

引用格式:

李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 徐庆国. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 147-152.

LI C Z, SUN Y L, LIU H M, XU Q G. The difference of seedling growth and photosynthetic performance of different rice varieties under cadmium stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(2): 147-152.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异

李陈贞<sup>1,2</sup>, 孙亚莉<sup>2</sup>, 刘红梅<sup>2</sup>, 徐庆国<sup>2\*</sup>

(1.怀化学院风景园林学院, 湖南 怀化 410008; 2.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 设置 0(对照)、0.05、0.10、0.20 mmol/L CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 等 4 种镉胁迫处理, 采用水培法, 测定不同镉胁迫处理下 28 占、黄华占、丰华占、黄粤占选、矮秀占、黄粤占 6 个镉抗性不同的水稻品种的幼苗高、幼根长、幼苗鲜质量、幼苗干质量、叶片叶绿素含量及其叶绿素荧光参数。结果表明: 不同镉胁迫处理下, 6 个供试水稻品种的幼苗高、幼根长、幼苗鲜质量及干质量随着镉胁迫浓度的增大而降低; 镉胁迫高抗性水稻品种 28 占和黄华占与镉胁迫中等或低抗性的丰华占、黄粤占选、矮秀占、黄粤占相比较, 其幼苗高、幼根长、幼苗鲜质量与干质量在镉胁迫下均表现出显著的优势, 能保持一定速度的幼苗生长及物质累积; 随着镉胁迫处理浓度的增大, 6 个供试水稻品种的叶绿素含量均呈下降趋势, 光合作用 PS II 的初始荧光参数( $F_0$ )均逐渐增加, 潜在最大光化学效率( $F_v/F_m$ )均逐渐降低, 其光化学转换的实际量子效率( $\Phi_{PS II}$ )和电子传递效率(ETR)均降低; 不同镉胁迫抗性的水稻品种间的苗期生长及光合性能存在明显差异, 黄粤占与矮秀占 2 个镉胁迫低抗性水稻品种的苗期生长性能比 28 占、黄华占 2 个镉胁迫高抗性水稻品种及丰华占、黄粤占选 2 个镉胁迫中等抗性水稻品种的抑制程度低, 其光合性能破坏程度比 28 占、黄华占、丰华占、黄粤占选的高。

**关键词:** 水稻; 镉胁迫; 苗期; 叶绿素含量; 叶绿素荧光参数; 光合性能

中图分类号: S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)02-0147-06

## The difference of seedling growth and photosynthetic performance of different rice varieties under cadmium stress

LI Chenzhen<sup>1,2</sup>, SUN Yali<sup>2</sup>, LIU Hongmei<sup>2</sup>, XU Qingguo<sup>2\*</sup>

(1.School of Landscape Architecture, Huaihua University, Huaihua, Hunan 410008, China; 2.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** In order to study the effect of cadmium stress on the growth and photosynthetic performance of different rice varieties, a group of CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O, with four concentrations, 0(distilled water), 0.05, 0.10, 0.20 mmol/L were used to culture six rice varieties. A batch of planting parameters including seedling height, young root length, fresh and dry weight of seedlings, chlorophyll content of leaves and chlorophyll fluorescence parameters of six different rice varieties(28zhan, Huanghuazhan, Fenghuazhan, Huangyuezhaxuan, Aixiuzhan, Huangyuezhazhan) were collected to investigate the effect of cadmium on the rice growing. The results show that seedling height, root length, fresh weight and dry weight decreased with the increase of Cd stress concentration. Among them, 28zhan and Huanghuazhan rice varieties with high resistance to cadmium stress showed significant advantages in seedling height, root length, fresh weight and dry weight under cadmium stress compared with other four rice varieties with medium or low resistance to cadmium stress. They still maintained a certain speed of seedling growth and material accumulation, which showed that they had

收稿日期: 2019-12-17

修回日期: 2020-03-17

基金项目: 湖南省科学技术厅重点研发计划项目(2015NK3013)

