

# 水稻和杂草稻对镉胁迫反应的比较研究

王 欣,周守标\*,程龙玲,吴晓艳

(安徽师范大学生命科学学院 安徽重要生物资源保护与利用研究重点实验室,安徽 芜湖 241000)

**摘要:**采用水培实验,研究不同浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水稻和杂草稻植株的生长、色素含量、抗氧化酶的活性、丙二醛含量、相对电导率以及脯氨酸含量的影响。结果表明:(1)Cd<sup>2+</sup>胁迫条件下,水稻和杂草稻植株地上部分外观伤害随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的升高而加重。(2)水稻和杂草稻的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量含量均表现为 Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度<0.5 mg·L<sup>-1</sup>时升高,Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度>0.5 mg·L<sup>-1</sup>时降低的现象;水稻和杂草稻的类胡萝卜素含量也都表现出 Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度<0.5 mg·L<sup>-1</sup>时降低,然后升高,最后在 Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度>1 mg·L<sup>-1</sup>时降低的现象。(3)水稻的 SOD、POD、CAT 活性表现出在 Cd<sup>2+</sup>浓度<1 mg·L<sup>-1</sup>时升高,在 Cd<sup>2+</sup>浓度>1 mg·L<sup>-1</sup>时降低的现象;杂草稻的 SOD、CAT 活性表现出在 Cd<sup>2+</sup>浓度<2 mg·L<sup>-1</sup>时升高,在 Cd<sup>2+</sup>浓度>2 mg·L<sup>-1</sup>时降低的现象,杂草稻的 POD 活性表现出随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的升高而升高的现象;抗氧化酶活性随着 Cd<sup>2+</sup>浓度升高的变化幅度是水稻>杂草稻。(4)Cd<sup>2+</sup>胁迫使水稻和杂草稻的丙二醛含量、相对电导率以及脯氨酸含量显著增加,且增加幅度是水稻>杂草稻,说明水稻产生了较严重的膜脂过氧化。总之,对于 Cd<sup>2+</sup>胁迫,在敏感性上水稻>杂草稻,在抗性上杂草稻>水稻。

**关键词:**Cd<sup>2+</sup>胁迫;水稻;杂草稻;生理指标

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)04-0661-06

## Response of Rice and Weedy Rice Subjected to Cadmium Stress: A Comparative Study

WANG Xin, ZHOU Shou-biao\*, CHENG Long-ling, WU Xiao-yan

(Key Laboratory of Biological Resources Conservation and Utilization, College of Life Sciences, Anhui Normal University , Wuhu 241000, China)

**Abstract:** The effects of Cd<sup>2+</sup> on growth, chlorophyll content, MDA content, relative electric conductivity and activities of anti-oxidative enzymes in rice and weedy rice were examined hydroponically. The results suggested that, (1) apparent damage of aerial parts of rice and weedy rice exposed to Cd enhanced with increasing Cd<sup>2+</sup> concentration.(2)Contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll in leaves of rice and weedy rice increased at Cd<sup>2+</sup> concentration below 0.5 mg·L<sup>-1</sup>, while their contents decreased at concentration above 0.5 mg·L<sup>-1</sup>. Carotenoid content decreased at Cd<sup>2+</sup> concentration below 0.5 mg·L<sup>-1</sup>, but attenuated later on. The Carotenoid content increased again at Cd<sup>2+</sup> concentration above 1.0 mg·L<sup>-1</sup>. (3)Activities of SOD, POD and CAT in rice exposed to Cd<sup>2+</sup> increased when Cd<sup>2+</sup> concentration was below 1 mg·L<sup>-1</sup>, but decreased when Cd<sup>2+</sup> concentration was above 1 mg·L<sup>-1</sup>. Activities of SOD and CAT in weedy rice increased when Cd<sup>2+</sup> concentration was below 2 mg·L<sup>-1</sup>, but decreased when Cd<sup>2+</sup> concentration was above 2 mg·L<sup>-1</sup>. POD activity in weedy rice increased with increasing Cd<sup>2+</sup> concentration. (4)Subjected to Cd<sup>2+</sup> treatment, MDA content in both rice and weedy rice increased, while relative electric conductivity and proline content significantly increased, and the amplitude increased in rice was higher than those in weedy rice, suggesting that rather severe membrane lipid peroxidation has been occurred in rice. Taken together, rice was more sensitive to Cd<sup>2+</sup> stress than weedy rice in terms of susceptibility, while with reference to resistance, weedy rice was more resistant to Cd<sup>2+</sup> stress than rice.

