

Cd 胁迫对杂交水稻及其亲本叶片丙二醛含量的影响

王昌全¹, 郭燕梅¹, 李 冰¹, 袁大刚¹, 张济龙¹, 林正雨¹, 唐敦义²

(1. 四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2. 成都市龙泉驿区农发局, 四川 成都 610066)

摘要:以 15 份杂交水稻及其亲本为材料, 采用水培试验研究了不同 Cd^{2+} 浓度胁迫对水稻叶片丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明: (1) 在不同 Cd 处理水平和生育时期, 保持系叶片 MDA 含量存在差异, 如 D83B 叶片 MDA 含量各处理显著高于对照($p < 0.05$), MDA 积累水平较高, 受到 Cd 严重胁迫, 而 II-32B 在两个生育时期受低 Cd 浓度的影响不大, 与对照差异不显著, 且随着 Cd 浓度的增大, MDA 含量均表现出较低的 MDA 积累水平, 因此保持系 II-32B 是一种较好的保持系材料。(2) Cd 胁迫对恢复系各材料叶片 MDA 的影响不同, 其中以 R527、R498 叶片 MDA 积累最明显, 孕穗期和灌浆期各处理均显著高于对照, 其余恢复系材料受不同 Cd^{2+} 浓度的影响, MDA 积累不稳定。(3) 同一保持系 (II-32B) 与不同恢复系 (R498、R549、R892) 组合配制的 3 个杂交稻叶片在 MDA 含量的增加幅度上表现不同, 其中 II 优 498、II 优 892 受 Cd 影响较小, 无论在孕穗期还是灌浆期叶片 MDA 含量增幅相对较小, 而 II 优 549 受 Cd 严重胁迫, 各处理均显著高于对照, MDA 积累增幅最大。(4) 同一恢复系 (R498) 与不同保持系 (II-32B、D62B) 配制的杂交稻叶片 MDA 含量亦不同, 如 D 优 498 仅在孕穗期低浓度下 MDA 较对照有所降低, 其余各处理 MDA 均积累较多, 而 II 优 498 MDA 含量随着 Cd 浓度的增加, MDA 增幅相对较小, 可见水稻亲本对子代 MDA 的积累存在差异, 可根据优良亲本, 寻找优势组合, 培育出抗 Cd 性强的杂交水稻。

关键词: Cd 胁迫; 杂交水稻; 亲本; 丙二醛

文章编号: 1000-0933(2008)11-5377-08 中图分类号: S154.4 文献标识码: A

Effects of Cd stress on the content of MDA in leaves of the hybrid rice and their parents

WANG Chang-Quan¹, GUO Yan-Mei¹, LI Bing¹, YUAN Da-Gang¹, ZHANG Ji-Long¹, LIN Zhen-Yu¹, TANG Dun-Yi²

1 Department of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China

2 Longquan Bureau of Agricultural Development, Chengdu, 610066, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5377 ~ 5384.

Abstract: The content of malondialdehyde (MDA) in leaves of fifteen hybrid rice and their parents was here measured to obtain an understanding of the effects of Cd stress on the growth of rice employing the method of solution culture. (1) MDA content in leaves of the rice varied with the maintainer, Cd stress level and growth period. For example, D83B maintainers had higher MDA content in leaves by comparing with the control and were stressed severely, while the content of MDA in leaves of II-32B maintainers varied slightly in comparison with the controls, and did not increase significantly with the increase of Cd content in the solution. The results implied that II-32B was a good maintainer. (2) The effects of Cd stress

基金项目: 四川省科技厅应用基础资助项目 (2008JY0095); 四川省教育厅重点实验室专项资助项目 (07ZS002); 四川省教育厅重点资助项目 (2006A013)

收稿日期: 2008-03-07; **修订日期:** 2008-07-22

作者简介: 王昌全 (1962 ~), 男, 四川新都人, 博士, 教授, 主要从事土壤质量与资源环境可持续研究. E-mail: wcquan@sieau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the application foundation project of Sichuan Provincial Science & Technology Department (No. 2008JY0095), special project of the Key Laboratory of Education Department in Sichuan Province (No. 07ZS002), Key Project of the Education Department in Sichuan Province (No. 2006A013)

Received date: 2008-03-07; **Accepted date:** 2008-07-22

Biography: WANG Chang-Quan, Ph. D., Professor, mainly engaged in soil quality and resource environmental sustainable development. E-mail: wcquan@sieau.edu.cn

on the rice depended on the restorer lines. The content of MDA in leaves of restorer lines R527 and R498 was significantly higher than that of the control at the booting and filling stages. While other restorers were influenced by Cd stress and varied with the restorer lines and the growth stage. (3) The contents of MDA in leaves of the hybrid rices from II -32B and different restorer lines (R498, R549 and R892) showed the different increasing amplitude. II You 498 and II You 892 were not significantly influenced by Cd stress, while the II You 549 was significantly influenced by Cd stress, of which the MDA content was significantly higher than that of the controls, and accumulated higher content of MDA in leaves. (4) The contents of MDA in the hybrid rices depended on the cross combination from the restorer R498 and the maintainers II -32B and D62B. D You 498 had lower MDA content only at the booting stage and the lower Cd content by comparing with the control, while the contents of MDA were significantly higher than that of the control at other stages and Cd contents. Meanwhile, the content of MDA in leaves of II You 498 increased with the Cd content in the solution. It was suggested that the content of MDA in leaves of the offspring be influenced by not only Cd stress, but also the parents, and the variety of anti-Cd hybrid rice be cultivated through the superiority combination and high-quality parents.

