

文章编号 :1003-8701(2013)03-0047-05

# 硅对镉胁迫下水稻幼苗不同叶位叶片 叶绿素含量的影响

黄秋婵,韦友欢\*,唐鸣,曾振芳,董佩佩

(广西民族师范学院化学与生物工程系,广西 崇左 532200)

**摘要** 通过溶液培养,研究不同硅浓度(0、30、80、130、180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉( $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$ )胁迫下水稻幼苗不同叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响。结果表明:30~130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$  可提高对镉胁迫下水稻幼苗倒 5、倒 4 叶位叶片 3 种色素含量,且 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$  均达到最佳效果,其中倒 5 叶位叶片 3 种色素含量分别较单独镉胁迫下提高 189.47%、38.66%和 75.93%,而倒 4 叶位叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量在 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$  分别为单独镉胁迫下的 161.15%、166.23%和 177.61%,但较高浓度( $> 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )时水稻幼苗倒 5、倒 4 叶位叶片叶绿素含量却呈现下降趋势;水稻幼苗倒 3 叶位叶片 3 种色素含量均随着  $\text{SiO}_2$  浓度的增加而呈上升趋势,当  $\text{SiO}_2$  浓度为 180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量达到最高(2.5239、0.8120、3.3359  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ );而硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 3、倒 2、倒 1 叶位叶片 3 种色素含量影响较小,未及倒 5、倒 4 等下位叶的影响显著。

**关键词** 硅;镉胁迫;水稻幼苗;叶绿素

中图分类号 :S511

文献标识码 :A

## Effect of Silicon on Chlorophyll Contents of Rice Seedlings at Different Position under Cadmium Stress

HUANG Qiu-chan, WEI You-huan\*, TANG Ming,  
ZENG Zheng-Fang, DONG Pei-pei

(Department of Chemistry and Biological Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities,  
Chongzuo 532200, China)

**Abstract:** Effect of silicon on chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll contents of rice seedlings at different position under cadmium stress were studied by hydroponics culture method. Rice seedlings were treated with the concentration of  $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$  and 0, 30, 80, 130, 180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ . The results showed that three chlorophyll content in the 5th and the 4th leaf from the top of rice seedlings under cadmium stress increased when the concentration of silicon was 30~130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ , and they were the most at 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ . The chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll contents of the 5th leaf from the top increased 189.47%, 38.66% and 75.93%, and that of the 4th leaf from the top increased 161.15%, 166.23% and 177.61% compared with cadmium stress. When the concentration of silicon was more than 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ , the chlorophyll content of the fifth and the 4th leaf from the top decreased. The three chlorophyll content of the 3rd leaf from the top increased with the increase of  $\text{SiO}_2$  concentration. When the  $\text{SiO}_2$  concentration was 180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the three chlorophyll content were the highest (2.5239, 0.8120, 3.3359  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ ).

收稿日期 :2013-04-03

基金项目 :广西区教育厅科研资助面上项目(200911MS275);广西民族师范学院科研资助重大项目(XYZDa2011001)

作者简介 :黄秋婵(1971-),女,壮族,副教授,主要从事植物营养及环境生态研究。

通讯作者 :韦友欢,男,教授,E-mail: wyh7506@yahoo.com.cn

The effect of silicon on three chlorophyll content of the 3rd, the second and the first leaf from the top of rice seedlings under cadmium stress was less significant than on the 5th and the 4th leaf from the top of rice seedling.

