

酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究

I. 对土壤pH、Eh 及硅动态的影响

杨 丹, 刘鸣达, 姜 峰, 张玉龙 *

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

摘 要:分别选取酸性和中性水田土壤进行盆栽试验,研究施用硅肥对水稻各生育期土壤溶液 pH、Eh 及硅浓度的影响。结果表明,淹水种稻后酸性土壤 pH 迅速升高,而中性土壤 pH 降低,然后均趋于中性;Eh 的变化基本均呈近似“W”形;土壤溶液硅浓度则经历了一个先升高后下降并趋于稳定的变化过程。与对照相比,单施高炉渣或高炉渣与葡萄糖配施处理在提高土壤溶液 pH 和 Eh、增加硅浓度方面的效果较为明显,尤其在酸性水田土壤上表现得更为突出;偏硅酸钠的施用效果只是在水稻生长的某一时期在中性水田土壤上表现得相对明显;单施葡萄糖会降低土壤 Eh,提高生育前期土壤溶液中的硅浓度。在水稻全生育期内,高炉渣与葡萄糖配施处理的土壤溶液中硅浓度升高的幅度最大,在酸性水田土壤和中性水田土壤上分别是对照处理的 1.40(最小倍数)~4.93(最大倍数)倍和 1.19(最小倍数)~2.72 倍(最大倍数),说明施用高炉渣硅肥,可明显提高土壤硅素供应水平,对促进水稻生长、提高水稻产量有重要意义。

关键词:水田土壤;土壤溶液;pH;Eh;硅;高炉渣

中图分类号:S143.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0757-07

Effect of Silicon Fertilizer in Acid and Neutral Paddy Field Soils I. Effect on Dynamic Changes of pH, Eh and Si in Soil Solution

YANG Dan, LIU Ming-da, JIANG Feng, ZHANG Yu-long*

(College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Northeast Cultivated Land Conservation, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of silicon fertilizer on the dynamic changes of pH, Eh, silicon concentrations in soil solutions of acid and neutral paddy field soils in northern China during the growth stages of rice. The mechanisms of different types of silicon fertilizer on improving soil silicon supplying ability were investigated. The results showed that pH value increased in acid soil, however it decreased in neutral soil, and finally both approached to neutral pH. The pH value of soil solutions in the treatments with blast furnace slag or mixture of blast furnace slag and glucose increased obviously in acid paddy field soil, while the increase of pH was more pronounced in the treatment with sodium metasilicate in neutral paddy field soil. The Eh of all treatments in the two types of soil decreased sharply firstly, and gradually reached the bottom, then increased rapidly to a peak after the water was drained away; when soil was drowned again, the Eh decreased to another bottom, and then increased slightly. The Eh varied greatly between acid and neutral soil. In acid paddy field soil, Eh increased in the treatments with blast furnace slag or sodium metasilicate, whereas it decreased in the treatment with glucose. The silicon concentration in soil solutions of all treatments increased to a peak, then decreased gradually, and stabilized at a constant value. The silicon concentration in soil solutions increased in the early growth stage of rice because of application of silicon fertilizer, and the increase was most obvious in the treatment with glucose or mixture of blast furnace slag with glucose. The silicon concentration in the treatment with sodium metasilicate was higher than that in the treatment with blast furnace slag in neutral paddy field soil at early growth stage of rice; in the late growth stage of rice, the silicon concentration in the treatment with silicon fertilizer was higher than that in the treatment with glucose. In acid

收稿日期:2011-09-24

基金项目:国家自然科学基金(40971175);辽宁省自然科学基金(20062114)

作者简介:杨 丹(1977—),女,辽宁鞍山人,博士,讲师,主要从事土壤改良及农业环境保护方面的教学与科研工作。E-mail:yangdan_dfcy@163.com

* 通信作者:张玉龙 E-mail:ylzsau@163.com

paddy field soil, the effects of blast furnace slag or mixture of blast furnace slag with glucose on silicon concentration was greater than that in the treatment with sodium metasilicate. In the whole growth stage of rice, mixed application with furnace slag and glucose increased the silicon concentration in the soil with the maximum increase rate. The silicon concentrations were 1.40 (the smallest multiple)~4.93(the largest multiple) time and 1.19 (the smallest multiple)~2.72 (the largest multiple) time higher in acid and neutral paddy soils respectively, compared to the untreated soil. Our study has shown that silicon fertilizers from blast furnace slag can improve the silicon-supplying capacity in the soil and increase the growth and yield of rice.

