

镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响

史静¹, 潘根兴², 夏运生¹, 张仕颖¹, 张乃明^{1*}

1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 南京农业大学 农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095

摘要: 水稻 *Oryza sativa* L. 被认为是Cd吸收最强的大宗谷类作物, 本研究采用网室盆栽实验研究2个籽粒镉积累水平不同的水稻品种 (中浙优1号、高Cd品种和J196、低Cd品种), 研究不同浓度Cd处理对水稻幼苗生长和抗氧化酶系统的影响。结果表明: 高Cd水稻品种的Cd耐性高于低Cd水稻品种, 表现为前者体内的MDA含量低于后者, 而SOD、CAT、POD活性高于低Cd品种; 在Cd胁迫下, 高Cd品种的SOD活性、CAT活性随Cd处理浓度增加先增后降, 在10 mg·kg⁻¹时达到峰值, POD活性则为先降后增, 在Cd浓度为5 mg·kg⁻¹时达到峰值; 而低Cd品种随着外源Cd浓度增长, 3种酶活性在25 mg·kg⁻¹达到峰值, 除SOD比对照降低外, CAT和POD分较对照升高38.07%和62.10%, 表明在本试验处理下, Cd胁迫下, 两品种中3种抗氧化酶保护作用不同, 高Cd品种CAT的保护性最强, 低Cd品种POD的保护作用最强。但本研究对两品种生长性状的研究却发现, 高Cd品种根系耐受指数及根系鲜质量显著低于低Cd品种, 这可能和水稻对Cd的耐受原因多元化, 且本实验条件下的Cd处理未产生植株生长抑制, Cd敏感品种自身的保护机制有关。

关键词: 镉; 水稻; 抗氧化酶系统

中图分类号: X131

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 05-0832-06

引用格式: 史静, 潘根兴, 夏运生, 张仕颖, 张乃明. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 832-837.

SHI Jing, PAN Genxing, XIA Yunsheng, ZHANG Shiyong, ZHANG Naiming. Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 832-837.

镉 (Cd) 是环境中广泛存在的重金属类污染物, 对植物具有明显的毒害作用, 且能通过食物链危及人类健康。镉胁迫使植物体内自由基累积, 如超氧阴离子自由基 ($\cdot\text{O}_2\cdot$)、羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 和 H_2O_2 等的积累, 攻击生物膜中不饱和脂肪酸引发脂质过氧化作用, 并由此形成脂质过氧化物丙二醛 (MDA), 从而恶化细胞膜系统的结构和功能, 最终导致新陈代谢紊乱, 植株受到伤害^[1-3]。作为对活性氧伤害的防御机制, 植物体内存在着酶促和非酶促两类活性氧自由基清除系统, 其中超氧化歧化酶 SOD、过氧化物酶 POD、过氧化氢酶 CAT 构成抗氧化酶促活性氧清除系统, 以保持膜结构完整性和防御活性氧自由基对膜脂的攻击伤害作用。但关于 Cd 胁迫对作物体内抗氧化酶的激活或抑制存在着不同报道^[4-7], 原因主要是该变化主要取决于镉胁迫的程度、实验方法以及植物的种类、组织和暴露时间等^[8-10]。目前认为, 镉耐性植物种间和种内基因型间的耐 Cd 性差异与体内抗氧化能力有关^[11-13]。笔者前期对 110 个南方杂交水稻材料和品种的筛选研究发现, 不同水稻品种的籽粒镉积累量