**Keywords:**Cd<sup>2+</sup> stress; rice; weedy rice; physiological index

---

收稿日期:2011-10-22

基金项目:转基因生物新品种培育科技重大专项“转基因水稻向杂草稻基因漂流的风险评价、预防及其后果的控制”(No. 2009ZX08012-020B);安徽省高校生物环境和生态安全重点实验室(2004003)专项基金资助

作者简介:王 欣(1987—),男,安徽安庆人,硕士,主要从事植物生理生态和植物修复方面的研究。E-mail:wangxin19870913@126.com

\* 通讯作者:周守标 E-mail:zhoushoubiao@vip.163.com

随着工业的快速发展,各种工业废水和固体废弃物的渗出液直接排入水中,致使水中重金属的含量越来越高<sup>[1,9]</sup>。过量的重金属在植物体内产生活性氧,打破了清除机制的动态平衡,造成植物过氧化伤害。其中,Cd是主要的重金属污染源之一,其毒性强、危害大。尤其是Cd<sup>2+</sup>污染水稻后,直接影响水稻生理指标,进而影响水稻的产量与质量;并通过食物链传递最终在人体富集,危害人类健康<sup>[2]</sup>,因而引起人们的关注。黄秋婵<sup>[11]</sup>和王琴儿<sup>[9]</sup>等研究镉毒害对水稻生理生态效应;何俊瑜<sup>[8]</sup>和邵国胜<sup>[10]</sup>等进一步研究不同基因型水稻对镉胁迫反应的差异,但对于水稻和杂草稻镉胁迫反应的种间差异尚未研究。

杂草稻(Weedy Rice)是普通野生稻和栽培稻经自然选择和人工干预而产生的兼有野生稻和栽培稻特性的中间型水稻类型,因其种皮多数为红色,因此又称为“红稻”<sup>[14]</sup>。一方面在稻田中有杂草性危害,另一方面它从普通野生稻中继承且在长期的野生环境中积累了众多非生物胁迫抗性的遗传因子,具有良好的抗病性和对环境的适应性,与栽培稻有密切的亲缘关系,但遗传差异较大<sup>[17]</sup>,因此在水稻改良特别在抗性育种上是一个优良的稻种资源库<sup>[14]</sup>。目前关于它们的研究主要集中在杂草稻的起源、鉴别、危害以及防治<sup>[4]</sup>,但对于研究杂草稻和水稻对重金属胁迫抗性机制的差异还未见报道。本文通过水培实验,比较杂草稻和水稻在不同浓度Cd<sup>2+</sup>胁迫下的植株生长和生理响应的差异,为进一步探究其生长代谢过程中如何适应和抵御外来污染物的生理响应机制和提高水稻对重金属抗性以及进行品种改良提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

本研究所用的试验材料为水稻(*Oryza sativa L.*)和杂草稻(Weedy rice)种子。水稻种子品种为川香8号(四川川种种业有限责任公司生产);杂草稻种子采自安徽巢湖市和县。

### 1.2 试验方法

挑选充实饱满的杂草稻和水稻种子,分别用10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消毒30 min,用蒸馏水冲洗干净并浸泡8 h,于25℃恒温箱内催芽。将萌发的种子放入直径15 cm、垫有2层滤纸的培养皿中,置于室温下生长,期间浇Hoagland营养液,待出现第二片完全叶时将幼苗移到塑料杯中,营养液每3 d一换,待幼苗长到四叶一心时,以不同Cd<sup>2+</sup>浓度(0、0.5、1、2、5 mg·L<sup>-1</sup>)处理,每个

处理100株苗,每个浓度设3个重复,每2 d更换处理液。处理7 d后,于各处理组采样测定其生理指标。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 植物外伤症状

参考秦天才等<sup>[5]</sup>的方法,用目测估计,将植物的外伤症状分为4级:正常生长(无伤害),目测不到伤害症状;轻度伤害,叶片中心部位失绿;中度伤害,叶片中心部位及外围不同程度失绿;重度伤害,植物矮小叶片全部失绿。

#### 1.3.2 叶片色素含量测定

取鲜叶0.2 g,采用分光光度法<sup>[6]</sup>用80%丙酮研磨提取后,于663、645、440 nm处测定吸光度。计算叶绿素a、叶绿素b含量,叶绿素总量以及类胡萝卜素含量。

