

# 叶面喷施硅调理剂对水稻砷累积及其赋存形态的影响

张世杰<sup>1</sup>, 樊利敏<sup>1</sup>, 陈苗苗<sup>2</sup>, 薛培英<sup>1</sup>, 刘文菊<sup>1</sup>

(1.河北农业大学资源与环境科学学院,河北省农田生态环境重点实验室,河北保定 071000;

2.河北农业大学科学技术研究院,河北保定 071001)

**摘要:** 采用营养液培养生物学模拟方法,研究了喷施8种不同的叶面硅调理剂对苗期水稻累积总砷(As)和砷形态的影响。结果表明,叶面施用硅调理剂可降低水稻根和茎叶中砷含量,其中叶面施用Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+鼠李糖脂处理(Si6)的水稻根系和地上部砷含量最低,分别为10.04,0.31 mg/kg,比对照降低25.35%和33.10%( $P < 0.05$ );水稻中砷的赋存形态主要为As(III),喷施该叶面硅调理剂减少水稻地上部和根系As(III)含量,降幅分别为27.74%和21.50%( $P < 0.05$ );综合考虑水稻根系和地上部砷累积及砷由根系向地上部的转运,对不同的叶面硅调理剂处理进行聚类分析发现,喷施Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+鼠李糖脂的处理为水稻砷低积累类群。因此,生物表面活性剂鼠李糖脂与含硅溶液配施是抑制水稻幼苗吸收和积累砷效果最好的叶面硅调理剂,可为我国砷污染区稻米生产安全提供技术支撑。

**关键词:** 叶面施硅; 水稻; 硅调理剂; 砷形态

**中图分类号:** X53; S511.2<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)04-0364-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.051

## Effects of Foliar Silicon Conditioner on the Accumulation and Speciation of Arsenic in Rice Seedlings

ZHANG Shijie<sup>1</sup>, FAN Limin<sup>1</sup>, CHEN Miaomiao<sup>2</sup>, XUE Peiying<sup>1</sup>, LIU Wenju<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment Science, Agricultural University of Hebei, Hebei Key Laboratory of Ecological of Farmland, Baoding, Hebei 071000;

2.Institute of Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001)

**Abstract:** Biological simulation of the hydroponic experiment was conducted to explore the effects of spraying eight different foliar silicon solutions on total arsenic (As) accumulation and As speciation in rice seedling. The results showed that the application of foliar silicon conditioner reduced As content in rice roots and shoots. Moreover, As contents in roots and shoots of rice seedlings treated with Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+rhamnolipid (Si6) were the lowest, 10.04 mg/kg and 0.31 mg/kg, respectively, which were 25.35% and 33.10% lower than those of the control ( $P < 0.05$ ), respectively. As (III) was the predominant speciation of As in rice. Compared to the control, foliar application of solution with Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+rhamnolipid significantly reduced the As (III) contents in roots and shoots by 27.74% and 21.50% ( $P < 0.05$ ), respectively. Considering the accumulation of As in rice roots and shoots and the transport of As from roots to shoots, the cluster analysis of different silicon conditioner treatments showed that the treatment of spraying Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+rhamnolipid was a low accumulation group of As in rice. Therefore, the rhamnolipid as bio-surfactant combined with silicate solution was the best silicon conditioner for inhibiting the uptake and accumulation of As in rice seedlings, which would provide technical support for food security of rice in As-contaminated regions of China.

**Keywords:** foliar application of silicon; rice; silicon conditioner; arsenic speciation

砷作为一种类金属元素广泛存在环境中,低剂量的砷长期暴露对动物、植物生长产生毒性作用,世界癌症研究中心将无机砷划为I级致癌物。水稻是世界的主粮作物之一,由于自身生理特性和淹水的生长条件,水稻比其他谷物具有更强的转运和富集砷的能力<sup>[1]</sup>,水稻砷

污染问题日益受到关注。因此,采取有效措施来降低水稻中砷的转运和富集至关重要。水稻是富硅植物,硅可促进水稻的生长发育<sup>[2]</sup>。有研究<sup>[3-8]</sup>表明,土壤施硅可显著降低水稻对砷的累积。但是土壤施硅可增加土壤溶液中硅酸的浓度,硅酸可以将土壤胶体表面吸附

收稿日期:2019-01-17

资助项目:国家自然科学基金项目(41471398)

