

doi:10.7668/hbnxb.2014.S1.044

# 硅对铬、铜胁迫下小麦幼苗生理生化指标的影响

张志雯, 秦素平, 陈于和, 郭艾英, 秦 玲, 林小虎

(河北科技师范学院 生命科技学院, 河北 秦皇岛 066600)

**摘要:**为了明确外源硅对小麦铬、铜毒害的缓解效应,以普通小麦品种京冬8号为材料,采用水培试验,研究硅( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )对 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (0.6 mmol/L)、 $\text{CuSO}_4$  (0.8 mmol/L)胁迫下小麦幼苗生理生化指标的影响。结果表明:在铬、铜胁迫下,小麦幼苗可溶性糖含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶SOD和过氧化物酶POD活性显著升高,叶绿素含量显著降低;外源硅能显著降低铬、铜胁迫下小麦幼苗的可溶性糖含量、MDA含量以及SOD和POD活性, $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 浓度为1.5 mmol/L时,效果最明显;外源硅能显著提高铬、铜胁迫下小麦幼苗的叶绿素含量, $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 浓度为1.0 mmol/L时,效果最明显。适当浓度的外源硅能在一定程度上减轻重金属铬、铜胁迫对小麦幼苗的伤害。

**关键词:**硅;重金属;小麦;生理生化指标

中图分类号:S512.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2014)增刊-0229-05

## Effects of Silicon on Physiological and Biochemical Indexes of Wheat Seedlings under Cr and Cu Stresses

ZHANG Zhi-wen, QIN Su-ping, CHEN Yu-he, GUO Ai-ying, QIN Ling, LIN Xiao-hu

(College of Life Sciences, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China)

**Abstract:** In this study, using wheat variety (Jingdong 8) as material, effects of exogenous silicon on physiological and biochemical indexes of wheat seedlings under  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (0.6 mmol/L) and  $\text{CuSO}_4$  (0.8 mmol/L) stresses were studied in hydroponic conditions. The results showed that the soluble sugar content, MDA content, the activity of SOD and POD in wheat seedlings were significantly increased under  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and  $\text{CuSO}_4$  stresses. The chlorophyll content in wheat seedlings were reduced significantly under  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and  $\text{CuSO}_4$  stresses. Exogenous silicon with the concentration of 1.5 mmol/L played a noticeable role in reducing the soluble sugar content, MDA content, the activity of SOD and POD in wheat seedlings under  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and  $\text{CuSO}_4$  stresses. Exogenous silicon with the concentration of 1.0 mmol/L played a noticeable role in increasing the chlorophyll content in wheat seedlings under  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and  $\text{CuSO}_4$  stresses. Exogenous silicon with appropriate concentration could alleviate the damage caused by  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and  $\text{CuSO}_4$  stresses to the wheat seedlings.

**Key words:** Silicon; Heavy metals; *Triticum aestivum*; Physiological and biochemical indexes

近年来,随着土壤重金属污染日趋严重,重金属对植物生长发育的影响以及如何缓解和抑制重金属对植物的毒害已经引起了广泛关注。铬是土壤重金属污染元素之一,有研究表明,过量的铬会抑制种子萌发和幼苗生长,使抗氧化酶系统和膜系统受损,诱发染色体畸变,严重时还可导致植物死亡<sup>[1-4]</sup>。铜既是植物生长发育所必需的微量元素,又是污染环境的重金属元素,当土壤中铜浓度超过一定值时,会

对细胞形成较大的毒害,影响植物的生长和发育<sup>[5-6]</sup>。硅是地球上仅次于氧的最为丰富的元素,也是植物体内最丰富的无机元素之一,硅能提高植物对重金属的抗性已是不争的事实<sup>[7-8]</sup>。关于硅缓解小麦重金属毒害的作用少见报道。本试验主要研究硅对铬、铜胁迫下小麦幼苗生理生化指标的影响,为减缓铬、铜对植物的毒害提供相应的防护措施和一定的科学依据。

收稿日期:2014-09-30

基金项目:河北省教育厅项目(2010246)

作者简介:张志雯(1979-),女,山东德州人,实验师,硕士,主要从事作物抗逆生理等研究。

通讯作者:秦素平(1965-),女,河北唐山,教授,硕士,主要从事作物遗传育种研究。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料处理