作者简介: 李陈贞(1983—), 女, 湖南怀化人, 硕士, 讲师, 主要从事风景园林设计研究, 16532305@qq.com; \*通信作者, 徐庆国, 教授, 主要从事作物遗传育种研究, 1075324207@qq.com

stronger resistance to cadmium stress at seedling stage. With the increase of Cd stress concentration, the chlorophyll content of leaves of six rice varieties showed a downward trend; the initial minimum fluorescence of PS for photosynthesis( $F_0$ ) increased gradually; the potential maximum photochemical efficiency( $F_v/F_m$ ) decreased gradually; the actual quantum efficiency of photochemical conversion( $\Phi PS II$ ) decreased, and the apparent photosynthetic electron transport efficiency(ETR) decreased. There were significant differences in seedling growth and photosynthetic performance among rice varieties with different cadmium stress resistance. The growth performance of rice varieties with low resistance to cadmium stress was lower than that of rice varieties with high resistance and medium resistance to cadmium stress, and the destruction of photosynthetic performance of cadmium stress were forceder than other varieties.

**Keywords:** rice; cadmium stress; seedling stage; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence parameters; photosynthetic performance

镉胁迫对农作物的危害是当今农业生产的一项世界性难题<sup>[1]</sup>。有色金属冶炼、矿石的烧结、工业废水的随意排放都极易引起镉污染。镉污染不仅危害农作物的正常生长发育,还能通过食物链进入生物体内,危害人体与牲畜的健康。水稻因其自身基因型特性,其镉吸附能力显著高于其他作物,成为镉污染的典型“受害者”。研究<sup>[2-5]</sup>表明,通过对植物叶绿素荧光参数的测定能精确反映植物光合作用的动态变化及植物对外界环境因子的响应。为此,本研究通过设置不同镉胁迫浓度处理,对6个不同镉胁迫抗性的水稻品种的种子萌发幼苗期的生长性能与叶绿素含量及其叶绿素荧光参数的变化进行分析,旨在为镉胁迫下的水稻优质高产栽培及低镉积累水稻新品种的选育提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

2个镉胁迫高抗性品种28占、黄华占;2个镉胁迫中等抗性品种丰华占、黄粤占;2个镉胁迫低抗性品种矮秀占、黄粤占。

### 1.2 镉胁迫的处理方法

将6个供试水稻品种的饱满籽粒分别浸泡在0.5%NaClO溶液中灭菌20 min,无菌水反复冲洗,再用蒸馏水浸种12 h。待种子吸胀后,分别将种子移入铺有2层滤纸的发芽盒内,每个发芽盒均放置120粒种子,加入10 mL浓度分别为0(对照)、0.05、0.10、0.20 mmol/L CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O,置于光照12 h/黑暗12 h、25℃的培养箱内进行种子发芽试验。每个处理5次重复,结果取平均值。为保持种子发芽

盒内滤纸的湿润状态,各处理发芽期间每天均补充因蒸发而损失的相应处理浓度的镉胁迫溶液。在种子萌发幼苗生长14 d后测定幼苗的生长特性及叶绿素含量与叶绿素荧光参数。

### 1.3 各处理幼苗生长特性的测定

采用直尺测量幼苗高与幼根长,每个处理测量30株,结果取平均值。每个处理测量30株幼苗的鲜质量与干质量,以10株水稻幼苗的鲜质量或干质量为1次重复。每个处理3次重复,结果取平均值。

### 1.4 各处理叶绿素含量与叶绿素荧光参数的测定

各处理随机选取5株萌发幼苗,参照李合生<sup>[6]</sup>的方法测定叶绿素含量:各处理分别取水稻幼苗叶片鲜质量0.2 g,在黑暗条件下浸提,待叶片发白之后测定各样品在波长649、665、470 nm的吸光度值。

采用德国Walz、蓝光版Imaging-PAM叶绿素荧光成像系统测定叶绿素荧光参数 $F_0$ (初始荧光)、 $F_v/F_m$ (最大光合效率)、 $\Phi PS II$ (实际量子效率)和ETR(电子传递效率)。各叶绿素荧光参数测定方法如下:于07:00—08:00,各处理选取有代表性的水稻幼苗,暗适应30 min,用双层黑色塑料袋将仪器探头与供试样品套牢,调用叶绿素荧光慢速动力学曲线程序测定各供试水稻幼苗叶片中部的叶绿素荧光参数<sup>[7]</sup>。每个处理3次重复,结果取平均值。

