

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.

ZHANG Shi-jie, FU Jie, WANG Xiao-mei, et al. Effects of foliar application of silicon on uptake and transport of inorganic and methyl arsenic in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1529–1536.

叶面施硅对水稻吸收和转运无机砷和甲基砷的影响

张世杰, 付洁, 王晓美, 何迪, 薛培英, 刘文菊*

(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)

摘要:为探讨叶面施硅对水稻吸收和转运不同形态砷[As(Ⅲ)、As(V)、MMA(V)和DMA(V)]的影响,采用水培模式和高效液相-原子荧光光度计(HPLC-AFS)相结合的方法,探究了水稻幼苗叶面施硅后其吸收不同形态砷的能力及其体内不同形态砷含量的变化。结果表明:4种砷形态处理下,叶面施硅可降低水稻地上部和根部砷含量,其中As(V)、MMA(V)处理下,叶面施硅水稻根中砷含量显著低于对照,降幅分别为26.16%、35.32% ($P<0.05$), As(Ⅲ)和As(V)处理下,叶面施硅后,水稻地上部砷浓度显著低于对照 ($P<0.05$),降幅分别为23.03%和42.98%;叶面施硅处理还可降低水稻对砷的吸收能力,其中As(V)、MMA(V)处理下,叶面施硅水稻对砷的吸收显著低于对照,降幅分别为29.08%、35.17% ($P<0.05$);此外,叶面施硅可以降低水稻地上部与根系砷形态含量,其中As(V)处理下,叶面施硅的水稻地上部As(Ⅲ)含量比对照显著降低32.60% ($P<0.05$), As(V)和MMA(V)处理下,水稻根系As(V)和MMA(V)含量分别比对照显著降低55.30%和30.61%。但是,叶面施硅对不同形态砷在苗期水稻体内的转运没有显著影响。总之,叶面施硅可抑制水稻对不同形态砷的吸收与累积,在一定程度上降低水稻砷毒害。

关键词:叶面施硅;砷形态;水稻

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)07-1529-08 doi:10.11654/jaes.2018-0713

Effects of foliar application of silicon on uptake and transport of inorganic and methyl arsenic in rice

ZHANG Shi-jie, FU Jie, WANG Xiao-mei, HE Di, XUE Pei-ying, LIU Wen-ju*

(College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Key Laboratory of Ecological Environment of Farmland in Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of foliar application of silicon on the uptake of different species of arsenic in rice, the hydroponic experiment was conducted using rice seedlings sprayed with Si solution and exposed to nutrient solution with As(III), As(V), MMA(V) and DMA(V) respectively and high performance liquid chromatography hydride generation atomic fluorescence spectrometry (HPLC-HG-AFS). The results showed that foliar application of silicon reduced the arsenic concentrations in rice roots and shoots for 4 arsenic species exposure. With As(V) and MMA(V) treatments, the arsenic concentrations in rice root was significantly lower than that of the control, accounting for 26.16% and 35.32%, respectively ($P<0.05$). Meanwhile, the foliar application of Si significantly decreased arsenic concentrations in rice shoots by 23.03% and 42.98% ($P<0.05$) for treatments with As(Ⅲ) and As(V), respectively. In addition, foliar application of silicon can reduce arsenic uptake by rice. For As(V) and MMA(V) treatments, arsenic uptake of rice seedlings with foliar application of silicon was significantly lower than that of the control, accounting for 29.08% and 35.17% respectively ($P<0.05$). In general, foliar application of silicon could reduce the levels of different arsenic species in rice plants. As(Ⅲ) is the predominant species of arsenic in rice root and shoot for As(V) treatment, and foliar application of silicon decreased the levels of As(Ⅲ) in rice shoots by 32.60% ($P<0.05$). For As(V) and MMA(V) treatments, the concentrations of As(V) and MMA(V) in rice roots were decreased by Si application for 55.30% and 30.61% respectively. However, the foliar application of Si did not impact the translocation of different arsenic species in rice plants. In summary, fo-

收稿日期:2018-05-30 录用日期:2018-06-19

作者简介:张世杰(1991—),男,河北人,硕士研究生,主要从事环境化学与污染控制方面的研究。E-mail:zhangsj1010@163.com

*通信作者:刘文菊 E-mail:liuwj@hebau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41471398)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471398)

liar application of silicon could inhibit the uptake and accumulation of different species of arsenic in rice and reduce arsenic toxicity to rice seedlings.