Key Words: Cd stress; hybrid rice; parents; MDA

水稻是我国主要的粮食作物^[1], 65%以上的人口以稻米为主食。然而近年来, 由于工业废物管理不善和无意使用高镉含量的城市废弃物与肥料等, 水稻土 Cd 污染较为严重; 而水稻极易吸收土壤中的镉, 在一定浓度镉污染下, 稻米的产量和质量会严重受到影响, 人体健康将直接受到威胁^[2~4]。受 Cd 胁迫时, 植物细胞内将产生大量自由基^[5,6], 由于清除能力下降, 积累的自由基首先伤害质膜系统, 使膜透性增大, 引起膜脂过氧化, 普遍认为, 这是镉胁迫对植物造成伤害的重要机制之一。丙二醛 (MDA) 作为膜脂过氧化产物, 其含量可以反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[7,8]。

目前有关水稻耐重金属胁迫的品种差异有较多研究^[9~14], 但对材料差异报道较少。为此, 本试验研究了 15 份杂交水稻及其亲本在 Cd 胁迫反应较敏感时期^[15]——孕穗期和灌浆期叶片 MDA 的变化特征、抗性差异以及不同亲本组合对杂交子代抗 Cd 能力的影响, 探讨其遗传特性, 为寻找优良亲本, 搜寻优势组合提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本次试验所需 15 份水稻材料及子代均由四川农业大学水稻研究所提供, 其中 9 份杂交稻亲本 (保持系 4 份、恢复系 5 份) 以及由这些亲本配制的 6 个杂交稻 (表 1)。

1.2 试验设计

试验于 2006 年 5 月在四川农业大学甘家坝农场网室内进行。

将精选的水稻种子消毒、洗净后育苗, 待两叶一心时移植于容器为 20L 的黑色塑料桶中, 培养于完全营养液中, 营养液完全采用国际水稻研究所 (IRRI) 推荐的配方配制 (表 2), 营养液的起始 pH 值为 5.5 ~ 6.0。幼苗先在 1/2 浓度的营养液中培养 7d, 然后进行全营养液培养 and 不同浓度的 Cd 处理, 设 3 个 Cd 水平: 0、1、5mg/L Cd, 每处理重复 4 次。营养液中 Cd 以 CdCl₂·2.5H₂O 形式加入。培养液每 7d 更换 1 次, 并用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调节 pH 值至 5.5 ~ 6.0。处理期间每天观察植物的长势。

表 1 供试水稻材料

Table 1 Rice materials in the experiment

亲本 Parents		杂交稻 Hybrid rice
保持系 Maintainer line	恢复系 Restorer line	
II -32B	R498	II 优 498
II -32B	R549	II 优 549
II -32B	R892	II 优 892
D62B	R498	D 优 498
D82B	R781	D82A/781
D83B	R527	D83A/R527

表 2 水稻常规营养液配方

Table 2 Formula of the nutrition solution of rice culture in pot experiment

大量元素 Macro-element	用量 (mg/L) Application rate	微量元素 Trace elements	用量 (mg/L) Application rate
NH ₄ NO ₃	114.3	MnCl ₂ ·4H ₂ O	1500
NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O	50.4	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	74
K ₂ SO ₄	89.3	H ₃ BO ₃	934
CaCl ₂	110.8	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	35
MgSO ₄ ·7H ₂ O	405.0	CuSO ₄ ·5H ₂ O	31
		FeCl ₃ ·6H ₂ O	7700
		柠檬酸(-水合物)	11900

水稻分蘖期营养液 NH₄NO₃ 加倍;微量元素储备液配制:各种盐类分别溶解,然后与 50ml 硫酸混匀,加蒸馏水至 1L,使用时每 4L 营养液加 5ml 储备液 NH₄NO₃ of the nutrient solution was doubled in tillering stage; Preparation of trace elements: All kinds of Salts were dissolved, and mixed with 50ml sulfuric acid, increasing water to 1 L, and add 5ml trace elements to 4L nutrient solution

1.3 样品的采集分析及数据处理

本试验分别在孕穗期、灌浆期取水稻主茎倒 2 叶叶片,按硫代巴比妥酸法,测定水稻叶片 MDA 含量,并采用 Excel 和 SPSS12.0 对数据进行二因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对保持系叶片 MDA 的影响