Keywords: paddy field soil; soil solution; pH; Eh; silicon; blast furnace slag

早在 20 世纪 50 年代,日本应用含硅炉渣改造退化稻田获得成功^[1],随后关于土壤硅素营养与肥力方面的研究日益增多。我国于 20 世纪 80 年代开展了硅肥对水稻增产效果、施用硅肥的指标和硅肥资源调查方面的研究,相继出现了以高炉渣、钢渣、粉煤灰、黄磷废渣等工矿废物作为硅肥施用的报道,对废渣的用量、粒度、溶解机理等施用技术及效果进行了比较和分析^[2-5]。近年来,国内外学者针对硅的有益作用尤其是施硅提高植物抗逆性等方面展开了广泛而深入的研究^[6-8],而将土壤-植物看作一个整体,系统地分析施硅在水稻不同生育期内对不同土壤改良效果及水稻增产作用的研究还鲜有报道。

本文选取辽宁地区酸性和中性水田土壤进行盆栽试验,动态监测水稻生育期内土壤溶液 pH、Eh 及水溶态硅的变化,以期揭示不同硅肥在不同土壤上提高土壤供硅能力的作用机制,为促进工矿废渣农业资源化及硅肥生产与应用提高科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤分别采自辽宁省的抚顺和盘锦,取样深度为 0~20 cm。供试土壤的理化性质见表 1、表 2。

供试硅肥采用分析纯偏硅酸钠 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 含 SiO_2 21%)和碱性水淬高炉渣。高炉渣取自抚顺钢铁公司(新抚钢厂),含 SiO_2 36.24%、 CaO 46.32%,重金属元素 Cd $0.016 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 Pb $1.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 Zn $0.091 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 Cu 、 Ni 、 Cr 、 Hg 、 As 等未检出。所用氮磷钾肥及有机物料均为尿素、过磷酸钙、氯化钾和葡萄糖的分析纯试剂。

供试水稻(*Oryza sativa* L cv.)品种为奥羽 316。

1.2 试验设计

盆栽试验共设 5 个处理,每个处理 4 次重复,钵钵为容积 17.5 L 的塑料桶,装土前安装如图 1 所示的装置,以备动态监测试验采集土壤溶液用。称取风干土 12 kg 与肥料充分混匀后装盆,各处理肥料用量及施用方式详见表 3。

试验于 2010 年进行。泡水 1 d 后插秧,选取 3 叶秧苗,每盆 3 穴,每穴 2 株。分蘖期追肥,拔节期(7 月 21 日)烤田 2 d。整个生育期定量浇水,按常规管理。在水稻生育期,从插秧后第 2 d 开始抽取土壤溶液,共取样 10 次,每次 50 mL,取样后立即测定水样的 pH、Eh 与土壤溶液中硅的含量。

1.3 测定项目与方法

土壤全碳采用德国生产 Vario EL III 型元素分析

表 1 土壤类型及其主要的理化性质

Table 1 Types and properties of soils

采样地点 Location	土种 Soil species	全碳 Total C/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	粘粒 Clay/%	游离氧化铁 Free iron oxide/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	无定形铁 Amorphous iron oxide/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	游离氧化锰 Free manganese oxide/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	无定形锰 Amorphous manganese oxide/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
抚顺清原	壤质棕壤田	14.65	5.57	16.29	11.41	6.41	0.24	0.12
盘锦大洼	粘质硫酸盐 氯化物盐渍田	13.34	7.62	37.16	13.34	2.08	0.12	0.10

表 2 土壤中不同形态的硅及有效硅含量

Table 2 Content of silicon in different forms and available silicon

采样地点 Location	DCB-硅 DCB-Silicon ($\text{SiO}_2, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水溶态硅 Water soluble silicon ($\text{SiO}_2, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	活性硅 Active silicon ($\text{SiO}_2, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	无定形硅 Amorphous silicon ($\text{SiO}_2, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效硅 Available silicon ($\text{SiO}_2, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
抚顺清原	4.11	25.46	199.77	9.52	130.05
盘锦大洼	7.54	22.03	440.45	7.51	630.81

表 3 肥料用量表($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)
Table 3 Amount of fertilizers($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer						追肥 Additional fertilizer
	高炉渣 Blast furnace slag	葡萄糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	偏硅酸钠 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	N	P_2O_5	K_2O	N
对照 CK Control	—	—	—	1.67	1.8	0.9	0.72
高炉渣 Blast furnace slag	30	—	—	1.67	1.8	0.9	0.72
高炉渣+葡萄糖 Blast furnace slag+Glucose	30	10	—	1.67	1.8	0.9	0.72
葡萄糖 Glucose	—	10	—	1.67	1.8	0.9	0.72
偏硅酸钠 Sodium metasilicate	—	—	2.4	1.67	1.8	0.9	0.72

