

Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根种子萌发及 幼苗抗氧化酶活性的影响

孟红梅, 张芬琴, 韩多红, 罗寅卯
(河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 研究了 Cd²⁺ (10 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹) 胁迫下不同浓度 Ca²⁺ (0、80、160、320 mg·L⁻¹) 对板蓝根种子萌发、幼苗抗氧化酶系统及蛋白质含量的影响。结果表明: 低浓度 Ca²⁺ (80、160 mg·L⁻¹) 可缓解 Cd²⁺ 毒害, 显著提高板蓝根种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数, 促进蛋白质含量的增加, 提高 SOD、POD、CAT 活性, 且 160 mg·L⁻¹ Ca²⁺ 缓解效果最好, 缓解能力随 Cd²⁺ 浓度的升高有所下降; 高浓度 Ca²⁺ (320 mg·L⁻¹) 与 Cd²⁺ 作用, 反而抑制了板蓝根种子的萌发, 幼苗的 POD、SOD、CAT 活性及蛋白质含量下降。低浓度 Ca²⁺ 可以显著提高板蓝根的抗性, 对 Cd²⁺ 毒害起缓解作用, 高浓度的 Ca²⁺ 与 Cd²⁺ 对板蓝根种子起协同毒害作用。

关键词: 板蓝根; 镉; 钙; 种子萌发; 抗氧化酶系统
中图分类号: Q949.95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0161-05

The effect of Ca²⁺ on *Radix isatidis* seed germination and seedling physiological characteristics under Cd²⁺ stress

MENG Hong-mei, ZHANG Fen-qin, HAN Duo-hong, LUO Yin-mao
(College of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: This study aims to investigate the effect of different Ca²⁺ levels (0, 80, 160 mg·L⁻¹ and 320 mg·L⁻¹) on seed germination, activities of SOD, POD, and CAT, and protein content of *Radix Isatidis* seedlings under different Cd²⁺ stress levels (10 mg·L⁻¹ and 30 mg·L⁻¹). The results show that low concentration of Ca²⁺, especially the concentration of 160 mg·L⁻¹, may mitigate the deleterious effect of Cd²⁺ by increasing germination rate and vigour index, and enhancing activities of SOD, POD, and CAT, and increasing protein content. The influence of Ca²⁺ on the Cd²⁺ toxicity was not obvious at high Cd²⁺ concentration because of the inhibition of the above indexes. These results suggest that the low concentration of Ca²⁺ could be favorable for coping with Cd²⁺ toxicity, whereas high concentration of Ca²⁺ shows synergistic effect with Cd²⁺ for *Radix Isatidis*.

Keywords: *Radix isatidis*; Cd²⁺; Ca²⁺; seed germination; antioxidant enzymes

由于人口的剧增以及工业化的发展和城市化的进程,大量含有重金属的工业废水、废渣和生活垃圾进入土壤,给农业生产和人类的健康带来了很大的潜在的危 险。Cd²⁺ 与其他重金属相比,具有毒性强和迁移性强的特点。在 Cd²⁺ 胁迫下,植物的水分吸收、光合、呼吸作用等都受到抑制;同时也会导致植物体内活性氧自由基水平急剧上升,当这种自由基超出植物体活性氧清除酶清除能力时,氧自由基将会对植物代谢产生危害,进而使植物生长发育受到影响,严重时导致植物死亡^[1]。

Ca²⁺ 是植物必需的一种矿质营养元素,对于维持细胞壁、细胞膜及膜结合蛋白的稳定性、调节无机离子运输、作为细胞内生理生化反应的第二信使偶联胞外信号、调控多种酶活性等起重要作用^[2]。研究表明,施加外源 Ca²⁺ 可以增强植物对许多非生物逆境的适应性,减轻逆境对植物所造成的伤害。

板蓝根为十字花科菘蓝属植物菘蓝 (*Isatis indigotica* For) 的干燥根,性寒味苦,有清热解毒、凉血消肿的功效^[3]。具有抗菌、抗病毒、抗内毒素、抗炎、增强免疫^[4]、抗乙型肝炎等多种作用^[5]。由于重金

