

镉胁迫对油菜根系生理特性的影响

金美芳, 周 杨, 卢 瑛, 黄巧娟

(福建师范大学福清分校 生物与化学工程系 福建 福清 350300)

摘要: 采用水培体系, 对幼苗期油菜根系进行不同浓度(1, 5, 10, 25, 50 mg/L)的 Cd^{2+} 胁迫, 胁迫 1, 3, 6, 9 d 后测定其若干相关生理特性指标, 研究镉对油菜根系生理特性的影响。研究表明: Cd^{2+} 胁迫下油菜根系的电解质相对外渗率、MDA 和游离脯氨酸的含量都随着 Cd^{2+} 处理浓度的增加而增大, 并且各处理浓度与对照差异性显著 ($P < 0.05$); 可溶性蛋白、可溶性糖含量随着 Cd^{2+} 处理浓度的增加先升高后降低, 低浓度(小于 5 mg/L)有明显的促进作用; 且各指标随着处理时间的延长逐渐上升。SOD 酶活性在胁迫 3 d 后, 随浓度和处理时间的延长先升高后降低, APX、CAT 和 POD 酶活性随着 Cd^{2+} 胁迫浓度的升高, 先升高后降低, 但各种抗氧化酶对浓度的敏感性不同, $SOD > APX > CAT > POD$ 。综上所述, 镉胁迫对油菜根系生长有一定的伤害, 使得根系细胞膜透性增加, 膜脂过氧化加重, 根系利用自身渗透调节物质和抗氧化酶活性升高来调节并适应环境, 但是高浓度的镉环境使得根系细胞中积累较多的活性氧等自由基而严重伤害细胞, 可溶性蛋白含量以及抗氧化酶活性下降, 影响根系生长。

关键词: 镉胁迫; 油菜根系; 电解质相对外渗率; 丙二醛; 渗透调节物质; 抗氧化酶活性

中图分类号: S565.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)04-0664-07

Effects of Cadmium Stress on Physiological Property of Roots of *Brassica napus* L.

JIN Mei-fang, ZHOU Yang, LU Ying, HUANG Qiao-juan

(Department of Biology and Chemical Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, China)

Abstract: In this study, water culture method was used to study the effects of different Cd^{2+} concentrations (1, 5, 10, 25, and 50 mg/L) on the roots of *Brassica napus* L. After 1, 3, 6, and 9 d under the Cd^{2+} exposure, the physiological characteristics were measured. The results showed that, the relative electrolyte leakage rate, the malonaldehyde (MDA) and free proline content of the roots of *Brassica napus* L increased with the increasing concentrations of Cd^{2+} , and there were significant ($P < 0.05$) differences among the different treatments; the soluble protein content and soluble sugar content both ascended firstly then declined with the increasing concentrations of Cd^{2+} , lower concentrations (<5 mg/L) of Cd^{2+} had obviously stimulation affection; and the physiological indexes gradually ascended with time under the Cd^{2+} stress. The results also showed that, various antioxidant enzymes' activity also ascended firstly then declined with Cd^{2+} concentrations increasing, and they were sensitive to the Cd^{2+} stress as the following sequences: $SOD > APX > CAT > POD$. So it can be concluded that, cadmium stress is harmful to the growth of roots of *Brassica napus* L., which increased the membrane permeability and membrane lipid peroxidation of cell. The permeability substances

收稿日期: 2012-04-20 修回日期: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170374)、福建省自然科学基金项目(2011J05062)和福建省教育厅项目(JB10199)

作者简介: 金美芳(1978—), 女, 讲师, 硕士, 主要从事植物生理生态研究, E-mail: jinmf2005@163.com。

and the rise of antioxidant enzymes' activity are helpful to adaption to environment ,but higher content of cadmium environment significantly destroys the cell of the roots ,soluble proteins and antioxidant enzymes' activity decline ,finally ,which greatly inhibits the growth of plant roots.