仪测定,其他土壤理化性质采用常规方法分析^[9-11]。土壤水溶态硅、活性硅、无定形硅、DCB 硅和有效硅含量分别用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ ($\text{pH}1.5$)、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ 、连二亚硫酸钠-柠檬酸钠混合溶液和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHAC}$ ($\text{pH}4.0$) 溶液浸提、钼蓝比色法测得,土壤溶液中的硅也采用硅钼蓝比色法测定, pH 和 Eh 采用电位计法测定。高炉渣全量成分以碳酸钠熔融,用重量法测定硅,钼蓝比色法测定磷,原子吸收分光光度计法测定钙、镁、铝、铁、锰等元素。高炉渣中有效硅及重金属元素以 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 浸提,硅钼蓝比色法测定硅,原子吸收分光光度计法测定镉、铅、锌、铜、铬、汞等元素。

2 结果与分析

本文选取 2 种理化性质(特别是 pH)差异较大的水田土壤进行盆栽试验,以期掌握不同类型水田土壤硅素供应规律及其影响因素,探讨硅肥的施用效应。

2.1 施用硅肥对水稻生育期内土壤 pH 动态的影响

图 2、图 3 分别为水稻生育期 2 种土壤 pH 的动态变化情况。从图中可以看出,淹水种稻后,2 种土壤各处理 pH 的动态变化趋势不尽相同。酸性水田土壤 pH 升高,约 20 d 达到平衡;中性水田土壤 pH 稍有降低,大约只有 10 d 即趋于平衡。尽管平衡后由于撒水烤田等原因致使土壤 pH 有所波动(酸性水田土壤 pH 略有下降,中性水田土壤 pH 有所上升),但 2 种土壤 pH 都趋于中性,使土壤 pH 在 6.4~6.8 的范围内变化。总的来说,土壤 pH 还是中性水田土壤高于酸性水田土壤。

从总体上来看,在水稻生育期的大部分时间内,在酸性和中性水田土壤上施用硅肥和葡萄糖处理的土壤 pH 均高于对照。就一种水田土壤而言,因其施肥情况不同,各处理之间又存在一定的差异。在酸性水田土壤上,不同处理 pH 开始升高的起点不同,表