收稿日期:2013-05-06
基金项目:河西学院青年教师科研基金项目 (No. QN2012-13)
作者简介:孟红梅 (1975—),女,甘肃张掖人,讲师,主要从事植物逆境生理方面的研究工作。E-mail:mhm1122@163.com。
通信作者:韩多红 (1977—),男,甘肃张掖人,副教授,主要从事植物资源学方面的研究工作。

属的污染,中药材的重金属含量严重超标,不仅制约了中药材的出口,而且危害到人体健康^[6]。本试验选择大宗药材之一的板蓝根为研究材料,研究不同浓度 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根种子萌发及早期幼苗生理特性的缓解作用,以期阐明 Ca^{2+} 缓解 Cd^{2+} 胁迫的机制,为 Cd^{2+} 污染的修复及板蓝根的安全栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验所用板蓝根种子购买于种子市场。千粒质量 9.163 g,种子含水量为 10.35%。取健壮饱满的

板蓝根种子用 0.1% 的 HgCl_2 消毒 5 min,蒸馏水冲洗 3 次。各取 30 粒,放入铺有滤纸的 10 cm 的培养皿中(种子预处理:在 20℃ 水中浸泡 6 h),在 20℃ 光照培养箱中培养,每个处理设 3 个重复,每隔 24 h 更换处理液一次,以保证处理液浓度不变,每天统计发芽的种子数,培养 7 d 后计算发芽指标。另选择发芽势一致、刚刚萌动的种子播于育苗盘内,置于室内砂基培养,至二叶期开始处理,每个处理设 3 个重复,处理 4 d 后取地上部分进行指标测定。所用药品为分析纯硝酸镉($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)和氯化钙(CaCl_2),不同浓度的重金属以纯镉、钙计,浓度设计以预备试验确定,浓度设置见表 1。

表 1 处理液浓度
Table 1 Concentrations of Ca^{2+} and Cd^{2+}

处理 Treatment	Ca^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	第 7 天苗重/($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) Dry mass of seedling on 7th day($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	处理 Treatment	Cd^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	第 7 天苗重/($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) Dry mass of seedling on seventh day/($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)
CK	0	0	0.59	M1 + N1	10	80	0.44
M1	0	10	0.47	M1 + N2	10	160	0.45
M2	0	30	0.42	M1 + N3	10	320	0.41
N1	80	0	0.70	M2 + N1	30	80	0.31
N2	160	0	0.60	M2 + N2	30	160	0.29
N3	320	0	0.55	M2 + N3	30	320	0.31

1.2 方 法

1.2.1 千粒质量、含水量的测定 千粒质量测定^[7]:挑取饱满、大小一致的种 3 000 粒,然后随机取 1 000 粒称重,重复 3 次,取其平均值,即为种子的千粒质量。

含水量的测定^[7]:用烘干称重法。在电子天平上称取 3 份板蓝根种子,每份 1.000 g,放入 105℃ 的烘箱中,经 10 h 后烘干至衡重,移入干燥器内冷却至室温,并称重。

1.2.2 发芽指标的测定^[8] 发芽率(GR) = 7 d 内正常发芽的种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽势(GP) = 4 d 内正常发芽的种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽指数(GI) = $\sum G_t/D_t$,其中 G_t 为 t 时间内的发芽数, D_t 为相应的发芽天数;

活力指数(VI) = $W \times GI$ (W 为第 7 天平均株鲜重)。

1.2.3 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定^[9] 采用氮蓝四唑(NBT)法,单位 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ FW。

1.2.4 过氧化物酶(POD)活性的测定^[9] 采用愈创木酚法,单位 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ FW。

1.2.5 过氧化氢酶(CAT)活性测定^[9] 采用紫外

分光光度法,单位 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ FW。

1.2.6 蛋白质含量的测定^[9] 采用考马斯亮蓝法,单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根种子萌发的影响

