

镉胁迫下不同耐性水稻植株幼苗生长 和抗氧化酶的变化

陈会, 任艳芳, 陈秀兰, 王阳阳, 何俊瑜*

(贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025)

摘要: 以耐 Cd 性不同的两个水稻品种(秀水 63 和秀水 09) 为试验材料, 采用溶液培养方法, 比较研究不同浓度 Cd(0, 1, 5, 10, 25, 50, 100 $\mu\text{mol/L}$) 胁迫不同时间后水稻幼苗生长、脯氨酸、丙二醛(MDA) 和抗氧化酶活性的变化。结果表明: 随 Cd 胁迫浓度增加和胁迫时间延长, 水稻幼苗生长明显受抑, 株高和地上部干重增长、叶绿素含量明显下降, 且秀水 63 降幅大于秀水 09; 处理 3 d 后, 较高浓度 Cd($\geq 50 \mu\text{mol/L}$) 胁迫造成叶片 MDA 含量明显增加, 随着胁迫时间的延长, 高于 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫对 MDA 含量有显著影响, 特别是秀水 63。叶片脯氨酸含量、SOD、POD 活性随 Cd 胁迫浓度增加和胁迫时间延长呈增加的趋势, 且秀水 09 的增加幅度高于秀水 63, 而 CAT 活性表现为先增加后降低, 在较高浓度 Cd 胁迫下($\geq 25 \mu\text{mol/L}$) 秀水 63 降幅较大。可见, 较高的脯氨酸含量和较强抗氧化酶活性是秀水 09 耐镉性强于秀水 63 重要原因之一。

关键词: 镉; 水稻; 耐性; 抗氧化酶

中图分类号: X173; Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)06-1099-06

Changes of Seedlings Growth and Antioxidant Enzyme Activities of Different Cd-tolerant Rice Cultivars under Cadmium Stress

CHEN Hui, REN Yan-fang, CHEN Xiu-lan,
WANG Yang-yang, HE Jun-yu*

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Different responses of seedlings growth and physiological characteristics in different cadmium-tolerant rice cultivars (Xiushui 63 and Xiushui 09) were studied with a hydroponic experiment under different Cd concentration(0, 1, 5, 10, 25, 50, 100 $\mu\text{mol/L}$). The results showed that the growth of rice seedlings was restrained significantly by the increase of Cd concentration and prolonged time. The inhibition rates of height, leaf dry weight and chlorophyll content in Xiushui 63 were greater than those in Xiushui 09. The content of MDA increased observably the stress of high concentration of Cd ($\geq 50 \mu\text{mol/L}$) for 3 days. With the prolonged time, Cd high than 10 $\mu\text{mol/L}$ the content of MDA increased significantly after Cd treatment for 9 days. The content of proline and activities of superoxide dismutase(SOD) and peroxidase(POD) increased under Cd stress. And they were more obvious in Xiushui 09 with the same concentration and the stress time. The activity of catalase(CAT) firstly increased and then decreased as the Cd concentration increased, and it

收稿日期: 2012-06-11 修回日期: 2012-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901260)和贵州省自然科学基金项目(20122144)

作者简介: 陈会(1989—), 女, 硕士生, 主要从事植物环境生理生态研究, E-mail: gzdx2006@126.com; * 通讯作者: 何俊瑜, 教授, 博士, E-mail: junyuhe0303@126.com。

was obviously lower in Xiushui 63 than that in Xiushui 09 at the level of $Cd \geq 25 \mu\text{mol/L}$. The experimental results showed that the higher content of proline and stronger activities of active oxygen scavenger enzyme in Xiushui 09 were the causes of its more tolerance to Cd stress than Xiushui 63.

