻⁵ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫下,叶片Mg含量显著下降,而根中Mg含量显著增加;10⁻⁴ mol·L⁻¹ Cd²⁺胁迫后,叶片和根中的Mg含量均显著减少。

3 讨论

植物器官在衰老或逆境条件下,由于自由基的毒害会发生膜脂的过氧化作用,其产物MDA是生物膜中不饱和脂肪酸分解后的一种产物,可与蛋白质结合,引起膜中结构蛋白和酶进行聚合、交联,形成不溶性的化合物(脂褐素)沉积,从而对质膜系统造成进一步的伤害^[4]。因此,MDA含量反映了膜脂过氧化的程度。在中、低浓度(10⁻⁶、10⁻⁵ mol·L⁻¹)Cd²⁺胁迫下,根和叶片MDA含量比对照高,但是没有显著差异。在高浓度(10⁻⁴ mol·L⁻¹)胁迫下,MDA含量则显著高于对照,并且随着Cd²⁺胁迫时间的延长而上升(图1和图2),说明Cd胁迫严重地引起了植物细胞膜脂过氧化作用。

植物在正常生长条件下,能有效地清除体内的活性氧自由基,使细胞免受伤害。但在逆境环境下,当植物体内的活性氧自由基产生速度超过了植物清除活性氧的能力时,便会引起伤害^[5]。相应地,植物体内也有一套复杂的活性氧清除系统来保护植物细胞免受活性氧的损伤。活性氧清除系统包括低分子量的抗氧化剂如谷胱甘肽、脯氨酸等,以及抗氧化酶类如POD、CAT和SOD等。在外来胁迫初期,植物体内的活性氧清除系统被激活,其产生的作用超过了活性氧对植物的损伤作用,表现为Cd胁迫初期(5~10 d)玉米叶片和根中SOD、POD、CAT 3种抗氧化酶活性在不同浓度Cd胁迫下均升高。但是随着Cd浓度的增加和胁迫时间的延长,保护酶系统逐渐被抑制,抗氧化酶系统内多种酶之间的活性比不平衡。

表 1 不同浓度 Cd^{2+} 处理 15 d, 玉米叶片和根部 Cd, Fe, Cu, Zn, Mg 含量的变化 (Mean $\pm$ SE, $n=3$)Table 1 Effects of different concentrations of Cd^{2+} on Cd, Fe, Cu, Zn and Mg content in the leaves and roots of maize seedling for 15 days (Vertical bars denote SE. $n=3$)

器官	Cd^{2+} 浓度/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	金属含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW				
		Cd	Fe	Cu	Zn	Mg
叶片	0	3.85 $\pm$ 0.98c	916.40 $\pm$ 99.55a	6.102 $\pm$ 0.75ab	44.00 $\pm$ 2.42b	464.12 $\pm$ 7.27b
	10^{-6}	5.52 $\pm$ 0.81c	910.05 $\pm$ 96.37a	4.038 $\pm$ 1.65b	45.34 $\pm$ 3.66b	532.20 $\pm$ 10.19a
	10^{-5}	52.48 $\pm$ 0.67b	830.72 $\pm$ 61.49a	4.823 $\pm$ 0.60ab	52.54 $\pm$ 5.77b	404.81 $\pm$ 4.13c
	10^{-4}	452.68 $\pm$ 10.43a	1 013.84 $\pm$ 86.40a	8.219 $\pm$ 1.21a	87.10 $\pm$ 1.90a	313.94 $\pm$ 0.67d
根	0	6.37 $\pm$ 2.55d	1 701.15 $\pm$ 18.81d	3.65 $\pm$ 1.46b	55.87 $\pm$ 3.88c	440.25 $\pm$ 21.17b
	10^{-6}	123.16 $\pm$ 6.58c	4 379.79 $\pm$ 143.52c	5.88 $\pm$ 2.85b	70.07 $\pm$ 2.77bc	589.20 $\pm$ 23.72a
	10^{-5}	668.95 $\pm$ 34.41b	6 466.20 $\pm$ 335.43b	10.49 $\pm$ 5.10b	82.38 $\pm$ 8.07b	653.45 $\pm$ 55.68a
	10^{-4}	4 953.83 $\pm$ 86.11a	42 337.74 $\pm$ 1 304.97a	34.62 $\pm$ 1.30a	146.76 $\pm$ 7.86a	170.79 $\pm$ 4.79c