Keywords: foliar application of silicon; arsenic species; rice

砷作为一种类金属元素广泛存在于自然界,过量砷暴露对动、植物生长具有很强毒性,世界卫生组织(WHO)把砷列为“人类致癌物质”之一,世界癌症研究中心将无机砷划为Ⅰ级致癌物^[1]。水稻是我国乃至全球的主粮作物之一。研究发现,与其他粮食作物相比,水稻对砷有较强的富集能力,这是由于水稻自身生理特性和淹水条件造成的^[2]。水稻砷污染问题日益受到关注。水稻根施硅肥可以显著降低水稻对砷的吸收和转运^[3],还可以降低水稻糙米中无机砷含量,以及水稻各部分总砷含量^[4]。但根施硅肥,会增加土壤溶液中砷含量^[5],使水稻暴露在高砷环境中,增加了水稻砷胁迫的危险。因此硅作为肥料用在农作物增产和提高抗病性等方面,多以叶面施硅为主。

土壤中砷的主要存在形态有As(Ⅲ)、As(V)、一甲基砷酸盐[MMA(V)]和二甲基砷酸盐[DMA(V)],其中以无机砷为主,有机砷占土壤总砷比例极低^[6-7]。土壤溶液中砷的存在形态不同,水稻吸收和转运砷的方式和数量均存在差异。水稻根系通过磷酸盐的转运通道吸收As(V),As(Ⅲ)主要通过硅酸的转运蛋白Lsi1进入根系,没有解离的甲基砷分子也是主要通过根细胞膜上的水通道蛋白OsNIP2;1(即Lsi1)进入水稻根内^[8],但其吸收速率远低于无机砷^[9],尤其是DMA,其分子量较大,被根系吸收的速率最低。砷被吸收后,在水稻体内主要通过木质部和韧皮部进行转运。As(V)进入水稻根系后还原为As(Ⅲ),As(Ⅲ)一方面通过硅酸盐通道(Lsi2)进入木质部向茎叶转运,另一方面As(Ⅲ)可外排到外部生长介质中^[10-11]。此外,研究表明As(Ⅲ)主要通过韧皮部运输到水稻籽粒中,DMA(V)由根系转运至地上部的效率很高,除了经韧皮部运输至籽粒外,可能存在其他的转运途径^[12-14]。

本小组前期研究表明叶面喷施低浓度的硅既降低了水稻对As(Ⅲ)的吸收,也抑制了As(Ⅲ)在水稻体内的转运,高硅处理可显著降低水稻地上部和根部DMA(V)浓度^[3],但叶面施硅对土壤中主要存在的4种形态砷吸收和转运的影响鲜有报道。基于此,本研究通过水培试验,探究叶面喷施硅对暴露在不同形态砷[As(Ⅲ)、As(V)、MMA(V)和DMA(V)]中水稻吸收和转运砷的影响,以期降低不同形态砷在水稻体

内的吸收、积累和转运提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种: *Italica carolina* (来源于英国洛桑研究所)。

硅源: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (国药集团化学试剂有限公司),配制成浓度为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硅溶液,调节 pH 为 7.0 ~ 8.0,此时溶液中硅以 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、 $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ 形式存在。

1.2 植物培养

选择颗粒饱满的水稻种子,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。待种子长至三叶时,将幼苗转移到盛有营养液的 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。采用 Kimura 水稻专用营养液配方,其成分见表 1。每 3 d 更换一次营养液。

1.3 试验处理

试验设置 As(Ⅲ)、As(V)、MMA(V)和 DMA(V) 4 种砷形态的处理,砷浓度均为 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每种砷形态设置叶面喷硅的处理和不喷硅的对照,处理叶面喷施 SiO_2 浓度为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的含硅溶液,对照在叶面喷施等量的清水。水稻在营养液中预培养至 6 到 7 叶时,挑选 32 株生长一致的水稻苗移栽至盛有营养液的 PVC 罐中培养 2 d,然后将水稻根系用超纯水洗净,

表 1 水稻营养液组成

Table 1 Compositions of rice nutrient solution

组成	浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.274
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.183
KH_2PO_4	0.091
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.183
KNO_3	0.091
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.000 5
H_3BO_3	0.003 0
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.000 1
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.000 4
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.000 2
$\text{NaFe}(\text{Ⅲ})\text{-EDTA} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	0.020 0

将其移栽至配制好的盛有不同形态砷的营养液中(移栽时须小心,以免破坏水稻根系),用海绵固定水稻,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入生长溶液。硅、砷处理48 h后收获。

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 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 和 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}_2\text{-EDTA}$,pH为5.5),然后过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜于新的离心管中,放入冰箱中 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $10\text{ mL }25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液中,并放置于培养箱中 $24\text{ h}^{[15]}$,将收集的韧皮部汁液贮于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 超低温冰箱中待测。整个收集过程始终保持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 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