Key words: cadmium stress; roots of *Brassica napus* L.; relative electrolyte leakage rate; osmotic adjustment; malondialdehyde (MDA); antioxidant enzymes activity

近年来,随着工业“三废”排放量的增加,固体废弃物的处理不善,污水灌溉、肥料施用及污泥农用作等使大量镉进入环境。据不完全统计,我国镉污染农田面积达到 2.8×10^5 hm²,每年生产镉含量超标农产品 1.46×10^{10} kg^[1],严重危害着农业生态环境和人民的生活质量,重金属镉污染已成为目前国内外普遍关注的土壤污染问题之一。

镉不是植物生长所必需的元素,土壤重金属镉污染影响到植物生长,同时由于植物中镉离子的富集,含量升高,从而直接危害人类和动物身体健康。镉对植物的毒性很大,含量在3~10 mg/kg(DW)时即产生伤害^[2]。镉能与脂肪、蛋白、光合色素及核酸等反应导致膜脂过氧化、细胞膜损伤、酶失活、代谢降低甚至细胞死亡^[3-4]。玉米幼苗在镉胁迫48 h后,叶绿素a、总叶绿素含量都有下降,叶绿素b的含量及光系统II的活性与最大量子产量在镉胁迫96 h后也有所下降^[5]。水体镉污染不仅抑制植物种子萌发与种胚生长,而且干扰幼苗的生理活动^[6]。镉污染还使得植物光合速率降低,干物质积累减少,渗透调节物质的积累,并影响抗氧化酶活性等等^[7-10]。油菜(*Brassica napus* L.)是我国主要的冬种油料作物之一,在全国大量栽培,种植面积约占油料作物种植面积的1/3,总产量106 t,种植面积和产量均居世界首位^[11]。Larsson等^[12]研究发现2~5 μmol/L的镉处理后油菜根和叶中镉含量都有所升高,根干重、叶面积,叶绿素含量和光系统的光化学量子产量都有显著的降低;杨金凤等^[13]研究土壤外源镉对油菜株高和叶绿素含量的影响;王兴明等^[14]以油菜幼苗为材料研究了镉胁迫对油菜生长及抗氧化酶活性的影响;季立英等^[15]通过萌发率、根长和苗长等指标研究了铅、镉胁迫对油菜生长的影响,曹春信等^[16]以土培的方法研究了土壤镉污染对油菜幼苗光合速率、植株的生物量、植株中N、P、K的含量以及生理特性指标的影响。根系是植物体最重要的营养吸收器官,水分以及营养物质都是通过根系吸收后,运送到植物体的各个部分,根系生长的好坏直接影响地上部分植株的生长及产量。一般来说,镉在植物各器官中的含量由高到低顺序为:根>叶>茎>花>果>籽粒^[17-18]。金美芳等^[19]研究发现当Cd²⁺浓度≥5 mg/L时,对种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数以及幼根根长、根鲜质量、芽长、芽鲜质量都有显著的抑制;幼苗期根系的根长以及根鲜、干质量都随着Cd²⁺浓度的升高和处理时间的延长而降低;根系活力也开始降低。本文拟以油菜根系为研究材料,研究油菜根系在镉胁迫下的生理响应机制,为油菜抗镉品种的选育和油菜的抗镉生理机制更深水平的研究提供一定的理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 材料

种子选用油菜‘101’(购自厦门同安区马巷镇翔安有利蔬菜种苗站)。

1.2 材料培养与处理

挑选大小一致饱满无病害的油菜种子,自来水洗净后用体积分数75%的酒精消毒5 s,然后用200 g/L的高锰酸钾溶液浸泡5 min,流水冲洗干净后置于铺有石英砂的盘中,光照培养箱中进行培养(温度27℃,相对湿度70%,光照时间12 h,光照强度为4 000 lx)。待2片子叶完全展开后挑选生长一致的幼苗,小心的移栽入带有小孔泡沫板架的2 L的塑料小桶中,每桶约8个孔,每孔移栽3~4株,小桶内加入1/4阿夫道宁培养液^[20]继续培养。每天定时通气,先用1/4阿夫道宁营养液培养1周,再换用1/2阿夫道宁培养液培养1周,之后采用全营养液进行培养。每3 d更换1次培养液。培养20 d后,培养液换为体积相同的不同Cd²⁺浓度培养液(用1/2阿夫道宁培养液配制)中胁迫培养,Cd²⁺处理浓度分别为0,1,5,10,25,50 mg/L(以Cd²⁺含量计算,以CdCl₂作为镉源),Cd²⁺处理时间分别为1,3,6,9 d,每个处理做5个重复。

1.3 指标测定与数据处理

从每个处理的5个重复桶中随机抽取数株植株,将根系冲洗干净并擦干并剪下整个根,称重约0.3 g,

按下述各方法提取并测定油菜根系的各生理指标。可溶性糖含量是将选取的根系 105 °C 杀青 15 min , 80 °C 烘干至恒重 , 分别称取 0.05 g 提取测定的。数据处理采用 Excel 软件 , 显著性分析采用 SPSS13.0 软件进行 Duncan 比较。