#### 1.3.3 抗氧化酶活性的测定

SOD活性的测定采用NBT光化还原法<sup>[7]</sup>,利用SOD抑制NBT在光下的还原作用来确定酶活性大小。POD活性的测定采用愈创木酚法<sup>[8]</sup>,将每分钟OD减少0.01定义为1个活力单位。CAT活性的测定采用陈利锋等<sup>[8]</sup>的方法,将每分钟OD增加0.01定义为1个活力单位。

#### 1.3.4 MDA含量测定

采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[8]</sup>,单位nmol·g<sup>-1</sup> FW。

#### 1.3.5 脯氨酸含量测定

采用酸性茚酚酸酮法测定<sup>[8]</sup>,单位μg·g<sup>-1</sup> FW。

#### 1.3.6 茎叶电解质渗透率的测定

称取新鲜茎叶0.2 g,剪成1 cm长小段,加入装有20 mL双蒸水的三角瓶中,于电动振荡机上以400次·min<sup>-1</sup>的速率振荡2 h,过滤后用DDS-307型电导仪测电导率。

### 1.4 数据处理

实验数据均用SPSS13.0软件进行方差分析(ANOVA)和LSD检验,用Excel和SigmaPlot作图,文中所有测定指标均以鲜质量计。

## 2 结果和分析

### 2.1 植物外伤症状

由表1可见,随着培养液中Cd<sup>2+</sup>浓度增大,杂草稻和水稻表现出外观伤害的差异较大。Cd<sup>2+</sup>浓度为0.5 mg·L<sup>-1</sup>时,杂草稻和水稻长势均正常,没有对植株造成伤害;Cd<sup>2+</sup>浓度为1.0 mg·L<sup>-1</sup>时,杂草稻长势正常,而水稻表现出轻度伤害,靠近叶的中心部位失绿,可见水稻对镉胁迫更加敏感;Cd<sup>2+</sup>浓度≥2.0 mg·L<sup>-1</sup>

表1 Cd<sup>2+</sup>处理下杂草稻和水稻幼苗的外伤症状

Table 1 Visible damage in rice and weedy rice subjected to Cd<sup>2+</sup> stress

| Cd <sup>2+</sup> 的浓度/mg·L <sup>-1</sup> | 植物  | 外伤症状 |
|---|-----|------|
| 0                                       | 杂草稻 | 正常生长 |
|   | 水稻  | 正常生长 |
| 0.5                                     | 杂草稻 | 正常生长 |
|   | 水稻  | 正常生长 |
| 1.0                                     | 杂草稻 | 正常生长 |
|   | 水稻  | 轻度伤害 |
| 2.0                                     | 杂草稻 | 重度伤害 |
|   | 水稻  | 重度伤害 |
| 5.0                                     | 杂草稻 | 重度伤害 |
|   | 水稻  | 重度伤害 |

时,杂草稻和水稻表现出重度伤害。

## 2.2 Cd<sup>2+</sup>胁迫对杂草稻和水稻幼苗色素的影响

由图1可见,Cd<sup>2+</sup>胁迫对水稻和杂草稻幼苗体内色素含量的影响显著。水稻和杂草稻幼苗中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总量,随着Cd<sup>2+</sup>浓度的升高表现出先升高后降低的趋势。在较高Cd<sup>2+</sup>浓度下(大于1.0 mg·L<sup>-1</sup>),水稻和杂草稻幼苗中类胡萝卜素也均表现出随着Cd<sup>2+</sup>浓度的升高而降低的趋势。比较发现,水稻幼苗色素含量随着Cd<sup>2+</sup>浓度升高的变化幅度大于杂草稻。水稻和杂草稻的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量在Cd<sup>2+</sup>浓度为0.5 mg·L<sup>-1</sup>时,均达到峰值,分别高出其对照的31.84%、32.47%、32.01%和22.52%、20.30%、21.86%。类胡萝卜素在Cd<sup>2+</sup>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时达峰值,分别比其对照升高了2.91%和17.83%;当Cd<sup>2+</sup>浓度为5 mg·L<sup>-1</sup>时,水稻和杂草稻的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量均达到最低值,分别比其对照降低了54.01%、61.78%、56.09%和38.65%、44.06%、

40.27%。类胡萝卜素则分别比其对照降低了42.28%和29.36%。水稻和杂草稻幼苗中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总量都与Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度呈极显著负相关,相关系数分别为-0.815\*\*、-0.676\*\*、-0.821\*\*和-0.854\*\*、-0.776\*\*、-0.868\*\*。水稻幼苗的类胡萝卜素与Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度呈显著负相关,相关系数分别为-0.581\*和-0.529\*。