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浓度为0.1% HNO_3 将脱脂棉上砷洗脱下来,并稀释至 $1\text{ mL}^{[16]}$,将收集的木质部汁液贮于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 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;水稻根用超纯水冲洗3~5次,放入解吸附溶液(包含 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}_2\text{HPO}_4$, $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MES}$,pH为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

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左右,根系:0.050 0 g左右),加入10 mL磷酸盐缓冲液($2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 和 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}_2\text{-EDTA}$),在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下超声提取1 h;提取完成后,提取液依次经42号Whatman滤纸、 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤^[17],最后用高效液相色谱-原子荧光联用仪进行砷形态测定。

砷形态的分离与测定:营养液、韧皮部与木质部汁液、地上部与根部样品中砷形态采用高效液相色谱-原子荧光联用仪进行测定。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 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 和 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KH}_2\text{PO}_4$,pH调节为5.92,其经过色谱柱的速率为 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。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。

木质部与韧皮部汁液中总砷的测定:用移液枪吸取木质部汁液0.5 mL,韧皮部汁液2 mL,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:采用高压闷罐消解法进行水稻地上部和根系的提取^[18],其具体步骤为,称取地上部样品0.200 0 g左右(根系样品0.100 0 g左右),放置于聚四氟乙烯内胆中,向内胆中加入5 mL优级纯浓硝酸,盖上盖子放置过夜,次日将内胆装入外胆中,然后放入不锈钢外套中,将盖子旋紧,然后放置于烘箱中进行闷罐消解。具体消解过程如下,首先将温度升高至 $100\text{ }^\circ\text{C}$,并保持1 h,然后升温至 $140\text{ }^\circ\text{C}$,保持4 h。闷罐冷却后将内胆取出放置在加热板上进行赶酸,升高温度至 $140\text{ }^\circ\text{C}$,待内胆中消煮液剩余约1 mL左右,停止赶酸。冷却后将内胆中消煮液转移至10 mL比色管中,用超纯水清洗内胆内壁并定容,之后将比色管中消解液转移至10 mL离心管,最后置于冰箱 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冷藏保存待测。空白和标准样品的操作与样品操作相同,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总砷。

1.5 数据分析

水稻砷吸收能力的计算:一般用Specific Arsenic Uptake(SAU)作为指标来评价根系对砷的吸收能力,即用植物吸收的砷总量与其根鲜重的比值表示^[19]。

采用Microsoft Office Excel 2007和数据分析软件SPSS 19.0对试验数据进行相关性分析、显著性检验以及多重比较。

2 结果与分析

2.1 叶面施硅对水稻吸收和转运不同形态砷的影响

表2为不同砷形态处理下,叶面施硅对水稻地上部和根系砷含量影响。水稻根中砷浓度是砷吸收和砷转运共同作用的结果。由表2可知,不论水稻叶面是否施硅,水稻根中砷浓度高低顺序为 $\text{MMA}(\text{V})$ 处理 $>\text{As}(\text{III})$ 处理 $>\text{As}(\text{V})$ 处理 $>\text{DMA}(\text{V})$ 处理,且不施

硅处理下, MMA(V)处理水稻根中砷含量显著高于其他处理($P<0.05$); 叶面施硅处理下, MMA(V)处理水稻根中砷含量显著高于 As(V)处理和 DMA(V)处理($P<0.05$), 与 As(Ⅲ)处理相比差异不显著, 但根中砷含量仍比 As(Ⅲ)处理高 12.19%。不论何种砷形态下, 叶面施硅处理的水稻根系中砷含量均出现不同程度的下降。其中 As(V)、MMA(V)处理下, 叶面施硅水稻根中砷含量显著低于对照, 降幅分别为 26.16%、35.32% ($P<0.05$); As(Ⅲ)和 DMA(V)处理下, 叶面施硅水稻根系中砷含量与对照相比差异不显著 ($P>0.05$), 但仍比对照降低了 14.73% 和 22.85%。

水稻根系吸收砷后, 砷首先进入根细胞, 之后经木质部被转移至地上部, 因此, 水稻茎叶中砷浓度是砷转运作用的结果。不同砷形态处理的水稻在叶面施硅处理 48 h 后, 地上部砷浓度呈现较大差异 (表 2)。不论叶面是否施硅, 水稻地上部砷浓度排序为 As(Ⅲ)处理>As(V)处理>MMA(V)处理>DMA(V)处理, 且 As(Ⅲ)处理地上部砷含量均显著高于其他处理。As(Ⅲ)和 As(V)处理下, 叶面施硅后, 水稻地上部砷浓度显著低于对照 ($P<0.05$), 降幅分别为 23.03% 和 42.98%; MMA(V)和 DMA(V)处理下叶面施硅水稻地上部砷含量与对照相比虽然差异不显著 ($P>0.05$), 但仍分别比对照降低了 21.20% 和 8.57%。