保持系不同材料在不同时期受到 Cd 胁迫的影响程度不同(表 3)。在孕穗期,当 Cd²⁺ 为 1mg/L 时,所有保持系材料与对照相比均显著上升,其中 D82B 上升幅度最大(77%),显著高于其他保持系材料,其次为 D83B、D62B、II-32B,增加幅度依次为 43%、31%、18%。在 Cd 处理浓度提高到 5mg/L 时,D82B 和 D83B 受到 Cd 影响程度更大,叶片 MDA 含量分别为 7.637μmol/g、7.176μmol/g,增幅均达 100% 以上,而 D62B 和 II-32B 受 Cd 毒害相对较轻,MDA 含量上升幅度分别为 59%、70%。

表 3 不同 Cd 水平下保持系材料叶片 MDA 含量(μmol/g)

Table 3 Effect of different Cd levels on MDA contents of maintainer line' leaves

Cd 浓度 Cd level (mg/L)	孕穗期 Booting stage				灌浆期 Filling stage			
	D83B	D82B	D62B	II-32B	D83B	D82B	D62B	II-32B
0	3.798f	3.548f	4.199ef	3.882f	4.492g	7.208de	4.502g	6.861de
1	5.451d	6.300c	5.532d	4.584e	5.663f	7.145de	7.536de	7.922cd
5	7.637a	7.176ab	6.696bc	6.656bc	9.788b	9.509b	12.21a	8.602c

同一列数字后小写字母表示同一生育时期差异显著($p < 0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly in the same stage($p < 0.05$)

在灌浆期低 Cd 浓度下,D82B 和 II-32B 受 Cd 胁迫叶片 MDA 含量与对照差异不显著(表 3)。D62B 和 D83B 受 Cd 胁迫影响较大,其叶片 MDA 含量较对照增加分别为 67% 和 26%,达显著水平。当 Cd 处理浓度增至 5mg/L 时,仍以 D62B 受 Cd 处理影响最大,叶片 MDA 含量最高(12.21μmol/g),与对照和低 Cd(1mg/L)处理相比显著上升。其次,D83B 和 D82B 也显著受到 Cd 处理浓度的影响。II-32B 叶片 MDA 含量略有上升,与低 Cd(1mg/L)处理相比未达显著水平(表 3)。

综上所述,在孕穗阶段,保持系中的 D83B 受到 Cd 严重胁迫,叶片 MDA 含量各处理显著高于对照,MDA 积累水平较高;而 D62B 和 II-32B 叶片 MDA 积累相对较少,受 Cd 处理浓度影响较小,但在灌浆期,D62B 叶片 MDA 含量显著上升,而 II-32B 叶片 MDA 含量始终保持较低的水平,受到 Cd 处理浓度变化的影响较小。因此,D62B 受生育时期影响较大,MDA 积累变化不稳定,而 II-32B 无论在孕穗期和灌浆期均表现出较低的 MDA 积累水平,是一种较好的保持系材料。

2.2 Cd 胁迫对恢复系叶片 MDA 的影响

恢复系各材料叶片 MDA 含量在各生育时期和处理浓度下存在差异(表 4)。在孕穗期阶段,当低 Cd 浓度

(1mg/L)处理时,恢复系植株体内 MDA 含量均有所升高,其中恢复系材料 R527、R498、R549、R892 显著高于对照,上升最为明显的是 R527,其值为 5.899 $\mu\text{mol/g}$,增幅达到 75%,其次为 R498,增幅达 45%,相对较高。在 Cd^{2+} 浓度达到 5mg/L 时,恢复系各材料叶片 MDA 含量与对照相比均显著升高,说明在孕穗期时,恢复系在高浓度镉处理下更易受到伤害。就 MDA 变化幅度而言,R498、R527、R892 叶片 MDA 含量上升较快,增幅分别为 80%、79%、68%。由此可见,水稻受到高 Cd 胁迫时,恢复系 R527、R498 受到 Cd 胁迫影响依然最大,而 R781 无论在低浓度还是高浓度下,相对于对照,叶片 MDA 积累较少,说明其清除自由基的能力明显比其他恢复系材料强,具有较强的抵抗逆境胁迫的能力。

表 4 不同 Cd 处理下恢复系材料叶片 MDA 含量($\mu\text{mol/g}$)

Table 4 Effect of different Cd levels on MDA contents of restorer line' leaves

Cd 浓度 Cd level(mg/L)	孕穗期 Booting stage					灌浆期 Filling stage				
	R498	R527	R549	R781	R892	R498	R527	R549	R781	R892
0	3.703h	3.370h	4.705fg	5.242ef	4.546g	5.618f	3.466h	3.524h	3.889h	5.382f
1	5.358de	5.899cd	5.667cde	5.816cde	5.212ef	7.576d	4.477g	4.529g	4.538g	6.615e
5	6.636b	6.044c	6.626b	6.796b	7.665a	9.054c	13.012a	8.706c	11.198b	8.964c

同一列数字后小写字母表示同一生育时期差异显著($p < 0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly in the same stage($p < 0.05$)