**Keywords:** Silicon; Cadmium stress; Rice seedling; Chlorophyll

随着世界经济的迅速发展,工业“三废”排放量也日益增加,若不经妥善处理直接排放到环境(大气、水域、土壤)中,排放量超过环境自净能力容许量,就会对环境产生污染,破坏生态平衡和自然资源,直接危害工农业生产和人体健康。研究表明,在农作物所需要的众多元素中,Cd不是农作物所必需元素,而是对生物有较高毒性的元素之一,在土壤和植株中活动较旺盛。土壤中含Cd浓度过高,不仅危害植株的生长和发育,而且还通过食物链直接危害人体健康<sup>[1]</sup>。农业上因长期利用污水灌溉及利用化学农药和化肥,从而加剧土壤污染。有报道,氯化镉对农作物生长危害很大,其临界质量浓度为1.0 mg/L,灌溉水中含Cd 0.04 mg/L时可出现明显污染,水中Cd质量浓度为0.1 mg/L时,就可抑制水体自净作用,使土壤受到严重的重金属污染。目前,我国污水面积约140万hm<sup>2</sup>,且64.8%灌区遭受到重金属的污染,我国农田重金属污染面积已达2万hm<sup>2</sup>,尤以Cd污染最为普遍<sup>[2]</sup>,每年有14.6亿kg农产品含Cd量超标,且因处理不当有明显上升的趋势<sup>[3]</sup>。水稻是极易累积Cd的农作物,且稻米是人们的主要粮食。研究表明,Cd可以破坏光合作用、呼吸作用和营养代谢等严重阻碍和抑制水稻生长<sup>[4]</sup>。Cd能通过食物入侵人体,并对人体健康带来严重的威胁<sup>[5]</sup>。据调查,我国大部分农田土壤含有Cd元素量可达5~7 mg/kg,生产的稻米至少含Cd 0.4~1.0 mg/kg,最高可达3.7 mg/kg。每年生产大约有 $1.25 \times 10^6$  kg稻谷不能作为粮食食用<sup>[6]</sup>。因此,为了保障人们的食品安全与健康,必须开展Cd污染的相关研究。而Si是土壤中的所有元素中最丰富的元素,占有所有元素的70%左右。硅是水稻生长的必需元素,硅可以通过提高叶片叶绿素含量来促进根系生长发育、光合作用、养分有效利用<sup>[4]</sup>,它可以改善农作物的品质,提高农作物的产量和农作物对重金属的承受力<sup>[7]</sup>。迄今为止,虽然国内外有很多学者研究水稻对Cd的吸收、运输、累积等,但在Si对Cd胁迫下水稻幼苗不同叶位叶片色素含量方面的研究较少。为此,本文研究了Si对Cd胁迫下水稻幼苗(5叶1心)不同叶位[包括顶1叶(倒数第1展开叶,简称倒1

叶位,下同)、顶2叶、顶3叶、顶4叶、顶5叶]叶片叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量的影响,旨在为研究Si对Cd胁迫水稻幼苗的解毒机制提供一些理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

粳型杂交水稻:金优528(广西大学水稻研究所提供)。营养液为木村B营养液,试剂均为分析纯以上药品。

### 1.2 硅酸贮备液的制备

溶解28.42 g硅酸钠( $\text{Na}_2\text{SiO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ),定容至1 L。硅酸钠溶液通过填充有阳离子交换树脂的层析柱以除去硅酸钠溶液中的钠离子。收集层析流出液得含 $\text{SiO}_2$  0.1 mol·L<sup>-1</sup>的硅酸贮备液。

### 1.3 植株培养

水稻种子用1%的次氯酸钠溶液消毒15 min,去离子水冲洗干净并浸种48 h。露白后置于尼龙网上发芽,尼龙网漂浮于0.5 mmol/L的 $\text{Ca-Cl}_2$ (pH 6.0)溶液上。2叶1心后,选取长势一致的幼苗移植于1/5强度的木村B营养液(pH 6.0)中,每盆种植6穴,每穴4株,共24株。培养期间每天补充营养液2次,每隔2 d更换营养液。5叶1心后经0.5 mmol/L的 $\text{CaCl}_2$ 溶液浸洗过夜的幼苗为供试植株。

### 1.4 试验设计

试验共设6个处理,处理1:不加硅也不添加镉;处理2~6:加 $\text{Cd}^{2+}$  4.0 mg/L+ $\text{SiO}_2$ (0、30、80、130、180 mg/L)。处理溶液的pH 5.5~6.0,处理期间每天用去离子水补充水分蒸发部分。每个处理均设3个重复。处理4d后收获植株,并按如下方法分析各项指标。