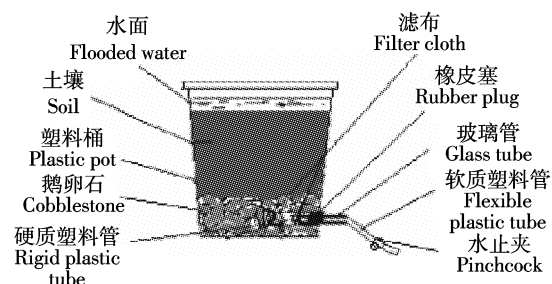


图 1 盆栽装置示意图

Figure 1 Apparatus used for experiment

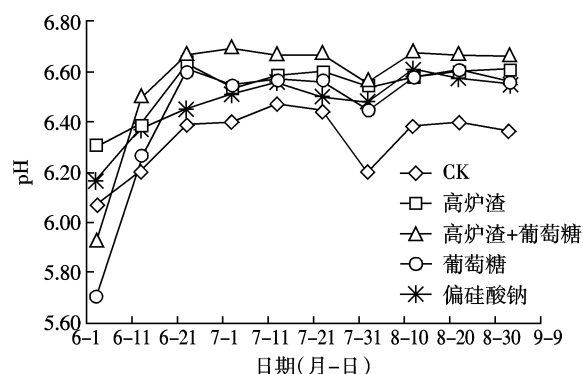


图 2 酸性水田土壤 pH 的动态变化

Figure 2 Dynamic change of pH in acid paddy field soil

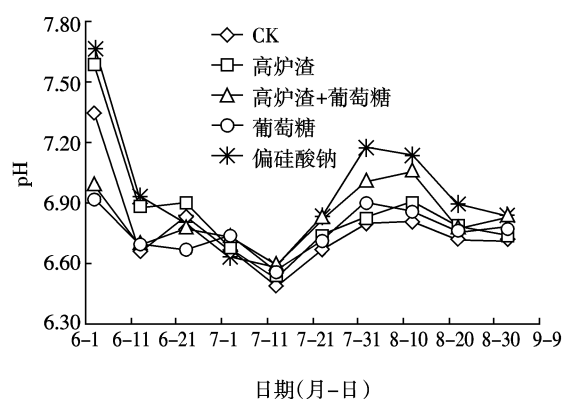


图 3 中性水田土壤 pH 的动态变化

Figure 3 Dynamic change of pH in neutral paddy field soil

现为高炉渣>偏硅酸钠>对照>高炉渣+葡萄糖>葡萄糖;从 6 月 13 日开始,施肥各处理的 pH 均高于对照,这种情况一直持续到排水落干(9 月 2 日)。对于中性水田土壤来说,在淹水初期土壤 pH 高低顺序与酸性水田土壤基本相同。此后,各处理土壤 pH 均有所下降。7 月 3 日以后,各施肥处理土壤 pH 均高于对照,总体上看是施用偏硅酸钠处理 pH 最高,高炉渣和葡萄糖配合施用的处理次之,其后为单施高炉渣和葡萄糖的处理。

2.2 施用硅肥对水稻生育期内土壤 Eh 动态的影响

图 4 和图 5 是淹水种稻后土壤 Eh 的动态变化情况。

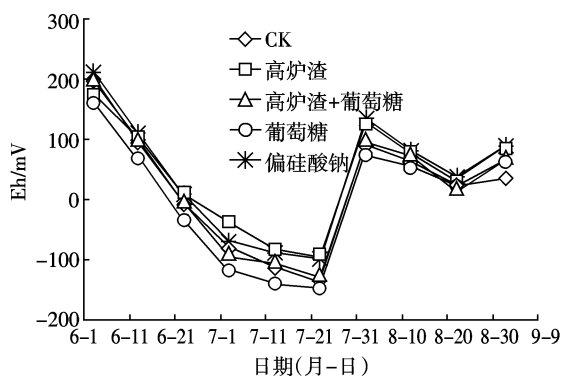


图 4 酸性水田土壤 Eh 的动态变化

Figure 4 Dynamic change of Eh in acid paddy field soil

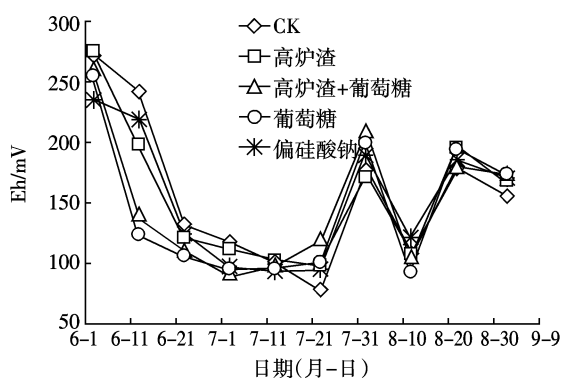


图 5 中性水田土壤 Eh 的动态变化

Figure 5 Dynamic change of Eh in neutral paddy field soil

从图中可以看出,淹水种稻后 2 种土壤各处理 Eh 的动态变化基本呈近似“W”形。即各处理土壤 Eh 先迅速降至低谷,继而在烤田撤水后又迅速升高达到峰值;复水后又降至第二个低谷,随后有一定程度的升高。从水稻整个生育期来看,在 2 种土壤各处理中,土壤 Eh 变化的范围差异较大,且由于施肥情况的不

同,在相同时期,同一土壤上的各处理之间也存在一定的差异。

在酸性水田土壤中,施用高炉渣和偏硅酸钠提高土壤 Eh 的作用较为明显,而单施葡萄糖处理的土壤 Eh 在水稻整个生育期内基本都低于对照处理。在中性水田土壤中,从淹水初期开始到 7 月 3 日之前,各施肥处理土壤 Eh 均低于对照处理;7 月 13 日时各处理 Eh 的差异较小;此后,施用偏硅酸钠处理的 Eh 始终高于对照,而其他施肥处理与对照相比较变化规律不明显。各处理土壤 Eh 的变化可能与土壤自身的理化特性有一定的关系,其原因尚有待于进一步研究。

这两种土壤各处理的 Eh 在烤田后均有较大幅度的升高,尤以酸性土壤的变化更大;随后由于重新灌水(7 月 23 日)而又开始下降,且各处理土壤 Eh 都存在一定的波动。