本实验结果表明,在中、低浓度(10^{-6} 、 10^{-5} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) Cd^{2+} 胁迫下,叶片SOD和POD活性显著增强,CAT活性变化不显著,这是因为此浓度 Cd^{2+} 胁迫下诱导产生的活性氧大部分被SOD和POD所清除,从而使得CAT活性没有发生太大的变化。这表明在中、低浓度 Cd^{2+} 胁迫下,玉米幼苗叶片中的SOD和POD对抵抗 Cd^{2+} 胁迫起到了积极的作用。 Cd^{2+} 胁迫 15 d后,玉米幼苗叶片的抗氧化酶活性均呈现下降的趋势,说明随着 Cd^{2+} 胁迫时间的延长,玉米叶片中的活性氧积累过多,从而导致膜脂过氧化加剧,对质膜系统造成伤害,造成细胞内多种功能膜被破坏,抗氧化酶的产生受到抑制,使得3种酶活性均有所降低,最终生理代谢紊乱,直至细胞凋亡。

通过实验还发现,玉米幼苗根中3种抗氧化酶活性的变化因 Cd^{2+} 胁迫浓度的不同而有所不同。在 10^{-6} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫 15 d内,玉米根中SOD、POD的活性均显著上升,而CAT活性仅在处理 10 d时显著升高,这表明,玉米根在对抗 10^{-6} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫引起的氧化胁迫损伤时,SOD和POD的作用强于CAT。在 10^{-5} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫下,玉米根中SOD、CAT的活性显著增强,而POD活性变化不显著,此时,SOD、CAT的活性氧清除作用强于POD。在 10^{-4} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫下,随着胁迫时间的增加,玉米根中SOD、POD的活性均显著下降,而CAT的活性显著上升。以上实验结果表明,在低浓度 Cd^{2+} 胁迫下,玉米幼苗的根主要依靠SOD和POD活性的增强来抵抗 Cd^{2+} 胁迫。随着 Cd^{2+} 胁迫浓度的升高,POD活性逐渐减弱,CAT活性逐渐增强。在高浓度 Cd^{2+} 胁迫下,SOD活性降低,仅靠CAT活性的增强已经不能有效清除 Cd^{2+} 胁迫诱导产生的大量氧自由基,从而导致玉米幼苗根部的过氧化伤害。

植物对环境中的 Cd^{2+} 的吸收及在植物不同器官中的分布因不同植物种而异^[16-17],一般植株吸收的Cd大部分积累在根中,只有很少量部分转运到地上部^[18-19]。本试验也得到了类似结果,玉米幼苗叶片及根中的 Cd^{2+} 含量显著高于对照植株,且随着培养液中 Cd^{2+} 浓度的升高而增加,同时,玉米根中积累的Cd明显高于叶片中Cd浓度。Cd之所以主要集中在根部,可能是Cd进入根皮的细胞后,与细胞内的蛋白质、多糖、核酸等化合,形成稳定的大分子络合物或不溶性有机大分子而沉积下来的原因^[4-5]。

重金属对植物的毒害机理之一是干扰植物对养分的吸收,进而破坏植物体内的养分平衡,影响植物的正常生长^[20-21]。目前,关于Cd对Fe、Zn、Cu、Mg等矿质元素吸收影响的报道,因植物种类及Cd处理浓度不同而异^[22-28]。大多数学者认为,Cd²⁺作为一种重金属离子,或与植物必需营养元素竞争根部的吸收位点,进而影响植物对矿质元素的吸收^[23-25];或通过影响细胞质膜透性来影响矿质元素的吸收,改变矿质元素的浓度和组成^[6]。本研究结果表明,玉米叶片中的Fe、Cu含量没有出现明显变化,而根中Fe、Cu、Zn3种元素含量显著增加,Fe含量增加最多;这种变化主要是因为根浸泡在不同浓度 Cd^{2+} 培养液中,Cd严重影响根部细胞质膜的选择透过性,致使大量的Fe、Cu、Zn进入根部组织中。中、低浓度处理组(10^{-6} 、 10^{-5} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的叶片中Fe、Cu、Zn含量没有出现明显变化,高浓度组(10^{-4} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)叶片中Zn含量明显增加,说明中、低浓度Cd胁迫未能对玉米地上部分的组织造成损伤,而高浓度Cd胁迫对地上部分组织产生了一定的影响,这与MDA含量及抗氧化酶活性变化结果具有一致性。另外,随着 Cd^{2+} 浓度的升高,玉米幼苗中的Mg