### 1.5 测定方法

分别称取水稻幼苗不同叶位的碎叶片(长、宽均为0.2~0.3 cm)0.100 0 g置于20 mL比色管中,加入15 mL的萃取液(丙酮:无水酒精=1:1混合液),避光浸泡24 h后,以混合液为空白对照。用紫外-可见分光光度计在649 nm、665 nm测定其吸光值,并按以下公式计算叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量<sup>[8-9]</sup>。

$$\text{叶绿素 a } :C_a(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})= 9.784 \times \text{OD}_{665} - 0.99 \times \text{OD}_{649}$$

$$\text{叶绿素 b } :C_b(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})= 12.6 \times \text{OD}_{649} - 4.65 \times \text{OD}_{665}$$

叶绿素 a 含量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )= $C_a(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \times$  提取液总体积 / 样品鲜重( $\text{g}$ )

叶绿素 b 含量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )= $C_b(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \times$  提取液总体积 / 样品鲜重( $\text{g}$ )

总叶绿素( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )= $(C_a+C_b)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \times$  提取液总体积 / 样品鲜重( $\text{g}$ )

### 1.6 统计检验

以上试验各处理均设 3 个重复,邓肯新复极差法进行多重比较。

## 2 结果和分析

### 2.1 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 5 叶位叶片(顶 5 叶)叶绿素含量的影响

由表 1 可知,不同浓度硅(0、30、80、130、180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉(4.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$ )胁迫下水稻幼苗倒 5 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量都随着  $\text{SiO}_2$  浓度的增加而呈现先升后降的趋势。当  $\text{SiO}_2$  浓度为 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量达到最高,分别为 0.044 0、0.064 2、0.108 2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{FW}$ ,分别为单独镉胁迫下的 189.47%、38.66%、75.93%(表 1),可见,叶绿素 a 含量上升得最快,其次为总叶绿素,最后是叶绿素 b(表 1)。当  $\text{SiO}_2 > 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量呈下降趋势。说明,适量的硅(30~130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉胁迫下水稻幼苗倒 5 叶位叶片叶绿素的形成有促进作用,其中 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$  为最佳浓度,而较高浓度的硅( $> 130$

表 1 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 5 叶位叶片叶绿素含量增加的百分比

$\text{SiO}_2$ 浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	叶绿素 a 含量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	叶绿素 a (%)	叶绿素 b 含量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	叶绿素 b (%)	总叶绿素 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	总叶绿素 (%)
0	0.015 2	-	0.046 3	-	0.061 5	-
30	0.036 0	136.84	0.053 2	14.90	0.089 2	45.04
80	0.043 4	185.53	0.055 3	19.44	0.098 7	60.49
130	0.044 0	189.47	0.064 2	38.66	0.108 2	75.93
180	0.021 0	38.158	0.050 3	8.640	0.071 3	15.93

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对倒 5 叶位叶绿素的形成影响不大。

### 2.2 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 4 叶位(顶 4 叶)叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知,不同浓度硅(0、30、80、130、180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉(4.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$ )胁迫下水稻幼苗倒 4 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量都随着  $\text{SiO}_2$  浓度的增加而呈上升趋势。当  $\text{SiO}_2$  浓度为 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量达到最高,分别为 0.313 9、0.148 8、0.462 7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{FW}$ ,其中叶绿素 b 含量上升得最快,为单独镉胁迫下的

177.61%,其次为总叶绿素,为 166.23%,最后是叶绿素 a,为 161.15%(表 2)。当  $\text{SiO}_2 > 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量呈下降趋势,当  $\text{SiO}_2$  为 180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,3 种色素含量分别下降至仅为单独镉胁迫下的 58.15%、18.29%、45.86%(表 2)。说明,适量的硅(30~130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉胁迫下水稻幼苗倒 4 叶位叶片叶绿素的形成有促进作用,其中 130  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$  为最佳浓度,而较高浓度的硅( $> 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对倒 4 叶位叶绿素的形成影响很小,与倒 5 叶位叶片的有相似之处。