## 2.3 Cd<sup>2+</sup>胁迫对杂草稻和水稻幼苗抗氧化酶活性的影响

由图2可知,随着Cd<sup>2+</sup>浓度的增加,水稻的SOD、POD、CAT活性和杂草稻的SOD、CAT活性都表现出在低Cd<sup>2+</sup>浓度时升高,在高Cd<sup>2+</sup>浓度时降低的现象。杂草稻幼苗体内的POD活性表现出随着Cd<sup>2+</sup>浓度的升高而升高的现象。水稻幼苗体内的SOD、POD、CAT活性在Cd<sup>2+</sup>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大值,分别为对照的236.65%、194.07%和169.49%,之后下降,到5 mg·L<sup>-1</sup>时其活性仅为对照的72.94%、133.79%和84.32%,与活性最大时相比降低了163.71%、60.28%和85.17%。杂草稻幼苗体内的SOD和CAT活性在Cd<sup>2+</sup>浓度为2 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大值,分别为对照的222.47%和170.91%,之后下降,在5 mg·L<sup>-1</sup>时SOD和CAT的活性只有对照的166.80%和108.64%,与活性最大时相比降低了55.67%和62.27%;杂草稻幼苗体内的POD活性一直升高,在Cd<sup>2+</sup>浓度为5 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大值,为对照的217.53%。

## 2.4 Cd<sup>2+</sup>胁迫对杂草稻和水稻幼苗MDA、相对电导率和Pro含量的影响

丙二醛(MDA)是植物体内膜脂过氧化的主要产物之一,其含量水平通常可反映植株遭受氧化胁迫的水平,为膜质过氧化的重要指标之一<sup>[16-17]</sup>。植物叶片电导率的变化在一定程度上可以反映出叶片受害

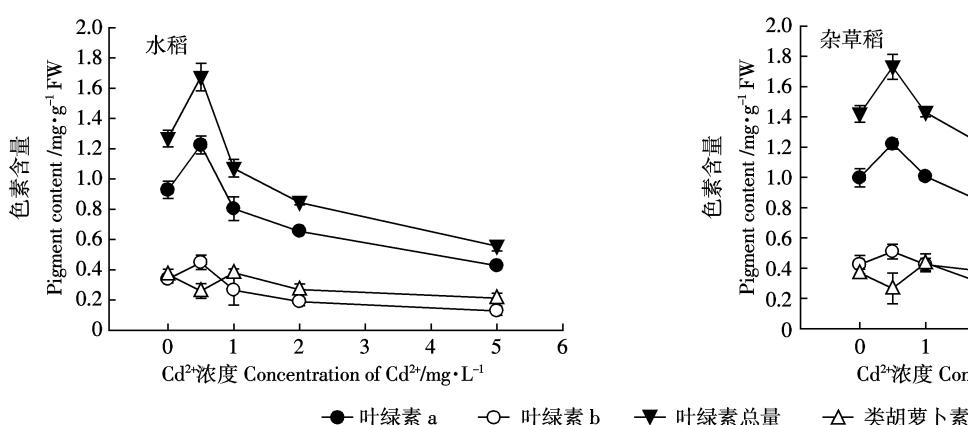
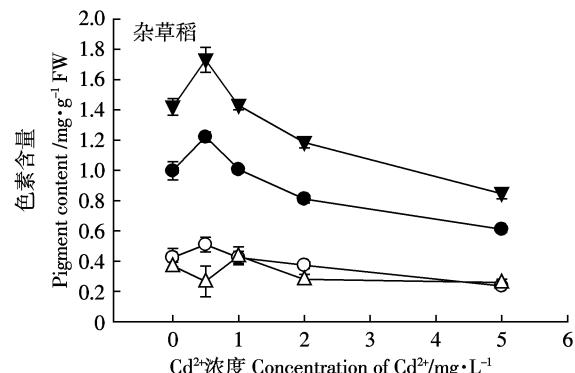


图1 不同浓度的Cd<sup>2+</sup>胁迫对水稻和杂草稻叶片中色素含量的影响

Figure 1 Effects of Cd<sup>2+</sup> stress on chlorophyll content in leaves of rice and weedy rice



后的生理变化,与植物的伤害程度和抗性强弱密切相关<sup>[18]</sup>。脯氨酸(Pro)是植物在胁迫下产生的一种重要的渗透调节物质,其含量的积累对于降低细胞内溶质的渗透势、平衡原生质体内外的渗透压等具有重要的作用。由图2可知,两种植物的MDA、相对电导率和Pro含量均随着Cd<sup>2+</sup>处理浓度的提高而显著升高。说明植株遭受到的氧化胁迫随Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度的提高而加重,但品种间存在着明显差异。同一Cd<sup>2+</sup>处理浓度下水稻幼苗的MDA、相对电导率和Pro含量一直高于杂草稻。当Cd<sup>2+</sup>的胁迫浓度为5 mg·L<sup>-1</sup>时,水稻和杂草稻幼苗体内的MDA、相对电导率和Pro均达