挑选均匀一致的京冬 8 号小麦种子,用 0.1% 双氧水消毒 5 min,清水冲洗数次,用蒸馏水浸泡 24 h。之后将小麦均匀摆放在有 2 层滤纸的培养皿中,25 ℃ 培养。待小麦出芽后,用处理液 ( $K_2Cr_2O_7$  +  $Na_2SiO_3$  浓度为:0 mmol/L + 0 mmol/L、0.6 mmol/L + 0 mmol/L、0.6 mmol/L + 0.5 mmol/L、0.6 mmol/L + 1.0 mmol/L、0.6 mmol/L + 1.5 mmol/L、0.6 mmol/L + 2.0 mmol/L;  $CuSO_4$  +  $Na_2SiO_3$  浓度为:0 mmol/L + 0 mmol/L、0.8 mmol/L + 0 mmol/L、0.8 mmol/L + 0.5 mmol/L、0.8 mmol/L + 1.0 mmol/L、0.8 mmol/L + 1.5 mmol/L、0.8 mmol/L + 2.0 mmol/L。其中, $K_2Cr_2O_7$  和  $CuSO_4$  的浓度根据预试验结果进行选择)进行培养。设 3 次重复,每 2 d 更换一次培养液,14 d 后测定各生理指标。

### 1.2 测定方法

1.2.1 幼苗含水量的测定 称取一定重量的鲜样,加热烘干至恒重,根据公式:含水量 = (鲜质量 - 干质量)/鲜质量 × 100% 计算。

1.2.2 幼苗叶片可溶性糖含量、SOD、POD 活性测定及 MDA 含量的测定 可溶性糖含量、SOD 活性、POD 活性及 MDA 含量的测定参照杨晴等<sup>[9]</sup>的方法进行。其中一个 SOD 活性单位用 1 g 鲜样 1 h 内抑制 NBT 还原 50% 所表现出来的酶活力单位数表示;POD 采用愈创木酚法测定,一个 POD 活性单位用 1 g 鲜样 1 min 内 470 nm 处吸光值升高 0.01 表示;MDA 含量用 1 g 鲜样中含有的纳摩尔数表示。

1.2.3 幼苗叶绿素含量的测定 叶绿素含量测定参照杨晴等<sup>[9]</sup>的方法进行,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量表示为:每 1 g 叶片中含有的叶绿素的毫克数。

### 1.3 数据分析

数据用 Excel 2003 和 SPSS 软件进行分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法。

## 2 结果与分析

### 2.1 硅对铬胁迫下小麦幼苗生理指标的影响

由表 1 可知,加  $K_2Cr_2O_7$  和  $Na_2SiO_3$  处理后,不同处理间小麦幼苗的各个生理指标间差异均达到了显著水平。

表 1 硅对铬胁迫下小麦幼苗生理指标影响的方差分析(均方值)

Tab. 1 Variance analysis of silicon's effects on physiological indexes of wheat under Cr stress

变异来源 Source of variation	自由度 DF	可溶性糖 Soluble sugar	丙二醛 MDA	过氧化物酶 POD	超氧化物歧化酶 SOD	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b
区组间 Between groups	2	0.001 8	0.000 3	0.853 8	4.635 4	0.000 1	0.000 1
处理间 Within groups	5	1.422 6*	2.602 9*	58.222 2*	2 447.317 9*	0.005 5*	0.001 0*
误差 Error	10	0.001 2	0.001 0	0.689 2	5.319 9	0.000 2	0.000 0
总变异 Total	17						

注: $F_{0.05(5,10)}=3.33$ ;  $F_{0.01(5,10)}=5.64$ ;\*. 差异显著。表 3 同。

Note: $F_{0.05(5,10)}=3.33$ ;  $F_{0.01(5,10)}=5.64$ ;The asterisk denotes that the difference of treatments is significant. The same as Tab. 3.

2.1.1 硅对铬胁迫下小麦幼苗可溶性糖含量的影响  $K_2Cr_2O_7$  胁迫使小麦幼苗的可溶性糖含量显著升高。加硅处理后,小麦幼苗的可溶性糖含量显著降低,且随着  $Na_2SiO_3$  浓度的升高呈先降后升的趋势,在低浓度时,可溶性糖含量随  $Na_2SiO_3$  的升高逐渐降低,当  $Na_2SiO_3$  浓度达到 2.0 mmol/L 时,可溶性糖含量又有所升高,但各处理的可溶性糖含量都仍显著高于对照组。

#### 2.1.2 硅对铬胁迫下小麦幼苗 MDA 含量的影响

$K_2Cr_2O_7$  处理后小麦幼苗的丙二醛含量显著升高。加硅处理后,随  $Na_2SiO_3$  浓度的增加,丙二醛含量呈先降后升的趋势。当  $Na_2SiO_3$  浓度为小于 1.5 mmol/L 时,丙二醛含量随其浓度的升高而降低,当  $Na_2SiO_3$  浓度为 2.0 mmol/L 时,丙二醛含量又略有升高。各处理丙二醛含量均显著高于对照组。