表 2 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 4 叶位叶片叶绿素含量增加的百分比

$\text{SiO}_2$ 浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	叶绿素 a 含量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	叶绿素 a (%)	叶绿素 b 含量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	叶绿素 b (%)	总叶绿素 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ )	总叶绿素 (%)
0	0.120 2	-	0.053 6	-	0.173 8	-
30	0.226 3	88.27	0.086 2	60.82	0.312 5	79.80
80	0.244 2	103.16	0.092 7	72.95	0.336 9	93.84
130	0.313 9	161.15	0.148 8	177.61	0.462 7	166.23
180	0.190 1	58.15	0.063 4	18.29	0.253 5	45.86

### 2.3 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 3 叶位(顶 3 叶)叶片叶绿素含量的影响

试验结果表明,不同浓度硅(0、30、80、130、180  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{SiO}_2$ )对镉(4.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$ )胁迫下水

稻幼苗倒 3 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量都随着 SiO<sub>2</sub> 浓度的增加而增加 (图 3)。当 SiO<sub>2</sub> 浓度为 180 mg·L<sup>-1</sup> 时, 3 者均达到最大值, 分

别为 2.523 9、0.812 0、3.335 9 mg·g<sup>-1</sup>·FW, 但仅为单独镉胁迫下的 21.99%、28.54%、23.52% (表 3), 且与 SiO<sub>2</sub> 浓度为 130 mg·L<sup>-1</sup> 的差别很小。

表 3 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 3 叶位叶片叶绿素含量增加的百分比

SiO <sub>2</sub> 浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	叶绿素 a 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 a (%)	叶绿素 b 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 b (%)	总叶绿素 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	总叶绿素 (%)
0	2.069 0	-	0.631 7	-	2.700 7	-
30	2.184 0	5.56	0.704 8	11.57	2.888 8	6.96
80	2.193 7	6.03	0.726 9	15.073	2.920 6	8.14
130	2.402 0	16.09	0.809 3	28.11	3.211 3	18.91
180	2.523 9	21.99	0.812 0	28.54	3.335 9	23.52

#### 2.4 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 2 叶位 (顶 2 叶) 叶片叶绿素含量的影响

由表 4 可知, 不同浓度硅 (0、30、80、130、180 mg·L<sup>-1</sup> SiO<sub>2</sub>) 对镉 (4.0 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>) 胁迫下水稻幼苗倒 2 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量的变化趋势很小, 没有倒 5 叶位和倒 4 叶位的

显著。说明, 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 2 叶位叶片叶绿素含量的影响较小, 三者的含量与不加硅的相差不大, 仅为 16.55%、21.55%、17.82%。由于镉在水稻体内的分布为末端分布规律<sup>[10]</sup>, 倒 2 叶位的镉含量少于倒 5、倒 4 叶位, 所以随着 SiO<sub>2</sub> 浓度的增加水稻幼苗倒 2 叶位叶片叶绿素含量未发生

表 4 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 2 叶位叶片叶绿素含量增加的百分比

SiO <sub>2</sub> 浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	叶绿素 a 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 a (%)	叶绿素 b 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 b (%)	总叶绿素 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	总叶绿素 (%)
0	2.638 7	-	0.896 3	-	3.535 1	-
30	2.750 0	4.22	0.936 7	4.50	3.686 7	4.29
80	2.780 7	5.38	0.939 3	4.79	3.720 0	5.23
130	2.826 9	7.13	0.958 4	6.92	3.785 3	7.08
180	3.075 4	16.55	1.089 5	21.55	4.164 9	17.82

明显的变化。

#### 2.5 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 1 叶位 (顶 1 叶) 叶片叶绿素含量的影响

由表 5 可知, 不同浓度硅 (0、30、80、130、180 mg·L<sup>-1</sup> SiO<sub>2</sub>) 对镉 (4.0 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>) 胁迫下水稻幼苗倒 1 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量都随着 SiO<sub>2</sub> 浓度的增加而呈缓慢上升趋势, 含量变化很小, 未及倒 5 叶位和倒 4 叶位等下位叶变化显著。当 SiO<sub>2</sub> 浓度为 180 mg·L<sup>-1</sup> 时, 3 种色