电解质相对外渗率的测定按照文献 [21] 进行:

$$\text{电解质相对外渗率} = \text{煮沸前电导率} / \text{煮沸后电导率} \times 100\% \quad (1)$$

丙二醛含量的测定参照文献 [22] , 含量用 $\mu\text{mol/g FW}$ 表示。游离脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮比色法 , 用 $\mu\text{g/g FW}$ 表示; 可溶性糖含量测定采用蒽酮法 , 用 mg/g DW 表示; 可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G - 250 法 , 用 mg/g FW 表示 , 测定方法参考邹琦等 [23] 。

超氧化物歧化酶 (SOD) 酶活性用 NBT 法测定 [24] , 以每单位时间内抑制光还原 50% 的氮蓝四唑 (NBT) 作为一个酶活单位 (U) , 酶活性大小用 U/g FW 表示。过氧化氢酶 CAT 活性的测定参照高锰酸钾方法测定 [23] , 以每 g 鲜质量样品 1 min 内分解 H_2O_2 的 mg 为一个酶活力单位 , 用 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min}) \text{FW}$ 表示。过氧化物酶 POD 活性测定采用愈创木酚法进行 , 酶活性单位用每分钟 OD 值变化 0.01 作为一个酶活性单位 , $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min}) \text{FW}$ 表示 [25] 。抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的测定参照沈文飏等 [26] 的方法 , 以室温下每分钟氧化 1 mol AsA 的酶量作为一个酶活性单位 , $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min}) \text{FW}$ 表示。

2 实验结果

2.1 镉胁迫对油菜根系电解质相对外渗率和丙二醛含量的影响

由表 1 可以看出 油菜根系的电解质相对外渗率随着镉处理浓度的增加而增大 当 Cd^{2+} 浓度大于 5 mg/L 时 , 各处理浓度与对照差异性显著 ($P < 0.05$) 。处理 1 d , 电解质相对外渗率比对照分别增加了 5.59% 、 20.83% 、 27.63% 、 44.30% 和 64.47% 。另外 随着 Cd^{2+} 处理时间的延长 , 电解质相对外渗率先升高后降低 , 处理 6 d 后达到最高值。

油菜幼苗根系中的 MDA 含量与镉浓度成正相关关系 , 即随着 Cd^{2+} 浓度的升高 , MDA 的含量呈明显的上升趋势 ($P < 0.05$) , 并且随着处理时间的延长 , 各处理浓度下 MDA 的含量也是逐渐上升 (表 1) 。50 mg/L 时 , Cd^{2+} 胁迫 9 d MDA 的含量达到最大值 , 比对照提高了 82.45% 。说明镉处理浓度越高处理时间越长油菜根系中丙二醛含量越高 , 细胞膜脂过氧化的程度越高。

表 1 镉胁迫对油菜根系电解质相对外渗率和丙二醛含量的影响

Tab. 1 Effect of cadmium stress on the relative electrolyte leakage rate and MDA content in roots of *Brassica napus* L.

指标类型 Pointertype	Cd^{2+} 浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cd^{2+} concentration	测定时间 / d Stress time			
		1	3	6	9
电解质相对外渗率 / % The relative electrolyte leakage rate	0	9.12 ± 0.64 ^d	9.34 ± 1.04 ^b	9.21 ± 0.63 ^c	9.54 ± 0.20 ^c
	1	9.63 ± 0.42 ^{dc}	9.86 ± 0.37 ^b	10.09 ± 0.69 ^{bc}	10.00 ± 1.38 ^c
	5	11.02 ± 1.30 ^c	10.59 ± 0.58 ^b	11.36 ± 0.72 ^b	10.73 ± 1.50 ^b
	10	11.64 ± 1.18 ^c	10.75 ± 0.83 ^b	12.03 ± 1.16 ^a	11.46 ± 1.02 ^b
	25	13.16 ± 1.52 ^b	12.67 ± 0.61 ^a	12.85 ± 1.28 ^a	11.63 ± 0.62 ^b
	50	15.00 ± 1.75 ^a	13.54 ± 2.54 ^a	13.18 ± 1.29 ^a	13.03 ± 1.00 ^a
丙二醛含量 / ($10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$) FW	0	4.51 ± 0.49 ^a	4.76 ± 1.03 ^a	4.96 ± 0.06 ^a	5.99 ± 0.28 ^a
	1	5.49 ± 0.44 ^{ab}	5.65 ± 0.38 ^{ab}	5.89 ± 0.03 ^b	6.97 ± 0.52 ^b
MDA content	5	5.93 ± 0.37 ^b	6.48 ± 0.6 ^b	6.53 ± 0.71 ^b	8.16 ± 0.20 ^c
	10	6.44 ± 0.07 ^b	6.52 ± 0.33 ^b	8.25 ± 0.29 ^c	8.32 ± 0.25 ^c
	25	7.56 ± 0.69 ^c	8.15 ± 0.61 ^c	8.31 ± 0.14 ^c	8.91 ± 0.47 ^c
	50	8.06 ± 0.20 ^c	9.07 ± 0.19 ^c	9.75 ± 0.34 ^d	10.93 ± 0.54 ^d