表 3 为不同砷形态处理下, 叶面施硅对水稻 As 吸收能力和转运的影响。结果显示, 不论何种砷形态处理, 叶面施硅处理均可降低水稻对砷的吸收能力。其中 As(V)、MMA(V)处理下, 叶面施硅水稻对砷的吸收显著低于对照, 降幅分别为 29.08%、35.17% ($P<0.05$); As(Ⅲ)和 DMA(V)处理下, 叶面施硅水稻对砷的吸收能力与对照相比差异不显著 ($P>0.05$), 但仍比对照降低了 12.86% 和 18.90%。此外, 不同砷形态处理下, 水稻根系对不同形态砷的吸收能力不同, 不施硅处理下, 水稻根系对不同形态砷的吸收能力排序为 MMA(V)>As(Ⅲ)>As(V)>DMA(V), MMA(V)处理水稻对砷的吸收能力显著高于其他处理 ($P<0.05$); 叶面施硅处理下, 水稻根系对不同形态砷的吸收能力排序为 As(Ⅲ)>MMA(V)>As(V)>DMA(V), As(Ⅲ)处理和 MMA(V)处理水稻对砷的吸收能力显著高于 As(V)处理和 DMA(V)处理 ($P<0.05$)。

不同砷形态处理下水稻根系向地上部的迁移能力不同, 用地上部砷浓度与根系中的砷浓度比值来计算水稻体内将砷从根系转运到地上部的转运系数, 比值越大表明水稻对砷的运移能力越强。由表 3 可知, 不论水稻叶面是否施硅, 水稻体内 4 种砷形态的转运能力排序为 DMA(V)>As(Ⅲ)>As(V)>MMA(V), 这说明 DMA(V)可以高效地向地上部运输。叶面施

表 2 叶面施硅对不同砷形态处理下水稻地上部和根砷含量的影响 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Effects of foliar application of Si on arsenic concentrations in the shoots and roots of rice ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

砷形态 As Species	地上部 Shoots		根系 roots	
	CK	Si	CK	Si
As(Ⅲ)	1.272±0.077a	0.979±0.020a*	23.03±1.95b	19.64±1.58a
As(V)	0.897±0.138b	0.512±0.019b*	19.55±1.13b	14.43±1.37b*
MMA(V)	0.199±0.005c	0.157±0.026c	34.06±2.91a	22.03±2.65a*
DMA(V)	0.065±0.003c	0.060±0.001d	0.51±0.05c	0.39±0.02c

注: 同列不同小写字母表示不同形态砷处理下砷浓度之间差异显著 ($P<0.05$), *表示相同砷形态处理下施硅处理与对照的差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicated significant differences among arsenic treatments at $P<0.05$ level, *indicated significant differences between silicon application treatments and CK at $P<0.05$ level. The same below.

表 3 叶面施硅对水稻 As 吸收能力和转运的影响

Table 3 Effects of foliar application of Si on arsenic specific uptake and translocation from root to shoot

砷形态 As Species	吸收能力 As specific uptake/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		转运系数 Transfer factors	
	CK	Si	CK	Si
As(Ⅲ)	27.0±2.3b	23.5±2.2a	0.056±0.002b	0.058±0.008b
As(V)	22.6±1.4b	16.0±1.4b*	0.046±0.006b	0.036±0.003c
MMA(V)	34.7±2.9a	22.5±2.7a*	0.006±0.001c	0.007±0.001d
DMA(V)	0.74±0.07b	0.60±0.02c	0.135±0.019a	0.154±0.007a

硅后,不同形态砷在水稻中转移系数与对照相比差异不显著($P>0.05$),其中As(Ⅲ)、MMA(V)和DMA(V)处理下,叶面施硅后水稻转运系数分别比对照增加了5.94%、22.10%和29.03%,As(V)处理下,叶面施硅后水稻转运系数比对照降低了21.16%。