### 1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2010及DPS 7.05进行数据分析、绘图与差异显著性检验。

## 2 结果和分析

### 2.1 镉胁迫下不同水稻品种幼苗的生长特性差异

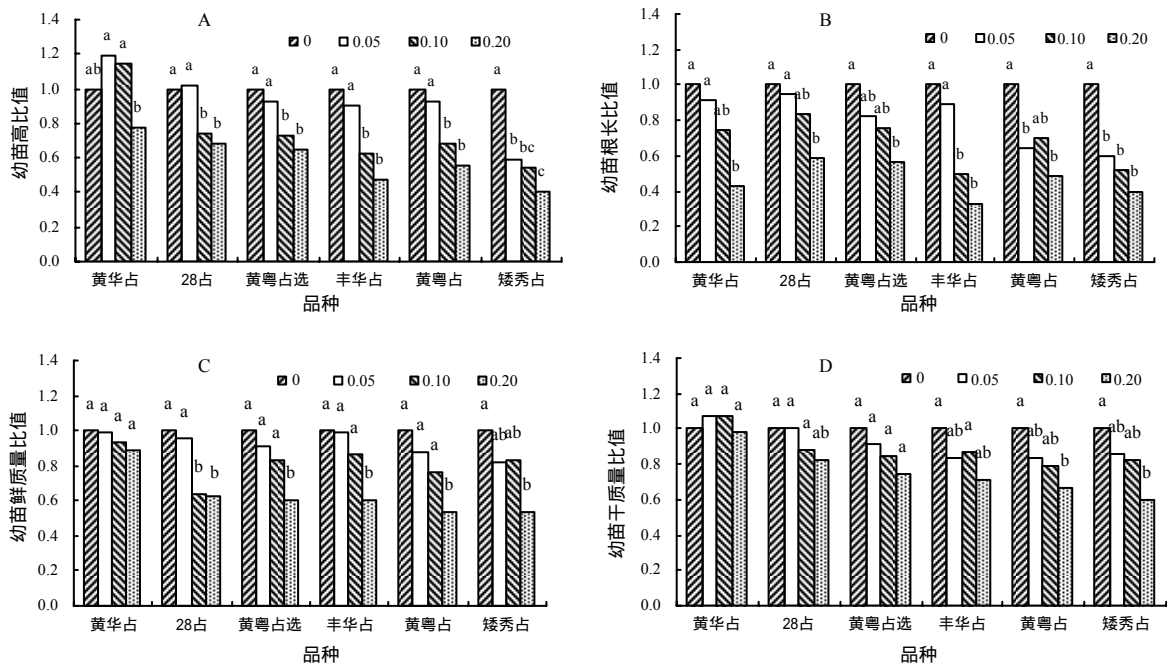
从图 1-A 可以看出,除镉胁迫高抗性水稻品种黄华占和 28 占在低浓度镉胁迫(0.05 mmol/L)下的幼苗高于对照外,其他水稻品种的幼苗高度均随着镉胁迫浓度的增加而降低,说明低浓度镉胁迫能促进镉胁迫高抗性水稻品种的幼苗生长;在高浓度镉胁迫(0.20 mmol/L)下,6 个供试水稻品种的幼苗高度均显著下降。

从图 1-B 可以看出,供试水稻品种不同镉胁迫浓度的幼苗根长在低浓度镉胁迫(0.05 mmol/L)下,黄粤占和矮秀占 2 个镉胁迫低抗性的水稻品种的幼苗根长显著降低,2 个镉胁迫高抗性水稻品种的幼苗根长有所降低,但均不显著;而在高浓度镉胁迫(0.20 mmol/L)下,6 个供试水稻品种的幼苗根长较

对照的均显著降低。

从图 1-C 可以看出,供试水稻品种不同镉胁迫浓度处理的幼苗鲜质量随着镉胁迫浓度的增加均有所下降,其中,镉胁迫高抗性水稻品种黄华占的幼苗鲜质量受镉胁迫的影响最小;其余 5 个供试水稻品种幼苗鲜质量均在镉胁迫浓度达到较高水平(0.20 mmol/L)时下降显著。