#### 2.1.3 硅对铬胁迫下小麦幼苗 SOD 和 POD 活性

的影响  $K_2Cr_2O_7$  处理后,小麦幼苗的 SOD 和 POD 活性显著升高。硅酸盐浓度较低时,SOD 和 POD 活性随着其浓度的升高逐渐降低,当硅酸盐浓度较高时,SOD 和 POD 活性又有所升高。各处理的 SOD 和 POD 活性均显著高于对照组。

#### 2.1.4 硅对铬胁迫下小麦幼苗叶绿素含量的影响

$K_2Cr_2O_7$  胁迫使小麦幼苗的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著降低。随着加入  $Na_2SiO_3$  浓度的不断升高,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量呈先升后降趋势,当  $Na_2SiO_3$  浓度为 1.0 mmol/L 时,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量达到最大值,且显著高于对照组。随着加入硅浓度的进一步升高,叶绿素 a 和叶绿素 b 呈逐渐降低的变化趋势(表 2)。

### 2.2 硅对铜胁迫下小麦幼苗生理指标的影响

由表 3 可知,加  $CuSO_4$  和  $Na_2SiO_3$  处理后,不同处理间小麦幼苗的各个生理指标间差异均达到了显

著水平。

表 2 硅对铬胁迫下小麦幼苗生理指标影响

Tab.2 Effects of silicon on physiological and biochemical indexes of wheat under Cr stress						
浓度/( mmol/L) Gr + Si concentration	可溶性糖/% Soluble sugar	丙二醛 /( nmol/L) MDA	超氧化物 歧化酶/U SOD	过氧化物酶/U POD	叶绿素 a /( mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b /( mg/g) Chlorophyll b
0 + 0 ( CK )	2. 67e	3. 30d	361. 19f	67. 57e	0. 99b	0. 30b
0. 6 + 0	4. 56a	5. 42a	444. 21a	78. 57a	0. 95c	0. 27d
0. 6 + 0. 5	4. 36b	5. 37a	419. 40b	76. 67b	0. 99b	0. 29c
0. 6 + 1. 0	4. 13c	4. 02b	409. 67d	72. 34c	1. 07a	0. 32a
0. 6 + 1. 5	3. 95d	3. 70c	387. 71e	69. 67d	0. 97bc	0. 31b
0. 6 + 2. 0	4. 38b	3. 97b	415. 15c	76. 68b	0. 95c	0. 28c

注:小写字母表示处理间在 0.05 水平下的差异显著性结果。表 4 同。  
Note:Small letters denote that the difference of treatments is significant at the 0.05 level. The same as Tab. 4.

表 3 硅对铜胁迫下小麦幼苗生理指标影响的方差分析(均方值)

Tab.3 Variance analysis of silicon's effects on physiological indexes of wheat under Cu stress							
变异来源 Source of variation	自由度 DF	可溶性糖 Soluble sugar	丙二醛 MDA	过氧化物酶 POD	超氧化物歧化酶 SOD	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b
区组间 Between groups	2	0.000 2	0.000 1	0.301 8	13.144 7	0.000 1	0.000 1
处理间 Within groups	5	1.287 2 *	2.615 9 *	140.000 0 *	2 404.658 4 *	0.005 1 *	0.003 9 *
误差 Error	10	0.001 3	0.001 1	0.763 0	8.640 9	0.000 1	0.000 1
总变异 Total	17						

2.2.1 硅对铜胁迫下小麦幼苗可溶性糖含量的影响  
CuSO<sub>4</sub>处理显著提高了小麦幼苗的可溶性糖含量。加硅处理后,小麦幼苗的可溶性糖随着Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度的升高呈先降后升趋势,在Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度为1.5 mmol/L 为最小值,且各处理的可溶性糖含量仍显著高于对照组。

2.2.2 硅对铜胁迫下小麦幼苗 MDA 含量的影响  
CuSO<sub>4</sub>处理后小麦幼苗的丙二醛含量显著升高。加硅后,丙二醛含量显著降低,且随Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度的增加呈先降后升趋势。不同Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度处理丙二醛含量均显著高于对照组。

2.2.3 硅对铜胁迫下小麦幼苗 SOD 和 POD 活性

的影响 CuSO<sub>4</sub>处理后,小麦幼苗的 SOD 和 POD 活性均显著提高。硅酸盐浓度较低时,SOD 和 POD 活性随着其浓度的升高逐渐降低,当硅酸盐浓度较高时,SOD 和 POD 活性又有所升高,但各处理 SOD 和 POD 活性仍均显著高于对照组。