差异很大, 但是是否与它们的耐 Cd 性的差异有关还不清楚。因此, 本文以 2 个籽粒 Cd 积累明显不同的水稻品种为材料, 研究不同水平镉处理对水稻苗期生长和抗氧化酶系统的影响, 旨在明确不同品种镉胁迫下抗氧化酶系统表达的基因型差异及各种酶对 Cd 胁迫的响应敏感度, 并从活性氧伤害方面探讨水稻耐 Cd 性基因型间差异的生理机制。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为红沙泥田, 属红壤性水稻土, 为典型筒育湿润老成土 (typical hapludults), 是南方杂交稻地区十分广泛的土壤类型。土样为耕作层 (0~15 cm 深度) 土壤, 采自中国科学院鹰潭红壤生态实验站 (116°55' E, 28°5' N), 第四纪红黏土母质所发育。2011 年 4 月把采集到的土壤样品, 运回实验室后经风干、磨碎、过 5 mm 孔径筛, 混匀盆栽实验之用。另取部分磨碎过 1 mm 和 0.149 mm 尼龙筛供基本性质测定。供试土壤的基本理化性质分析结果见表 1。

基金项目: 博士点专项基金项目 (B200613); 云南省科技计划项目 (2010CA010)

作者简介: 史静 (1980 年生), 女, 副教授, 博士, 主要从事土壤-植物体系重金属迁移方面的研究。E-mail: 383110966@qq.com

***责任作者:** 教授。E-mail: zhangnaiming@sina.com

收稿日期: 2013-02-14

表 1 供试土壤的基本性质
Table 1 Basic properties of studied soil

土壤	pH(H ₂ O)	w(有机碳)/(g·kg ⁻¹)	b(CEC)/(cmol·kg ⁻¹)	w(粘粒)/(g·kg ⁻¹)	w(速效磷)/(mg·kg ⁻¹)	w(全 Cd)/(mg·kg ⁻¹)
红壤性水稻土	4.95	14.15	13.98	139.1	6.70	0.55

1.2 供试品种

通过前期对我国南方 110 个栽种杂交水稻品种的筛选研究^[14], 选取籽粒含 Cd 量差异较大的 2 个杂交水稻品系, 即: 籽粒中 Cd 累积量高的品种中浙优一号(以下简称高 Cd 品种)和籽粒 Cd 累积量低的品种 J196(以下简称低 Cd 品种), 两品种的生育期为(150±20) d。

1.3 试验设计

水稻盆栽试验于 2011 年 5 月中旬—7 月中旬在云南农业大学温室中进行, 采用 20 cm×20 cm 的塑料钵, 每盆装土 3.0 kg, 设置 5 个不同浓度土壤 Cd 处理, 分别为 0、2.5、5、10、25 mg·kg⁻¹。将 CdCl₂·2.5H₂O 与去离子水配成母液, 逐级稀释成处理浓度后与过 5 mm 筛的土壤反复混合均匀, 再加入底肥 N(0.1 g·kg⁻¹)、P₂O₅(0.2 g·kg⁻¹)和 K₂O(0.2 g·kg⁻¹), 加水搅成匀浆混匀之后室温下平衡 30 d。2011 年 6 月 17 日, 挑选优质饱满水稻种子用“浸种灵”按一定比例和温水混匀成溶液, 浸种催芽 48 h 至种子露白; 6 月 19 日取优质露芽种子直接播种, 土壤保持湿润状态, 待幼苗 2 叶 1 心时间苗, 每盆保留 3 株, 保持淹水层(水层 3 cm)。试验按完全随机设计, 3 次重复; 7 月 20 日采集植株样品, 测定生长性状指标和生理指标。

1.4 测定方法

1.4.1 生长性状

7 月 19 日测定株高, 次日采集植株样本, 植株按根、茎叶分别采集, 样品先用自来水和蒸馏水洗净, 用吸水纸擦净, 测定各组织生物量(FW)及测量各样本主根长, 混匀茎叶样品对角线法采取定量茎叶 4 °C 冰箱待测叶片 MDA 含量及叶片保护酶

等生理指标。剩余植株样品按不同组织分装于牛皮信封中 105 °C 杀青 20 min, 60 °C 烘干, 分别测定各组织生物量(DW), 再分别用不锈钢粉碎机粉碎, 过 0.250 mm 筛, 在塑料瓶中密封备用。