第一作者:张世杰(1991—),男,硕士研究生,主要从事环境化学与污染控制研究。E-mail:zhangsj1010@163.com

通信作者:刘文菊(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤污染与防治研究。E-mail:liuwj@hebau.edu.cn

的  $As^{III}$ 、 $As^V$  和  $DMA^V$  代换下来,增加土壤溶液中砷的浓度,提高砷的生物有效性和植物毒性<sup>[9-10]</sup>。因此,施硅对稻田土壤中砷生物有效性的影响取决于硅对土壤颗粒表面砷的解吸和硅对水稻根系吸收砷的竞争之间的动态平衡<sup>[11-12]</sup>。为了减少或避免土壤施硅造成土壤溶液中砷有效性增加的情况,叶面施硅可能是调控水稻吸收和累积砷的另一个有效农艺措施。前期试验<sup>[13]</sup>结果显示,叶面喷施硅可降低不同形态砷在水稻根系和茎叶的浓度。

理论和实践<sup>[11,14]</sup>均证明,叶面施硅和土壤施硅同样可以增强植物对外界胁迫(包括重金属胁迫)的抗性。比如,叶面喷施纳米硅或者含硅溶液可以缓解水稻幼苗的镉毒性及籽粒中镉的累积<sup>[15-18]</sup>。水稻叶面喷施硅与纳米硅的复合溶胶既减轻砷对水稻的毒害,又降低砷在稻米中的累积<sup>[19]</sup>;此外,表面活性剂可降低液滴表面张力,增加叶面的附着性,延长滞留时间,促进叶片对液滴的吸收<sup>[20]</sup>。因此,在含硅溶液中加入不同表面活性剂,对水稻进行叶面喷施,是否也会增加水稻对硅的吸收,进而减少水稻对砷的吸收与累积?硼作为植物必需的微量元素,以中性分子硼酸进入植物体内,而硅酸也是以分子形式被吸收的,那么含硅溶液中加入一定比例的硼酸是否会影响水稻对砷的吸收及累积?元素硒和砷为同族元素,理化性质相似<sup>[19]</sup>,含硅溶液加入一定浓度的硒酸盐是否能抑制砷在水稻体内的含量与分布?基于此,本研究配制不同的硅调理剂,探究叶面喷施硅调理剂对水稻苗期砷累积和赋存形态的影响,旨在筛选出降低水稻中砷浓度的最适叶面硅调理剂,为我国粮食安全生产提供理论知识及可行的技术措施。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试水稻品种为“*Italica Carolina*”,是一个开花早且生长期较短的粳稻品种(来源于英国洛桑研究所)。

供试药品:硅酸钠( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$  国药集团化学试剂有限公司)、硅酸钾( $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$  国药集团化学试剂有限公司)、液体硅肥( $SiO_2$  含量  $\geq 25\%$ , 深圳中科启润生物有机肥料厂)、Tween-80(国药集团化学试剂有限公司)、聚天门冬氨酸( $C_4H_5NO_3$ , 成都艾科达化学试剂有限公司)、鼠李糖脂(湖州紫金生物科技)、硼酸(国药集团化学试剂有限公司)和亚硒酸钠(国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 植物培养

选择籽粒饱满的水稻种子,在 30% 过氧化氢中消毒 15 min,用超纯水清洗干净,在黑暗条件下催芽。待种子长至 3 叶时,将幼苗转移到盛有 1 L 营养液的 PVC 罐中,用海绵将水稻植株固定放入培养箱

中进行培养,海绵与营养液不接触,每 3 天更换 1 次营养液。采用 Kimura 水稻专用营养液配方,其成分见表 1。水稻生长在植物光照培养箱中进行,植株生长条件为 14 h/10 h 的光照/黑暗循环,温度维持在 25~28 °C,光照强度 280  $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。

表 1 水稻营养液组成

营养液组成	浓度/ (mmol · L <sup>-1</sup> )	营养液组成	浓度/ (mmol · L <sup>-1</sup> )
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.274	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.0030
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.183	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.0001
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.091	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.0004
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.183	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.0002
KNO <sub>3</sub>	0.091	NaFe(3)-EDTA · 3H <sub>2</sub> O	0.0200
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.0005		