发芽率能反映种子的出苗率,发芽势可表明种子活力的高低,两者均可指示种子出苗的好坏,而发芽指数和活力指数可反映胁迫对种子品质的影响程度^[10]。由表 1 可知, M1 和 M2 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均显著低于 CK 对照 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, M1 和 M2 的发芽率分别下降 39.7%、48.2%;发芽势分别下降 13.9%、23.2%;发芽指数分别下降 27.9%、36.9%;活力指数分别下降 42.5%、55.2%。由此看出 Cd^{2+} 对板蓝根种子萌发的抑制作用随 Cd^{2+} 浓度的增加而增强。N1、N2、N3 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数与 CK 对照相比表现为: N1、N2 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数略高于 CK 对照,但差异不显著; N3 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数显著低于 CK 对照,分别下降了 22.9%、20.9%、16.9%、22.2%。由此看出较低的 Ca^{2+} (0 ~ 160 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对板蓝根种子萌

发具有一定的促进作用,但促进作用不显著,较高浓度的 Ca²⁺ (320 mg·L⁻¹)对板蓝根种子的萌发具有显著的抑制作用。

表 2 Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根种子萌发的影响

Table 2 Effects of calcium on seed germination of <i>Radix isatidis</i> tinctorialis under cadmium stress				
处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index	活力指数 Vitality index
CK	92.22ab	47.78ab	15.61ab	9.17bc
M1	55.56d	41.11bc	11.25cde	5.27fg
M2	47.78de	36.67bcd	9.85e	4.11g
N1	95.56a	52.22ab	16.41a	11.55a
N2	97.78a	55.56a	17.25a	10.42ab
N3	71.11c	37.78bc	12.97bcd	7.13cd
M1 + N1	75.56c	40.00bc	12.75bcd	5.61ef
M1 + N2	82.22abc	50.00ab	14.87ab	6.73de
M1 + N3	53.33d	27.78cd	10.08de	4.16fg
M2 + N1	70.00c	41.11bc	12.43bcd	3.85g
M2 + N2	77.78bc	45.56ab	13.53bc	3.99gh
M2 + N3	38.89e	21.11d	7.02f	2.21h

注:同列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。
Note: Different letters mean significant difference($P < 0.05$).

M + N 组合处理下,其发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均显著低于 CK 对照;但与 M1 和 M2 相比,除 M1 + N3 和 M2 + N3 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均显著下降,其他处理组合的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数分别均显著升高。由此看出 Ca²⁺ 浓度在 80、160 mg·L⁻¹时,对不同浓度 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根种子萌发的毒害具有一定的缓解作用,而 Ca²⁺ 在 320 mg·L⁻¹时,对不同浓度 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根种子萌发的影响表现为协同毒害效应。

2.2 Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗 SOD 活性的影响

由图 1 可知,板蓝根幼苗的 SOD 活性在不同 Cd²⁺ 处理下随 Ca²⁺ 浓度升高呈先上升后下降的趋势。在 Cd²⁺ 浓度为 10 mg·L⁻¹时与对照 CK 相比,差异达显著水平($P < 0.05$);在 Cd²⁺ 浓度为 30 mg·L⁻¹时与对照 CK 相比差异不显著;在不同浓度的 Ca²⁺ 处理下,除 Ca²⁺ 为 320 mg·L⁻¹外,其他浓度下 SOD 活性与 CK 相比有显著性差异($P < 0.05$);Cd²⁺、Ca²⁺ 混合处理后,SOD 的活性在 Ca²⁺ 为 80 mg·L⁻¹ 时与 M1、M2 相比差异不显著,在 Ca²⁺ 为 160 mg·L⁻¹ 时与 M1 相比差异不显著、与 M2 相比差异显著;在 Ca²⁺ 为 320 mg·L⁻¹ 时与 M1 相比差异显著、与