1.4.2 根系耐受指数(IT, Index of Tolerance)的测定

收获完好的根, 直接测量最长根的长度, 求单株根长平均值, 单位为 cm。根据 Wilkins (1957) 的方法计算根系 IT 值。IT = (处理根系的平均长度/对照根系的平均长度)×100%。

1.4.3 膜脂过氧化和活性氧清除保护酶系统中各指标测定

称取待测植株叶片样品 2.5 g, 剪碎于预冷研钵中, 加适量磷酸缓冲液(pH7.8)冰浴研磨成匀浆, 低温离心(4 °C, 8 000 r/min) 25 min, 上清液冷藏, 即为丙二醛(MDA)和几种酶的粗提液。硫代巴比妥酸(TBA)法测定 MDA, 氮蓝四唑(NBT)光还原法测定 SOD 活性, 愈创木酚法测定 POD 活性, 高锰酸钾滴定法测定 CAT 活性^[15]。

1.5 统计分析

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。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对水稻生长发育的影响

从表 2 可以看出, 与对照(CK)相比, 外加 Cd 处理对水稻没有产生明显的毒害效应, 两品种在任何外加 Cd 处理下的相对株高、茎叶鲜质量和植株生物量没有显著差异。但不容忽视的是, 外加 Cd 处理下, 对两品种根系的抑制程度及根系鲜质量的影响程度不同。和对照相比, 外加 Cd 处理下, 高 Cd 品种的根系容忍指数低于 1, 而低 Cd 品种的根

表 2 外加 Cd 对水稻生长性状指标的影响
Table 2 Effect of Cd on growth of two rice at seeding period

处理	品种	相对株高	根系容忍指数	茎叶鲜质量/g	根鲜质量/g	新鲜植株生物量/g
CK	高 Cd 品种	1 a	1 bc	11.53±1.74 abc	0.68±0.11 c	12.21±1.69 ab
	低 Cd 品种	1 a	1 bc	12.94±3.18 ab	0.73±0.096 c	13.68±3.26 a
Cd1	高 Cd 品种	0.93±0.08 a	0.93±0.19 c	8.78±2.68 c	0.53±0.10 c	9.31±2.78 b
	低 Cd 品种	0.99±0.25 a	1.22±0.14 a	13.36±1.24 ab	0.79±0.20 c	14.15±1.06 a
Cd2	高 Cd 品种	0.95±0.07 a	0.94±0.15 c	9.13±0.82 bc	1.66±0.30 b	11.23±0.94 ab
	低 Cd 品种	0.95±0.25 a	1.14±0.25 ab	12.17±2.56 abc	2.10±0.34 a	13.83±3.26 a
Cd3	高 Cd 品种	0.92±0.19 a	0.92±0.10 c	9.77±2.46 abc	0.50±0.12 c	10.27±2.56 ab
	低 Cd 品种	0.94±0.18 a	1.20±0.23 a	10.86±1.62 abc	1.83±0.21 ab	12.69±1.83 ab
Cd4	高 Cd 品种	0.91±0.19 a	0.92±0.19 c	8.88±0.70 c	0.73±0.18 c	9.61±0.58 b
	低 Cd 品种	0.95±0.18 a	1.17±0.20 ab	9.33±1.57 bc	1.63±0.11 b	10.97±1.51 ab

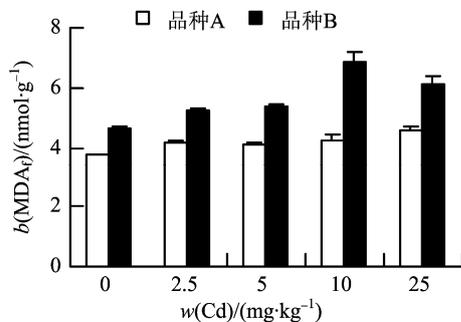
同一列中不同字母表示处理在 P=0.05 水平上差异显著 (LSD, P=0.05)