### 1.3 试验设计

试验于 2017 年 8 月进行,当水稻在营养液中预培养至 6~7 叶时,挑选 40 株生长一致的水稻苗移至盛有营养液的 100 mL 离心管中培养 2 天,然后将水稻根系用超纯水洗净,移栽至装有 5  $\mu mol/L$   $As(V)$  营养液的 100 mL 离心管中(移栽时须小心,以免破坏水稻根系), $As(V)$  由  $Na_3AsO_4 \cdot 12H_2O$  配置。水稻植株用海绵固定,且不能接触生长溶液,并用凡士林将海绵露出部分涂匀防止喷施硅过程中散落的含硅液滴进入生长溶液。试验共设对照和 9 种不同叶面硅调理剂处理,不同含硅溶液的组成见表 2。其中喷施的溶液中硅的处理浓度为 3 mmol/L,喷施量为 20 mL,在 9 种含硅溶液中,Si3、Si4、Si5 和 Si6 添加了表面活性剂。将每个处理的溶液均匀喷施在水稻叶片的正反两面,CK 喷施相同体积的超纯水,硅、砷处理 48 h 后收获。

表 2 水稻喷施硅调理剂的试验处理

处理	处理	喷施溶液硅浓度/ (mmol · L <sup>-1</sup> )	喷施溶液 用量/mL
CK	CK(超纯水)	0	20
Si1	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3	20
Si2	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3	20
Si3	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +1% Tween-80	3	20
Si4	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +0.1% Tween-80	3	20
Si5	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +1% 聚天门冬氨酸	3	20
Si6	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +0.1% 鼠李糖脂	3	20
Si7	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +0.1% 硼酸	3	20
Si8	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> (含 Se 30mg/L)	3	20
Si9	液体硅肥(市场购买)	3	20

### 1.4 样品的采集与测定

1.4.1 样品的采集 处理液的收集:处理之前与处理结束后,分别取处理液 0.5 mL 于离心管中,并加入 4.5 mL 磷酸盐缓冲液(PBS,包含 2 mmol/L  $NaH_2PO_4$  和 0.2 mmol/L  $Na_2-EDTA$ ,pH 为 5.5),然后过

0.22  $\mu\text{m}$  滤膜于新的离心管中,放入冰箱中 4  $^{\circ}\text{C}$  保存待测砷形态与砷含量。

**韧皮部汁液的收集:**用干净的刀片,在距离根基处约 3 cm 快速切断茎秆,用超纯水清洗茎切口,脱脂棉吸茎部表面水分,插入含有 10 mL 25 mmol/L 的  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$  溶液中,并放置于培养箱中 24 h<sup>[13]</sup>,将收集的韧皮部汁液贮于 -80  $^{\circ}\text{C}$  超低温冰箱中待测。整个收集过程始终在黑暗的人工培养箱中进行,培养箱中的相对湿度为 95%,温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。

**木质部汁液的收集:**在剪断的茎上倒扣 2 mL 的离心管(装有约 0.2 g 脱脂棉)来收集木质部汁液,收集 1 h 后称重计算收集的木质部的体积,然后用 0.5 mL 0.1%  $\text{HNO}_3$  将脱脂棉上砷洗脱下来,并稀释至 1 mL<sup>[13]</sup>,将收集的木质部汁液贮于 -80  $^{\circ}\text{C}$  超低温冰箱中待测。

**地上部与根部样品的收集:**将收集完韧皮部的水稻茎用超纯水清洗,表面水分用吸水纸吸干,称重,然后将地上部用锡箔纸包住,放入液氮中暂时保存;水稻根部用超纯水冲洗 3~5 次,放入解吸附溶液(包含 1 mmol/L  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 0.5 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  和 5 mmol/L MES, pH 5.5) 中浸泡 10 min,去除根系表面吸附的砷,超纯水洗净根,称重,将根用锡箔纸包住,放入液氮中暂时保存;最后将液氮中的茎和根样品转移到超低温冰箱中保存待测。

**1.4.2 样品的测定 总砷的测定<sup>[21]</sup>:**木质部与韧皮部汁液中总砷的测定,采集的木质部汁液和韧皮部汁液直接采用原子荧光光度计(AFS 9600,北京海光分析仪器公司)测定其总砷含量。

**地上部与根部总砷的测定:**水稻地上部和根系采用高压密闭消解法进行处理<sup>[21-22]</sup>,同时消煮标准物质(GBW 07603 灌木枝叶)和空白,以确保消煮前处理及测定的准确度;最后用原子荧光分光光度计测定消解液中的砷总量。