素含量达到最高, 分别为 3.1391、1.0781、4.2172 mg·g<sup>-1</sup>·FW, 分别为单独镉胁迫下的 33.70%、47.34%、36.94%。可见, 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 1 叶位叶片叶绿素含量的影响很小, 3 者的含量与不加硅的相差不大。由于镉在水稻体内的分布为末端分布规律<sup>[10]</sup>, 累积在倒 1 叶位的镉少于倒 5、倒 4 叶位的镉含量<sup>[11]</sup>, 因此, 随着 SiO<sub>2</sub> 浓度的增加水稻幼苗倒 1 叶位的叶绿素含量未发生明显的变化。

表 5 硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 1 叶位叶片叶绿素含量增加的百分比

SiO <sub>2</sub> 浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	叶绿素 a 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 a (%)	叶绿素 b 含量 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	叶绿素 b (%)	总叶绿素 (mg·g <sup>-1</sup> ·FW)	总叶绿素 (%)
0	2.347 8	-	0.731 7	-	3.079 5	-
30	2.503 8	6.64	0.788 9	7.82	3.292 7	6.92
80	2.749 5	17.11	0.893 1	22.06	3.642 6	18.29
130	2.825 6	20.35	0.928 3	26.87	3.753 9	21.90
180	3.139 1	33.70	1.078 1	47.34	4.217 2	36.94

### 3 结 语

综上所述可知, 30~130 mg·L<sup>-1</sup> SiO<sub>2</sub> 可提高对镉胁

迫下水稻幼苗倒 5、倒 4 叶位叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量, 且 130 mg·L<sup>-1</sup> SiO<sub>2</sub> 均达到最佳效果, 其中倒 5 叶位叶片 3 种色素含量分

别较单独镉胁迫下提高 189.47%、38.66%、75.93%，而倒 4 叶位叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量在  $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ SiO}_2$  分别为单独镉胁迫下的 161.15%、166.23%、177.61%，当  $\text{SiO}_2$  浓度  $> 130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时，水稻幼苗倒 5、倒 4 叶位叶片叶绿素含量却呈现下降趋势；水稻幼苗倒 3 叶位叶片 3 种色素含量均随着  $\text{SiO}_2$  浓度的增加而呈上升趋势，当  $\text{SiO}_2$  浓度为  $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时，3 种色素含量达到最高 ( $2.5239$ 、 $0.8120$ 、 $3.3359 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$ )；而硅对镉胁迫下水稻幼苗倒 3、倒 2、倒 1 叶位叶片 3 种色素含量影响较小，未及倒 5、倒 4 等下位叶的影响显著。对于 5 叶 1 心的水稻幼苗而言，倒 3、倒 2、倒 1 叶位叶片靠近植株顶端，属于上位叶，而倒 5、倒 4 叶位叶片属于下位叶。据报道，硅对镉胁迫下水稻幼苗镉累积量呈现末端分布规律<sup>[10]</sup>，越靠上的叶片其镉含量越少，毒害较轻，上位叶的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量较下位叶的多；然而，由于上位叶受镉毒害程度较下位叶的小，故硅对镉胁迫下 3 种色素的影响较小，而对于倒 5、倒 4 叶片下位叶的影响很大 (图 1、图 2)。另报道，水稻叶片对产量的贡献度中，倒 1 叶位占 52%，倒 2 叶位占 22%，即上位叶约占产量贡献度的 74%。叶色是叶片生理衰老的外部综合表现<sup>[12]</sup>，倒 1、倒 2、倒 3 叶位叶片正处于功能盛期，叶色 (SPAD 值) 较深，受到镉毒害程度低，其光合作用强度大，产率高，随着下位叶 (倒 2、倒 1 叶位) 叶片的衰老，叶色相应褪淡。因此，随着  $\text{SiO}_2$  浓度的增加水稻幼苗叶绿素含量呈上升趋势。加不同浓度的  $\text{SiO}_2$  ( $0$ 、 $30$ 、 $80$ 、 $130$ 、 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 可以有效地缓解镉对水稻幼苗不同叶位叶片的毒害，从而提高水稻幼苗不同叶位叶片叶绿素的含量。其原因可能是硅的添加阻止了镉向水稻幼苗上部的运输，特别是向水稻叶片的运输，从而保护了叶片的生理功能，尤其是叶片的光合作用，从而增加生物量<sup>[13-14]</sup>。据报道，水稻幼苗不同叶位叶片间叶绿素荧光特性差异与其衰老程度相关<sup>[15-16]</sup>。本试验植株是 5 叶 1 心的水稻幼苗，倒 1 叶位叶龄最小，处于生长发育阶段，内部光合生理系统也都处于最佳状态，自我调节能力强，因此镉胁迫能力最强；倒 5 叶位叶片衰老程度最严重，内部结构处于衰退过程，自我调节能力差，因此镉胁迫后很容易受到伤害；倒 4、倒 3、和倒 2 叶位叶片衰老程度介于倒 1 和倒 5 叶位之间，因此，不同浓度硅 ( $0$ 、 $30$ 、 $80$ 、 $130$ 、 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ SiO}_2$ ) 对镉 ( $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ ) 胁迫下水稻幼苗 (5 叶 1 心) 不同叶位叶片叶绿素