系容忍指数则高于1。

从外加 Cd 达到 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 水稻植株根系鲜质量显著高于对照, 但不同 Cd 处理之间没有显著差异。任意 Cd 处理下低 Cd 品种的根系质量显著高于高 Cd 品种。结果表明, 本实验中 Cd 处理的毒性较小, 没有使水稻植株生长性状受到损害, 但和高 Cd 品种相比, 低 Cd 品种受外加 Cd 的影响较小, 其根系耐受指数及根系鲜质量显著高于高 Cd 品种。

2.2 镉胁迫对水稻叶片丙二醛 (MDA) 含量的影响

植物体内过剩活性氧自由基可引发膜脂过氧化作用, MDA 是膜脂过氧化的主要产物之一, 其积累是活性氧毒害作用的表现, 为膜脂过氧化的重要指标之一。试验结果表明 (图 1), 镉胁迫使下供试 2 个水稻品种 MDA 含量都显著提高, 但高 Cd 品种的叶片 MDA 含量显著低于低 Cd 品种, 表明 Cd 深刻影响着水稻膜脂的过氧化作用, 对低 Cd 品种水稻的影响要强于高 Cd 品种。就低 Cd 品种而言, $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 水平下, 其幼苗叶片 MDA 含量较对照增加了 17.1%, 而当外加 Cd 增至 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 幼苗叶片 MDA 较对照增加达 48.5%, 表明高浓度的 Cd 促进 MDA 积累, 加剧细胞的膜脂过氧化, Cd 胁迫对 MDA 含量的影响基因型间存在显著差异, 以低 Cd 品种受影响最大, 如 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 下该基因型的 MDA 含量比对照高 48.5%, 相应地高 Cd 品种仅较对照增加 12.8%。



(注: 品种 A 为高 Cd 品种, 品种 B 为低 Cd 品种; MDA 含量以鲜质量计)

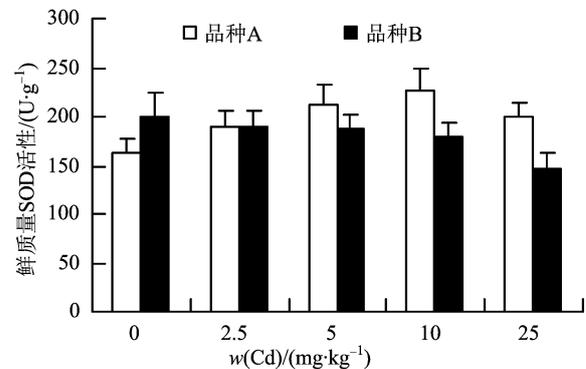
图 1 Cd 胁迫对水稻叶片 MDA 含量的影响

Fig.1 Effect of Cd on MDA concentration in leaf of two rice at seeding period

2.3 镉胁迫对叶片保护酶活性的影响

SOD 是清除超氧自由基酶系统中最重要的一种酶, SOD 与 POD、CAT 等酶协同作用可防御活性氧或其他过氧化物自由基对细胞膜系统的伤害, 减缓叶绿素、蛋白质降解, 增强机体抗逆性, 延长叶片功能期。试验结果表明, 低浓度 Cd 胁迫下 ($2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 高 Cd 品种和对照相比, 其 SOD 活性没有显著变化, 随着外加 Cd 水平的提高, SOD 活性显著升高, 但随后表现出下降趋势。尽管如此, 在

