

文章编号: 1000-5013(2008)03-0391-04

# Cd 单一及 Cd 和 Se 复合污染对 玉米幼苗生理特性的影响

侯艳伟, 王 琼, 周茂钟

( 华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 泉州 362021 )

**摘要:** 采用溶液培养法, 在不同浓度 Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染下, 对玉米体内叶绿素、脯氨酸、丙二醛, 以及对超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性的动态变化进行测定. 结果表明, Cd 胁迫下, 玉米叶片中脯氨酸质量比增加, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶的活性出现失衡现象, 丙二醛质量摩尔浓度增加; 根部活性氧消除系统平衡未被打破, 丙二醛质量摩尔浓度保持在一个较低的水平. 加入  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se 能缓解低浓度 Cd 对叶绿素、脯氨酸质量比, 以及 Cd 对玉米体内抗氧化物酶的毒害作用.

**关键词:** Se; Cd; 玉米; 生理特性; 复合污染

**中图分类号:** Q 949.71+4.205; X 503.23

**文献标识码:** A

Cd 是植物非必需元素, Se 是人体和动物的必需微量元素, 而是否为植物所必需目前尚无定论. 所有重金属进入植物体并积累到一定程度后都会产生毒害作用<sup>[1]</sup>, 即会造成植株氧化胁迫、叶绿素和糖及蛋白质合成受阻、养分失调, 从而引起光合强度和呼吸强度下降, 以及其他一系列生理代谢紊乱<sup>[2-5]</sup>, 最终导致生长量和产量的下降. 重金属复合污染对生态系统的毒性效应与单一污染有所不同, 相互作用机理非常复杂, 该领域的研究结果也常常相左. 本文在前人研究的基础上, 以玉米为材料, 通过溶液培养法, 研究 Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米幼苗生理特性的影响, 以探讨 Se 对 Cd 毒害的缓解作用.

## 1 材料与方法

### 1.1 植物的培养及染毒处理

选择饱满的玉米种子, 用体积分数为 10% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  消毒后, 于珍珠岩中育苗. 将生长一周后的幼苗移到 1/2 全营养液中培养, 每隔 2 d 更换全营养液, 预培养 4 d 后, 对玉米幼苗进行 Se 处理. 然后, 选择最适的 Se 浓度分别与不同浓度的 Cd 进行复合染毒, 每个处理做 4 个重复, 染毒 2 d 后取样.

### 1.2 样品测定

采用文[6]的方法测定叶绿素及丙二醛的质量摩尔浓度, 并以丙二醛质量摩尔浓度表示膜脂过氧化程度. 用张殿忠改进的磺基水杨酸法测定脯氨酸质量比<sup>[7]</sup>. 按光化学抑制法测定超氧化物歧化酶(SOD)活力, 按袁朝兴报道的方法, 以  $\text{H}_2\text{O}_2$ -愈创木酚为底物测定过氧化物酶(POD)活力, 按略加改变的Chance方法测定过氧化氢酶(CAT)活力, 并根据  $\text{H}_2\text{O}_2$  的消失量计算 CAT 活性<sup>[8]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 Se 最适浓度的选择

表 1 为不同浓度 Se 对叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素质量比的影响. 由表 1 可见, 在  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Se 处理下, 玉米叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素质量比都较高, 只略低于空白对照组. 所以, 本试验选择  $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Se 与 Cd 对玉米进行复合染毒处理.

收稿日期: 2007-11-02

作者简介: 侯艳伟(1979-), 女, 讲师, 主要从事环境毒理学研究. E-mail: houyw@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(X0650076); 华侨大学科研基金资助项目(06HZR19)