到最大值,分别比其对照增加了63.63%、106.71%、461.48%和51.48%、91.87%、696.70%,并且都呈极显著正相关,相关系数分别为0.960\*\*、0.884\*\*、0.976\*\*和0.913\*\*、0.951\*\*、0.973\*\*。说明Cd<sup>2+</sup>污染对植物的细胞膜造成了很大伤害,这与观测到的植物外伤症状相吻合。进一步分析发现,水稻幼苗受到的破坏程度大于杂草稻。

### 3 讨论

Cd<sup>2+</sup>胁迫浓度低于0.5 mg·L<sup>-1</sup>时,水稻和杂草稻植株均无明显的外伤症状,随着Cd<sup>2+</sup>浓度进一步增

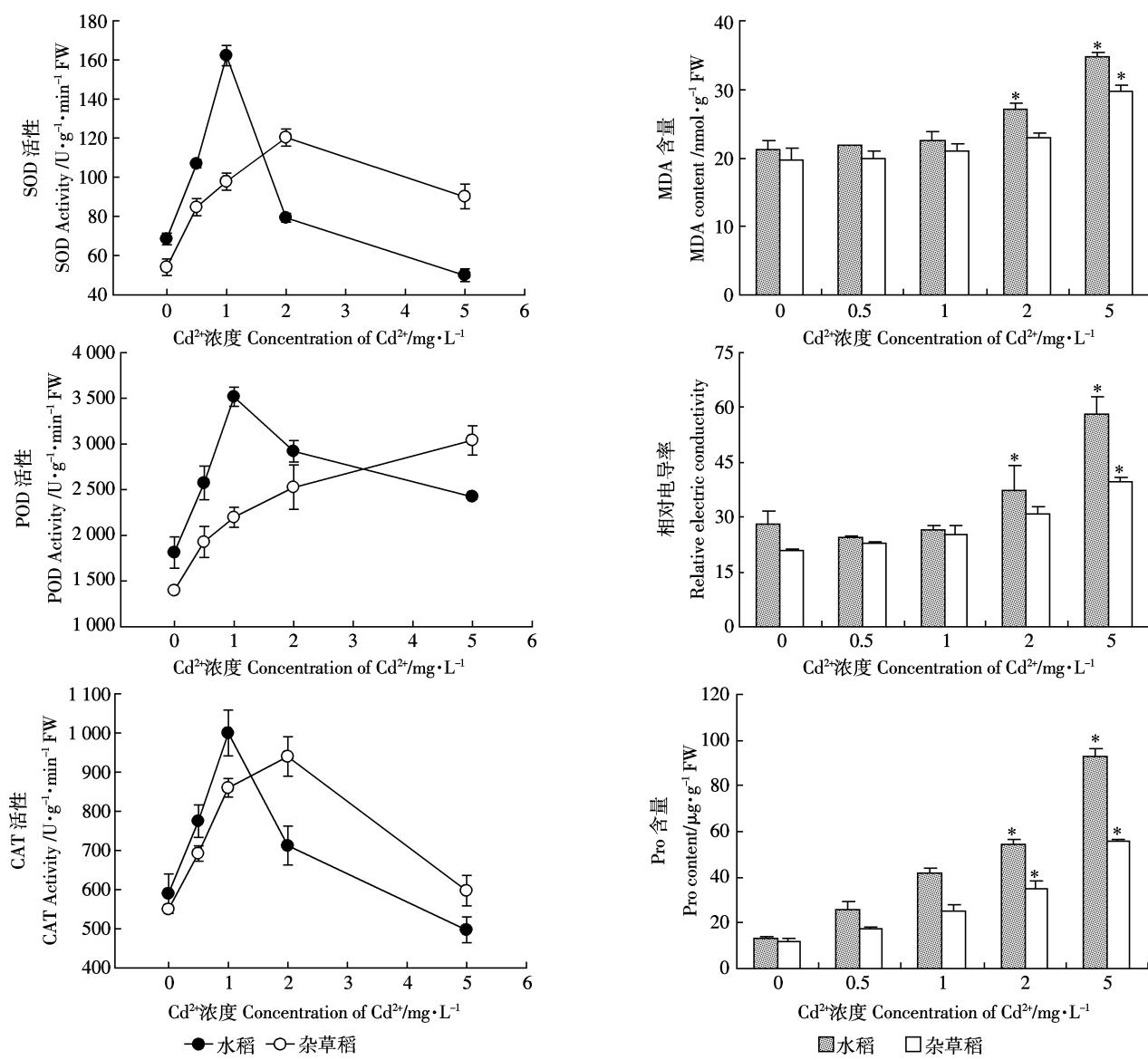


图2 不同浓度的Cd<sup>2+</sup>胁迫对水稻和杂草稻抗氧化酶活性、MDA含量、相对电导率和Pro含量的影响

Figure 2 Effects of Cd<sup>2+</sup> exposure on MDA content, proline content, relative electric conductivity and activities of anti-oxidative enzymes in leaves of rice and weedy rice

加,两种植株的叶片均发黄,叶片色素含量下降,须根由根尖发黑然后到整个须根发黑甚至须根腐烂,与黄永杰<sup>[16]</sup>研究 Cu<sup>2+</sup>胁迫下水花生的症状一致。

叶绿素含量是植物叶光合作用的非常重要的生理指标,其含量的高低可在一定程度上反应光合作用的水平。在本实验中,Cd<sup>2+</sup>胁迫下水稻和杂草稻的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均在低浓度( $<0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )时升高,然后随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的增加而降低,这与储玲等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,可能是因为在低浓度时,植物的保护适应性会刺激叶绿素的合成,然而随着 Cd<sup>2+</sup>在植物细胞中不断积累,导致叶绿素被分解和叶绿体的结构被破坏<sup>[23]</sup>。随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的升高,水稻叶绿素含量的变化幅度高于杂草稻,表明水稻叶片中叶绿素受 Cd<sup>2+</sup>胁迫的影响较大。植物体内类胡萝卜素有抑制活性氧的产生及清除活性氧的功能。