Key words: cadmium; rice; tolerance; antioxidant enzyme

重金属污染已是世界各国致力研究的重点和热点问题之一,其在土壤-植物系统中的迁移关系着农业生态环境的可持续性、食品质量安全以及人类健康^[1-2]。其中,Cd 污染尤为严重。Cd 不是植物生长的必需元素,但其毒性强,易被植物摄取、富集。Cd 胁迫可引起植物的生长迟缓、叶绿素含量下降,光合作用、蒸腾作用等受到抑制,引起氧化胁迫、细胞膜及 DNA 损伤等^[3-6]。在花生、玉米、番茄、水稻等上研究表明,植物种间和种内品种间对 Cd 的耐性表现出明显的差异^[7-11]。已有大量研究表明,抗氧化酶在耐镉机制中起着重要作用。邵国胜等^[12]研究发现,水稻耐镉差异与体内抗氧化能力有关;章秀福等^[13]研究表明镉胁迫下水稻 SOD 活性的基因型差异及水稻镉积累与抗氧化能力有关;张福燕等^[14]对热带地区不同水稻品种研究发现,镉胁迫下水稻品种间抗氧化酶活性表现出差异;但研究结果不尽一致,此外,有关水稻幼苗耐镉性差异动态研究少有报道。笔者以耐性不同的两个水稻品种作为试验材料,研究不同浓度 Cd 胁迫对植株生长和部分生理指标的动态变化,旨在更加明确水稻耐 Cd 性差异可能的生理基础,以期为进一步探明水稻抗 Cd 胁迫机制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为水稻 Cd 敏感品种秀水 63 (*Oryza sativa* L. cv. Xiushui 63) 和 Cd 耐性品种秀水 09 (*Oryza sativa* L. cv. Xiushui 09)。

1.2 实验处理

选取健康饱满的种子经 5 g/L 次氯酸钠溶液消毒 25 min 后,去离子水反复冲洗干净,蒸馏水 30 °C 催芽 1 d,然后播于湿润的滤纸上并保持 28 °C 恒温培养 24 h 后选择露白的种子浅播于水稻育秧盘中,蒸馏水培养 10 d 后,转入 1/2 营养液中培养 7 d,然后将水稻幼苗移至含有全素营养液的塑料桶中,每桶种 8 穴,每穴 3 株,营养液按国际水稻研究所(IRRI)推荐配方配制,营养液每 5 d 换一次,调节 pH 为 5.0~5.1。待幼苗长到五叶一心时期开始用不同浓度 Cd (0, 1, 5, 10, 25, 50, 100 $\mu\text{mol/L}$) 处理,每处理设 3 次重复。分别于处理后 3, 6, 9 d 测定地上部的形态指标,并取倒 1、倒 2 叶测定生理生化指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标的测定 分别于处理 3, 6, 9 d 后,每桶随机抽取 2 株水稻植株,每个处理取 6 株,测量其株高;收获地上部,在烘箱中 100~105 °C 杀青 15 min 后,70 °C 左右烘至恒质量,称其干质量(DW)。

1.3.2 叶片生理生化指标测定 叶绿素含量采用日产 SPAD-502 型叶绿素仪测定。脯氨酸和 MDA 含量测定参考张志良^[15]的方法,CAT 活性、SOD 活性、POD 活性测定参照 Shah 等^[16]的方法。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验,所有数值均为至少 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对水稻幼苗生长和叶绿素含量的影响

从表 1 可知,除 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 外,Cd 胁迫会引起秀水 63 和秀水 09 株高的抑制。处理 3 d 时,1, 5, 10, 25, 50, 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,与对照相比,秀水 63 株高的下降分别为 0.61%、2.58%、6.38%、9.09%、11.52% 和 14.36%,而秀水 09 株高的下降分别为 -0.82%、-0.76%、-2.44%、-4.70%、-7.34% 和 9.05%。随着 Cd 处理时间的延长,2 个水稻品种株高的增长逐渐减慢。Cd 处理的 3~6 d,秀水 63 和秀水 09 株高的日平均增长分别对照的 81.43% 和 92.71%,6~9 d 的株高日平均增长分别为对照的 73.16% 和 84.27%。两个品种相比,秀水 09 的生长受 Cd 胁迫的影响较小。

表 1 Cd 胁迫对水稻株高、地上部干质量、叶绿素含量的影响

Tab.1 Effects of Cd stress on plant height , shoots dry weight and SPAD in rice seedling