2.2 叶面施硅对不同形态砷在水稻体内赋存形态及含量的影响

图1和图2分别表示不同砷形态处理下,叶面施硅对水稻根系和地上部砷形态含量的影响。As(Ⅲ)处理下,不论是否施硅,水稻地上部和根系中砷形态主要是As(Ⅲ),分别占水稻各部位总砷的77.82%~79.94%和97.34%~97.87%;还有少量As(V),分别占水稻各部位总砷的12.55%~19.78%、4.69%~5.24%,没有检测到MMA(V)和DMA(V)的生成;叶面施硅水稻根系中As(Ⅲ)和As(V)含量与对照相比差异不显著($P>0.05$),但As(Ⅲ)降低了11.64%;地上部As(Ⅲ)和As(V)含量与对照相比差异不显著($P>0.05$),但分别比对照降低10.82%和27.31%。

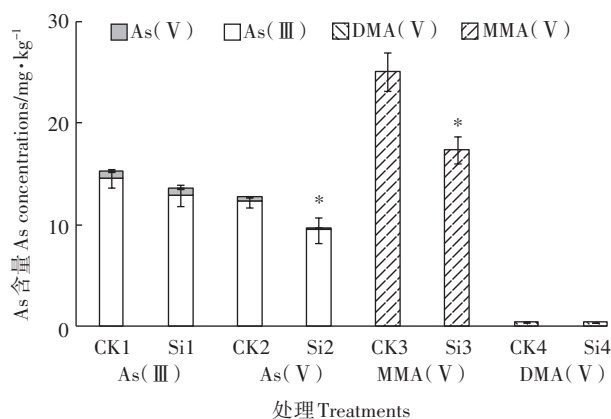
As(V)处理下,不论施硅与否,水稻地上部和根中砷形态主要是As(Ⅲ),分别占水稻各部位总砷的70.01%~81.93%和97.11%~97.63%;还有少量As(V),分别占水稻各部位总砷的14.81%~18.05%、2.37%~3.85%,没有检测到甲基砷的存在(图1和图2)。As(V)处理下,叶面施硅水稻根中As(Ⅲ)和As(V)含量与对照相比分别降低了23.32%、55.30%;地上部As(Ⅲ)含量比对照显著降低32.60%($P<0.05$),As(V)含量与对照相比差异不显著($P>0.05$)。

MMA(V)处理的水稻体内只有MMA(V),没有检测到其他砷形态(图1和图2)。叶面施硅显著降低了水稻根系中MMA(V)含量,降幅为30.61%,说明叶面施硅可显著抑制水稻根系对MMA(V)的吸收;水稻地上部MMA(V)含量也有所降低,降幅为14.93%。

无论是否施硅,在DMA(V)处理的水稻体内只有DMA(V),没有检测到其他砷形态(图1和图2)。叶面施硅可以降低水稻中DMA(V)含量,但差异不显著($P>0.05$),说明叶面施硅对水稻吸收和转运DMA(V)没有明显影响。

2.3 叶面施硅对水稻木质部和韧皮部砷形态的影响

叶面施硅可以降低水稻木质部不同砷形态含量(图3)。As(Ⅲ)和As(V)处理下,水稻茎叶木质部汁液中均含有As(Ⅲ)和As(V),且以As(Ⅲ)为主,未检测到有机砷存在。As(Ⅲ)处理下,叶面施硅水稻木质



*表示同一形态砷处理下水稻体内相同砷形态在施硅与对照之间差异显著($P<0.05$)。下同

*indicated significant

differences between silicon application treatments and CK at $P<0.05$ level. The same below

图1 叶面施硅对无机砷和甲基砷处理下水稻根中砷形态含量的影响

Figure 1 Effects of foliar application of Si on arsenic speciation concentrations in rice roots under different arsenic species treatments

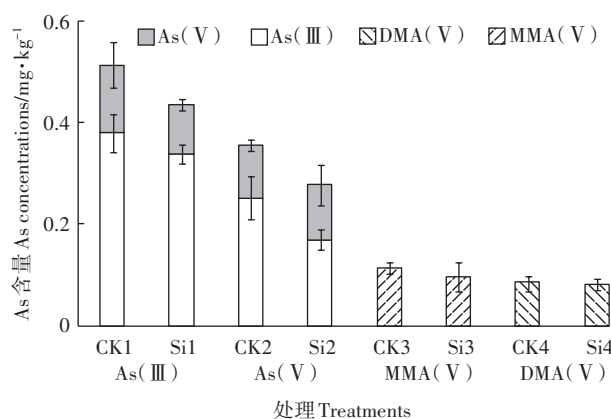


图2 不同砷形态处理下叶面施硅水稻地上部不同砷形态含量
Figure 2 Effects of foliar application of Si on arsenic speciation concentrations in rice shoots under different arsenic species treatment