表 1 Se 对叶绿素质量比的影响

Tab. 1 Effects of chlorophyll mass ratio under Se single pollution

$C(\text{Se})/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$w(\text{叶绿素 a})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$w(\text{叶绿素 b})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$w(\text{总叶绿素})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
0	$20.37\pm0.56$	$5.15\pm0.25$	$25.52\pm0.75$
0.005	$18.26\pm0.19$	$4.74\pm0.13$	$22.99\pm0.32$
0.01	$17.57\pm0.38$	$4.61\pm0.04$	$22.18\pm0.42$
0.05	$18.61\pm0.56$	$4.71\pm0.16$	$23.32\pm0.70$
0.10	$16.39\pm0.17$	$4.32\pm0.16$	$20.71\pm0.02$
0.20	$17.09\pm0.18$	$5.18\pm0.12$	$22.28\pm0.30$
0.50	$16.75\pm1.30$	$4.93\pm0.11$	$21.67\pm0.21$

2.2 对叶绿素质量比的影响

Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米叶片叶绿素质量比的影响,如表 2 所示.由表 2 可见,Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染下,叶绿素质量比都随处理浓度的增大先减少后增加,然后再减少.低浓度 Cd+ Se 复合污染下,叶绿素质量比较 Cd 单一处理时有所提高( $P<0.05$ ),Se 缓解了低浓度 Cd 胁迫导致的叶绿素质量比的降低,有利于植株生长.但 Se 的这种缓解作用是有限的,当 Cd 处理浓度较大时,缓解作用消失,两者共同对玉米产生毒害效应.表 2 中,\* \* 表示  $P<0.01$ ; \* 表示  $P<0.05$ ,下同略.

2.3 对玉米叶片脯氨酸质量比的影响

Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米叶片脯氨酸质量比的影响,如表 2 所示.由表 2 可知,除  $0.05\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 单一处理外,其他所有处理浓度下,叶片中脯氨酸质量比显著高于对照组( $P<0.01$ );除了  $0.25\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd+  $0.05\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Se 这一处理外,其他复合污染下,叶片中脯氨酸质量比均高于相应浓度 Cd 单一处理下的质量比( $P<0.05$ ),玉米通过增加体内脯氨酸质量比来提高其抗逆性,并且加入 Se 后,其体内脯氨酸的积累量增加,进一步增强了它的抗逆性.

表 2 Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对叶绿素及脯氨酸质量比的影响

Tab. 2 Effects of chlorophyll and proline mass ratio under Cd single and Cd+ Se combined pollution

金属	$C/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$w(\text{叶绿素 a})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$w(\text{叶绿素 b})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$w(\text{总叶绿素})/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$w(\text{脯氨酸})/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
Cd	0	$50.43\pm1.25$	$10.69\pm0.05$	$61.12\pm0.55$	$23.68\pm0.10$
	0.05	$42.89\pm1.30^{**}$	$10.01\pm0.60$	$52.89\pm0.79^{*}$	$23.50\pm1.67$
	0.10	$43.61\pm0.76^{**}$	$10.35\pm0.30$	$53.97\pm0.97^{*}$	$30.70\pm0.72^{*}$
	0.25	$49.32\pm1.76$	$12.07\pm0.24^{**}$	$61.38\pm0.10$	$42.84\pm2.59^{*}$
	0.50	$51.07\pm0.64^{*}$	$11.71\pm0.46^{*}$	$62.78\pm0.39^{*}$	$34.90\pm0.58^{*}$
	1.00	$42.87\pm0.81^{**}$	$10.69\pm0.31$	$53.56\pm0.93^{*}$	$31.32\pm0.41^{**}$
Cd + Se	0+ 0.05	$50.04\pm0.83$	$11.95\pm0.47^{**}$	$61.30\pm0.83$	$46.29\pm2.25^{*}$
	0.05+ 0.05	$49.06\pm0.79$	$11.32\pm0.62$	$60.38\pm0.88$	$41.92\pm1.58^{*}$
	0.1+ 0.05	$47.05\pm0.01^{**}$	$11.17\pm0.30$	$58.21\pm0.31^{*}$	$32.35\pm1.00^{*}$
	0.25+ 0.05	$41.12\pm0.77^{**}$	$10.06\pm0.40$	$51.18\pm0.92^{*}$	$39.66\pm0.42^{**}$
	0.5+ 0.05	$44.54\pm0.88^{**}$	$10.58\pm0.44$	$55.12\pm1.08^{*}$	$42.73\pm0.14^{*}$
	1.0+ 0.05	$36.79\pm0.95^{**}$	$9.10\pm0.16^{**}$	$45.89\pm1.11^{*}$	$46.40\pm1.58^{**}$