数据表示为平均值 ± 标准偏差 , 同一列的不同字母表示经 Duncan 比较各浓度之间差异 ($P < 0.05$) 。

Data show as Mean ± S D , The different letters indicate the significant difference among the different concentration by Duncan compare ($P < 0.05$) .

2.2 镉胁迫对油菜根系渗透调节物质的影响

镉胁迫对油菜根系有机渗透调节物质有一定的影响。如表2所示,随着 Cd^{2+} 处理浓度的升高,油菜根系游离脯氨酸含量逐渐升高,且各浓度之间显著差异($P < 0.05$)。胁迫1 d,其含量分别为对照的1.3、1.6、2.0、2.7、3.2倍。游离脯氨酸的含量还随时间的延长而增高, Cd^{2+} 浓度25 mg/L时,随胁迫时间的延长其含量与第1天相别分别升高了35.8%、30.6%和26.7%。说明镉胁迫浓度与胁迫时间对油菜根系脯氨酸含量有明显的影响。

油菜根系可溶性糖含量随着 Cd^{2+} 胁迫浓度的提高,呈先上升后下降的趋势,且各浓度间存在显著差异($P < 0.05$)但均高于不作胁迫的。随胁迫时间延长油菜根系可溶性糖含量也是呈先上升后下降的趋势, Cd^{2+} 浓度为5 mg/L时油菜根系可溶性糖含量达到最大值,胁迫1、3、6、9 d后与不作胁迫的相比较分别上升了50.3%、88.6%、70.1%和110.9%。

可溶性蛋白含量表现了不同的变化趋势,油菜根系可溶性蛋白含量随着 Cd^{2+} 浓度的升高呈现先升高后下降再升高再下降的趋势,结果如表2所示。但是各胁迫浓度下可溶性蛋白含量显著高于对照的($P < 0.05$)。 Cd^{2+} 浓度 ≤ 5 mg/L时,对油菜根系中可溶性蛋白含量具有明显的浓度促进作用。另外,随胁迫时间的延长油菜根系可溶性蛋白含量也呈上升趋势。

表2 镉胁迫对油菜根系渗透调节物质的影响

Tab.2 Effects of different cadmium concentration stress on osmoregulation substance in roots of *Brassica napus* L.

指标类型 Pointertype	Cd^{2+} 浓度/(mg · L ⁻¹) Cd^{2+} concentration	胁迫时间/d Stress time			
		1	3	6	9
游离脯氨酸含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) FW Free proline content	0	15.11 ± 0.91 ^a	23.23 ± 1.32 ^a	32.20 ± 1.15 ^a	46.48 ± 1.13 ^a
	1	19.83 ± 0.84 ^b	27.37 ± 0.98 ^b	39.63 ± 1.32 ^b	54.54 ± 0.95 ^b
	5	24.24 ± 1.04 ^c	34.59 ± 0.84 ^c	45.47 ± 1.01 ^c	62.77 ± 0.99 ^c
	10	30.13 ± 0.68 ^d	41.59 ± 1.15 ^d	51.10 ± 1.08 ^d	69.57 ± 0.59 ^d
	25	40.58 ± 1.53 ^e	55.13 ± 1.40 ^e	72.01 ± 0.92 ^e	91.22 ± 1.11 ^e
	50	48.65 ± 1.55 ^f	64.05 ± 1.04 ^f	79.38 ± 0.29 ^f	100.09 ± 0.98 ^f
可溶性糖含量/ (mg · g ⁻¹) DW Soluble sugar content	0	50.48 ± 2.19 ^a	59.56 ± 1.69 ^a	74.34 ± 2.66 ^a	48.88 ± 1.45 ^a
	1	64.54 ± 2.06 ^b	77.15 ± 2.32 ^d	90.16 ± 2.69 ^c	71.76 ± 2.17 ^d
	5	75.86 ± 1.82 ^c	112.33 ± 2.06 ^f	126.47 ± 2.17 ^e	103.09 ± 1.45 ^f
	10	73.13 ± 1.95 ^d	82.37 ± 2.06 ^e	98.92 ± 2.43 ^f	84.28 ± 1.69 ^e
	25	70.64 ± 2.17 ^c	74.66 ± 2.17 ^c	93.29 ± 2.17 ^d	64.46 ± 1.57 ^c
	50	62.85 ± 2.22 ^b	69.19 ± 2.17 ^b	85.58 ± 1.69 ^b	55.62 ± 2.06 ^b
可溶性蛋白含量/ (mg · g ⁻¹) FW Soluble protein content	0	5.18 ± 0.02 ^a	5.78 ± 0.06 ^a	6.81 ± 0.01 ^a	8.42 ± 0.01 ^a
	1	5.94 ± 0.04 ^b	6.49 ± 0.09 ^{bc}	7.77 ± 0.02 ^c	9.12 ± 0.06 ^b
	5	6.59 ± 0.06 ^c	7.55 ± 0.01 ^d	8.72 ± 0.04 ^d	10.44 ± 0.04 ^c
	10	6.07 ± 0.06 ^b	6.34 ± 0.05 ^b	7.17 ± 0.01 ^b	8.90 ± 0.02 ^b
	25	7.30 ± 0.03 ^d	8.88 ± 0.06 ^e	9.24 ± 0.03 ^e	10.63 ± 0.08 ^c
	50	5.83 ± 0.02 ^b	6.77 ± 0.01 ^c	8.69 ± 0.04 ^d	9.06 ± 0.01 ^b