部汁液中As(Ⅲ)和As(V)均低于对照,但差异不显著($P>0.05$);As(V)处理下,叶面施硅木质部汁液中As(Ⅲ)比对照显著低39.04%($P<0.05$),As(V)含量与对照相比差异不显著。MMA(V)处理下,木质部汁液中只检测到MMA(V),叶面施硅木质部汁液中MMA(V)含量低于对照,但差异不显著。DMA(V)处理下,木质部汁液中分别只检测到DMA(V),叶面施硅木质部汁液中DMA(V)含量低于对照,但差异

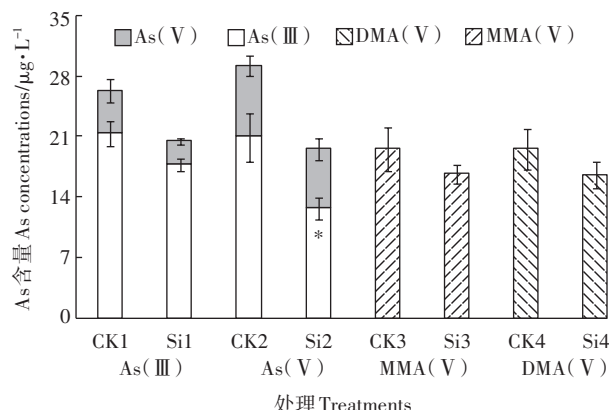


图3 不同砷形态处理下叶面施硅对水稻木质部砷形态影响
Figure 3 Effects of foliar application of Si on arsenic speciation in rice xylem sap under different arsenic species treatments

不显著。

叶面施硅后不同砷形态处理水稻韧皮部汁液中砷形态及含量见图4。As(III)和As(V)处理下,韧皮部汁液中只检测到As(III),未检测到As(V)和有机砷,这说明五价砷被根系吸收,只有一小部分没有被还原为三价砷,而是以五价砷的形式运往地上部,然后在地上部行使其功能,很少有五价砷装载进入韧皮部向下运输,这也是为什么在木质部可以检测到五价砷而韧皮部没有检测到五价砷的原因。As(III)处理下,叶面施硅韧皮部汁液中As(III)含量高于对照,As(V)处理下,叶面施硅韧皮部汁液中As(III)含量低于对照,但差异均不显著($P>0.05$)。MMA(V)处理下,水稻韧皮部汁液中同时存在As(III)和MMA(V),叶面施硅水稻韧皮部汁液中As(V)含量与对照差异不显著,但MMA(V)含量显著高于对照15.14%($P<$

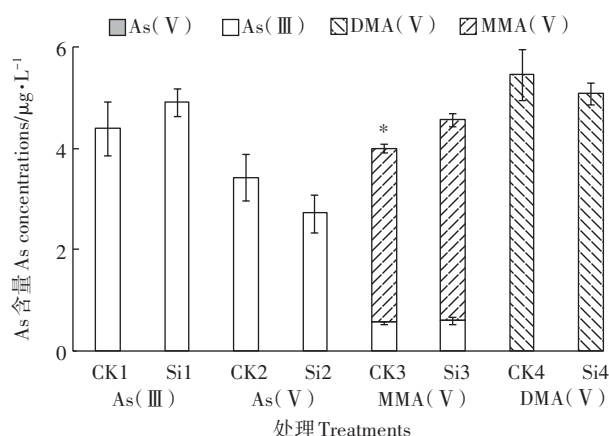


图4 不同砷形态处理下叶面施硅对水稻韧皮部砷形态影响
Figure 4 Effects of foliar application of Si on arsenic speciation in rice phloem sap under different arsenic species treatments

0.05)。DMA(V)处理下,水稻韧皮部汁液中只检测到DMA(V),叶面施硅韧皮部汁液中DMA(V)含量低于对照,但差异不显著($P>0.05$),DMA(V)处理下水稻韧皮部汁液中DMA(V)含量高于其他处理韧皮部不同砷形态含量。不论施硅与否,韧皮部不同砷形态含量排序为DMA(V)>As(III)>MMA(V)>As(V)。

3 讨论

不同形态砷的化学性质不同,植物根系对它们的吸收机理也不同。研究^[16]表明,水稻根系对不同砷形态吸收排序为:As(III)>MMA(V)>As(V)>DMA(V),而本研究结果显示,不论施硅与否,水稻根系对不同砷形态吸收能力排序为MMA(V)>As(III)>As(V)>DMA(V),这可能是因为水稻品种的不同而导致的吸收差异,且叶面施硅可显著降低水稻对As(V)和MMA(V)的吸收;但水稻对不同砷形态的转运系数排序为DMA(V)>As(III)>As(V)>MMA(V),说明MMA(V)虽然可以被水稻根系大量吸收,但向地上部转运很少,DMA(V)被水稻根系吸收得少,但可高效地运移至地上部。