处理/($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Treatment	株高/cm			地上部分干质量/g			叶绿素含量 SPAD		
		Plant height			Dry weight of shoot			Chlorophyll content (SPAD value)		
		3 d	6 d	9 d	3 d	6 d	9 d	3 d	6 d	9 d
秀水 63	0	37.60	41.80	43.70	1.01	1.22	1.49	40.48	40.90	40.21
		37.37	41.50	43.23	1.00	1.20	1.45	40.12	40.51	39.78
	1	(-0.61)	(-0.72)	(-1.08)	(-0.99)	(-1.64)	(-2.68)	(-0.89)	(-0.95)	(-1.07)
		36.63	40.70	42.07	0.98	1.16	1.39	39.92	39.82	38.63
		(-2.58)	(-2.63)	(-3.73)	(-2.97)	(-4.92)	(-6.71)	(-1.38)	(-2.64)	(-3.93)
		35.20	38.90	40.20*	0.94	1.11*	1.31**	38.48	38.45	37.01*
		(-6.38)	(-6.94)	(-8.01)	(-6.93)	(-9.02)	(-12.08)	(-4.94)	(-5.99)	(-7.96)
25	34.18*	37.50*	38.73**	0.92*	1.04**	1.18**	37.40*	37.02*	35.36**	
	(-9.09)	(-10.29)	(-11.37)	(-8.91)	(-14.75)	(-20.81)	(-7.61)	(-9.49)	(-12.06)	
	33.27**	36.10**	37.56**	0.87**	0.99**	1.11**	35.79**	35.03**	32.99**	
50	(-11.52)	(-13.64)	(-14.05)	(-13.86)	(-18.85)	(-25.50)	(-11.58)	(-14.35)	(-17.96)	
	32.20*	34.67**	35.92**	0.83**	0.93**	1.02**	33.95**	33.36**	31.20**	
100	(-14.36)	(-17.06)	(-17.80)	(-17.82)	(-23.77)	(-31.54)	(-17.12)	(-19.17)	(-22.41)	
	秀水 09	0	36.80	39.97	42.35	0.95	1.15	1.41	42.54	42.57
秀水 09	0	37.10	39.75	42.40	0.96	1.17	1.42	42.42	42.41	42.93
		(0.82)	(-0.55)	(0.12)	(1.05)	(1.74)	(0.71)	(-0.28)	(-0.38)	(-0.63)
	1	36.52	39.55	41.92	0.94	1.13	1.37	41.87	42.05	41.96
		(-0.76)	(-1.05)	(-1.02)	(1.05)	(-1.74)	(-2.84)	(-1.57)	(-1.22)	(-2.87)
		35.90	38.93	41.20	0.91	1.09	1.32	41.32	41.25	41.37
		(-2.44)	(-2.60)	(-2.72)	(-4.21)	(-5.22)	(-6.38)	(-2.87)	(-3.10)	(-4.24)
		35.07	37.95	40.17	0.89	1.04*	1.24**	40.65	40.43	40.05*
25	(-4.70)	(-5.05)	(-5.14)	(-6.32)	(-9.57)	(-12.06)	(-4.44)	(-5.03)	(-7.29)	
	34.10	36.61*	38.67*	0.87*	1.02**	1.19**	39.41*	39.06*	38.63**	
50	(-7.34)	(-8.41)	(-8.69)	(-8.42)	(-11.30)	(-15.60)	(-7.36)	(-8.25)	(-10.58)	
	33.47*	35.40**	37.07**	0.83**	0.99**	1.16**	38.49*	38.01*	37.09**	
100	(-9.05)	(-11.43)	(-12.47)	(-12.63)	(-13.91)	(-17.73)	(-9.52)	(-10.71)	(-14.14)	

括号内数值为 Cd 处理与对照相比增减%，* 和 ** 分别代表显著差异 ($P < 0.05$) 和极显著差异 ($P < 0.01$)。

The data in parentheses represent the increased or decreased percentage between Cd treatment and respective control. * and ** indicate significance at $P < 0.05$, 0.01 , respectively.