外加 Cd 处理达到 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时仍高于对照 23.1%, 说明低 Cd 胁迫增加了高 Cd 品种体内 SOD 活性, 高 Cd 胁迫也只是使活性的增加程度有所降低而已, 并没有损害到细胞膜系统, 本身仍具有缓解 Cd 胁迫危害的作用, 这一点也正好佐证了前述其体内 MDA 含量较低这一结论。图 2 显示, 低 Cd 胁迫下, 高 Cd 品种由于植物自身的保护能力, 具有较高的 SOD 活性, 从而降低植物细胞内活性氧自由基对质膜和膜脂过氧化作用的伤害, 维持细胞膜的稳定性和完整性。但在外加 Cd 达到 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 其酶活性降低, 植物自身清除活性氧的能力降低, 开始受到伤害。而低 Cd 水稻品种在外加 Cd 下表现截然不同: 在外加 Cd 处理下, SOD 活性较对照明显降低, 这种作用以 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下最甚, 低于对照 26.8%, 表明 Cd 胁迫对低 Cd 品种已造成了严重伤害, 其自身对 Cd 胁迫危害的缓解作用有限。

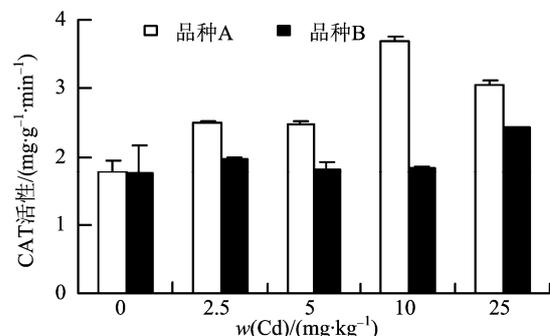


(注: 品种 A 为高 Cd 品种, 品种 B 为低 Cd 品种)

图 2 Cd 胁迫对水稻叶片 SOD 活性的影响

Fig.2 Effect of Cd on SOD concentration in leaf of two rice at seeding period

羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 是化学性质活泼的活性氧, 它几乎与细胞内的每一类有机物, 如糖、氨基酸、磷脂、核苷酸和有机酸等, 都能反应, 因此破坏性极强, 但它可以被过氧化氢酶分解。测定结果表明,



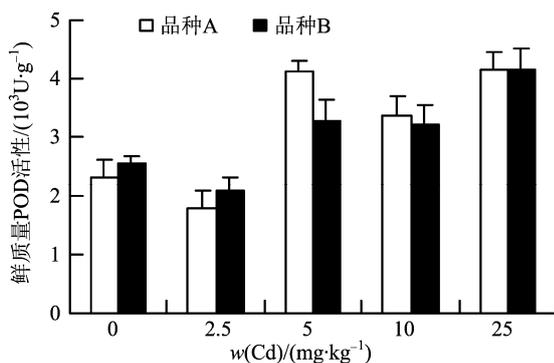
(注: 品种 A 为高 Cd 品种, 品种 B 为低 Cd 品种; 叶片 CAT 活性以 H_2O_2 计)

图 3 Cd 胁迫对水稻叶片 CAT 活性的影响

Fig.3 Effect of Cd on CAT concentration in leaf of two rice at seeding period

由图 3 可知, 在镉胁迫下耐镉性不同的 2 个水稻品种 CAT 活性和对照相比有不同的变化趋势, 高 Cd 品种表现出随 Cd 处理浓度增加先增后降, 在 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到峰值, 相当于对照提高了 1 倍; 而低 Cd 品种在 2.5、5、 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 处理下和对照无显著差异, 只在 Cd 处理浓度为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下其 CAT 活性显著升高, 仅较对照增加了 38.07%。

POD 是植物体内一种重要的抗氧化酶, 它可以清除体内的 H_2O_2 。由图 4 可以看出, 镉胁迫下两品种 POD 活性和对照相比均表现出随 Cd 处理浓度增加先降后增, 但不同 Cd 处理下的变化程度不同: 高 Cd 品种的 POD 活性在 Cd 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下达到峰值, 比对照增加 78.22%, 而低 Cd 品种则在 Cd 浓度为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下达到峰值, 比对照增加 62.10%, 说明水稻体内 POD 活性对于本试验的外加 Cd 胁迫仍具有缓解作用, 而且 2 个基因型之间存在显著差异, 高 Cd 品种中 POD 活性的增加要高于低 Cd 品种。