在灌浆期,当 Cd^{2+} 处于低浓度(1mg/L)时,所有恢复系材料叶片内 MDA 含量与对照的差异均达显著水平,相对而言,R498 上升较快,MDA 含量高达 7.576 $\mu\text{mol/g}$,显著高于其他恢复系材料,增幅达 35%,受到 Cd^{2+} 毒害引起的氧化胁迫程度最高,显示出对 Cd^{2+} 强敏感性;R527、R549、R781 叶片 MDA 含量显著低于 R498、R892,相对于对照,上升幅度最小,约 16%。因此,低浓度 Cd 胁迫下,R498 受 Cd^{2+} 影响最大,MDA 积累较对照最为明显。而 Cd^{2+} 处于高浓度(5mg/L)时,各恢复系材料叶片细胞膜受到刺激产生毒害,MDA 含量显著高于对照。R527、R781、R549MDA 含量上升增幅最大,均在 150% 以上,其中以 R527 的 MDA 含量为三者最高,达到 13.012 $\mu\text{mol/g}$,增幅高达 275%,R892、R498 受到 Cd^{2+} 影响最小,增幅都在 60% 左右。可见 R527 叶片受 Cd 胁迫过程中膜脂过氧化的程度要比其它恢复系水稻高,尤其是在胁迫的后期更加明显。

恢复系对 Cd^{2+} 敏感程度存在差异,从孕穗期和灌浆期恢复系叶片 MDA 积累情况看,R527、R498 忍耐性较弱,MDA 大量积累;其余恢复系材料受不同 Cd^{2+} 浓度影响,MDA 积累时快时慢,耐 Cd 表现不稳定。

2.3 不同亲本组合对杂交稻叶片 MDA 的影响

2.3.1 Cd 胁迫下同一保持系与不同恢复系组合对杂交稻叶片 MDA 的影响

由表 5 可见,保持系 II-32B 与不同恢复系配制的杂交稻叶片 MDA 含量差异较大。在孕穗期,当受到低浓度 Cd(1mg/L)胁迫时,3 个亲本组合配制的杂交稻叶片 MDA 含量与对照的差异均达显著水平。杂交稻叶片中 MDA 含量相对较高杂交品种 II 优 892 和 II 优 549,其叶片 MDA 含量分别达到 5.217 $\mu\text{mol/g}$ 、4.934 $\mu\text{mol/g}$,其中以杂交子代 II 优 549 MDA 含量增幅最大,高达 45%,说明恢复系 R549 对提高子代抗 Cd 性方面的贡献不大,甚至产生负效应,而 II 优 892 增幅远不及 II 优 549,仅 18%,相对而言 MDA 含量低的杂交稻 II 优 498 增幅最小,为 13%,表现出良好的耐性;当 Cd 浓度提升到 5mg/L 时,各亲本组合叶片 MDA 显著高于对照,且表现同低浓度一致,恢复系 R549 配制的子代叶片 II 优 549MDA 含量为 5.222 $\mu\text{mol/g}$,相比对照,上升最快,受到 Cd 毒害最为严重,而杂交稻 II 优 498 和 II 优 892 叶片 MDA 增幅较小,受 Cd 毒害较轻,在高浓度依然表现出对 Cd 较强的耐性。

在灌浆期低浓度(1mg/L)Cd 胁迫时,相对于孕穗期各组合 MDA 含量有整体上升的趋势,各恢复系组合叶片 MDA 含量均降低,但 3 个杂交子代间 MDA 含量不存在显著差异。其中,杂交稻 II 优 498 和 II 优 549 叶片 MDA 含量基本无变化,与对照差异不显著,恢复系 R892 配制的杂交稻 II 优 892 叶片 MDA 含量与对照的差异达显著水平,MDA 含量降低幅度最高,MDA 含量最低,说明在该胁迫强度内,细胞的各种保护机制使其受到毒害最轻;在 Cd 高浓度(5mg/L)胁迫下,3 个水稻组合均与对照的差异均达显著水平,细胞膜受到 Cd 毒

害,其中恢复系 R892 组合叶片 MDA 含量显著高于其他两个品种,增幅最大,接近 53%,略高于 MDA 含量低的恢复系 R498 组合(49%)。

表 5 保持系 II-32B 及其相应恢复系配制的杂交稻叶片 MDA 含量($\mu\text{mol/g}$)

Table 5 MDA contents of hybrids made from maintainer lines II-32B and other restore lines

Cd 浓度 Cd level(mg/L)	杂交组合叶片 MDA 含量 MDA contents of hybrids					
	孕穗期 Booting stage			灌浆期 Filling stage		
	II 优 498 II-32B $\times$ R498	II 优 892 II-32B $\times$ R892	II 优 549 II-32B $\times$ R549	II 优 498 II-32B $\times$ R498	II 优 892 II-32B $\times$ R892	II 优 549 II-32B $\times$ R549
0	3.386f	4.392d	3.391f	6.170cd	6.488c	5.802e
1	3.843e	5.217b	4.934c	6.142cde	5.965de	5.789e
5	4.442d	5.643a	5.222b	9.225b	9.886a	8.924b

同一列数字后小写字母表示同一生育时期差异显著($p < 0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly in the same stage($p < 0.05$)