从图 1-D 可以看出,供试镉胁迫处理浓度对不同水稻品种的幼苗干质量的影响存在差异。其中,镉胁迫高抗性水稻品种黄华占和 28 占在低浓度镉胁迫(0.05 mmol/L)下的幼苗干质量较对照的有所增加,但差异不显著;镉胁迫中等抗性水稻品种黄粤占选和丰华占在中等浓度镉胁迫(0.10 mmol/L)下的幼苗干质量大于低浓度镉胁迫(0.05 mmol/L)的干质量;镉胁迫低抗性水稻品种黄粤占和矮秀占的幼苗干质量随着镉胁迫浓度的增加呈下降趋势。



纵坐标的数据均为 3 个镉胁迫处理结果与对照结果的比值。不同字母示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

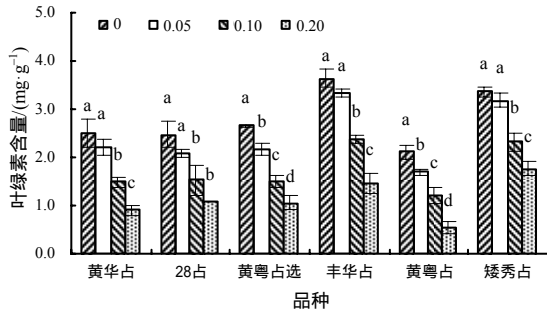
图 1 不同镉处理下 6 个供试水稻品种的幼苗生长特性

Fig.1 Seedling growth characteristics of different rice varieties under cadmium stress

### 2.2 镉胁迫下不同水稻品种幼苗的叶绿素含量差异

从图 2 可以看出,随着镉胁迫处理浓度的增加,6 个水稻品种幼苗的叶绿素含量均呈下降趋势。中等抗性的黄粤占选、低抗性的黄粤占在较低浓度(0.05 mmol/L)镉胁迫处理下的叶绿素含量与对照的差异

达显著水平,而其他 4 个水稻品种在较低浓度(0.05 mmol/L)镉胁迫处理下的叶绿素含量与对照的差异均未达显著水平;6 个水稻品种的幼苗在 0.10 mmol/L 和 0.20 mmol/L 处理下的叶绿素含量均显著低于对照的。



不同字母示差异显著( $P < 0.05$ )。

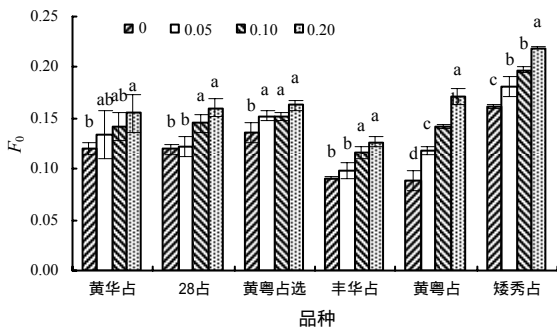
图 2 不同镉处理下供试水稻品种幼苗的叶绿素含量

Fig.2 The chlorophyll content in seedlings of different rice varieties under cadmium stress

### 2.3 镉胁迫下不同水稻品种幼苗的初始荧光差异

从图 3 可以看出,随着镉胁迫浓度的增加,6 个供试水稻品种的初始荧光参数  $F_0$  均呈上升趋势,说明镉胁迫对于 6 个供试水稻品种幼苗的 PS II 中心均存在不同程度的伤害。

从图 3 还可以看出,镉胁迫低抗性水稻品种黄粤占与矮秀占的  $F_0$  随镉胁迫处理浓度的提高增加幅度相对较大,说明黄粤占与矮秀占的  $F_0$  对镉胁迫较敏感,即使在较低镉胁迫处理浓度下,其 PS II 中心也会遭到较大破坏,而其余 4 个供试水稻品种在较低镉胁迫浓度处理下,其 PS II 中心的受伤害程度较小,表明这 4 个供试水稻品种比黄粤占和矮秀占具有较强的镉胁迫抗性。