As(III)和As(V)处理下,砷在水稻地上部与根系主要以As(III)形式存在,MMA(V)和DMA(V)处理下,砷在水稻地上部和根系分别以MMA(V)和DMA(V)形式存在,这与前人研究结果^[16]一致。硅在水稻的生长发育过程中起着极其重要的作用^[20]。叶面施硅可以降低重金属对水稻的毒害作用,抑制水稻籽粒对重金属的累积^[21-22],减少重金属经食物链对人体产生的危害。本研究结果表明,As(III)处理下,叶面施硅可降低水稻地上部与根系中砷含量,这可能是因为叶面施硅后,硅通过韧皮部向地上部和根系运输,与砷竞争硅的吸收和转运通道Lsi1和Lsi2,从而降低水稻地上部和根系砷浓度;As(V)处理下,叶面施硅可显著降低水稻根系和地上部砷含量,一方面可能是因为添加外源硅增加了水稻对P的吸收^[23-25],而As(V)与P共用磷酸盐转运蛋白,叶面施硅后,硅通过韧皮部运输到根系中,增加了水稻对营养液中P的吸收,从而减少了根系对As(V)吸收;另一方面可能是因为As(V)进入水稻根系后会转化为As(III),并通过硅酸盐通道Lsi2向地上部转运^[10-11],叶面施硅后,硅与As(III)竞争Lsi2,从而减少As(III)的转运,使水稻地上部砷含量降低。MMA(V)和DMA(V)处理下,叶面施硅可降低地上部和根系MMA(V)和DMA(V)含量,甲基砷可能是通过水通道蛋白Lsi1

进入到水稻^[8],叶面施硅后硅下移到根部与MMA(V)和DMA(V)竞争吸收通道Lsi1,从而减少了水稻中MMA(V)和DMA(V)含量;本试验还发现,水稻根中DMA(V)含量很低,这可能是DMA(V)快速的外排作用或者快速迁移至地上部造成的^[16]。

有研究表明,木质部是无机砷由根系向地上部运输的主要途径^[26],As(Ⅲ)在水稻木质部移动性较强^[27-28],本研究结果显示,在As(Ⅲ)和As(V)处理下,水稻木质部As(Ⅲ)和As(V)共存,并且以As(Ⅲ)为主,与前人研究结果^[16]一致,叶面施硅可不同程度降低木质部As(Ⅲ)含量,这可能是因为硅会和As(Ⅲ)竞争转运通道Lis2,进而抑制了水稻体内木质部砷的转运。与无机砷相比,甲基砷尤其是DMA(V)在木质部和韧皮部的移动性要高得多^[16]。本研究结果也显示,虽然水稻根中DMA(V)含量很低,但韧皮部DMA(V)浓度及其地上部含量却相对升高。此外,还有一个有意思的现象是根对MMA(V)的吸收能力在4种砷形态中最强,但是MMA(V)转运系数最低,而根对DMA(V)的吸收能力在4种砷形态中最弱,但是DMA(V)转运系数最高,水稻幼苗对二者的吸收和转运能力正好相反。在吸收能力方面,转运通道Lis1对DMA(V)的吸收显著低于MMA(V),至于DMA(V)从根到地上部高效转运的原因目前还不清楚,有待进一步研究。

4 结论

(1)不论何种砷形态处理,叶面施硅均可降低水稻对砷的吸收和累积;As(V)、MMA(V)处理下,叶面施硅显著降低了水稻对砷的吸收,降幅分别为29.08%、35.17% ($P<0.05$);As(Ⅲ)和DMA(V)处理下,叶面施硅处理与对照相比水稻对砷的吸收能力降低了12.86%和18.90%。

(2)不论叶面是否施硅,水稻对4种砷形态的转运能力为DMA(V)>As(Ⅲ)>As(V)>MMA(V),这说明DMA(V)向地上转运的能力很强。但是,叶面施硅后不同形态砷的转运系数与对照相比差异不显著($P>0.05$),即叶面喷施硅48 h内并没有显著影响不同形态砷在水稻中的转运。

参考文献:

[1] 李仁英, 沈孝辉, 张耀鸿, 等. 无机砷对不同水稻品种种子萌发和幼苗光合生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1067-1074.
LI Ren-ying, SHEN Xiao-hui, ZHANG Yao-hong, et al. Effects of inorganic arsenic on seed germination and photosynthetic characteristics of

various rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1067-1074.
[2] 沈孝辉, 李仁英, 徐向华, 等. 土壤-水稻系统砷迁移累积的影响因素及调控措施[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1273-1280.
SHEN Xiao-hui, LI Ren-ying, XU Xiang-hua, et al. Influencing factors of arsenic transfer in soil-rice system and control measures to mitigate arsenic accumulation in rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1273-1280.
[3] 孙宇. 硅/砷比对土壤-水稻中砷迁移和累积的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2016.
SUN Yu. Effects of Si/As in growth medium on the translocation and accumulation of arsenic in the soil-rice system[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016.
[4] 张敏. Si/As比调控水稻砷吸收和累积机制研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2017.
ZHANG Min. Study on mechanism of Si/As regulate arsenic uptake and accumulation in rice[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017.
[5] Liu W J, McGrath S P, Zhao F J. Silicon has opposite effects on the accumulation of inorganic and methylated arsenic species in rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1): 423-431.
[6] Stroud J L, Khan M A, Norton G J, et al. Assessing the labile arsenic pool in contaminated paddy soils by isotopic dilution techniques and simple extractions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4262-4269.
[7] Mestrot A, Feldmann J, Krupp E M, et al. Field fluxes and speciation of arsines emanating from soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1798-1804.
[8] 刘文菊, 赵方杰. 植物砷吸收与代谢的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 56-62.
LIU Wen-ju, ZHAO Fang-jie. A brief review of arsenic uptake and metabolism in plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 56-62.
[9] Abedin M J, Cotter-Howells J, Meharg A A. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa*, L.) irrigated with contaminated water[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 311-319.
[10] 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.
[11] Xu X Y, McGrath S P, Meharg A A, et al. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(15): 5574-5579.
[12] Raab A, Williams P N, Meharg A, et al. Uptake and translocation of inorganic and methylated arsenic species by plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 4(3): 197-203.
[13] Carey A M, Norton G J, Deacon C, et al. Phloem transport of arsenic species from flag leaf to grain during grain filling[J]. *New Phytologist*, 2011, 192(1): 87-98.
[14] Carey A M, Scheckel K G, Lombi E, et al. Grain unloading of arsenic species in rice[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(1): 309-319.
[15] King R W, Zeevaert J A. Enhancement of phloem exudation from cut petioles by chelating agents[J]. *Plant Physiology*, 1974, 53(1): 96-103.
[16] 贾炎, 黄海, 张思宇, 等. 无机砷和甲基砷在水稻体内吸收运

- 移的比较研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10):2483-2489.
- JIA Yan, HUANG Hai, ZHANG Si-yu, et al. A comparative study of inorganic and methylated arsenic on absorption and transportation in rice plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10): 2483-2489.
- [17] Liu W J, McGrath S P, Zhao F J. Silicon has opposite effects on the accumulation of inorganic and methylated arsenic species in rice[J]. *Plant & Soil*, 2014, 376(1):423-431.
- [18] 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.
- WANG Ying, ZHAO Quan-li, HU Ying, et al. Survey and contamination assessment of heavy metal in soil and plants around the Pb/Zn mine in Shangyu, Zhejiang Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(7): 1354-1360.
- [19] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277:127-138.
- [20] 廖红. 高级植物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- LIAO Hong. Advanced plant nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [21] 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.
- WANG Shi-hua. Foliar application of nanometer silicon increases heavy metal resistance in rice (*Oryza sativa* L.) and its mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [22] 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.
- XU Xiang-hua, LIU Chuan-ping, TANG Xin-lian, et al. Foliar application of selenium-silicon sol reduced arsenic accumulation in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6):1064-1069.
- [23] Guo W, Hou Y L, Wang S G, et al. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2):173-181.
- [24] Ma J F, Takahashi E. Effect of silicic acid on phosphorus uptake by rice plant[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1989, 35(2):227-234.
- [25] Ma J F, Takahashi E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice[J]. *Plant and Soil*, 1990, 126(1):115-119.
- [26] 赵方杰. 水稻砷的吸收机理及阻控对策[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5):569-576.
- ZHAO Fang-jie. Mechanisms of arsenic uptake by rice and mitigation strategies[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):569-576.
- [27] Zhao F J, Ma J F, Meharg A A, et al. Arsenic uptake and metabolism in plants[J]. *New Phytologist*, 2009, 181(4):777-794.
- [28] Su Y H, McGrath S P, Zhao F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2010, 328(1/2):27-34.