在本实验中,当 Cd<sup>2+</sup>浓度高于  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,水稻和杂草稻的类胡萝卜素均随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的增加而先升高后降低,可能是少量的活性氧刺激类胡萝卜素的产生,大量的活性氧抑制类胡萝卜素的产生。水稻类胡萝卜素含量的变化幅度高于杂草稻,可见水稻对 Cd<sup>2+</sup>胁迫的敏感性大于杂草稻。

正常生长条件下,植物体内活性氧自由基的产生和清除处于平衡状态。当处于胁迫时,植物就会产生过多的活性氧自由基,这将导致膜脂的过氧化,从而使植物生长发生异常。SOD、POD 和 CAT 共同作用,能有效地清除植物体内的自由基和过氧化物<sup>[22]</sup>。在一定范围内,SOD、CAT 共同作用能把 O<sub>2</sub><sup>·</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 转化为 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>,并能起到减少活性氧自由基的形成;POD 和 CAT 则催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 形成 H<sub>2</sub>O,能有效阻止 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的积累<sup>[13,21]</sup>。本实验中,除杂草稻的 POD 活性一直上升以外,两种植物抗氧化系统酶的活性均随着 Cd<sup>2+</sup>浓度的增加呈先升高后降低的趋势。这是因为生物体内抗氧化酶合成受到了 O<sub>2</sub><sup>·</sup> 浓度的影响,在 O<sub>2</sub><sup>·</sup> 的诱导下生物合成抗氧化酶的能力升高<sup>[10]</sup>,但胁迫过重,植物的自身调节系统会被破坏,导致抗氧化酶活性有所降低。进一步分析,低 Cd<sup>2+</sup> 浓度时( $0.5, 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),在同一 Cd<sup>2+</sup> 浓度水平下,水稻幼苗体内 SOD、POD 和 CAT 的活性明显高于杂草稻幼苗,这说明水稻幼苗比杂草稻幼苗对 Cd<sup>2+</sup> 胁迫反应更敏感;高 Cd<sup>2+</sup> 浓度时( $2, 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),在同一 Cd<sup>2+</sup> 浓度水平下,水稻幼苗体内 SOD、POD 和 CAT 的活性明显低于杂草稻幼苗,并且杂草稻幼苗体内 SOD、POD 和 CAT 的活性最大值是在 Cd<sup>2+</sup> 胁迫浓度更高的情况下达到的,这表明杂草稻