2.2.4 硅对铜胁迫下小麦幼苗叶绿素含量的影响  
CuSO<sub>4</sub>处理使小麦幼苗的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著降低。随着加入Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度的不断升高,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量呈先升后降趋势,当Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>浓度为1.0mmol/L 时,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量达到最大值,且显著高于对照组(表 4)。

表 4 硅对铜胁迫下小麦幼苗生理指标影响

Tab.4 Effects of silicon on physiological indexes of wheat under Cu stress						
浓度/( mmol/L) Cu + Si concentration	可溶性糖/% Soluble sugar	丙二醛 /( nmol/L) MDA	超氧化物 歧化酶/U SOD	过氧化物酶/U POD	叶绿素 a /( mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b /( mg/g) Chlorophyll b
0 + 0 ( CK )	2. 69e	3. 40f	364. 29e	68. 67e	0. 99b	0. 30c
0. 8 + 0	4. 45a	6. 22a	442. 98a	88. 33a	0. 96c	0. 27d
0. 8 + 0. 5	4. 25b	5. 51b	428. 96b	79. 33	0. 97c	0. 34b
0. 8 + 1. 0	3. 95c	5. 19c	414. 94c	73. 67d	1. 05a	0. 37a
0. 8 + 1. 5	3. 43d	4. 98e	402. 15d	72. 67d	0. 98bc	0. 32b
0. 8 + 2. 0	4. 20b	5. 13d	432. 23b	75. 33c	0. 93d	0. 28cd

3 讨论

植物在逆境胁迫下通过积累有机物来调节细胞渗透压,以增加适应环境的能力<sup>[10]</sup>,可溶性糖是植

物体内能量的储存者,也是植物合成其他有机物的起始物质,还是植物体内重要的渗透性调节物<sup>[11]</sup>。加入K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、CuSO<sub>4</sub>处理之后,小麦的可溶性糖含量显著升高,说明小麦在铬、铜胁迫下可能通过积累

可溶性糖来提高其渗透调节能力,保护细胞免受伤害。加硅后,可溶性糖含量显著减少,证明外源硅能显著缓解重金属铬、铜对小麦带来的伤害。但硅浓度过大后,这种缓解作用减弱。

丙二醛(MDA)是植物体内膜脂过氧化的产物,含量越高表明细胞膜脂过氧化程度越高,细胞膜结构完整性越差,重金属胁迫可诱发生物代谢过程产生自由基,对植物细胞膜具有伤害作用,进而导致膜脂过氧化产物 MDA 含量明显增加。因此,MDA 含量的变化可作为检测逆境条件下植物膜系统受伤程度的指标<sup>[12-13]</sup>。 $K_2Cr_2O_7$ 、 $CuSO_4$ 处理,加重了小麦的膜脂过氧化作用,MDA 含量显著升高。随着硅的加入,各处理的 MDA 含量均降低,说明硅在一定程度上降低了小麦叶片的膜脂过氧化水平,对铬、铜导致的膜系统受损表现出一定的缓解作用。但当硅的浓度过高时,缓解程度又有所降低。说明硅对铬、铜毒害作用的缓解是有一定限度的,并且须在一定的浓度范围内,这与袁宇飞等<sup>[14]</sup>研究的锌对汞的缓解作用一致。

植物体内的抗氧化系统在保护机体免受自由基侵害的过程中起到重要作用。当遭受重金属伤害时,小麦启动体内抗氧化系统超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)来抵御重金属伤害。当加入  $K_2Cr_2O_7$ 、 $CuSO_4$ 之后,SOD、POD 活力均显著升高;加硅处理之后,SOD、POD 活性开始下降。因为 SOD、POD 活性代表某一阶段或某一时刻幼苗体内的物质代谢状况及抗逆性的变化,可把其活性高低作为衡量小麦幼苗受胁迫程度轻重的条件之一,所以,SOD、POD 活性的降低也能理解为小麦幼苗受污染胁迫程度的相对降低,从而证明硅有效缓解了铬、铜胁迫对小麦幼苗产生的过氧化伤害。这与王晨等<sup>[15]</sup>的研究结果有一致之处。随着硅浓度的进一步升高,其抑制效果开始降低,这与许建光等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