a、叶绿素 b、总叶绿素含量影响不一，其影响介于二者之间。此外，光合系统 (PS) 是植物光合作用过程中进行光反应的重要结构，逆境胁迫对植物造成的最大的生理伤害是导致 PS 电子传递和光能转化效率降低<sup>[17-18]</sup>，因此，有关硅对镉胁迫下水稻幼苗不同叶位叶片叶绿素荧光特性及其 PS 电子传递和光能转化效率有待研究。

#### 参考文献：

- [1] 赵颖, 李军. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 59-64.
- [2] 欧行奇, 任秀娟. 叶菜型甘薯新品种百薯 1 号的主要特点及利用价值[J]. 中国农业科技导报, 2005, 7(3): 10-12.
- [3] 黄秋婵, 韦友欢, 韦良兴, 等. 硅对镉胁迫下水稻幼苗培养液指标及其生物量的影响[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(6): 639-642.
- [4] 刘鸣达, 王丽丽, 李艳利. 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.
- [5] 黄秋婵, 韦友欢, 黎晓峰. 镉对人体健康的危害效应及其机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2528-2530.
- [6] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 海军, 陈坤明, 王锁民, 等. 植物硅营养的研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(12): 2385-2392.
- [8] 韦友欢, 黄秋婵, 王慧瑛, 等. 阴生植物与阳生植物色素含量的比较分析[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(5): 1127-1129.
- [9] 黄秋婵, 韦友欢, 韦方立, 等. 常见夹竹桃科植物叶片颜色及类胡萝卜素含量的比较分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15203-15204, 15262.
- [10] 黄秋婵, 韦友欢, 吴颖珍. 硅对镉胁迫下水稻幼苗体内镉分布规律的研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(2): 303-306.
- [11] 黄秋婵, 韦友欢, 农克良, 等. 硅对镉胁迫下水稻幼苗营养器官外部形态与镉累积量的影响[J]. 江苏农业科学, 2008(5): 20-23.
- [12] 王绍华, 吉志军, 刘胜环, 等. 水稻氮素供需差与不同叶位叶片氮转运和衰老的关系[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1261-1265.
- [13] 黄秋婵, 韦友欢, 韦方立, 等. 硅对镉胁迫下水稻幼苗茎叶生物量及其镉含量的影响[J]. 广东农业科学, 2011(4): 33-35.
- [14] 黄秋婵, 黎晓峰, 沈方科, 等. 硅对水稻幼苗镉的解毒作用及其机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1307-1311.
- [15] 王强, 温晓刚, 卢从明, 等. 超高产杂交稻‘华安 3 号’冠层不同衰老程度叶片的光合功能[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 39-46.
- [16] 王春萍, 雷开荣, 李正国, 等. 低温胁迫对水稻幼苗不同叶龄叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 38-43.
- [17] JEONG S W, CHOI S M, LEE D S, et al. Differential susceptibility of photosynthesis to light-chilling stress in rice (*Oryza sativa* L.) depends on the capacity for photochemical dissipation of light [J]. *Molecules and Cells*, 2002 (13): 419-428.
- [18] WOO N S, BADGER M R, POGSON B J. A rapid, non-invasive procedure for quantitative assessment of drought survival using chlorophyll fluorescence[J]. *Plant Methods*, 2008 (4): 27-40.