对 Cd<sup>2+</sup> 胁迫的耐性更好。有研究表明,谷草转氨酶和谷丙转氨酶对杂草稻的 Cd<sup>2+</sup> 胁迫耐性有一定贡献<sup>[14]</sup>,镉胁迫对谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性有显著抑制作用,但受抑制的程度均为杂草稻轻于栽培稻,这可能是杂草稻对 Cd<sup>2+</sup> 胁迫的耐性更好的原因之一,也可能是导致杂草稻已成为贯穿全世界的问题杂草的原因之一。

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物,MDA 的含量通常作为过氧化程度的测定指标<sup>[10]</sup>。反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱<sup>[15]</sup>。本试验结果表明,水稻和杂草稻幼苗体内的 MDA 含量随 Cd<sup>2+</sup> 处理浓度的提高而显著增加,该结果同黄永杰等<sup>[16]</sup>的结果相似。但 Cd<sup>2+</sup> 胁迫下 MDA 增加的程度两种植物存在着差异,较高浓度 Cd<sup>2+</sup> 胁迫下,生长受抑程度较重,水稻幼苗体内 MDA 含量积累高于杂草稻,说明 Cd<sup>2+</sup> 诱导产生活性氧造成水稻叶片膜质的过氧化更严重,佐证了 MDA 积累与生长受抑制的关系。

当植物受到胁迫时,质膜会受到破坏,膜的通透性会增大。因此可以根据质膜透性的变化来反映植物受害的状况。有证据表明细胞离子渗透率与污染物浓度正相关<sup>[19]</sup>,本实验中,杂草稻和水稻的电导率随着 Cd<sup>2+</sup> 处理浓度的提高而极显著升高,这与王友保等<sup>[19]</sup>的结论一致。

植物体内游离脯氨酸含量的增加是对逆境胁迫的一种生理生化反应。它既可能是植物细胞膜结构和功能受损伤的表现,又可能是植物对逆境胁迫的适应性,降低细胞的渗透势<sup>[1]</sup>。在本实验中,随着 Cd<sup>2+</sup> 浓度的升高,水稻和杂草稻体内游离的脯氨酸含量都逐渐增加,说明了水稻和杂草稻通过增加游离的脯氨酸含量来抵御 Cd<sup>2+</sup> 对其毒害。进一步分析,水稻体内游离的脯氨酸含量在各个浓度 Cd<sup>2+</sup> 处理下都高于杂草稻,表明水稻受到的伤害大于杂草稻。

#### 4 结论

杂草稻和水稻遭受 Cd<sup>2+</sup> 胁迫时,作为内源活性氧清除剂的 SOD、POD、CAT 能够在一定程度下清除体内过剩的活性氧,维持活性氧代谢平衡,保护膜结构,使杂草稻和水稻具有一定忍耐或抵抗重金属 Cd<sup>2+</sup> 的能力。一旦胁迫超过它们的承受极限时,抗氧化酶活性就会下降或被破坏,膜脂质过氧化作用加剧,MDA 和脯氨酸的含量增加,质膜的离子渗透率升高,但二者之间存在差异。对于 Cd<sup>2+</sup> 胁迫,水稻表现出比杂草稻更加敏感的症状,而杂草稻比水稻表现出更强耐