(注: 品种 A 为高 Cd 品种, 品种 B 为低 Cd 品种)

图 4 Cd 胁迫对水稻叶片 POD 活性的影响
Fig.4 Effect of Cd on POD concentration in leaf
of two rice at seeding period

3 讨论

在正常情况下, 植物细胞内自由基的产生与清除处于动态平衡, 而当植物一旦处于镉胁迫下, 这种平衡遭到破坏, 镉能够导致植物体内 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}^-$ 、 H_2O_2 和 $^1\text{O}_2$ 的产生^[16-17]。有研究表明, 镉胁迫能使萝卜体内 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 H_2O_2 累积, 且叶片 H_2O_2 的增幅明显比根系大^[18], 因此叶片中这些活性氧自由基积累启动膜脂过氧化作用, 膜内拟脂双分子层中含有的不饱和脂肪酸链被过氧化分解, 从而造成膜的损伤和破坏, 膜系统的完整性丧失^[6]。MDA 正是膜脂过氧化的末端产物, 其含量高低是判断膜脂过氧化程度的重要指标^[19]。本实验研究结果表明, 镉胁迫使不同 Cd 含量的 2 个水稻品种叶片 MDA 含量显著增加, 对低 Cd 品种水稻的影响要强于高 Cd 品种。据此可以认为, 在 Cd 毒害植物的过程中,

过多的超氧自由基引起的膜脂过氧化充当了重要角色。尽管 Cd 胁迫诱发生物代谢过程产生的自由基对植物膜有伤害作用, 但 SOD、CAT 和 POD 等保护酶类在植物体内协同作用, 在逆境胁迫中清除过量的活性氧, 维持活性氧的代谢平衡、保护膜结构, 从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵御逆境胁迫伤害^[20]。SOD 催化 O_2^- 发生歧化反应进而解除其毒性伤害, 而歧化反应过程中所产生的 H_2O_2 则由 CAT、POD 等来清除^[6]。从本实验的结果来看, 高 Cd 品种在受 Cd 胁迫时, SOD 活性仍可维持 (甚至提高), 它们可以保持植株体内清除自由基的正常功能, 从而使高 Cd 品种呈现出较强的耐受性。从本实验 2 个水稻品种在 Cd 胁迫下 CAT 活性的变化来看, 高 Cd 品种活性明显增强, 而低 Cd 品种该酶的活性则下降, 说明 CAT 活性的维持和增高与作物品种耐受 Cd 强弱有关, 因为不同的耐性植物在镉胁迫下体内产生 $\cdot\text{O}_2^-$ 的累积量是不同的, 耐性弱品种的累积量要高, 而 $\cdot\text{O}_2^-$ 恰能抑制 CAT 的活性^[6,13]。即从图 2 SOD 的变化及图 3 CAT 的变化看出, 耐性强的品种 A 体内这 2 种酶活性均可维持或提高, 这种协同作用对保护生物膜免受自由基伤害, 在耐受 Cd 胁迫环境起着显著作用。