不同字母示差异显著( $P < 0.05$ )。

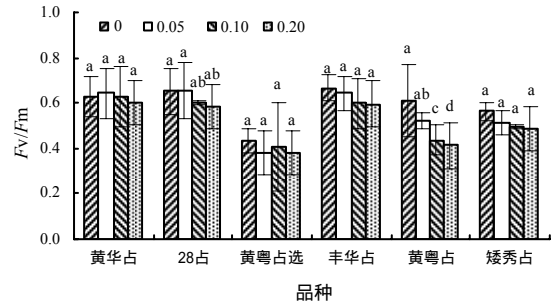
图 3 不同镉处理下供试水稻品种幼苗叶片的初始荧光参数

Fig.3 Initial fluorescence parameters of seedling leaves of different rice varieties under cadmium stress

### 2.4 镉胁迫下不同水稻品种幼苗的最大光合效率差异

叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  是衡量 PS II 光抑制的重要指标。从图 4 可以看出,0.05 mmol/L 低浓度镉胁迫处理下,与对照相比较,黄华占与 28 占的

最大光合效率  $F_v/F_m$  呈增加趋势,说明较低镉胁迫浓度处理能够促进这 2 个供试水稻品种光合作用 PS II 中心光能的转化效率,这可能与这 2 个水稻品种具有较高的镉胁迫抗性有关。除黄粤占外,其余 5 个水稻品种的  $F_v/F_m$  随镉胁迫浓度的增加变化均不显著,说明黄粤占幼苗光合作用的 PS II 受光抑制的程度较其余 5 个水稻品种的大,这可能是由于黄粤占具有较低的镉胁迫抗性所致。



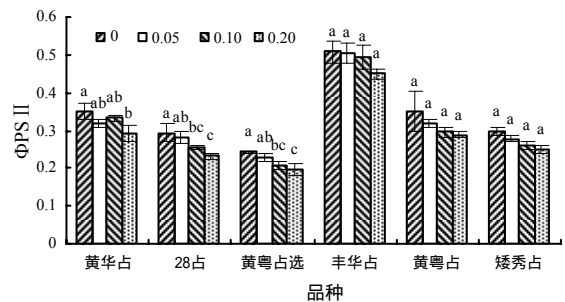
不同字母示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 4 不同镉处理下供试水稻品种幼苗叶片的  $F_v/F_m$

Fig.4 The  $F_v/F_m$  of leaves in seedlings of different rice varieties under cadmium stress

### 2.5 镉胁迫下不同水稻品种幼苗 PS II 光化学转换的实际量子效率( $\Phi_{PS II}$ )差异

由图 5 可以看出,随着镉胁迫浓度的增加,除黄花占外,其他 5 个水稻品种幼苗叶片的  $\Phi_{PS II}$  均呈下降趋势,说明镉胁迫可使水稻幼苗叶片的光合作用发生受到抑制,从而导致其光合电子传递效率降低。在 0.20 mmol/L 镉胁迫浓度处理下,黄华占、28 占与黄粤占选的  $\Phi_{PS II}$  较对照的下降明显;丰华占、黄粤占与矮秀占在不同镉胁迫浓度处理下的  $\Phi_{PS II}$  降低不显著,说明不同镉胁迫浓度处理对黄华占、28 占、黄粤占选的影响大于对丰华占、黄粤占与矮秀占的影响,不同镉胁迫浓度处理下,丰华占、黄粤占、矮秀占均能保持较高的  $\Phi_{PS II}$ 。



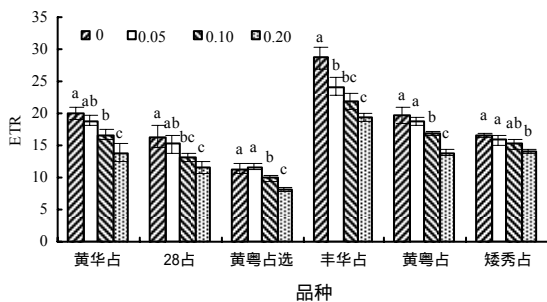
不同字母示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 5 不同镉处理下供试水稻品种幼苗叶片的  $\Phi_{PS II}$

Fig.5 The  $\Phi_{PS II}$  of leaf in seedlings of different rice varieties under cadmium stress