从地上部分干质量来看,Cd 处理 3 d 后,除 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理秀水 09 外,随着 Cd 浓度增加,两个水稻品种幼苗地上部干质量均受到抑制,且浓度越高,抑制作用越大(表 1)。随着处理时间的延长,Cd 对干质量的抑制增强,在处理 9 d 时,1,5,10,25,50,100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下秀水 63 地上部干质量分别下降了 2.68%、6.71%、12.08%、20.81%、25.50% 和 31.54%,而秀水 09 分别下降了 -0.71%、-2.84%、6.38%、12.06%、15.60% 和 17.73%。可见,Cd 对秀水 63 的地上部分干质量抑制作用较大。

从叶绿素含量可知(表 1),Cd 胁迫 3 d 后,较低浓度 Cd ($\leq 10 \mu\text{mol/L}$) 对秀水 63 和秀水 09 叶片叶绿素均无明显影响。随着 Cd 胁迫时间的延长,秀水 63 和秀水 09 叶绿素含量逐渐降低,分别在 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 25 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下明显低于对照 ($P < 0.05$),但秀水 63 受抑程度较大,与对照相比,25,50,100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫 9 d 后秀水 63 叶绿素含量分别下降了 12.06%、17.96% 和 22.41%,而秀水 09 分别下降了 7.29%、10.58% 和 14.14%。

2.2 Cd 胁迫对水稻脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,植物体内脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种适应性反应^[17]。由图 1 可看出,两水稻品种叶片脯氨酸含量均随 Cd 处理时间的延长和胁迫浓度的增加而上升,但不同水稻品种间有存在差异。在 1,5,10,25,50,100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 处理 3 d 后与对照相比,脯氨酸分别增加了 5.14%、8.92%、20.03%、26.61%、28.89%、35.79%,处理 9 d 后分别增加了 7.27%、16.77%、22.91%、33.45%、43.67% 和 52.86%;而秀水 09 处理 3 d 后与对照相比,脯

氨酸分别增加了 2.43%、5.91%、15.34%、31.22%、39.40% 和 46.78% ,处理 9 d 后分别增加了 3.34%、7.29%、25.34%、40.62%、60.13% 和 72.68%。可见,较高 Cd 浓度能显著增加脯氨酸含量,脯氨酸含量的增加越大,对 Cd 胁迫的耐性越强。

2.3 Cd 胁迫下水稻植株体内 MDA 含量的变化

MDA 是细胞膜脂过氧化的产物,其含量高低可用作衡量膜脂过氧化损伤的指标^[14]。由图 2 可以看出,水稻叶中的 MDA 含量均随 Cd 处理浓度的增加或胁迫时间延长而逐渐增加。同浓度 Cd 处理 3 d,秀水 63 和秀水 09 分别在 50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下叶片 MDA 含量显著高于对照 ($P < 0.05$) ,这表明 Cd 胁迫导致水稻叶片细胞膜脂过氧化只在 Cd 浓度较高时才出现。随着处理时间的延长,叶中 MDA 含量逐渐增加,并以秀水 63 增加幅度较大。Cd 处理 9 d 后,秀水 63 和秀水 09 分别在 10 $\mu\text{mol/L}$ 、25 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下叶片 MDA 含量显著高于对照 ($P < 0.05$)。

2.4 Cd 胁迫对水稻植株体内抗氧化酶活性的影响

SOD 作为超氧自由基清除剂,它能有效地清除植物体内过多的自由基,以避免自由基过量累积对生物膜造成损害,其活性高低与植物抗逆性大小有一定相关性。适度逆境可诱导 SOD 活性的增加,提高植物对逆境的适应能力^[13]。由表 2 可以看到,Cd 处理 3 d 后,随 Cd 胁迫浓度的增加,两个水稻品种叶中 SOD 活性呈上升趋势,其中秀水 63 和秀水 09 分别在 25 $\mu\text{mol/L}$ 和 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 浓度下明显高于对照 ($P < 0.05$)。处理 6 d 和 9 d 后,两品种 SOD 活性也随着 Cd 水平的提高而提高,两品种相比,同一浓度 Cd 胁迫下,秀水 09 的 SOD 活性增幅较大。不同浓度 Cd 胁迫下 POD 活性的变化与 SOD 基本相似,但增加幅度品种间存在着明显的差异,尤其是秀水 09。在处理 9 d 时,1、5、10、25、50、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下秀水 63 叶片 POD 分别较对照增加了 7.49%、18.37%、32.83%、44.53%、54.39% 和 46.45%,而秀水 09 分别增加了 8.61%、17.82%、30.85%、42.63%、67.29% 和 75.09%。表 2 结果表明,秀水 63 和秀水 09 叶片的 CAT 活性首先随 Cd 浓度的增加而略有增加,然后随 Cd 浓度的增加而下降。在高于 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,随着处理时间的延长,Cd 对 CAT 活性的抑制作用逐渐增强,在处理 9 d 时,10、25、50、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下秀水 63 叶片 CAT 活性分别较对照降低了 3.42%、9.43%、16.20% 和 26.23%,而秀水 09 分别降低了 0.78%、3.88%、10.04% 和 14.49%。