总之,同一保持系与不同恢复系组合配制的杂交子代存在抗 Cd 性差异,且在不同生育时期,各组合表现不同。其中 II 优 498 继承了亲本保持系 II-32B 强耐 Cd 性,而受亲本恢复系 R498 的影响较小,清除自由基的能力明显比亲本 R498 强,MDA 积累较少;II 优 549 则受亲本保持系 R549 高 MDA 积累量的影响,各处理 MDA 含量均显著高于对照,MDA 积累增幅最大。由此可见,不同亲本组合配制的杂交子代叶片 MDA 含量不同,可能说明对 Cd 的抗性差异,因而,可以根据适当的亲本组合以及各时期的抗性特征,配制超亲优势的后代。

2.3.2 Cd 胁迫下同一恢复系与不同保持系组合对杂交稻叶片 MDA 的影响

与恢复系一样,保持系 II-32、D62B 与恢复系 R498 配制的杂交稻在 Cd 胁迫下,叶片 MDA 含量积累情况不同(表 6)。在孕穗期阶段,从 MDA 含量变化来看,低浓度 Cd 胁迫下,杂交稻 II 优 498 叶片 MDA 显著高于对照,MDA 有小幅上升,而 D 优 498 相对于对照,叶片 MDA 含量反而略有下降,但下降幅度不明显,就变化幅度而言,低浓度对两种杂交稻的影响不大,由此可断定,低浓度时,保持系 II-32B 组合和 D62B 组合叶片膜过氧化作用不明显,轻度胁迫对膜伤害相对较小,对子代的影响较小;当在高浓度(5mg/L)条件时,保持系 D62B 配制的杂交稻叶片 MDA 含量猛然增加,且增幅较大(71.27%),保持系 D62B 对子代产生负影响,而保持系 II-32B 配制的杂交稻叶片 MDA 含量虽然有所增加,但增加幅度远远不及保持系 D62B 组合,仅 30% 左右,具有相对较强的细胞抗 Cd 能力,抗 Cd 性明显高于保持系 D62B,总的看来,杂交稻 II 优 498 较 D 优 498 叶片 MDA 含量积累慢。

表 6 恢复系 R498 及其相应保持系配制的杂交稻叶片 MDA 含量($\mu\text{mol/g}$)

Table 6 MDA contents of hybrids made from restore lines R498 and other maintainer lines

Cd 浓度 Cd level(mg/L)	杂交组合 MDA 含量 MDA contents of hybrids			
	孕穗期 Booting stage		灌浆期 Filling stage	
	II 优 498 R498 $\times$ II-32B	D 优 498 R498 $\times$ D62B	II 优 498 R498 $\times$ II-32B	D 优 498 R498 $\times$ D62B
0	3.386e	3.667d	6.170bc	5.669c
1	3.843c	3.557d	6.142bc	6.537b
5	4.442b	6.281a	9.225a	8.959a

同一列数字后小写字母表示同一生育时期差异显著($p < 0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly in the same stage($p < 0.05$)

在灌浆期,各杂交稻叶片 MDA 含量变化与孕穗期不同。在低浓度(1mg/L)时,保持系 D62B 组合叶片 MDA 含量为 6.537 $\mu\text{mol/g}$,相比对照显著增加,增幅约 15%,而保持系 II-32B 组合配制的杂交稻为 6.142 $\mu\text{mol/g}$,略有下降,与对照差异不显著,表现同孕穗期相反,可能是由于该杂交稻在长期的低浓度 Cd 胁迫下,植物为保护自身免受伤害形成了一套相应的抗氧化保护系统,致使叶片 MDA 含量降低;当水稻受到

5mg/LCd 胁迫时,杂交稻Ⅱ优498和D优498叶片MDA显著高于对照,相对而言,Ⅱ优498叶片MDA含量增幅相对较小(49.50%),说明保持系Ⅱ-32B能提高子代抵抗外界逆境能力。

恢复系与不同保持系组合配制的杂交稻受Cd胁迫叶片MDA积累速度不同,其中Ⅱ优498继承了亲本保持系Ⅱ-32BMDA积累较慢的特征,在孕穗期和灌浆期MDA积累始终缓慢,稳定性较强,显示出对Cd相对较强的耐性。

2.4 杂交水稻及其亲本叶片MDA含量差异

2.4.1 孕穗期杂交水稻及其亲本叶片MDA含量差异

在孕穗期,镉胁迫对水稻叶片MDA含量的作用因材料与胁迫浓度而异(表7)。随着Cd浓度的增加,水稻保持系、恢复系及其杂交稻叶片MDA呈现逐渐上升的趋势,各处理浓度间达显著水平,表明在该时期,水稻亲本及子代对Cd较为敏感,MDA含量相应升高。

表7 水稻孕穗期保持系、恢复系及其杂交稻叶片MDA的含量($\mu\text{mol/g}$)
Table 7 MDA contents of Maintainer, Restorer and Hybrid rice in booting stage

亲本及材料 Parents and material	Cd 处理浓度 Cd level (mg/L)		
	0	1	5
保持系($n=4$) Maintainer line	3.857e	5.466c	7.041a
恢复系($n=5$) Restorer line	4.313d	5.590c	6.753b
杂交稻($n=6$) Hybrids	3.583f	4.294d	5.379c