M2 相比差异不显著,说明 Ca²⁺ (80、160 mg·L⁻¹)对不同 Cd²⁺ 胁迫下 SOD 的活性都有一定的提高,但各处理之间差异不显著,Ca²⁺ (320 mg·L⁻¹)对 SOD 活性的降低作用不显著。

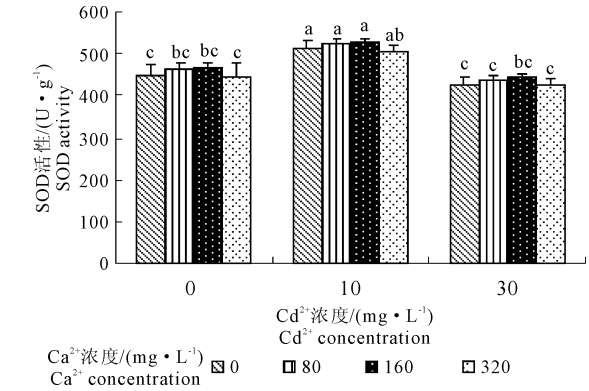


图 1 Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗 SOD 活性的影响
Fig.1 Effects of different Ca²⁺ and Cd²⁺ concentrations on SOD activity of *Radix isatidis* seedling

2.3 Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗 POD、CAT 的影响

由图 2、3 可知,板蓝根幼苗的 POD、CAT 活性在 Cd²⁺ 胁迫下,随 Cd²⁺ 浓度的升高呈先上升后下降趋势,与 CK 相比差异达显著水平($P < 0.05$);在不同浓度 Cd²⁺ 处理下,POD、CAT 活性随 Ca²⁺ 浓度升高均呈先上升后下降趋势,与各处理对照相比,差异达到显著水平($P < 0.05$);Ca²⁺ 浓度为 80、160 mg·L⁻¹ 时,POD、CAT 活性显著高于各处理对照 CK、M1、M2 ($P < 0.05$),与 M1 相比 POD 活性分别上升了 24.21%、39.95%,CAT 的活性分别上升了 21.20%、41.78%,与 M2 相比 POD 活性分别上升了 29.08%、37.76%,CAT 的活性分别上升了 37.99%、49.64%,且 Ca²⁺ 为 160 mg·L⁻¹ 时活性最高;Ca²⁺ 浓度为 320 mg·L⁻¹ 时,POD、CAT 活性显著低于各处理对照 CK、M1、M2($P < 0.05$);与 M1 相比 POD、CAT 活性分别下降了 8.72%、6.34%,与 M2 相比 POD、CAT 活性分别下降了 8.53%、17.61%。表明低浓度的 Ca²⁺ (80、160 mg·L⁻¹)能显著提高 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗 POD、CAT 活性,且 160 mg·L⁻¹ Ca²⁺ 处理下缓解效果最好,高浓度的 Ca²⁺ 能显著降低 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗 POD、CAT 活性。

2.4 Ca²⁺ 对 Cd²⁺ 胁迫下板蓝根幼苗蛋白质含量的影响

由图 4 可知,蛋白质含量随 Cd²⁺ 浓度升高,呈先上升后下降的趋势,与对照 CK 相比差异达显著水平($P < 0.05$)。在不同浓度 Cd²⁺ 处理下,蛋白质含量随 Ca²⁺ 浓度升高均呈先上升后下降趋势,与各

处理对照相比,差异达到显著水平($P < 0.05$);在 Cd^{2+} 胁迫下, Ca^{2+} 为 $80, 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蛋白质的含量显著高于 M1、M2,且 Ca^{2+} 为 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时含量最高, Ca^{2+} 为 $320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蛋白质的含量显著低于 M1、M2。说明浓度为 $80, 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ca^{2+} 能显著提高 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根幼苗的蛋白质含量,增强其抗性,且 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 效果最好,高浓度的 Ca^{2+} ($320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著降低了 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根幼苗的蛋白质含量。