数据表示为平均值 ± 标准偏差,同一列的不同字母表示经 Duncan 比较各浓度之间差异($P < 0.05$)。

Data show as Mean ± SD, the different letters indicate the significant difference among the different concentration by Duncan compare($P < 0.05$).

2.3 镉胁迫对油菜根系中 SOD、POD、CAT 和 APX 酶活性的影响

如表3所示,随着镉处理浓度的升高,油菜根系中 SOD 酶活性在胁迫1 d 是逐渐升高的,胁迫3 d 后,呈先升高后下降的趋势,且随着胁迫时间的延长,各浓度下的酶活性先升高后下降。POD、CAT 和 APX 酶活性一样都呈现先升高后下降的变化趋势。当 Cd^{2+} 浓度为25 mg/L时,POD 酶活性达到最大值。处理1 d 时,POD 酶活在各浓度间没有显著性差异,处理3 d 后,各浓度间的 POD 酶活性有了显著

的变化 ($P < 0.05$) , 处理到 6 d 后 , 其差异明显降低。CAT 酶的活性则在 Cd^{2+} 浓度为 5 mg/L 开始上升 , 当 Cd^{2+} 浓度大于或等于 25 mg/L 时 , 其活性随浓度的增加而下降。当 Cd^{2+} 浓度为 1 mg/L 时 , APX 酶活性最高 , 且各间存在显著差异 ($P < 0.05$) , 处理 9 d 时 , APX 酶的活性达到最高值 , 比对照提高了 39.62%。当 Cd^{2+} 浓度大于 1 mg/L 时 , 随着 Cd^{2+} 浓度的升高 , 油菜幼苗根系中的 APX 酶活性迅速下降 ($P < 0.05$) , 当 Cd^{2+} 浓度等于或大于 10 mg/L 时 , APX 酶活性明显低于对照组的。

表 3 镉胁迫对油菜根系 SOD、POD、CAT 和 APX 酶活性的影响

Tab. 3 Effects of cadmium stress on SOD、POD、CAT and APX enzymes activities in roots of *Brassica napus* L.