同一列数字后小写字母表示差异显著($p<0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly($p<0.05$)

在低Cd浓度(1mg/L)处理下,杂交水稻及其亲本植株体内MDA含量显著升高,均与对照达显著水平,其中上升最为明显的是保持系,其值为 $5.466\mu\text{mol/g}$,增幅达到42%,相比之下,杂交稻叶片MDA含量显著低于亲本材料,增幅最小(20%),MDA含量仅为 $4.294\mu\text{mol/g}$ 。在高浓度(5mg/L)胁迫时,三者MDA含量均显著高于低浓度镉胁迫时的含量。说明在孕穗期时,水稻亲本及其子代在高浓度镉处理下比在低浓度镉处理下更易受到伤害,就MDA变化幅度而言,保持系增幅最大,约83%,且MDA含量也居三者之最,达到 $7.041\mu\text{mol/g}$,杂交稻叶片MDA含量仅 $5.379\mu\text{mol/g}$,增幅最小(约50%),由此可见,水稻受到高Cd胁迫时,其伤害程度与低浓度胁迫一致,表现为保持系>恢复系>杂交稻,因而,杂交稻无论在低浓度还是高浓度下,其清除自由基的能力明显比保持系、恢复系强,具有较强的抵抗逆境胁迫的能力。

2.4.2 灌浆期杂交水稻及其亲本叶片MDA含量差异

在灌浆期阶段(表8),随着Cd浓度的增加,保持系、恢复系及杂交稻叶片MDA含量均有不同程度的升高。

表8 水稻灌浆期保持系、恢复系及其杂交稻叶片MDA含量($\mu\text{mol/g}$)
Table 8 MDA contents of Maintainer, Restorer and Hybrid rice in filling stage

亲本及材料 Parents and material	Cd 处理浓度 Cd level (mg/L)		
	0	1	5
保持系($n=4$) Maintainer line	5.766d	7.066c	10.027ab
恢复系($n=5$) Restorer line	4.376e	5.547d	10.187a
杂交稻($n=6$) Hybrids	5.632d	5.877d	9.666b

同一列数字后小写字母表示差异显著($p<0.05$) The means in the same column with small letters differ significantly($p<0.05$)

当Cd低浓度(1mg/kg)处理时,恢复系和保持系叶片MDA含量与对照比达显著水平,体内MDA含量骤然增加,增幅均达到22%以上,相比之下,恢复系MDA上升较快,受到Cd毒害引起的氧化胁迫程度最高,显示出对Cd强敏感性,杂交稻叶片MDA含量相对于对照,差异不显著,并表现为低浓度略有上升,受到Cd影响最小,增幅最低,仅为4%。因此,低浓度Cd胁迫下,杂交稻具有很好的抗逆性。而高Cd浓度(5mg/kg)下,植株叶片细胞膜受到刺激产生毒害,致使杂交稻及其亲本叶片MDA含量都有所增加,与低浓度Cd均达

显著水平。恢复系和保持系叶片 MDA 含量显著高于杂交稻,其中上升最快的为恢复系,MDA 含量为三者最高,达到 $10.187 \mu\text{mol/g}$,增幅 132%,杂交稻受到 Cd 影响最小,增幅 71%。总之,与孕穗期不同,灌浆期杂交水稻及其亲本对 Cd 胁迫耐性总体表现为杂交稻 > 保持系 > 恢复系。

3 讨论

在正常条件下,植物能有效清除体内活性氧自由基,使细胞免受伤害,但在逆境条件下,活性氧自由基产生速度超过清除能力,植物就会受到伤害,产生 MDA,且随着环境 Cd 浓度的提高,MDA 含量呈现逐渐上升的趋势^[16,17],但抗性强的类型,MDA 含量增加较少^[18]。

本试验结果表明,不同镉胁迫水平对杂交水稻及其亲本叶片 MDA 含量有一定影响,且在不同生育时期,Cd 对杂交稻及其亲本的伤害程度不同。如孕穗期水稻耐性表现为杂交稻 > 恢复系 > 保持系,而灌浆期,杂交水稻及其亲本对 Cd 胁迫耐性总体表现为杂交稻 > 保持系 > 恢复系,但总的来说,杂交稻对在各浓度和各生育期的清除自由基的能力明显比保持系、恢复系强,具有较强的抵抗逆境胁迫的能力,这可能是由于亲本优势基因的加性效应,所表现出的杂种优势,使得杂交后代抗逆性显示出优于亲本的性状^[21,22]。而恢复系与保持系间抗性差异可能与恢复基因和保持基因有关,但目前还未见有关报道,有关原因还需进一步研究。