本试验对 2 个耐 Cd 性不同的水稻品种的研究结果表明, 在耐 Cd 性强的水稻品种体内 SOD、CAT、POD 酶活性高于低 Cd 品种, 这与杨居荣等^[21]对不同种耐性作物体内几种抗氧化酶在重金属胁迫下的研究结果一致。但从本实验的研究结果来看, 并非所有的酶类随 Cd 升高表现出活性变化一致的结果。如高 Cd 品种 SOD 活性、CAT 活性随 Cd 处理浓度增加先增后降, 在 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到峰值, POD 活性则为先降后增, 在 Cd 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到峰值; 而低 Cd 品种随着外加 Cd 水平增长, 3 种酶活性没有呈现出一致的变化趋势。但 3 种酶活性均在 Cd 处理为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时出现最高 (低) 点, 如 SOD 活性比对照降低 26.8%, 说明其活性受到了不同程度的抑制, 可能是因为 Cd 干扰了其分子结构或改变了其空间结构或产生的活性氧自由基超过了它们的清除能力, SOD 活性低升高抑的结果与于方明等^[10]的研究结果类似。而 CAT 活性较对照增加了 38.07%, POD 活性则较对照增加 62.10%。但其活性较对照升高 (或降低) 的程度远低于高 Cd 品种, 表明不同品种在不同外加 Cd 水平下对酶活性的响应是不一致的, 不同的植物保护酶所起的保护作用也不尽然, 对于高 Cd 品种, CAT、SOD 的保护作用显然优于 POD, 低 Cd 品种在外加 Cd 为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 3 种保护酶的结果同样也表明了在本试验处理下, 3 种抗氧化酶的敏感性依次为:

SOD>CAT>POD。这一点和王宏宾等^[9]对营养液培养下不同小麦品种几种解毒机制研究结果一致: POD 在 Cd²⁺处理下小麦细胞活氧防御机制中起关键作用。同时本实验结果也揭示, Cd 胁迫对低 Cd 品种已造成了严重伤害, 其自身对 Cd 胁迫危害的缓解作用有限, 而对高 Cd 品种而言, 低浓度 Cd 胁迫增加了高 Cd 品种体内 SOD 活性, 高 Cd 胁迫也只是使活性的增加程度有所降低, 并没有损害到细胞膜系统, 本身仍具有缓解 Cd 胁迫危害的作用, 这一点也正好佐证了前述其体内 MDA 含量较低这一结果。

但仍需注意的是, 此结果和本实验中外加 Cd 下对生长性状的影响结果不一致: 外加 Cd 处理下, 对两品种根系的抑制程度及根系鲜质量的影响程度不同, 表现为: 和对照相比, 低 Cd 品种受外加 Cd 的影响较小, 其根系耐受指数及根系鲜质量显著高于高 Cd 品种。这主要是因为水稻对 Cd 的耐受性是受多种生理生化及遗传因子支配的, 除酶系统的作用外, 还存在其他调节因素。本实验中 Cd 处理水平最高也尚未对植株生长造成毒害, 且尚在生长发育初期, 低 Cd 品种由于自身的保护机制, 外加 Cd 的提高可能刺激了自身的生长所致。但本文仅对比研究了经大田试验从 110 个品种中筛选的 2 个籽粒 Cd 积累能力有截然差异的 2 个品种苗期叶片内酶活性的变化, 但对这些酶作用的详细机制、它们活性的维持与提高是否与基因表达有关及有何种关系仍有待进一步研究。

4 结论

4.1 外加 Cd 处理下, 高籽粒 Cd 品种体内抗氧化酶体系 (SOD、CAT、POD) 的协同作用高于低 Cd 品种, 从而保护其生物膜受自由基伤害程度较低, 使高 Cd 品种表现为较强的耐 Cd 性。两品种中 3 种抗氧化酶保护作用不同, 高 Cd 品种 CAT 的保护性最强, 低 Cd 品种则以 POD 的保护为主。

4.2 外加 Cd 浓度增加会显著促进叶片内 MDA 含量的积累, 积累高低程度因水稻品种而异, 对于高 Cd 含量品种的影响程度要低于低 Cd 品种, 表明低 Cd 品种在 Cd 胁迫下细胞膜脂过氧化现象严重, 细胞膜损伤程度要高于高 Cd 品种。

参考文献:

- [1] 罗立新, 孙铁衍, 靳月华. 镉胁迫对小麦叶片细胞膜脂过氧化的影响[J]. 中国环境科学, 1998, 18(1): 72-75.
- [2] SHAH K, KUMAR R G, VERMA A, 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: 1135-1144.
- [3] 王阳阳, 任艳芳, 周国强, 等. 镉胁迫对不同抗性水稻品种幼苗生