含量先增加后降低。不同植物体内的含 Mg 量各异, 生长初期 Mg 大多存在于叶片中, 到了结实期则转移到种子中, 以植酸盐的形态储存。Mg 在植株韧皮部中的移动性强, 储存在营养体或其他器官中的 Mg 可以被重新分配和再利用。在整个培养 15 d 期间, $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下玉米叶片比其他各组都要绿, 这与我们测定的 Mg 含量结果一致。另外, 在中、高浓度 Cd 处理组 (10^{-5} 、 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 经过 15 d 的 Cd 胁迫后, 由于 Cd 毒害叶片已经变黄, 而 Mg 在组织中的移动性强, 可以被重新分配和再利用, 以保护新产生的叶片和其他幼嫩组织, 所以随着 Cd^{2+} 浓度的升高, 玉米幼苗中的 Mg 含量先增加后降低。

4 结论

(1) Cd 胁迫对 MDA 含量和 3 种保护酶活性均有影响。随着 Cd^{2+} 胁迫时间的延长和处理浓度的升高, MDA 含量逐渐增加; SOD、POD、CAT 等保护酶活性先升高后降低。表明 Cd 胁迫使植物体内活性氧积累, 引发生物膜脂过氧化, 从而破坏膜系统的结构和功能。保护酶活性的提高能够清除 Cd 胁迫产生的活性氧, 对玉米幼苗具有保护作用, 但这种保护作用是有其一定限度的。

(2) Cd 胁迫使玉米幼苗叶片及根中的 Cd 含量明显增加, 根部的积累尤其明显。

(3) Cd 胁迫导致玉米幼苗矿质元素吸收紊乱, 进而破坏植物体内的养分平衡, 影响植物的正常生长。中、低浓度 Cd^{2+} 胁迫对玉米幼苗叶片中 Fe、Cu、Zn 吸收影响不显著, 高浓度 Cd^{2+} 促进叶片中 Zn 的吸收, Cd 使根中 Fe、Cu、Zn 3 种元素含量显著增加, Fe 含量增加最多; 根、叶中 Mg 含量随 Cd^{2+} 处理浓度的升高均表现为低促高抑。

参考文献:

- [1] Clemmte R, Walker D J, Roig A, et al. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcollar (Spain)[J]. *Biodegradation*, 2003, 14 (3): 199–205.
- [2] 顾继光, 林秋奇, 胡 韧, 等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 128–133.
GU Ji-guang, LIN Qiu-qi, HU Ren, et al. Heavy metals pollution in soil-plant system and its research prospect[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 128–133.
- [3] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35(4): 525–545.
- [4] Sanità L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105–130.
- [5] 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学报*, 2006, 32(1): 1–8.
ZHANG Jun, SHU Wen-sheng. Mechanisms of heavy metal cadmium tolerance in plants[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1): 1–8.
- [6] Suzuki N, Koizumi N, Sano H. Screening of cadmium-responsive genes in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Cell Environ*, 2001, 24(11): 1177–1188.
- [7] 孙光闻, 陈日远, 刘厚诚, 等. 镉与植物活性氧代谢[J]. *广东微量元素科学*, 2005, 12(4): 7–10.
SUN Guang-wen, CHEN Ri-yuan, LIU Hou-cheng, et al. Cadmium and active oxygen metabolism of plant[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2005, 12(4): 7–10.
- [8] 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. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 102–106.
- [9] Sneller F E C, Noordover E C M, TenBookum W M, et al. Quantitative relationship between phytochelatin accumulation and growth during prolonged exposure to cadmium in *Silene vulgaris*[J]. *Ecotoxicology*, 1999, 8: 167–175.
- [10] 李风华, 董海合, 杨兆顺, 等. 玉米新品种津单 2 的选育经过及配套栽培技术[J]. *天津农业科学*, 2007, 13(3): 30–31.
LI Feng-hua, DONG Hai-he, YANG Zhao-shun, et al. Breeding process and cultivation techniques of new corn variety Jindan 2[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2007, 13(3): 30–31.
- [11] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 123–274.
ZHANG Zhi-liang, ZHAI Wei-jing. Laboratory guide for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 123–274.
- [12] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Laboratory guide for plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [13] Zhang H Y, Jiang Y N, He Z Y, et al. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(9): 977–984.
- [14] 曹 莹, 黄瑞冬, 曹志强. 铅胁迫对玉米生理生化特性的影响[J]. *玉米科学*, 2005, 13(3): 61–64.
CAO Ying, HUANG Rui-dong, CAO Zhi-qiang. Effects of Pb stress on the physiological and biochemical traits of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(3): 61–64.
- [15] 费 伟, 陈火英, 曹 忠, 等. 盐胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2005, 23(1): 5–9.
FEI Wei, CHEN Huo-ying, CAO Zhong, et al. Effects of salinity stress on physiological characteristics of tomato seedling [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 23(1): 5–9.
- [16] Obata H, Umebayashi M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium[J]. *Journal of*

- Plant Nutrition*, 1997, 20(1):97-105.
- [17] Moreno-Caselles J, Moral R, Perez-Espinosa A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000; 23(2): 243-250.
- [18] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 9: 1337-1350.
- [19] Simon L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(2):341-352.
- [20] Dudka S, Piotrowska M, Terelak H. Transfer of cadmium, lead and zinc from industrially contaminated soil to crop plants a field study[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94: 181-188.
- [21] Ramos I, Esteban E, Lucena J J, et al. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction[J]. *Plant Science*, 2002, 162:761-767.
- [22] 郭 智, 黄苏珍, 原海燕. Cd胁迫对马蔺和鸢尾幼苗生长、Cd积累及微量元素吸收的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2):651-656
GUO Zhi, HUANG Su-zhen, YUAN Hai-yan. Effects of Cd stress on the development, Cd accumulation and microelements absorption of two species of Iris[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):651-656.
- [23] 郭 智, 原海燕, 奥岩松. 镉胁迫对龙葵幼苗光合特性和营养元素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3):824-829
GUO Zhi, YUAN Hai-yan, AO Yan-song. Effect of cadmium on photosynthesis and nutrient elements uptake of *Solanum nigrum* L. seedlings [J]. *Ecology and Environmental Science*, 2009, 18(3):824-829.
- [24] 李景梅, 葛建镛, 冯耀勇, 等. 不同镉水平对菠菜生长及营养元素含量的影响[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2007, 30(4):72-75.
LI Jing-mei, GE Jian-rong, FENG Yao-yong, et al. Effects of different cadmium levels on the growth and nutrient elements in spinach [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2007, 30(4):72-75.
- [25] 何勇强, 陶勤南, 广濑和久, 等. 镉胁迫下大豆中镉与几种微量元素的分布状况[J]. 浙江大学学报, 2000, 26(2):155-156
HE Yong-qiang, TAO QIN-nan, Hirose W, et al. The Distribution of cadmium and several micronutrients in matured soybean plants under cadmium stress[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2000, 26(2):155-156.
- [26] X J Jiang, Y M Luo, Q Liu, et al. Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian Mustard [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:319-324.
- [27] 张 玲, 李俊梅, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系的生理生态变化[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):61-65.
ZHANG Ling, LI Jun-mei, WANG Huan-xiao. Physiological and ecological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) root to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1):61-65.
- [28] 刘建新. 镉胁迫下玉米幼苗生理生态的变化[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3):265-268.
LIU Jian-xin. Physiological and ecological responses of maize seedlings to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3):265-268.