2.4 对玉米幼苗体内 SOD, POD, CAT 活性的影响

Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米体内 SOD, POD, CAT 活性( $u$ )的影响,如表 3 所示.由表 3 可见,Cd 单一处理下,除  $0.05,0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  两个处理浓度下 SOD 活性低于对照组外,其余均高于对照组.Cd+ Se 复合污染下,叶片中 SOD 活性显著高于相应浓度 Cd 单一处理( $P<0.05$ ),且显著高于对照组( $P<0.01$ ),Se 刺激玉米叶片中 SOD 活性增加,提高其消除体内氧自由基的能力.Cd 单一处理对根部 SOD 活性表现出明显的抑制作用( $P<0.01$ ),随 Cd 浓度增加活性急剧下降.Cd+ Se 复合污染下,除了  $0.1,0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Cd+ Se 外,根部 SOD 活性显著低于相应浓度 Cd 单一处理( $P<0.05$ ),也低于对照组( $P<0.01$ ),且  $0.05\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Se 单独处理时,根部 SOD 活性低于对照组.可以看出,Se 对根部 SOD 活性有明显的抑制作用( $P<0.01$ ),当其与 Cd 同时存在时,两者共同抑制根部 SOD 活性.

由表 3 可见,Cd 单一处理下叶片 POD 活性的变化趋势与 SOD 相同.在 Cd 浓度较低时,自由基诱

导叶片 POD 活性先降低后升高,对 Cd 胁迫表现出一定的抵抗作用;低浓度 Cd+ Se 复合污染下,叶片 POD 活性显著高于 Cd 单一处理( $P < 0.01$ ),增加了玉米消除细胞内过多  $H_2O_2$  的能力;当 Cd 处理浓度为  $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,POD 活性有所下降( $P < 0.01$ ).Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对根部 POD 活性的影响不大,只有  $0.05, 0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd+ Se 复合污染下,POD 活性低于 Cd 单一处理( $P < 0.01$ ).

由表 3 可知,Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对叶片 CAT 活性影响较大且没有规律,但都低于对照组( $P < 0.05$ ),其机理还有待研究.除  $0.1, 0.25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd+ Se 处理外,其他复合污染下根部 CAT 活性显著低于相应浓度 Cd 单一处理( $P < 0.05$ ),Se 对 Cd 污染下 CAT 活性的降低没有缓解作用.

表 3 Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米体内 SOD, POD, CAT 活性的影响

Tab. 3 Effects of SOD, POD, CAT activity of corn seedling under Cd single and Cd+ Se combined pollution							
金属 mmol·L <sup>-1</sup>	C/ mmol·L <sup>-1</sup>	<i>u</i> (SOD)/ $\mu\text{kat}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$		<i>u</i> (POD)/ $\mu\text{kat}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$		<i>u</i> (CAT)/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	
		叶片	根部	叶片	根部	叶片	根部
Cd	0	21.53±5.51	25.99±3.16	72.02±2.96	167.86±1.19	0.95±0.05	1.08±0.04
	0.05	10.76±0.79**	19.56±1.05**	59.18±0.24**	162.35±1.01**	0.55±0.04**	1.08±0.04
	0.10	32.35±0.18**	9.99±1.10**	71.67±0.01	167.39±1.43	0.13±0.04**	1.10±0.09
	0.25	36.33±1.81**	5.84±0.37**	69.78±2.37	160.32±2.40**	0.10±0.01**	0.65±0.04**
	0.50	17.88±0.80*	2.24±0.67**	64.35±1.42**	165.50±0.74	0.55±0.01**	0.90±0.14*
	1.00	22.98±0.87	13.30±0.49**	75.99±1.41**	168.86±2.21	0.53±0.03**	0.68±0.04**
Cd+ Se	0+ 0.05	37.86±3.84**	9.50±1.12**	78.83±0.24**	166.87±0.85	0.1±0.04**	0.48±0.05**
	0.05+ 0.05	50.44±1.44**	12.00±0.43**	70.50±0.73	141.88±5.35**	0.60±0.07*	0.90±0.005*
	0.10+ 0.05	35.64±2.21**	14.37±1.08**	76.01±0.50**	169.26±0.93	0.10±0**	1.08±0.04
	0.25+ 0.05	42.88±2.31**	3.93±0.64**	81.00±1.45**	165.29±1.42	0.58±0.04**	0.58±0.04**
	0.50+ 0.05	35.76±1.84**	1.99±0.38**	68.51±2.14**	143.76±0.83**	0.58±0.04**	0.60±0.01**
	1.00+ 0.05	34.39±1.56**	1.99±0.33**	64.66±1.66**	171.34±2.79*	0.23±0.01**	0.35±0.07**