**水稻地上部与根部砷形态的提取:**将水稻地上部和根系样品于研钵中加液氮研磨至粉末状,称取一定量样品(地上部:0.200 0 g;根系:0.050 0 g),加入 10 mL 磷酸盐缓冲液(2 mmol/L  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  和 0.2 mmol/L  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ ),在 4  $^{\circ}\text{C}$  下超声提取 1 h;提取完成后,提取液依次经 42 号 whatman 滤纸和 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤<sup>[4,21]</sup>待测。

**砷形态的分离与测定:**营养液、韧皮部与木质部汁液、地上部与根部样品提取液中砷形态采用高效液相色谱—原子荧光联用仪进行测定(LC—AFS 9600,北京海光分析仪器公司)。砷形态利用阴离子交换色谱柱(Hamilton PRP—X100)来进行分离,流动相包含 5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  和 5 mmol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , pH 调节为 5.92,其经过色谱柱的速率为 1 mL/

min。阴离子交换色谱柱的出口连接到 AFS,各砷形态在 8 min 之内分离、测定<sup>[21]</sup>。

## 1.5 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 和统计分析软件 SPSS 19.0 对试验数据进行方差分析、聚类分析和多重比较,其中多重比较采用 LSD 法分析不同处理间在  $P$  为 0.05 水平上的差异显著性。

## 2 结果与分析

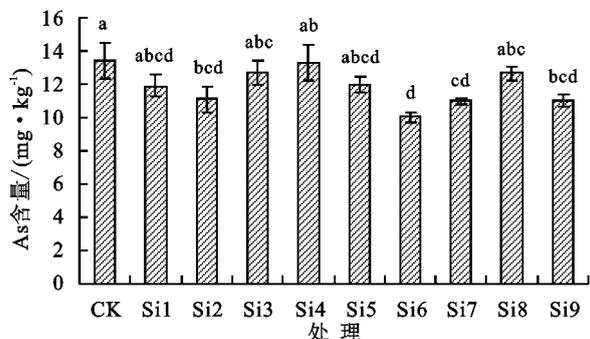
### 2.1 叶面硅调理剂对水稻地上部和根系 As 累积的影响

施用叶面硅调理剂对暴露在含砷营养液中 2 天的水稻根中 As 含量的影响见图 1。Si2、Si6、Si7 和 Si9 处理水稻根系砷含量显著低于对照( $P < 0.05$ ),分别比对照降低 17.55%, 25.35%, 18.31% 和 17.81%,以 Si6 处理砷含量最低,为 10.04 mg/kg。Si1、Si2 和 Si9 处理的硅源不同,其对水稻根系砷含量的影响也不同。喷施  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  的 Si1 处理根系砷含量与对照相比差异不显著,但是喷施  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  的 Si2 处理和喷施硅肥的 Si9 处理的根中砷含量显著低于对照,说明叶面施硅可降低水稻根系对砷的吸收。除 CK、Si1、Si2 和 Si9 外,其他处理在 Si2( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) 处理的基础上添加不同的表面活性剂(Si3~Si6)或其他相关营养元素(Si7、Si8)配置而成的叶面硅调理剂。由图 1 可知,不同表面活性剂对水稻根吸收砷的影响不同,只有 Si6 处理,即  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  + 鼠李糖脂处理根中砷含量最低。此外,在  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  的基础上添加以中性分子存在的硼酸(Si7 处理)也显著降低根中的砷含量。

叶面喷施硅调理剂后水稻地上部 As 含量变化见图 2。对照与处理之间地上部砷含量差异不显著(Si4 处理除外)。Si4 处理水稻地上部砷含量最高(0.64 mg/kg),比对照显著升高 38.15%。而 Si6、Si9 处理水稻地上部砷含量最低(0.31 mg/kg),比对照降低 33.10%。由此可见,在硅酸钠的基础上添加不同的表面活性剂对水稻地上部砷含量的影响较大(图 2),喷施添加 0.1% 表面活性剂 Tween-80 的含硅溶液(Si4)促进砷在水稻地上部的累积,而喷施添加 0.1% 鼠李糖脂的含硅溶液(Si6)则降低地上部的砷含量。

用地上部砷含量与根部砷含量的比值(转运系数)来表示水稻将砷从根转运到地上部的能力,比值越大说明水稻对砷的转移能力越强。由图 3 可知, Si4 处理砷的转移系数最大,且显著高于 Si6、Si8 和 Si9 处理。说明硅溶液添加 0.1% Tween-80 喷施在水稻上促进砷由根系向茎叶的转运,从而导致地上部砷含量最高(图 2)。虽然 Si6、Si8 和 Si9 处理的转运系数较低,但与不添加表面活性剂和营养元素 B 和