指标类型 Pointertype	Cd^{2+} 浓度/(mg · L ⁻¹) Cd^{2+} concentration	胁迫时间/d Stress time			
		1	3	6	9
SOD 酶活性/ (U · g ⁻¹) FW SOD enzyme activity	0	98.12 ± 5.64 ^a	97.84 ± 4.53 ^a	105.17 ± 3.12 ^a	109.15 ± 3.26 ^b
	1	101.1 ± 4.53 ^a	110.32 ± 3.13 ^a	132.68 ± 5.06 ^b	141.84 ± 5.36 ^c
	5	108.32 ± 4.21 ^a	126.41 ± 5.06 ^b	150.36 ± 0.70 ^c	181.73 ± 3.44 ^d
	10	123.35 ± 6.24 ^b	158.78 ± 5.76 ^d	194.62 ± 4.58 ^d	137.76 ± 5.43 ^c
	25	130.25 ± 2.86 ^b	142.63 ± 2.17 ^c	178.53 ± 4.14 ^c	107.65 ± 3.19 ^b
	50	145.34 ± 3.69 ^c	135.64 ± 5.78 ^{bc}	156.34 ± 2.74 ^{de}	90.15 ± 7.27 ^a
POD 酶活性/ (10 ² U · g ⁻¹ · min ⁻¹) FW POD enzyme activity	0	68.61 ± 7.54 ^a	69.94 ± 1.23 ^b	77.17 ± 8.47 ^a	96.15 ± 4.20 ^a
	1	67.14 ± 4.23 ^a	72.32 ± 1.31 ^c	77.80 ± 1.06 ^{ab}	101.84 ± 4.26 ^a
	5	69.62 ± 2.94 ^a	76.71 ± 1.06 ^d	84.36 ± 0.70 ^{ab}	111.73 ± 3.64 ^b
	10	71.38 ± 1.75 ^a	80.78 ± 0.76 ^e	85.62 ± 2.58 ^{abc}	117.76 ± 6.43 ^b
	25	80.45 ± 1.86 ^a	84.36 ± 1.27 ^f	94.53 ± 8.00 ^{bc}	137.65 ± 1.93 ^d
	50	67.34 ± 3.27 ^a	67.46 ± 0.78 ^a	87.34 ± 2.74 ^c	128.15 ± 7.72 ^c
CAT 酶活性/ (mg · g ⁻¹ · min ⁻¹) FW CAT enzyme activity	0	33.53 ± 2.95 ^b	34.00 ± 3.75 ^{ab}	35.89 ± 2.16 ^{ab}	38.72 ± 2.95 ^{ab}
	1	31.64 ± 3.27 ^{ab}	33.53 ± 3.56 ^{ab}	35.86 ± 2.94 ^{ab}	36.83 ± 1.42 ^a
	5	37.31 ± 3.56 ^b	39.19 ± 3.56 ^b	40.61 ± 4.55 ^b	41.55 ± 2.16 ^b
	10	34.4 ± 2.94 ^b	39.67 ± 4.25 ^b	41.55 ± 3.56 ^b	42.03 ± 1.64 ^b
	25	31.64 ± 3.56 ^{ab}	34.94 ± 4.33 ^{ab}	35.89 ± 1.64 ^{ab}	39.67 ± 3.74 ^{ab}
	50	27.39 ± 1.64 ^a	31.64 ± 1.63 ^a	31.64 ± 3.56 ^a	36.83 ± 1.42 ^a
APX 酶活性/ (10 ² U · g ⁻¹ · min ⁻¹) FW APX enzyme activity	0	17.62 ± 2.18 ^c	21.90 ± 2.18 ^{cd}	22.86 ± 1.42 ^{cd}	25.23 ± 3.29 ^{cd}
	1	25.71 ± 4.29 ^d	27.14 ± 5.15 ^d	33.33 ± 2.13 ^e	35.23 ± 5.94 ^e
	5	20.47 ± 2.14 ^c	23.81 ± 5.01 ^d	26.19 ± 2.21 ^d	30.47 ± 5.94 ^{de}
	10	10.47 ± 2.97 ^b	15.72 ± 4.28 ^{bc}	18.75 ± 2.85 ^{bc}	20.00 ± 3.77 ^{bc}
	25	8.09 ± 2.18 ^{ab}	10.48 ± 2.11 ^{ab}	14.28 ± 3.77 ^b	15.71 ± 2.85 ^b
	50	4.76 ± 2.91 ^a	4.76 ± 3.59 ^a	6.19 ± 1.97 ^a	6.67 ± 5.94 ^a

数据表示为平均值 ± 标准偏差 , 同一列的不同字母表示经 Duncan 比较各浓度之间差异 ($P < 0.05$) 。

Data show as Mean ± SD , the different letters indicate the significant difference among the different concentration by Duncan compare ($P < 0.05$) .