2.5 对玉米幼苗体内丙二醛质量摩尔浓度的影响

Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米体内丙二醛质量摩尔浓度( $m$ )的影响,如表 4 所示.由表 4 可知,Cd 单一处理下,叶片中丙二醛质量摩尔浓度显著高于对照组( $P < 0.01$ );Cd+ Se 复合污染下,除了

表 4 Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染对玉米体内丙二醛质量摩尔浓度的影响

Tab.4 Effects of malondialdehyde molality of corn seedling under Cd single and Cd+ Se combined pollution						
$C(\text{Cd})/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$m(\text{叶片})/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	$m(\text{根部})/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$		$C(\text{Cd+ Se})/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$m(\text{叶片})/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	$m(\text{根部})/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$
0	$0.334\pm0.029$	$0.412\pm0.035$		0+ 0.05	$0.420\pm0.004^{*~*}$	$0.304\pm0.017^{*~*}$
0.05	$0.363\pm0.017^{*~*}$	$0.318\pm0.010^{*~*}$		0.05+ 0.05	$0.343\pm0.009$	$0.204\pm0.016^{*~*}$
0.10	$0.404\pm0.004^{*~*}$	$0.323\pm0.015^{*~*}$		0.10+ 0.05	$0.293\pm0.009^{*~*}$	$0.251\pm0.006^{*~*}$
0.25	$0.441\pm0.008^{*~*}$	$0.258\pm0.011^{*~*}$		0.25+ 0.05	$0.372\pm0.011^{*~*}$	$0.246\pm0.023^{*~*}$
0.50	$0.383\pm0.006^{*~*}$	$0.238\pm0.002^{*~*}$		0.50+ 0.05	$0.438\pm0.018^{*~*}$	$0.172\pm0.022^{*~*}$
1.00	$0.365\pm0.008^{*~*}$	$0.238\pm0.005^{*~*}$		1.00+ 0.05	$0.325\pm0.006$	$0.178\pm0.008^{*~*}$

$0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd+ Se 外,叶片中丙二醛质量摩尔浓度显著低于相应浓度 Cd 单一处理( $P < 0.05$ ),Se 对 Cd 的氧化胁迫作用表现出一定的缓解作用.根部丙二醛质量摩尔浓度都低于对照组( $P < 0.01$ ),而且 Cd+ Se 复合污染下丙二醛质量摩尔浓度均低于相应浓度 Cd 单一处理(除  $0.25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd+ Se 外, $P < 0.01$ ).根部的活性氧自由基清除系统的平衡未被打破,且 Se 缓解或降低了 Cd 胁迫对玉米根部的影响,有效降低了膜脂过氧化水平.

3 讨论

研究表明,Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染下,玉米体内 SOD, POD, CAT 的活性,叶绿素、脯氨酸的质量比及丙二醛质量摩尔浓度都受到不同程度的影响,与根部相比,对叶片的影响更明显.低浓度 Cd 胁迫下叶绿素质量比降低,加入  $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  Se 可缓解这种降低的趋势.Cd 单一及 Cd+ Se 复合污染下,玉米体内脯氨酸质量比的增加提高了其抗逆性.