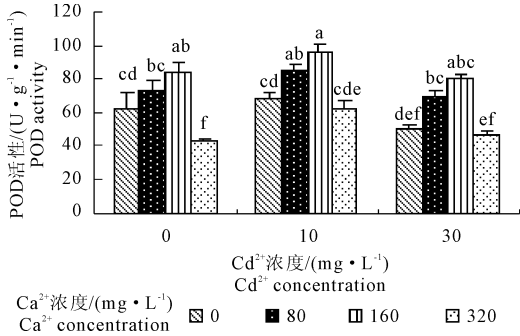


图2 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根幼苗 POD 活性的影响
Fig.2 Effects of different Ca^{2+} and Cd^{2+} concentrations on POD activity of *Radix isatidis* seedling

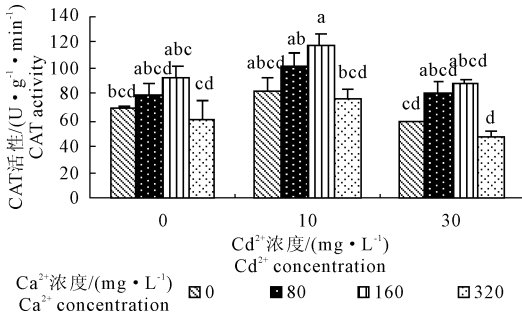


图3 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根幼苗 CAT 活性的影响
Fig.3 Effects of different Ca^{2+} and Cd^{2+} concentrations on CAT activity of *Radix Isatidis* seedling

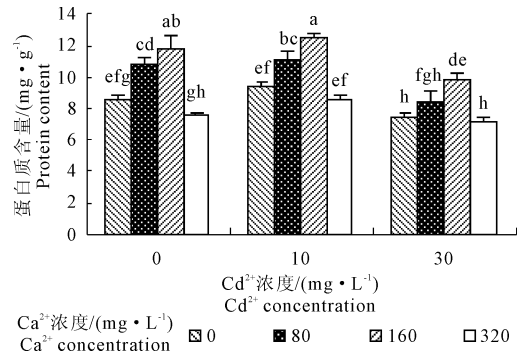


图4 Ca^{2+} 对 Cd^{2+} 胁迫下板蓝根幼苗蛋白质含量的影响
Fig.4 Effects of different Ca^{2+} and Cd^{2+} concentration on protein of *Radix Isatidis* seedling

3 讨论

发芽率是反映种子萌发与时间的动态关系,仅仅涉及种子群中能萌发种子的数目,而没有考虑种子萌发的速度和整齐度。发芽指数、活力指数的测定则包含了种子萌发的速度和整齐度,两者指标越高,种子的发芽速度越快,出苗的一致性越好,因此用发芽指数、活力指数可以较全面地反映植物种子与环境之间的作用结果^[11]。本研究结果表明:低浓度的 Ca^{2+} ($80, 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进板蓝根种子的萌发,而高浓度的 Ca^{2+} ($320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著抑制板蓝根种子的萌发; Cd^{2+} 胁迫下,随 Cd^{2+} 浓度的升高对板蓝根种子萌发的抑制作用加剧;施加 Ca^{2+} 后, $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ca^{2+} 缓解 Cd^{2+} 毒害效果最好, $320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 和 Cd^{2+} 协同作用,进一步抑制板蓝根种子的萌发。 Cd^{2+} 抑制了板蓝根种子的萌发,其主要原因可能是 Cd^{2+} 胁迫影响了种子萌发中贮藏物质的水解及能量的供应而导致种子萌发受阻^[12]。 Ca^{2+} 在生理学上具有防止膜损伤和渗漏,稳定膜结构和维持膜的完整性,提高种子活力,促进胚芽胚根的伸长^[13] 等的作用,并且外源 Ca^{2+} 能增强 Ca^{2+} 在细胞信号传递中的作用,引起板蓝根幼苗体内某些抗逆性蛋白的合成,从而减轻 Cd^{2+} 的毒害作用,这可能也是低浓度 Ca^{2+} 可以缓解 Cd^{2+} 毒害的机制之一。