3 讨 论

Cd 不是植物生长发育的必需元素,一定浓度的 Cd 对植物具有毒害作用。在花生^[8]、玉米^[9]、番茄^[10]、水稻等^[3,11-12] 研究表明不同植物种间或种内耐 Cd 性有很大的差异,耐性强的物种或品种受害程度较轻^[11-12]。Cd 胁迫下,植物生长受到抑制,形态上表现为植株矮小和叶片失绿^[11-14]。本试验结果表明水稻幼苗的株高和地上部分干重的增长、叶绿素含量随 Cd 胁迫浓度升高及胁迫时间延长呈现出

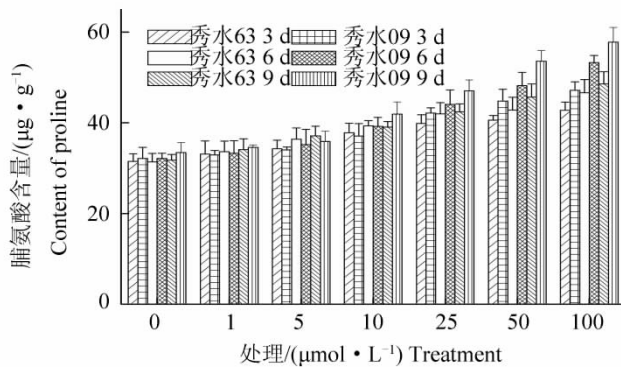


图 1 Cd 胁迫对水稻幼苗叶片脯氨酸含量的影响

Fig. 1 Effect of Cd stress on the content of proline in leaves of rice seedling

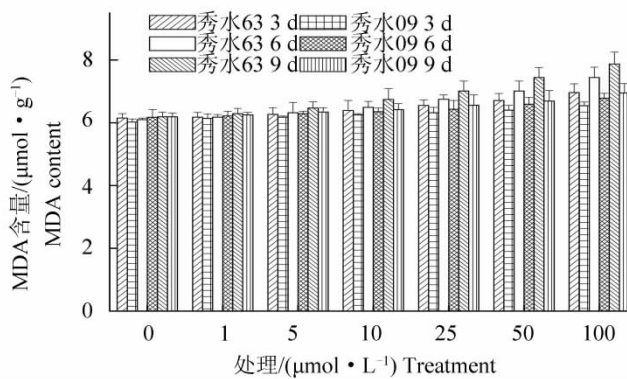


图 2 Cd 胁迫对水稻幼苗叶片 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effect of Cd stress on the content of MDA in leaves of rice seedling

抑制效应,抑制程度与 Cd 浓度及处理时间有关,这与前人研究^[11-12]的结果基本一致,但两个水稻品种间表现出差异,秀水 63 受抑较严重,这可能与其对 Cd 胁迫的生理响应有关。脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,其含量的增加是植物对逆境胁迫的一种适应性反应,对植物具有保护作用^[17]。该试验结果表明,两个水稻品种叶片中脯氨酸含量均随 Cd 浓度提高、处理时间的延长而增加,且秀水 09 积累量较秀水 63 多,这有利于保持原生质与环境的渗透平衡,抵御 Cd 的毒害使细胞免受伤害。因此,脯氨酸积累量高低可能是两个水稻品种耐 Cd 差异原因之一。