植物体内的 SOD, POD, CAT 组成了一个有效的活性氧自由基清除系统. 正常生长条件下, 三者及其他保护物质能够维持自由基在植物体内产生和清除的动态平衡, 从而排除自由基对植物细胞膜结构的氧化伤害<sup>[9]</sup>. 本试验中 Cd 单一处理下, 与对照相比, 叶片中 SOD 活性增加、CAT 活性降低、POD 活性变化不大, 叶片中有效的活性氧自由基清除系统的平衡被打破, 氧自由基攻击细胞膜上不饱和脂肪酸发生膜脂过氧化, 从而引起叶片中丙二醛质量摩尔浓度增加; 而根部的活性氧自由基清除系统的平衡没受到明显影响, 丙二醛质量摩尔浓度保持在较低的水平. 加入  $0.05\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}\text{Se}$  后叶片中 SOD, POD 活性均有所增加, 且 Cd+ Se 复合污染下, 叶片及根部丙二醛质量摩尔浓度较 Cd 单一处理时低, 说明 Se 对 Cd 的氧化胁迫表现出一定的缓解作用. 吴军等<sup>[10]</sup>认为, Se 与重金属元素之间多表现为拮抗作用, Se 可降低小麦、莴苣、菜豆对 Cd 的吸收. 本试验中 Se 通过对叶绿素、脯氨酸质量比及 SOD, POD, CAT 活性的调控来增强玉米的抗逆性, 表现为间接防御作用, 缓解了 Cd 对玉米的氧化胁迫. 然而, 是否由于 Se 通过直接抗逆作用, 抑制玉米对 Cd 的吸收, 从而减轻 Cd 引发的膜脂过氧化反应, 还有待探讨.

参考文献:

[ 1 ] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London :Academic Press, 1995.  
[ 2 ] WANG C X, MO Z, WANG H, et al. The transportation, time dependent distribution of heavy metals in paddy crops [ J ]. Chemosphere, 2003, 50: 717- 723.  
[ 3 ] CHUGH L K, SAWHNEY S K. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds[ J ]. Environmental Pollution, 1996, 92(1): 1- 5.  
[ 4 ] SHARM A S S, SCHAT H, VOOIJS R. In vitro alleviation of heavy metal induced enzyme inhibition by proline[ J ]. Phytochemistry, 1998, 49: 1531- 1535.  
[ 5 ] ANDREI A B, VERALI S, VIKTOR E T, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea ( *Pisum sativum* L. ) [ J ]. Euphytica, 2003, 131: 25- 35.  
[ 6 ] 上海市植物生理学学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
[ 7 ] 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸质量比的方法[ J ]. 植物生理学通讯, 1990, 26(4): 62- 65.  
[ 8 ] 李柏林, 梅慧生. 燕麦叶片衰老与活性氧代谢的关系[ J ]. 植物生理学报, 1989, 15( 1 ): 6- 12.  
[ 9 ] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应[ J ]. 中国环境科学, 1996, 16( 2 ): 113- 117.  
[ 10 ] 吴 军, 刘秀芳, 徐汉生. 硒在植物生命活动中的作用[ J ]. 植物生理学通讯, 1999, 35( 5 ): 417-423.

Effects of Physiological Characteristics of Corn Seedling Under Cd Single and Cd, Se Combined Pollution

HOU Yan-wei, WANG Qiong, ZHOU Mao-zhong

( College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China )

**Abstract:** The paper mainly studied the effects of different concentration of Cd single and Cd+ Se( $0.05\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) combined pollution on dynamics of chlorophyll, proline, malondialdehyde and SOD, POD, CAT in corn seedling using the solution culture method. The results indicated that, Cd stress caused the increase of proline content, and the imbalance of SOD, POD, CAT activity, thus caused malondialdehyde molality increased in leaves. But in roots, the active oxygen elimination system was still balanced, so malondialdehyde molality kept a low level. The addition of Se ( $0.05\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) could alleviate the toxicity of low concentration Cd on chlorophyll, proline mass ratio and Cd on antioxidant enzyme.

**Keywords:** Se; Cd; corn; physiological characteristics; combined pollution

( 责任编辑: 钱 筠 英文审校: 陈国华 )