植物体内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。活性氧清除系统的三种酶是过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)。SOD 能歧化超氧根离子形成 H_2O_2 和 H_2O ,降低植物体内自由基水平,减轻植物受到的危害^[14],POD 和 CAT 催化 H_2O_2 与酚类反应,将有毒的 H_2O_2 分解成无毒的 H_2O ,维持细胞的低水平自由基,减轻由于逆境引起蛋白质核酸等生物大分子变性和膜脂氧化带来的伤害,保护细胞膜的正常代谢,提高了对重金属的抗性^[15]。植物在受到 Cd^{2+} 胁迫时,会产生大量的活性氧(ROS),ROS 的生成启动了植物体内的抗氧化酶系统,产生了 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶来清除植物体内的 ROS^[16],但是,随着外界 Cd^{2+} 浓度的增高,植物产生的抗氧化酶已经不能完全清除 ROS 时,植物就会受到伤害。所以本试验随着 Cd^{2+} 胁迫浓度的升高,板蓝根幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性均出现先升高后降低的趋势,这与曾俊等^[15] 的研究结果相似。 Ca^{2+} 是植物生长、发育必需的营养元素之一,在植物的生理过程中具有重要作用^[16]。很早就被认为是一种重要的信号传递物质,在信号传递过程当中充当第二信使。当

植物受到重金属胁迫时,这种刺激作用于细胞,引起细胞内Ca²⁺浓度的增加,不但给细胞内Ca²⁺的补充提供了来源,同时增强了Ca²⁺在信号传递过程中的作用,以提高抗氧化系统的防御能力,这在很多试验中都得到了证明。在整个信号传递过程中,Ca²⁺的作用在ROS产生过程的上游,它通过ROS的产生启动了抗氧化系统^[17]。本试验中,80、160 mg·L⁻¹的Ca²⁺均可以不同程度地提高板蓝根幼苗在Cd²⁺胁迫时的抗氧化酶系统的活性,对板蓝根幼苗的Cd²⁺毒害起到了一定的缓解作用。但是在320 mg·L⁻¹ Ca²⁺作用下,除SOD活性下降不明显外,POD和CAT的活性都显著下降,说明高浓度的Ca²⁺对板蓝根幼苗有毒害作用,与Cd²⁺混合处理后,毒害作用进一步加剧,这与陈金锋^[18]的研究结果相似。

蛋白质含量的变化是衡量植株受重金属污染的指标^[19]之一。植物体内可溶性蛋白质具有较强的持水力,可以延缓衰老,为植株抵抗逆境提供较多的物质和能量,从而增强植株的抗逆性。由于重金属离子进入机体后,很少以离子形式存在,多与其他离子或化合物结合成金属络合物或螯合物,进而抑制了体内各种代谢活动,同时也阻碍了蛋白质的合成,因此植物体内可溶性蛋白质的含量与其抗逆性之间具有相关性。本试验结果表明,在10 mg·L⁻¹的Cd²⁺胁迫下蛋白质含量升高,而在30 mg·L⁻¹的Cd²⁺胁迫下蛋白质含量下降,其机制可能是低浓度重金属能迅速启动一种新蛋白质合成基因,合成一类金属硫蛋白的蛋白质,促进蛋白质合成。高浓度的重金属进入机体后,与其他离子或化合物形成金属络合物或螯合物,进而抑制了植物体内各种代谢活动,同时也阻碍了蛋白质的合成。外源施加80、160 mg·L⁻¹ Ca²⁺可以不同程度地提高Cd²⁺胁迫下板蓝根幼苗的蛋白质含量,缓解了Cd²⁺的毒害作用,而其原因可能是增强Ca²⁺在细胞信号传递过程中的作用,引起某些抗逆性蛋白的合成,使得蛋白质含量上升,减轻Cd²⁺对植物的毒害作用^[20],而施加320 mg·L⁻¹ Ca²⁺不但降低了板蓝根幼苗可溶性蛋白质的含量并且与Cd²⁺起协同毒害作用,这与冯小英等^[21]的研究结果相似。