Se 的 Si2 处理相比,差异并不显著。此外,对照与各处理相比,砷的转运系数差异均不显著;在硅酸钠的基础上添加不同物质的处理(Si3~Si8)与硅酸钠 Si2 处理差异也不显著。



注:不同小写字母表示不同处理之间差异显著性( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 叶面硅调理剂对水稻根系 As 含量的影响

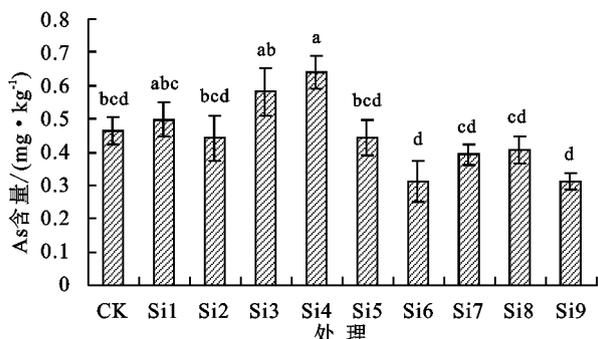


图 2 叶面硅调理剂对水稻地上部 As 含量的影响

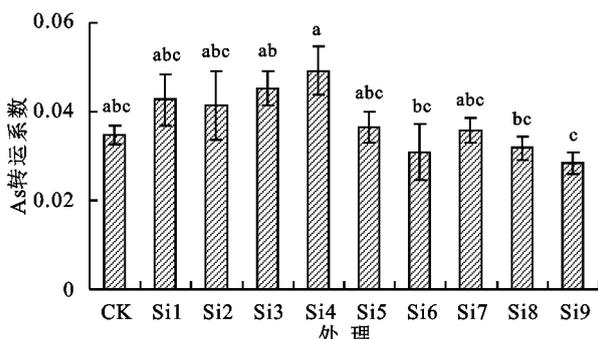


图 3 叶面硅调理剂对水稻砷转运系数影响

## 2.2 水稻地上部、根部 As 含量与转运系数之间聚类分析

为进一步明确喷施不同叶面硅调理剂对水稻幼苗地上部与根系中砷含量,以及砷由根系向茎叶转运能力的影响程度,筛选出能使水稻中砷低累积的适宜叶面硅调理剂,故采用聚类分析方法对水稻幼苗地上部与根系中砷含量及其转运系数进行分析。从图 4 可以看出,可以分为 5 类:第 1 类包括 CK、Si3、Si4 和 Si8 处理,为水稻砷高积累类群;第 2 类包括 Si1 和 Si5 处理,为水稻砷较高积累类群;第 3 类包括 Si2、Si7 和 Si9 处理,为水稻砷中等积累类群;第 4 类只有 Si6 处理,为水稻砷低积累类群。

综上所述,叶面喷施  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  对砷的抑制效果优

于喷施  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , Si6 处理对水稻吸收和转运砷的抑制效果最好。