- 长和生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 450-454
- [4] DIXIT V, PANDEY V, SHYAM R. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad)[J]. Journal of experimental botany, 2001, 52(38): 1101-1109.
- [5] SANDALIO L M, DALURZO H C, GOMEZ M, et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. Journal of experimental botany, 2001, 52(364): 2115-2126.
- [6] 林冬, 朱诚, 孙宗修. 镉敏感水稻突变体在镉胁迫下活性氧代谢的变化[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 561-566.
- [7] 王欣, 周守标, 程龙玲, 等. 水稻和杂草稻对镉胁迫反应的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 661-666.
- [8] GALLEGOS M, BENAVIDES M P, TOMARO M L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress[J]. Plant Science, 1996, 121: 151-159.
- [9] 王宏宾, 王焕校, 文传浩, 等. 镉处理下不同小麦品种几种解毒机制探讨[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 523-528.
- [10] 于方明, 刘可慧, 刘华, 等. 镉污染对水稻不同生育期抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 88-93.
- [11] GRANT C A, BUCKLEY W T, BAILEY L D. Cadmium accumulation in crops[J]. Plant Science, 1998, 78: 1-17.
- [12] WU F B, ZHANG G P, DIOMINY P. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50: 67-77.
- [13] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 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.
- [14] SHI JING, PAN GENXING, LI LIANQING. Variation of Cd and Zn concentrations in rice grain of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil from South China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(2): 168-172.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [16] FORNAZIR R F, FERREIRA R R, VITORIA A P, et al. Effect of cadmium on antioxidant enzyme activities in sugar cane[J]. Plant Biology, 2002, 45(1): 91-97.
- [17] 张芬琴, 孟红梅, 沈振国, 等. 镉胁迫下绿豆和箭舌豌豆幼苗的抗氧化反应[J]. 西北植物学报, 2006, 26(7): 1384-1389.
- [18] 汤春芳, 刘云国, 曾光明, 等. 镉胁迫对萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(4): 469-474.
- [19] LIANG Y C, HU F, YANG M C, et al. Antioxidative defenses and water deficit-induced oxidative damage in rice (*Oryza sativa* L.) growing on non-flooded paddy soils with ground mulching[J]. Plant and Soil, 2003, 257: 407-416.
- [20] LIANG Y C, CHEN Q, LIU Q, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160: 1157-1164.
- [21] 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.

Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system

SHI Jing¹, PAN Genxing², XIA Yunsheng¹, ZHANG Shiyong¹, ZHANG Naiming^{1*}

1. College of Resources and Environment of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Rice is concerned as a food crop that significantly accumulates Cd in grains. To examine the genotypic difference in the alternation of three antioxidative enzymes(SOD, POD and CAT) and the MDA contents, a pot experiment during the seeding period was conducted with two cultivars of hybrid rice, Zhongzheyou 1(high grain Cd accumulation) and J196 (high grain Cd accumulation), Cd was spiked at 0, 2.5, 5, 10, 20 mg/kg, respectively. The results showed that: Cd stress altered malondialdehyde (MDA) content and activities of superoxide dismutase (SOD), calase (CAT) and peroxidase (POD) in rice. Two rice cultivars responded differently to Cd stress in terms of MDA contents and antioxidant enzyme activity. Generally, the activities of SOD, CAT firstly ascend then dropped with increase of Cd level, contrast to POD. While MDA contents would be more produced in J196, but SOD, CAT and POD tend to accumulate in Zhongzheyou 1. The higher MDA and less antioxidant enzyme contents were found in J196, indicating that J196 was more sensitive to Cd stress than Zhongzheyou 1.

Key words: cadmium; rice; antioxidant enzyme system