本试验研究初步表明:Ca²⁺对板蓝根种子萌发及幼苗的生长具有显著抑制作用,适宜浓度的Ca²⁺可有效缓解Cd²⁺对板蓝根种子及幼苗的胁迫,增强了其抗逆性,从而改善了板蓝根的生长发育情况。但关于Ca²⁺缓解Cd²⁺胁迫的机制,有关研究报道认为可能是Ca²⁺在稳定细胞结构方面发挥了作用,也

可能是Ca²⁺通过增强抗氧化酶的活性来清除过量的ROS,从而缓解Cd²⁺毒害,因此其缓解机制还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 王慧忠,何翠屏.重金属胁迫对草坪草根系生长及其活力的影响[J].中国草地,2002,24(3):55-63.
- [2] 王玉凤,王庆祥,商丽威.钙对NaCl胁迫下玉米幼苗根系活力和有机渗透调节物质含量的影响[J].玉米科学,2008,16(2):66-70.
- [3] 徐 晗,方建国,刘云海.板蓝根最新研究进展[J].中草药,2003,34(3):10-11.
- [4] 胡兴昌,郑伟强.板蓝根粗提液抑制流感病毒的实验研究[J].上海师范大学学报,2003,12(5):34-37.
- [5] 李志华.板蓝根穴位注射治疗乙型肝炎病毒表面抗原携带者的疗效观察[J].新疆中医药,1995,34(1):24.
- [6] 邓茂芳.中药中重金属的研究进展[J].江苏药学与临床研究,2004,12(4):26-27.
- [7] 宋松泉,程红焱,龙春林,等.种子生物学研究指南[M].北京:科学出版社,2005:3-4.
- [8] 付世景,宗良纲,张丽娜,等.镉、铅对板蓝根种子发芽及抗氧化系统的影响[J].种子,2007,26(3):14-17.
- [9] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [10] 慈 恩,王 明,王子芳,等.镉对紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长的影响研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):96-98.
- [11] 程红玉,方子森,纪 瑛,等.NaCl胁迫对苦参种子萌发和幼苗生长的影响[J].甘肃农业大学学报,2008,12(6):90-93.
- [12] 葛才林,杨小勇,孙锦荷.重金属胁迫引起的水稻和小麦幼苗DNA损伤[J].植物生理与分子生物学报,2002,28(6):419-424.
- [13] 洪发水,马成昌,王旭明,等.钙和锌对玉米种子活力和萌发过程中酶活性的影响[J].植物生理学通讯,1996,32(2):110-112.
- [14] 董 慧.几种重金属对紫背萍过氧化氢酶活性的影响[J].云南环境科学,1999,18(2):13-15.
- [15] 田福平,陈子萱,张 自,等.硅对植物抗逆性作用的研究[J].中国土壤与肥料,2007,(3):10-14.
- [16] 贺 迪,刘云国,黄玉娥,等.钙对不同浓度镉胁迫下芦苇幼苗叶绿素及抗氧化酶系统的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(1):197-201.
- [17] Bowler C, Fluhr R. The role of calcium and activated oxygens signals for controlling cross - tolerance[J]. Trends Plant Sci, 2000,5(6):241-246.
- [18] 陈金峰,胡斌杰,韩艳霞,等.钙对铜胁迫下大豆种子的解毒作用[J].大豆科学,2008,27(6):1072-1075.
- [19] 付世景,宗良纲,张丽娜,等.镉、铅对板蓝根种子发芽及抗氧化系统的影响[J].种子,2007,26(3):14-17.
- [20] 翟福勤,汪晓丽,华佳敏,等.铜对小麦幼苗的毒害和钙的解毒作用[J].农业环境科学学报,2007,26(2):694-698.
- [21] 冯小英,胡章平,乙 引.Ca胁迫下伞花木和华山松脯氨酸及可溶性蛋白质含量的变化[J].贵州农业科学,2010,38(9):169-170.