水稻亲本保持系和恢复系随着 Cd 胁迫浓度和时间的增加,亲本叶片 MDA 含量基本呈现逐渐上升的趋势,且灌浆期 MDA 积累量远大于孕穗期,高浓度 Cd 处理比低浓度 Cd 处理更易受到伤害,说明随着 Cd 胁迫浓度的加剧和生育时期的推进,水稻叶片质膜的组成和完整性遭到破坏,细胞内产生大量自由基,但由于清除自由基的能力下降,引起质膜发生过氧化,MDA 含量增加^[18]。但有学者指出当植物受到 Cd 毒害时,会应激产生保护作用,抑制膜脂过氧化反应,维持细胞膜结构和功能的完整性,因此有可能使低浓度镉处理下的 MDA 含量反而低于不施镉处理。如恢复系材料 R498 在低 Cd 浓度处理下 MDA 含量比对照低。总的来看,孕穗期阶段 MDA 积累表现较为稳定,但在灌浆期受到 Cd 处理浓度的影响,不同恢复系和保持系材料 MDA 积累变化较大。产生这一现象可能与以下原因有关;第一,在水稻给 Cd 培养下,由于植株在灌浆期吸收 Cd 的累加效应,体内的净累积 Cd 含量较孕穗期更高,受到的生理毒害相对更大;第二,水稻在灌浆期时已开始步入衰老期,根系活力以及植株体内部生理生化作用的减弱^[19],体内各种生命活动更复杂,这时不同材料存在的抗性差异占主导作用,对 Cd 产生了不同适应性,从而导致在灌浆期 MDA 积累在不同 Cd 浓度下变化大;第三,可能与恢复基因和保持基因有关,但目前还未见有关报道,相关原因还需进一步研究。

通过对不同亲本组合配制的杂交稻叶片 MDA 变化特征分析表明,水稻亲本对子代 MDA 含量有着深刻影响。如杂交稻 II 优 498MDA 积累速率与亲本 II-32B 保持一致,即杂交稻 II 优 498 在 MDA 方面受亲本保持系 II-32B 的影响较大,始终保持着亲本的这一优势基因,维持着低 MDA 积累速率,其清除自由基能力明显比亲本恢复系 R498 强,显示出优于亲本的性状^[21-22],使得叶片 MDA 含量不仅不会上升反而略有下降,但下降幅度不明显,这可能是因为有机酸解毒作用使得体内各种抗氧化酶活性相对较高,有利于清除活性氧自由基,减弱膜脂过氧化作用,从而让 MDA 维持在一定水平,减少了 MDA 在体内的累积^[23-25],在高浓度时则抑制其活性^[13]。总的来说,低浓度对两种恢复系组合的影响不大,但当水稻在高浓度 Cd 胁迫时,两个组合 MDA 含量均增加,说明植物体内 MDA 存在一个阈值,超过一定浓度后,细胞内代谢失调,自由基积累,膜质过氧化作用加大,MDA 含量升高^[24]。相对而言,保持系 II-32B 组合具有相对较强的细胞耐镉能力,而在灌浆期,试验结果与孕穗期相同,杂交稻继承保持系 II-32B 的优势基因,同样表现出较强抗性。由此可见,不同亲本配制的杂交稻在受到 Cd 胁迫时,叶片 MDA 含量增加幅度上表现不同,显示出亲本对子代 Cd 耐性的影响差异,可根据优良亲本,寻找优势组合,培育出抗 Cd 性强的杂交水稻,以获得低吸收低积累 Cd 的水稻品种。

由于土壤中的镉离子不仅要受 pH 和 Eh 的影响,还要受到诸多阳离子、土壤矿质粘粒等的影响。本试验采取水培方法(在营养液中镉离子主要是以离子态方式存在),不能完全模仿土壤环境,所以试验所得的结果并不一定适应于大田水稻的生长情况,且本试验仅设置了两个生育时期和 3 个浓度梯度,至于在其他浓度和生育期对 MDA 的影响呈现何种规律性,还有待进一步研究。

Reference:

- [1] Peter Stair. Two new reports show industrial toxins common in human bodies. *World Watch*, 2005, 18(6):7—8.
- [2] Kido T, Nogawa K, Honda R, *et al.* The association between dysfunction in inhabitants environmentally exposed to cadmium. *Arch Environ Health*, 1990, 43(3): 213—217.
- [3] Waalkes M P, Diwan B A. Cadmium-induced inhibition of the growth and metastasis of human lung carcinoma xenografts: role of apoptosis. *Carcinogenesis*, 20(1): 65—70.
- [4] Simmons R W, Pongsakul P, Chaney R L, *et al.* The relative exclusion of zinc and iron from rice grain in relation to rice grain cadmium as compared to soybean: Implications for human health. *Plant and Soil*, 2003, 257(1): 163—170.
- [5] Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 20(3): 514—523.
- [6] Xia H P. Studies on cadmium in soil-plant system. *Chinese Journal of Applied And Environmental Biology*, 1997, 3(3): 289—298.
- [7] Becana M, Dalton D A, Moran J F, *et al.* Reactive oxygen species and antioxidants in legume nodules. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(4): 372—381.
- [8] Kanazawa S, Sano S, Koshiha T, *et al.* Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(2): 211—216.
- [9] Cheng W D, Zhang G P, Yao H G. The difference in growth and four microelement concentrations two rice genotypes differing in grain cadmium-accumulating capacity. *Agricultural Sciences in China*, 2004, 3(6): 416—424.
- [10] Rout G R, Samantaray S, Das P. Differential cadmium tolerance of mung bean and rice genotypes in hydroponic culture. *Soil and Plant Science*, 1999(4): 234—241.
- [11] Grant C A, Buckley W T, Bailey L D. Cadmium accumulation in crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, 78(1): 1—17.
- [12] Li K Q, Liu J G, Lu X L, *et al.* Uptake and distribute on of cadmium in different rice cultivars. *Journal of Agro-Environmen Science*, 2003, 22(5): 529—532.
- [13] Shao G S, Muhammad Jaffar Hassan, Zhang X F, *et al.* Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(3): 239—241.
- [14] Zhang X F, Wang D Y, Chu K F, *et al.* Changes of SOD activity and MDA Content in rice exposed to Cd stress as affected by genotype. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(2): 194—198.
- [15] Wang K R, Gong H Q. Effects of cadmium exposures in different stages on plant growth, Cd uptake and Cd concentrations in brown rice of a hybrid and conventional rice variety. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1197—1203.
- [16] Hua C, Wang R L. Changes of SOD and CAT activities and MDA content during senescence of hybrid rice and three lines leaves. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2003, 23(3): 406—409.
- [17] Zhang G, Slaski J J, Archambault J, *et al.* Aluminum-induced alterations in lipid composition of microsomal membranes from an aluminum-resistant and aluminum-sensitive cultivar of *Triticum aestivum*. *Physiologia Plantarum*, 1996, 96(4): 683—691.
- [18] Zhen S Y, Wang L Y, Shang X F, *et al.* Effects of cadmium exposures on antioxidant enzyme activities and MDA in maize. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007, (1): 36—38.
- [19] Huang Y S, Luo G H, Guan Q W. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by cadmium to plant. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(6): 522—526.
- [20] Liu G H. Effects of drought stress on physiological mechanism of hot pepper. *Hubei Agricultural Sciences*, 2007, 46(1): 88—90.
- [21] Wen J C, Zhang Z L, Jin S L, *et al.* Iron and zinc contents in japonica hybrid rice based on CMS-D1 system. *Scientia Agricultural Sinica*, 2005, 38(6): 1182—1187.
- [22] Zhang M W, Pen Z M, Du Y Q. Combining ability and stability analysis of the content of trace elements Fe, Zn and Mn in special rice grains. *Chinese Journal of Rice Science*, 1996, 10(4): 201—206.
- [23] Jing H M, Zheng H L, Zhao Z Q, *et al.* Progresses of plants response to cadmium. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2125—2130.
- [24] Peng Y, Li Y, Yang G X, He G Y, *et al.* Effects of aluminum stress on the activities of SOD, POD, CAT and the contents of MDA in the seedlings of different wheat cultivars. *Biotechnology*, 2006, 16(3): 38—42.
- [25] Cao Y, Huang R D, Cao Z J. Effects of Pb stress on the physiological and biochemical traits of maize. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(2): 61—64.

参考文献:

- [5] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展. *生态学报*, 2000, 20(5): 514—523.
- [6] 夏汉平. 土壤植物系统中的镉研究进展. *应用与环境生物学报*, 1997, 3(3): 289—298.
- [12] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 529—532.
- [13] 邵国胜, Muhammad, Jaffar Hassan, 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. *中国水稻科学*, 2004, 18(3): 239—241.
- [14] 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. *中国水稻科学*, 2006, 20(2): 194—198.
- [15] 王凯荣, 龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响. *生态环境*, 2006, 15(6): 1197—1203.
- [16] 华春, 王仁雷. 杂交稻及其三系叶片衰老过程中 SOD、CAT 活性和 MDA 含量的变化. *西北植物学报*, 2003, 23(3): 406—409.
- [18] 郑世英, 王丽燕, 商学芳, 等. Cd²⁺ 胁迫对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. *江苏农业科学*, 2007, (1): 36—38.
- [19] 黄玉山, 罗广华, 关荣文. 镉诱导植物的自由基氧化损伤. *植物学报*, 1997, 39(6): 522—526.
- [20] 刘国花. 干旱胁迫对辣椒生理机制的影响. *湖北农业科学*, 2007, 46(1): 88—90.
- [21] 文建成, 张忠林, 金寿林, 等. 溟型杂交梗稻及其亲本稻米铁、锌元素含量的分析. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1182—1187.
- [22] 张名位, 彭仲明, 杜应琼. 特种稻米中微量元素铁、锌、锰含量的配合力和稳定性分析. *中国水稻科学*, 1996, 10(4): 201—206.
- [23] 荆红梅, 郑海雷, 赵中秋, 等. 植物对镉胁迫响应的研究进展. *生态学报*, 2001, 21(12): 2125—2130.
- [24] 彭艳, 李洋, 杨广笑, 等. 铅胁迫对不同小麦 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量的影响. *生物技术*, 2006, 16(3): 38—42.
- [25] 曹莹, 黄瑞冬, 曾志强. 铅胁迫对玉米生理生化特性的影响. *玉米科学*, 2005, 13(2): 61—64.