性,其机理尚有待深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 黄秋婵,黎晓峰,李耀燕.镉对水稻的毒害效应及耐性机制的研究进展[J].安徽农业科学,2007,35(7):1971-1974.  
HUANG Qiu-chan, LI Xiao-feng, LI Yao-yan. Review of toxic effect of cadmium on *Oryza sativa* and tolerant mechanism[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(7):1971-1974.
- [2] 曾路生,廖 敏,黄昌勇,等.镉污染对水稻土微生物量、酶活性及水稻生理指标的影响[J].应用生态学报,2005,16(11):30-36.  
ZENG Lu-sheng, LIAO Min, HUANG Chang-yong, et al. Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11):30-36.
- [3] 王贵民,陈国祥,王习达,等.水稻两优培九与汕优63苗期Cd毒害下抗性差异的研究[J].农业环境科学学报,2004,23(2):217-220.  
WANG Gui-min, CHEN Guo-xiang, WANG Xi-da, et al. Resistance differences between two cultivars liangyupei9 and shanyou63 under Cd<sup>2+</sup> stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):217-220.
- [4] 袁晓丹,刘 亮,曹凤秋,等.杂草稻的研究现状与展望[J].中国野生植物资源,2006,25(3):5-8.  
YUAN Xiao-dan, LIU Liang, CAO Feng-qiu, et al. Prospect and present situation of weedy rice research[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2006, 25(3):5-8.
- [5] 秦天才,吴玉树,黄巧云,等.镉铅单一和复合污染对小白菜抗坏血酸含量的影响[J].生态学杂志,1997,16(3):31-34.  
QIN Tian-cai, WU Yu-shu, HUANG Qiao-yun, et al. Effects of cadmium, lead single and combination pollution on the contents of ascorbic acid in *Brassica chinensis* L.[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16 (3):31-34.
- [6] 张志良.植物生理实验指导[M].第三版.北京:高等教育出版社,2003.  
ZHANG Zhi-liang. Guidebook of phyto-physiology experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [7] 陈建勋.植物生理实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2002.  
CHEN Jian-xun. Guidebook of phyto-physiology experiments[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [8] 何俊瑜,任艳芳,朱诚期,等.镉胁迫对镉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.  
HE Jun-yu, REN Yan-fang, ZHU Cheng-qi, et al. Effects of cadmium stress on reactive oxygen species metabolism and antioxidant enzyme activity in Cd-sensitive mutant rice seedlings[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3):1004-1008.
- [9] 王琴儿,曾 英,李丽美.镉毒害对水稻生理生态效应的研究进展[J].北方水稻,2007,4(4):12-13.  
WANG Qin-er, ZENG Ying, LI Li-me. Advances on the effect of cadmium damage on physiology and ecology of rice[J]. *North Rice*, 2007, 4(4): 12-13.
- [10] 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.  
SHAO Guo-sheng, Muhammad J H, ZHANG Xiu-fu, et al. Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2004, 18(3):239-244.
- [13] 徐德利,周 玲,杜 永,等.连云港市水稻主产区土壤和灌溉水重金属含量分析及在稻米中的累积效应[J].中国土壤与肥料,2008,(4):60-64.  
XU De-li, ZHOU Ling, DU Yong, et al. Analysis on soil and water heavy metal content and accumulation effect in rice grains in major rice producing areas in Lianyungang[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008, (4):60-64.
- [14] 邵国胜,谢志奎,张国平.杂草稻和栽培稻氮代谢对镉胁迫反应的差异[J].中国水稻科学,2006,20(2):189-193.  
SHAO Guo-sheng, XIE Zhi-kui, ZHANG Guo-ping. Different responses to cadmium stress in Nitrogen metabolism between weedy and cultivated rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20(2):189-193.
- [15] 刘明达,王丽丽,李艳丽.镉胁迫下硅对水稻生物量及生理特性的影响[J].中国农学通报,2010,26(13):187-190.  
LIU Ming-da, WANG Li-li, LI Yan-li. Effect of Si on biomass and physiological characteristics of rice under Cd stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13):187-190.
- [16] 黄永杰,杨红飞,杨集辉,等.铜胁迫对水花生生长及活性氧代谢的影响[J].生态学杂志,2009,28(6):112-116.  
HUANG Yong-jie, YANG Hong-fei, YANG Ji-hui, et al. Effects of Cu stress on alternanthera philoxeroides growth and reactive oxygen species metabolism[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6):112-116.
- [17] 张忠林,谭学林,邓安凤.杂草稻种质资源的综合评价[J].植物遗传资源科学,2002,3(4):47-50.  
ZHANG Zhong-lin, TAN Xue-lin, DENG An-feng. Comprehensive evaluation of weedy rice germplasm[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2002, 3(4):47-50.
- [18] 李 君,周守标,黄文江,等.马蹄金叶片中铜、铅含量及其对生理指标的影响[J].应用生态学报,2004,15(12):2355-2358.  
LI Jun, ZHOU Shou-biao, HUANG Wen-jiang, et al. Cu and Pb contents in dichondra repens leaf and their effects on its physiological indexes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12):2355-2358.
- [19] 王友保,刘登义,张 莉,等.铜砷及其复合污染对黄豆影响的初步研究[J].应用生态学报,2001,12(1):117-120.  
WANG You-bao, LIU Deng-yi, ZHANG Li, et al. Effect of Cu and As and their combination pollution on glycine max[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1):117-120.
- [20] 储 玲,刘登义,王友保.铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究[J].应用生态学报,2004,5(1):119-122.  
CHU Ling, LIU Deng-yi, WANG You-bao. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of trifolium pratense[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 5(1):119-122.
- [21] Candalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutase[J]. *Plant Physiology*, 1993;7-12.
- [22] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Nutrition Biology*, 1992, 43:83-116.
- [23] Kastori R, Petrovic N. Effect of excess lead, cadmium, copper and zinc on water relations in sunflower[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15: 2424-2439.