## 2.6 镉胁迫下不同水稻品种幼苗的电子传递效率 (ETR) 差异

叶绿素荧光参数 ETR 是植物光合作用 PS II 的表观光合电子传递效率。由图 6 可以看出, 6 个水稻品种不同镉胁迫处理下的幼苗 ETR 均降低。在 0.05 mmol/L 低浓度镉胁迫处理下, 除丰华占的 ETR 较对照的显著降低外, 其余 5 个水稻品种的 ETR 降低不显著; 较高镉胁迫浓度(0.1、0.2 mmol/L)处理时, 6 个水稻品种幼苗的 ETR 均较对照的显著降低。说明低浓度镉胁迫处理下, 除丰华占外, 其他 5 个水稻品种幼苗叶片的光合作用 PS II 仍具有较高的电子传递效率; 较高镉胁迫浓度处理则会降低各供试水稻品种幼苗叶片光合作用 PS II 的电子传递效率, 从而降低光合作用速率, 影响光合作用。



不同字母示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 6 不同镉处理下供试水稻幼苗叶片的 ETR

Fig.6 The leaf ETR in seedlings of different rice varieties under cadmium stress

## 3 结论与讨论

本研究中, 6 个供试水稻品种的幼苗生长特性均随着镉胁迫浓度的增加而降低。在不同镉胁迫处理下, 镉胁迫高抗性品种的幼苗高度、幼根长、幼苗鲜质量与干质量等生长特性比镉胁迫中等抗性品种、低抗性品种的表现优势明显, 这与前人<sup>[1,6]</sup>的研究结果相似。

叶绿素是植物进行光合作用的核心元素。过量的镉被植物体吸附后, 对其细胞叶绿体产生毒害作用, 进而对其叶绿素的合成产生影响, 最终影响植株光合作用与正常生长发育<sup>[4]</sup>。郭文燕等<sup>[8]</sup>研究提出, 水稻幼苗的叶绿素 a 与叶绿素 b 含量, 包括其两者比值, 随着镉胁迫处理浓度的升高呈下降趋势。本研究结果显示, 随着镉胁迫处理浓度的增加,

6 个水稻品种幼苗叶片的叶绿素含量均呈降低趋势, 低浓度(0.05 mmol/L)镉胁迫处理对 6 个水稻品种叶绿素合成的影响较小, 当镉胁迫处理浓度逐渐升高时, 6 个供试水稻品种的叶绿素含量均大幅下降; 当镉胁迫处理浓度达到 0.20 mmol/L 时, 6 个水稻品种叶绿素的合成能力均受到严重影响。推测其原因, 可能是因为镉胁迫抑制了水稻植株光合作用中的电子传递, 叶绿素结构遭到破坏, 叶绿素合成酶的活性受到较大程度的影响。

植物叶绿素荧光参数是其光合作用的内在指标, 是对植物的胁迫抗性进行生理学解释的指针<sup>[7]</sup>。相关研究<sup>[9]</sup>表明, 镉胁迫可抑制植物的 PS II 光能捕获, 引发改变其 LHC II 构象, 降低其电能激发效率。也有研究提出, 镉胁迫抑制植物光合作用的方式包括阻碍其 Calvin 循环<sup>[10-11]</sup>, 抑制环式和非环式光合磷酸化<sup>[12]</sup>, 降低其 PS II 活性<sup>[13-14]</sup>, 降低其光合色素含量<sup>[15]</sup>等。这些研究结果均说明, 镉胁迫会对植物的电子传递、CO<sub>2</sub> 固定、光能吸收等光合作用的关键过程产生影响。本研究中, 3 种不同浓度的镉胁迫处理, 6 个供试水稻品种幼苗叶片的  $F_0$  均增加,  $F_v/F_m$  则下降, 说明不同浓度的镉胁迫处理均损伤了 6 个供试水稻品种幼苗光合作用的 PS II。随镉胁迫处理浓度的增加, 6 个供试水稻品种幼苗叶片的  $\Phi$ PS II 和 ETR 均呈降低趋势, 表明水稻幼苗的 PS II 光化学转换的实际量子效率、PS II 反应中心的光合活性及电子传递效率均会受镉胁迫影响, 进而影响水稻叶片对光能的吸收、传递与转换。