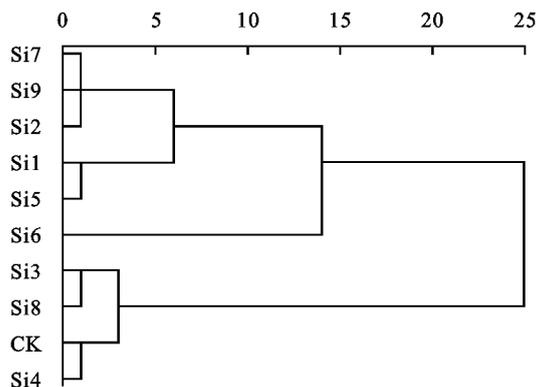


图 4 基于水稻地上部、根部砷含量和砷的转运系数的聚类分析

## 2.3 叶面硅调理剂对水稻地上部和根中不同形态 As 含量的影响

砷的植物毒性 ( $\text{As(III)} > \text{As(V)} > \text{MMA} > \text{DMA}$ ) 不仅取决于植物体内砷的总量,更与植物中砷的赋存形态关系密切。因此,本试验又关注了水稻体内砷的赋存形态以及叶面硅调理剂对不同形态砷在体内累积的影响程度。由叶面施硅下水稻根中砷形态及其含量(图 5)可知,水稻根中砷的主要存在形态是  $\text{As(III)}$ , 占总砷的 90.09%~100%,  $\text{As(V)}$  量少,仅占总砷的 0~9.91%,没有检测到甲基砷的存在。显著性分析可知,水稻根系中  $\text{As(III)}$  含量各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),其中 Si6 和 Si9 处理水稻根系中  $\text{As(III)}$  含量显著低于对照和其他处理,降幅分别为 12.18%~25.44% 和 17.74%~30.35%。各处理间水稻根系中  $\text{As(V)}$  含量差异显著 ( $P < 0.05$ ),其中 Si7 和 Si8 处理水稻根系中  $\text{As(V)}$  含量高于其他处理和对照,增幅分别为 49.46%~100% 和 67.11%~100%。

由叶面施硅调理剂对不同形态砷在水稻地上部累积的影响(图 6)可知,水稻地上部中砷的主要存在形态也是  $\text{As(III)}$ , 占提取液总砷的 75.15%~94.02%,  $\text{As(V)}$  占提取液总砷的 5.98%~24.85%,没有检测到甲基砷。各处理的水稻地上部  $\text{As(III)}$  含量间差异显著 ( $P < 0.05$ ), Si3、Si4 处理水稻地上部  $\text{As(III)}$  含量最高(0.20, 0.21 mg/kg),显著高于 CK、Si2 和 Si6~Si9 处理。这与地上部砷总量的影响趋势一致,说明喷施添加 Tween-80 的硅溶液促进了总砷和  $\text{As(III)}$  由根系向茎叶的转运,增加砷累积的风险; Si6~Si8 处理均是在 Si2 的基础上添加表面活性剂鼠李糖脂和营养元素 B、Se, 该 3 个处理地上部  $\text{As(III)}$  含量显著低于 Si2, 既喷施添加 3 种物质的硅溶液明显降低  $\text{As(III)}$  向地上部的转运。然而,喷施不同的叶面施硅调理剂对水稻地上部  $\text{As(V)}$  含量没有显著影响。因此,喷施不同的叶面硅调理剂主要影响水稻地上部  $\text{As(III)}$  的含量。