表 2 Cd 胁迫对水稻幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

Tab. 2 Effects of Cd stress on the activities of SOD and POD and CAT in leaves of rice seedling

处理/ Treatment ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	SOD 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) SOD activity			CAT 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) CAT activity			POT 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) POT activity			
	3 d	6 d	9 d	3 d	6 d	9 d	3 d	6 d	9 d	
秀水 63	0	495.22	494.23	509.74	171.24	161.50	167.80	181.98	196.54	193.79
Xiushui63	1	503.10 (1.59)	506.35 (2.45)	522.84 (2.57)	174.52 (1.91)	165.62 (2.55)	172.31 (2.69)	189.62 (4.19)	205.46 (4.54)	208.30 (7.49)
	5	510.47 (3.08)	511.62 (3.51)	528.30 (3.64)	175.83 (2.68)	164.33 (1.75)	166.65 (0.69)	202.49 (11.27)	219.96 (11.92)	229.38 (18.37)
	10	520.85* (5.18)	523.80* (5.98)	540.38* (6.01)	167.91* (-1.94)	159.28 (-1.37)	162.06 (-3.42)	220.59 (21.22)	242.97 (23.62)	257.42* (32.83)
	25	527.13** (6.45)	529.39** (7.11)	545.21** (6.96)	160.19 (-6.45)	156.57 (-3.05)	151.98 (-9.43)	241.66 (32.79)	264.95 (34.81)	280.08* (44.53)
	50	540.45** (9.13)	540.33** (9.33)	556.75** (9.22)	156.93 (-8.36)	146.59* (-9.23)	140.61* (-16.20)	269.77 (48.24)	291.97* (48.56)	299.21** (54.39)
Xiushui 09	100	555.26** (12.12)	550.30** (11.35)	564.38** (10.72)	139.95* (-18.27)	129.33** (-19.92)	123.79** (-26.23)	288.23 (58.38)	290.46* (47.79)	283.80** (46.45)
	0	501.00	504.97	523.41	174.54	170.09	179.8	168.07	184.27	184.51
	1	509.95 (1.79)	515.67 (2.12)	535.90 (2.39)	176.96 (1.39)	177.37* (4.28)	188.16* (4.65)	175.84 (4.62)	199.45 (5.38)	200.40 (8.61)
	5	521.47 (4.08)	530.78 (5.11)	550.36 (5.14)	184.17 (5.52)	181.62* (6.78)	185.17** (2.99)	189.90 (12.99)	210.17 (11.04)	217.39 (17.82)
	10	536.42* (7.07)	546.29* (8.18)	566.86* (8.30)	174.13 (-0.23)	174.76** (2.74)	178.40 (-0.78)	205.58* (22.32)	234.93* (24.12)	241.43* (30.85)
Xiushui 09	25	549.71** (9.72)	557.82** (10.47)	580.37** (10.88)	171.29* (-1.86)	167.47 (-1.54)	172.83 (-3.88)	226.89** (34.99)	255.60** (35.05)	263.17** (42.63)
	50	564.00** (12.58)	577.51** (14.37)	589.96** (14.43)	164.19 (-5.93)	161.58 (-5.00)	161.75 (-10.04)	251.15** (49.43)	284.68** (50.41)	308.67** (67.29)
	100	582.23** (16.21)	594.32** (17.69)	618.34** (18.14)	158.34 (-9.28)	154.09 (-9.41)	153.73 (-14.49)	270.54** (60.97)	308.47** (62.98)	323.07** (75.09)

括号内数值为 Cd 处理与对照相比增减%, “*”和“**”分别代表显著差异($P < 0.05$)和极显著差异($P < 0.01$)。

The data in parentheses represent the increased or decreased percentage between Cd treatment and respective control. * and ** indicate significance at $P < 0.05$, 0.01 , respectively.