3 结论与讨论

土壤重金属污染日益严重 , 严重影响植物的生长。本实验结果表明 , 镉胁迫下油菜根系的电解质相对外渗率、MDA 和游离脯氨酸的含量都随着镉处理浓度的增加而增大 , 并且各处理浓度与其对照间差异性显著 ($P < 0.05$) , 说明镉胁迫对油菜根系细胞膜结构有所损伤 , 随着镉胁迫浓度和时间的延长 , 对根系细胞膜结构完整性破坏越严重 , 膜脂过氧化程度加深 , 细胞内酶及代谢作用的区域受到严重破坏 , 胞内物质外流 , 植物受害严重。

油菜根系可溶性糖含量 , 在镉胁迫环境中呈现低促高抑的现象 , 这与张义贤和李晓科^[27] 研究镉、铅

及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响中可溶性糖含量变化趋势相似。油菜根系可溶性蛋白含量随着 Cd^{2+} 浓度的升高呈现先升高后下降再升高再下降的趋势,且与对照存在显著差异($P < 0.05$),这与陈菲^[28]的研究结果相似。本研究中当 Cd^{2+} 浓度 ≤ 5 mg/L 时,对油菜根系中可溶性蛋白含量明显升高,10 mg/L 时,可溶性蛋白含量稍有降低,镉浓度到 25 mg/L 时,其含量又升高,之后再降低,可能是因为低浓度的镉胁迫对油菜根系中可溶性蛋白的合成促进作用,当浓度等于大于 10 mg/L 时,根系受到胁迫蛋白的合成有一个适应环节,之后蛋白迅速合成来适应或抵抗重金属胁迫,当浓度过高时,植物细胞质膜受损严重,膜脂过氧化加大,细胞内活性氧自由基增多,细胞合成代谢受到影响,蛋白水解,可溶性蛋白含量下降,游离脯氨酸含量升高,另外高浓度的镉对蛋白合成的众多酶系均有毒害和纯化作用,并且会使蛋白质合成的相关细胞器受到损伤,抑制了新蛋白的合成。

抗氧化酶是植物清除自由基适应环境的一类保护性酶系统,是植物细胞中由于重金属的增加而产生的过多的活性氧的淬灭剂^[29]。本研究结果表明:油菜幼苗根系中 SOD 酶活性在胁迫第 1 天是逐渐升高的,胁迫 3 d 后,呈先升高后下降的趋势,且随着胁迫时间的延长酶活性先升高后下降。可能是因为 SOD 是清除活性氧的主要酶,镉胁迫后根中活性氧增多, SOD 立即作出响应清除。POD、CAT 和 APX 酶活性随着镉处理浓度的升高,其活性都呈现先升高后下降的变化趋势,随着 Cd^{2+} 处理时间的延长,其酶活性呈现逐渐升高的趋势。从实验结果得出各抗氧化酶对镉胁迫的敏感性不同,依次为 $\text{SOD} > \text{APX} > \text{CAT} > \text{POD}$ 。

综上所述,镉胁迫对油菜根系生长有一定的伤害,使得根系细胞膜透性增加,膜脂过氧化加重,植物体中活性氧等自由基增多,因此 SOD、APX、CAT 和 POD 酶活性升高清除这些自由基,保护细胞;植物根系利用自身游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量的变化来调节渗透势进而增强植物的抗逆性。但是随着镉胁迫浓度的升高油菜根系产生较多的自由基,根系细胞来不及清除而严重伤害细胞,表现出细胞中游离脯氨酸急剧上升,细胞蛋白质的合成受损导致蛋白质含量下降,同时其抗氧化酶的合成机制可能也受到一定程度的破坏,抗氧化酶活性降低,根系中的活性氧等自由基积累更多,最终导致膜结构破坏,细胞死亡,根系生长缓慢甚至死亡。

参考文献:

- [1] Wang K R. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farm land soils [J]. *Acta Biotechnologica*, 2002, 22(1): 189-198.
- [2] Polle A, Schtitzendtibbel A. Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses [M] // Hirt H, Shinozaki K. Plant responses to abiotic stresses. topics in current genetics. Berlin: Springer Verlag 2003, 4: 167-215.
- [3] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1968, 125(1): 189-198.
- [4] Hegedüs A, Erdei S, Horvath G. Comparative studies of H_2O_2 detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress [J]. *Plant Science*, 2001, 160(6): 1085-1093.
- [5] Wang H, Zhao S C, Liu R L, et al. Changes of photosynthetic activities of maize (*Zea mays* L.) seedlings in response to cadmium stress [J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(2): 277-283.
- [6] 樊明琴, 李焰焰, 苗杰, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *安徽农业科技*, 2010, 38(26): 14239-14241.
- [7] 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.
- [8] 刘会超, 刘孟刚, 姚连芳, 等. 镉胁迫对银条生物量及光合特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2010, 25(4): 162-165.
- [9] 张磊, 于燕玲, 张磊. 外源镉胁迫对玉米幼苗光合特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2008, 3(1): 101-104.
- [10] 程杰, 高压军. 镉毒害对小麦生理生态效应的研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 218-221, 227.
- [11] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应 [J]. *山西大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(4): 410-413.
- [12] Larsson E H, Bornman J F, Hakan A. Influence of UV-B radiation and Cd^{2+} on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(323): 1031-1039.
- [13] 杨金凤, 卜玉山, 郭小燕, 等. 土壤外源镉、铅污染对油菜生长的影响研究 [J]. *陕西农业科学*, 2005(3): 25-28.
- [14] 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.
- [15] 季丽英, 肖昕, 冯启言. 铅(Pb)和镉(Cd)对油菜幼苗的影响 [J]. *现代农业科技*, 2006(3): 48-49.