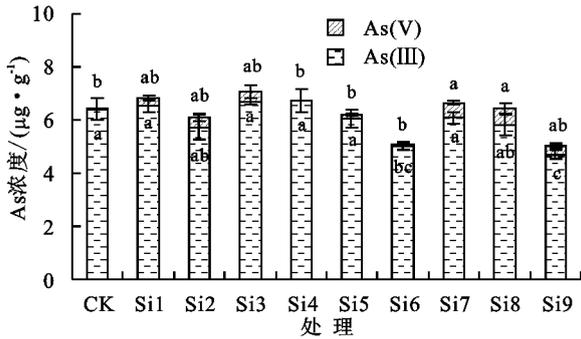


图 5 叶面硅调理剂对不同形态砷在水稻根中累积的影响

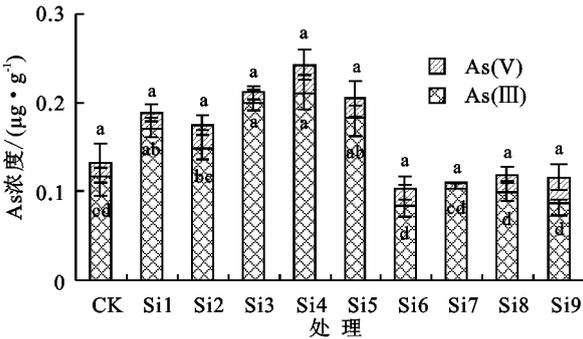


图 6 叶面硅调理剂对不同形态砷在水稻地上部累积影响

### 3 讨论

叶面施硅能显著降低重金属对水稻的毒害作用,其作用效果优于土施硅肥<sup>[23-24]</sup>,且可降低水稻籽粒中砷的累积<sup>[19]</sup>。但是,喷施不同类型含硅溶液的作用效果存在差异。已有研究<sup>[25]</sup>发现,在水稻分蘖期喷施 5 mmol/L 纳米硅胶不仅显著增产,而且降低稻米中砷累积。同样,在分蘖期或拔节期喷施 1 mmol/L 的硅酸溶液不仅有利于籽粒的发育,而且降低颖壳和籽粒中砷含量,这是因为叶片施硅降低砷由秸秆向颖壳和籽粒的转运。此外,在该 2 个生育期叶面喷施硅也降低米糠和精米中无机砷的含量<sup>[8]</sup>。然而, Syu 等<sup>[12]</sup>研究发现,在分蘖期前后喷施硅酸钠(含 0.3% Si)对营养生长阶段的水稻生长、根和茎叶中砷的浓度没有产生明显的影响。本试验结果显示,叶面喷施不同硅调理剂(含 Si 为 3 mmol/L)对水稻根系和地上部总砷、As(III)含量的影响存在较大差异。其中 Si6 处理效果最好,既显著降低水稻根部总砷和 As(III)含量,又能减少砷由根系向地上部的转运,从而大幅度降低水稻地上部总砷和 As(III)含量(图 1~图 4 和图 5~图 6)。这说明生物表面活性剂鼠李糖脂与硅配施更易增加水稻对硅的吸收,植物中硅的水平可能下调与砷吸收和转运有关基因 *Lsi1*、*Lsi2* 和 *Lsi6* 的表达,最终导致水稻对砷的吸收和转运明显降低<sup>[20,26-28]</sup>。此外, Si1、Si2 处理分别为  $K_2SiO_3$  和  $Na_2SiO_3$  无机硅, Si2 处理降低水稻地上部与根系砷含量; Si1 处理只降低根部砷含量,说明叶面喷施  $Na_2SiO_3$  效果优于  $K_2SiO_3$ 。虽然已有研究<sup>[24]</sup>结果发现,叶面喷施添加

Tween-80 的无机硅和有机硅可显著抑制水稻籽粒重金属含量,但是本研究结果显示,添加 Tween-80 的 Si3 和 Si4 处理与对照、Si2 相比水稻根中总砷、As(III)和 As(V)含量没有明显变化,但是地上部总砷和 As(III)含量显著增加,且砷转移系数最大,这说明喷施的硅溶液添加一定浓度的 Tween-80 并没有影响根系对砷的吸收,却显著促进砷由根系向地上部的转移。这可能是由于进入水稻体内后  $Na_2SiO_3$  与 Tween-80 发生了某种反应,导致苗期水稻体内硅酸形态的硅含量降低,从而上调了硅转运蛋白 *Lsi2* 的表达, *Lsi2* 是一种外排转运蛋白,负责把硅和 As(III)从细胞内向木质部中柱方向转运,从而促进 As(III)向地上部的迁移<sup>[28]</sup>,最终使砷过多的转运到地上部。硼是植物体内必需的微量元素之一,植物核酸生物合成、细胞壁结构的完整性和稳定性都受到硼的影响<sup>[29-30]</sup>。本研究结果显示, Si7 处理( $Na_2SiO_3 + 0.1\%$  硼酸)可显著降低水稻根系砷含量。这是因为中性分子的硼酸促进水稻的生长,间接促进水稻叶片对硅的吸收,植物体内硅的存在减弱砷吸收通道蛋白 *Lsi1* 的表达,降低水稻根系对砷的吸收<sup>[4]</sup>。硒和砷同在第 4 周期,是相邻的 2 个主族,两者存在一定的拮抗关系,水稻叶面喷施硒(40 mg/L)与纳米硅的复合溶胶既减轻砷、镉对水稻的毒害<sup>[31]</sup>,又降低砷、镉在稻米中的累积<sup>[18-19]</sup>。本研究结果显示,硅和硒配施,虽然都减少水稻地上部和根系砷含量,但差异均不显著。这可能是由于该叶面硅调理剂中添加硒的浓度较低所致。已有研究<sup>[19]</sup>显示,叶面喷施质量分数 1% 的硒掺杂纳米硅溶胶后,水稻籽粒干质量比对照增加 43.8%,砷含量下降 46%。而本研究中,添加硒的浓度远低于 1%。

综上所述,喷施不同的叶面硅调理剂对水稻吸收和转运砷的影响存在较大差异。此外,该培养试验的结果还需在整个生育期的土壤培养试验和田间小区试验中验证。

### 4 结论

(1) 叶面喷施  $Na_2SiO_3 + 0.1\%$  鼠李糖脂的含硅溶液不仅降低水稻根系和地上部砷含量,而且减少砷由根系向地上部的转运。

(2) 水稻中砷的赋存形态主要为 As(III),叶面喷施  $Na_2SiO_3 + 0.1\%$  鼠李糖脂溶液显著减少水稻地上部和根系 As(III)含量。