在正常情况,植物体内自由基的产生与清除保持平衡,不会导致植物细胞受到伤害。Cd 胁迫下植物体内自由基代谢平衡被破坏,造成氧自由基大量积累,进一步损伤细胞膜系统^[18]。丙二醛(MDA)是植物组织在逆境下遭受氧化胁迫发生膜脂过氧化作用的产物,它的产生含量高低可作为植物膜脂过氧化损伤程度高低的指标^[14]。本实验研究表明,秀水 63 和秀水 09 叶中的 MDA 含量均随 Cd 胁迫浓度的增加、胁迫时间的延长逐渐增加。这与前人的研究^[13, 18-19]结果相符。但 Cd 引起耐 Cd 品种秀水 09 叶片 MDA 的增加幅度明显小于 Cd 敏感品种秀水 63,这与邵国胜等^[12-13]研究结果一致,表明秀水 63 受到氧化损伤较大。SOD、POD、CAT 等组成的保护酶系统是植物体内高效的自由基清除系统。本试验结果表明,不同浓度 Cd 胁迫不同时间后,秀水 63 和秀水 09 叶中 SOD 和 POD 活性呈上升趋势。这一结论与 Shah 等^[16]、肖美秀等^[19]报道的结果相似。SOD、POD 活性增加,说明 SOD、POD 共同作用发挥其清除水稻体内自由基和过氧化物的作用,意味着抗氧化保护能力的增强,可能是适应 Cd 胁迫条件下活性

氧自由基增多,保护体内活性氧积累与清除系统平衡的一种适应性调节,以减轻氧自由基增加所引起的细胞伤害^[16]。尤其是秀水 09 在较高 Cd 浓度、较长时间胁迫下 SOD 和 POD 活性升高幅度高于秀水 63。此外,本试验表明,较高浓度 Cd 胁迫($\geq 25 \mu\text{mol/L}$)可引起 CAT 活性明显下降,特别是秀水 63。可能是较高浓度及较长时间 Cd 胁迫引起活性过量积累,抑制了 CAT 酶的结构与功能^[20]。可见,保护酶系统的差异可能是两品种耐 Cd 性不同的内在基础之一。

参考文献:

- [1]史静,李正文,龚伟群,等. 2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 32-40.
- [2]He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Uptake, subcellular distribution, and chemical forms of cadmium in wild-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 371-377.
- [3]何俊瑜,王阳阳,任艳芳,等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1863-1868.
- [4]张利红,李培军,李雪梅,等. Cd 胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 458-460.
- [5]张磊,于燕玲,张磊. 外源 Cd 胁迫对玉米幼苗光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 101-104.
- [6]李鹏,葛滢,吴龙华,等. 两种籽粒 Cd 含量不同水稻的 Cd 吸收转运及其生理效应差异初探[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3): 291-296.
- [7]何俊瑜,王阳阳,任艳芳. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 522-528.
- [8]刘文龙,王凯荣,王铭伦. 花生对镉胁迫的生理响应及品种间差异[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 451-459.
- [9]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影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 36-42.
- [10]张微,吕金印,柳玲. 不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1065-1071.
- [11]张杰,梁永超,姜运生,等. Cd 胁迫下对两个水稻品种幼苗光合参数、可溶性糖和植株生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 774-780.
- [12]邵国胜, Muhammad J H, 章秀福,等. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(3): 239-244.
- [13]章秀福,王丹英,储开富,等. 镉胁迫下水稻 SOD 活性和 MDA 含量的变化及其基因型差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2): 194-198.
- [14]李福燕,李许明,赵雄,等. 热带地区不同水稻品种对土壤镉胁迫的生理生化响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 821-825.
- [15]张志良,瞿伟菁. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 258-260.
- [16]Shah K, Kumar R G, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6): 1135-1144.
- [17]戴高兴,彭克勤,萧浪涛,等. 聚乙二醇模拟干旱对耐低钾水稻幼苗丙二醛、脯氨酸含量和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5): 557-559.
- [18]何俊瑜,任艳芳,朱诚,等. Cd 胁迫对 Cd 敏感水稻突变体活性氧代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1004-1008.
- [19]肖美秀,林文雄,陈冬梅,等. 镉胁迫对耐性不同的水稻幼苗膜脂过氧化和保护酶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 256-257.
- [20]李耀文,柳参奎. 水稻 CAT 与逆境应答关系及酶活性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2009, 28(3): 509-514.