叶绿素为植物进行光合作用的主要色素,其含量的降低是植物遭受重金属影响的重要特征之一<sup>[17]</sup>。单独加铜或铬处理,小麦叶绿素含量比对照(CK)显著降低,说明铬、铜对小麦具有毒害作用。加低浓度硅处理后,叶绿素相对含量比单加铬、铜处理时显著升高,说明外加硅对铬、铜的毒害表现出缓解作用。随着外加硅浓度的升高,叶绿素相对含量呈现逐渐降低的变化趋势,说明硅对铬、铜毒性的缓解作用随着硅浓度的升高而减弱。当硅浓度为 2.0 mmol/L 时,叶绿素含量显著低于对照组,说明高浓度的硅对小麦表现出毒害作用。

研究表明,硅能有效抑制或缓解重金属对植物的毒害作用<sup>[17-23]</sup>。王永锐等<sup>[24]</sup>认为,由于可溶性硅酸盐在水溶液中水解生成凝胶状  $H_4SiO_4$ ,可吸附有毒金属离子及其他有害物质,这可能是硅缓解毒害作用的原因之一。黄秋婵等<sup>[25]</sup>的研究则表明,硅可增加水稻对重金属毒害的抵御能力,其可能机制在于硅抑制水稻对重金属的吸收、减少镉的向上运输、增加镉在细胞壁中的沉积、改变自由空间中镉的形态。

本研究结果表明,适当浓度的硅可以在一定程度上缓解铬、铜胁迫对小麦幼苗造成的伤害,且对二者的缓解趋势基本一致,缓解程度略有不同。关于硅缓解铜、铬重金属毒害的确切生理机制有待深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 卢志红,赵小敏,朱美英. 铬  $Cr^{6+}$  对水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(3):60-62.
- [2] 陈晓玲,余土元,秦华明,等. 钙对铬胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 玉米科学,2009,17(4):74-78.
- [3] 张志雯,陈于和,秦玲,等. 重铬酸钾对黑麦的细胞遗传毒性及硅的缓解作用[J]. 麦类作物学报,2012,32(2):245-248.
- [4] 王爱云,黄珊珊,钟国锋,等. 铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响[J]. 环境科学,2012,33(6):2028-2037.
- [5] 李进学,曹虎,张芬琴,等.  $Cu^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  对普通小麦幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报,2005,14(4):59-60.
- [6] 吴家燕,夏增禄,巴音,等. 紫色土壤中镉铜铅砷污染对作物根系酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,1991,10(6):244-247,289.
- [7] Epstein E. Silicon[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol,1999,50:641-664.
- [8] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2004,50:11-18.
- [9] 杨晴,郭守华. 植物生理生化实验[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010:86-154.
- [10] 任安芝,高玉葆,刘爽. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(2):112-116.
- [11] 孙小霞. 高羊茅对铅递进胁迫的生理响应[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2006,27(6):75-78.
- [12] Lin R, Wang X, Luo Y, et al. Effects of soil Cadmium on growth, oxidative stress and antioxidant system in wheat

- seedlings (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2007, 69(1): 89–98.
- [13] Shafaqat Ali, Pu Bai, Zeng F R, *et al.* The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Altolerance [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70: 185–191.
- [14] 袁宇飞, 韩晓梅, 李光德, 等. 锌对汞胁迫下小麦幼苗生理特性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(2): 212–217.
- [15] 王晨, 王海燕, 赵琨, 等. 硅对镉、锌、铅复合污染土壤中黑麦草生理生化性质的影响 [J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2240–2245.
- [16] 许建光, 李淑仪, 王荣萍, 等. 硅对铬胁迫下小白菜生理指标的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 865–868.
- [17] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Physiological response of maize to Arsenic contamination [J]. Biologia Plantarum, 2003, 47(3): 449–452.
- [18] 顾明华, 黎晓峰. 硅对减轻水稻的铝胁迫效应及其机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 360–366.
- [19] 朱志明. 硅对汞毒害下玉米种子萌发代谢的影响 [J]. 淮北煤师院学报: 自然科学版, 2001, 22(4): 41–43.
- [20] 张永先, 杨培权, 许涛, 等. 硅对柱花草铝毒的解毒作用 [J]. 基因组学与应用生物学, 2009, 28(1): 57–61.
- [21] 陈秀芳, 赵秀兰, 夏章菊, 等. 硅缓解小麦镉毒害的效应研究 [J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 447–450.
- [22] 张丽娜, 宗良纲, 任偲, 等. 硅对低镉污染水平下水稻幼苗生长及吸收镉的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 494–499.
- [23] 黄昌勇, 沈冰. 硅对大麦铝毒的消除和缓解作用研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 98–101.
- [24] 王永锐, 陈平. 水稻对硒吸收、分布及硒与硅共施效应 [J]. 植物生理学报, 1996, 22(4): 344–348.
- [25] 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.