因此,生物表面活性剂鼠李糖脂与含硅溶液配施是抑制水稻幼苗吸收和积累砷的适宜叶面硅调理剂。

#### 参考文献:

[1] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced

- arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(19):6854-6859.
- [2] 李霖. 施硅对水稻生长及砷吸收的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [3] 王钊, 杨阳, 崔江慧, 等. 外源硅和有机质对水稻土溶液中砷形态变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 183-187.
- [4] Liu W J, McGrath S P, Zhao F J, et al. Silicon has opposite effects on the accumulation of inorganic and methylated arsenic species in rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376:423-431.
- [5] Duan G L, Hu Y, Liu W J, et al. Evidence for a role of phytochelatin in regulating arsenic accumulation in rice grain [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71:416-421.
- [6] 常晓青. 硅、硫对水稻砷吸收、累积的影响机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- [7] 孙宇, 薛培英, 陈苗, 等. 生长介质中硅/砷比对水稻吸收和转运砷的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4):148-206.
- [8] 张敏. Si/As 比调控水稻砷吸收和累积机制研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2017.
- [9] Bogdan K, Schenk M K. Arsenic in rice (*Oryza sativa* L.) related to dynamics of arsenic and silicic acid in paddy soils [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(21):7885-7890.
- [10] Lee C H, Huang H H, Syu C H, et al. Increase of As release and phytotoxicity to rice seedlings in As-contaminated paddy soils by Si fertilizer application [J]. *Journal of Hazard Mater*, 2014, 276:253-261.
- [11] Meharg C, Meharg A A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 120:8-17.
- [12] Syu C H, Huang C C, Jiang P Y, et al. Effects of foliar and soil application of sodium silicate on arsenic toxicity and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in As-contaminated paddy soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrient*, 2016, 62(4):357-366.
- [13] 张世杰, 付洁, 王晓美, 等. 叶面施硅对水稻吸收和转运无机砷和甲基砷的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7):1529-1536.
- [14] Nascimento A M, Assis F A, Moraes J C, et al. Silicon application promotes rice growth and negatively affects development of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)[J]. *Journal of Applied Entomology*, 2018, 42:241-249.
- [15] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3):1466-1472.
- [16] Wang S H, Wang F Y, Gao S C. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2015, 22:2837-2845.
- [17] Chen R, Zhang C B, Zhao Y L, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2018, 25:2361-2368.
- [18] Gao M, Zhou J, Liu H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Science Total Environment*, 2018, 631/632:1100-1108.
- [19] 徐向华, 刘传平, 唐新莲, 等. 叶面喷施硒硅复合溶胶抑制水稻砷积累效应研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6):1064-1069.
- [20] Liu H J, Shao B, Long X W, et al. Foliar penetration enhanced by biosurfactant rhamnolipid[J]. *Colloid Surface B*, 2016, 145:548-554.
- [21] Zhang M, Zhao Q L, Xue P Y, et al. Do Si/As ratios in growth medium affect arsenic uptake, arsenite efflux and translocation of arsenite in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229:647-654.
- [22] 王莹, 赵全利, 胡莹, 等. 上虞某铅锌矿区周边土壤植物重金属含量及其污染评价[J]. *环境化学*, 2011, 30(7): 1354-1360.
- [23] 王世华. 叶面喷施纳米硅增强水稻抗重金属毒害机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [24] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(3): 875-878.
- [25] Liu C P, Wei L, Zhang S R, et al. Effects of nanoscale silica sol foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress[J]. *RSC Advances*, 2014, 4:57227-57234.
- [26] Ma J F, Tamai K, Yamaji N, et al. A silicon transporter in rice[J]. *Nature*, 2006, 440:688-691.
- [27] Ma J F, Yamaji N, Mitani N, et al. An efflux transporter of silicon in rice[J]. *Nature*, 2007, 448:209-212.
- [28] Ma J F, Yamaji N, Mitani N, et al. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(29):9931-9935.
- [29] 宗毓铮, 王雯玥, 韩清芳, 等. 喷施硼肥对紫花苜蓿光合作用及可溶性糖源库间运转的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(4):665-672.
- [30] 魏双雨, 吉文丽, 杨丹怡, 等. 叶施硼、锌对油用牡丹‘凤丹’光合特性和矿质元素含量的影响[J]. *西北林学院学报*, 2018, 34(2):1-9.
- [31] 陈雪, 沈方科, 梁欢婷, 等. 外源施硒措施对水稻产量品质及植株硒分布的影响[J]. *南方农业学报*, 2017, 48(1):46-50.