- [16]曹春信,袁名安,刘新华.油菜对镉胁迫的响应及其产地环境安全临界值[J].江西农业学报,2011,23(2):24-26.
- [17]许嘉琳,杨居荣.陆地生态系统中的重金属[M].北京:中国环境科学出版社,1995:123-132.
- [18]周炎,罗安程.土壤和植物中镉的污染及防治[J].环境污染与防治,1996,18(6):19-21.
- [19]金美芳,林明凤,施翔.镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J].种子,2011,30(10):70-73.
- [20]金玲.小白菜水培营养液配方筛选[J].河南农业科学,2007(9):82-85.
- [21]邹琦.植物生理生化实验指导[M].北京:中国农业出版社,1995:94-96.
- [22]赵世杰.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.
- [23]邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:78-80,167-168.
- [24]张志良.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:123-124.
- [25]常福辰,陆长梅,沙莎.植物生物学实验[M].南京:南京师范大学出版社,2007:126-127.
- [26]沈文彪,徐良菜.抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨[J].植物生理学通讯,1996,32(3):203-205.
- [27]张义贤,李晓科.镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J].植物研究,2008,28(1):43-46,53.
- [28]陈菲.低温胁迫对矮斗菜脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响[J].北方园艺,2011,5:29-31.
- [29]Radotic K, Ducic T, Mutavdzic D. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium[J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(2):105-113.

(上接第 651 页)

- [3]马树庆.吉林农业气候研究[M].北京:北京气象出版社,1994:33.
- [4]魏瑞江,宋迎波,王鑫.基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J].应用气象学报,2009,20(5):622-627.
- [5]魏瑞江,张文宗,李二杰.河北省冬小麦生育期气象条件定量评价模型[J].中国农业气象,2007,28(4):367-370.
- [6]吴利红,娄伟平,柳苗,等.油菜花期降水适宜度变化趋势及风险评估[J].中国农业科学,2011,44(3):620-626.
- [7]傅军栋,刘遵雄,张德运.使用小波多孔算法提高网络业务流自相似参数求解精度[J].江西农业大学学报,2005,27(6):920-924.
- [8]Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1992, 24:395-457.
- [9]White M A, Schmidt J C, Topping D J. Application of wavelet analysis for monitoring the hydrological effects of dam operation: Glen Canyon dam and the Colorado River at Lees Ferry, Arizona[J]. River Research and Applications, 2005, 21(5):551-565.
- [10]Lange I A, Steel E A. Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales effects of multi-purpose dams in the Willamette River basin[J]. River Research and Applications, 2007, 23(4):351-359.
- [11]李春强,杜毅光,李保国.1965—2005年河北省降水量变化的小波分析[J].地理科学进展,2010,29(11):1340-1344.
- [12]黄强,赵雪花.河川径流时间序列分析预测理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,2008:127-142.
- [13]赖纯佳,千怀遂,段海来,等.淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势[J].生态学杂志,2009,28(11):2339-2346.
- [14]刁操铨.作物栽培学各论(南方本)[M].北京:中国农业出版社,2002:82-83.
- [15]赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度模型研究[J].资源科学,2003,25(6):77-82.
- [16]陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:109,122.
- [17]黄璜.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适宜性研究[J].自然资源学报,1996,11(4):341-345.
- [18]Ippolitov I I, Kabanov M V, Loginov S V. Wavelet analysis of hidden periodicities in some indexes of solar activity[J]. Russian Physics Journal, 2002, 45(11):1086-1092.
- [19]Mi X C, Ren H B, Ouyang Z S, et al. The use of the Mexican hat and the Morlet wavelets for detection of ecological patterns[J]. Plant Ecology, 2005, 179(1):1-19.
- [20]黄晓清,唐叔乙,罗布次仁,等.近47年雅鲁藏布江中游地区汛期降水的小波分析[J].气象,2010,36(12):68-73.