## 参考文献:

- 王君, 祝丹, 周艳冰, 等. 我国水稻镉污染防治研究进展[J]. 四川农业科技, 2019(10): 73-77.  
WANG J, ZHU D, ZHOU Y B, et al. Research progress on cadmium pollution control of rice in China[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2019(10): 73-77.
- 唐杰, 徐浩洋, 王昌全, 等. 镉胁迫对 3 个水稻品种(系)根系生长及有机酸和氨基酸分泌的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 118-124.  
TANG J, XU H Y, WANG C Q, et al. Effect of cadmium stress on root growth and organic acids and amino acid secretion of three rice varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2016, 42(2): 118-124.
- 杨冬奇, 刘三雄, 夏胜平, 等. 镉胁迫对水稻幼苗生长的影响[J]. 湖南农业科学, 2019(4): 19-22.

- YANG D Q, LIU S X, XIA S P, et al. Effects of cadmium stress on the growth of rice seedlings[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019(4): 19–22.
- [4] 孙亚莉, 刘红梅, 徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(4): 425–431.
- SUN Y L, LIU H M, XU Q G. Effects of cadmium stress on rice seed germination characteristics[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(4): 425–431.
- [5] 黎鹏, 黎娟, 屠乃美, 等. 外源耐镉菌对水稻镉吸收和积累及内生细菌群落结构的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(2): 124–130.
- LI P, LI J, TU N M, et al. Effects of exogenous addition of Cd-tolerant bacteria on Cd uptake and accumulation and endophytic bacterial community structure in rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, 45(2): 124–130.
- [6] 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, 2000.
- LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] 刘红梅, 周新跃, 李先喆, 等. 基于叶绿素荧光参数的籼型杂交稻杂种优势分析[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(6): 855–860.
- LIU H M, ZHOU X Y, LI X Z, et al. Heterosis analysis of chlorophyll fluorescence parameters in indica hybrid rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(6): 855–860.
- [8] 郭文燕, 田雄, 李尚钡, 等. 镉胁迫对抽穗期水稻生理生化特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(14): 37–43.
- GUO W Y, TIAN X, LI S K, et al. Effects of cadmium stress on the physiological and biochemical characters of rice at heading stage[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(14): 37–43.
- [9] 万雪琴, 张帆, 夏新莉, 等. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(6): 73–78.
- WAN X Q, ZHANG F, XIA X L, et al. Effects of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 73–78.
- [10] LI X L, LI N, YANG J, et al. Morphological and photosynthetic responses of riparian plant *Distylium chinense* seedlings to simulated autumn and winter flooding in Three Gorges Reservoir Region of the Yangtze River, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 31–39.
- [11] 刘济明. 贵州茂兰喀斯特森林中华蚊母树群落种子库及其萌发特征[J]. *生态学报*, 2001, 21(2): 197–203.
- LIU J M. The seed bank and its germinative characters of the *Distylium chinensis* community in Guizhou, Maolan Karst forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 197–203.
- [12] 刘泽彬, 程瑞梅, 肖文发, 等. 遮荫对中华蚊母树苗期生长及光合特性的影响[J]. *林业科学*, 2015, 51(2): 129–136.
- LIU Z B, CHENG R M, XIAO W F, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Distylium chinense* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(2): 129–136.
- [13] 石元值, 阮建云, 马立峰, 等. 茶树中镉、砷元素的吸收累积特性[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 70–75.
- SHI Y Z, RUAN J Y, MA L F, et al. Absorption and accumulation of As and Cd in tea[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3): 70–75.
- [14] 努扎艾提·艾比布, 刘云国, 曾光明, 等. 香根草对镉毒害的生理耐性和积累特性[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1958–1963.
- NUZA'AITI-AIBIBU, LIU Y G, ZENG G M, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Vetiveria zizanioides*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1958–1963.
- [15] 马守臣, 马守田, 邵云, 等. 矿井废水灌溉对小麦生理特性及重金属积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3243–3248.
- MA S C, MA S T, SHAO Y, et al. Effects of irrigation with mine wastewater on physiological characters and heavy metals accumulation of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3243–3248.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正