2.3 施用硅肥对水稻生育期土壤溶液中硅动态的影响

图 6 和图 7 是水稻生育期土壤溶液中硅的动态变化情况。在水稻生育期各处理土壤溶液中硅浓度变

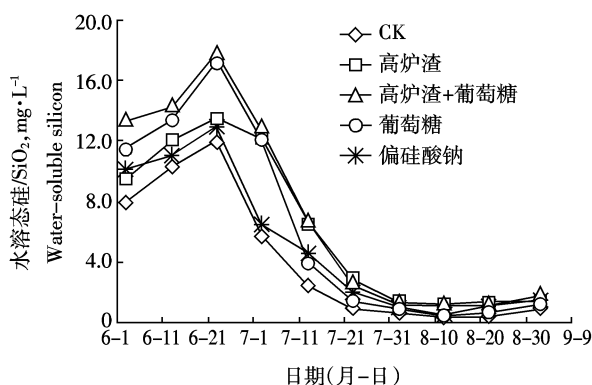


图 6 酸性水田土壤溶液中硅的动态变化

Figure 6 Dynamic change of SiO₂ in acid paddy field soil solution

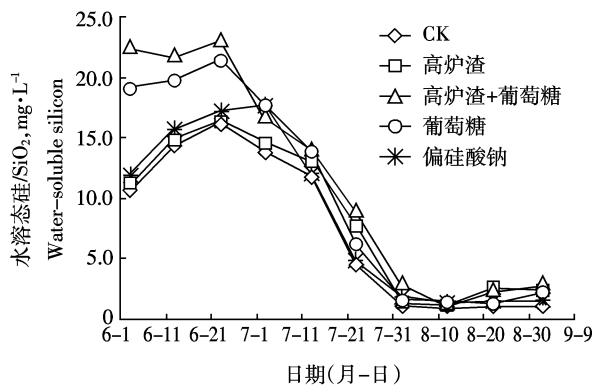


图 7 中性土壤溶液中硅的动态变化

Figure 7 Dynamic change of SiO₂ in neutral paddy field soil solution

化基本上均表现为从淹水后逐渐升至高峰,而后迅速降至低谷,随后则基本不变的趋势。总的来看,土壤溶液中硅浓度在各个时期都是中性水田土壤高于酸性水田土壤。

由图6、图7可以看出,在水稻营养生长期,施肥对于提高酸性和中性水田土壤溶液中硅浓度的效果均较为明显,而在生殖生长期,各施肥处理与对照处理间的差异减小。进一步计算施肥处理土壤溶液中的硅浓度与对照处理硅浓度的比值,在全生育期内,施用高炉渣、偏硅酸钠或者葡萄糖均可增加土壤溶液中的硅浓度,但尤以高炉渣和葡萄糖配施处理土壤溶液中硅浓度升高的幅度最大,在酸性水田土壤和中性水田土壤上分别是对照处理的1.40(最小倍数)~4.93倍(最大倍数)和1.19(最小倍数)~2.72倍(最大倍数)。

可以说,在酸性土上,高炉渣与葡萄糖配施、单施高炉渣两个处理增加土壤溶液硅浓度、提高土壤硅素供应能力的效果都明显好于偏硅酸钠处理;而在中性土上,种稻前期,单施偏硅酸钠的效果要好于单施高炉渣,种稻后期二者变化规律不明显。

3 讨论

一般认为酸性土壤淹水后 pH 升高是由于铵盐的形成,或是在淹水嫌气条件下形成的还原性碳酸铁、锰水解而产生了氢氧化亚铁和氢氧化亚锰,降低了土壤溶液中 H^+ 的浓度^[12-13](图2)。而近中性土壤 pH 降低,则可能是由于亚铁与氯化物等生成氯化亚铁,再水解产生氢氧化亚铁和盐酸,增加了土壤水解性酸的缘故^[10](图3)。此外,在纯溶液中,如果 pH 在 7~10 之间,盐浓度在 $0\sim 1\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的范围内,硅胶能够与钙、钾、钠等离子形成可溶于水的表面配合物,即硅胶表面硅羟基结合一个 Ca^{2+} (或 K^+ 、 Na^+)就释放出两个(或一个) H^+ ^[14]。供试的中性水田土壤淹水时可能会具备发生上述反应的条件,所以这一反应可能也是导致该土壤 pH 降低的原因之一。

在2种土壤上施用有机物料的处理,即施用葡萄糖或高炉渣与葡萄糖配施两个处理土壤 pH 的第一次观测值低于对照处理(图2、图3)。而对于一种水田土壤而言,随淹水时间延长,不同处理间的土壤 pH 的变化也是不同的,这可能与施用有机物料、碱性肥料及水分管理措施等有密切关系。一方面,有机物料分解时产生的还原性物质使土壤中的铁、锰氧化物等被还原,进而消耗土壤溶液中的 H^+ ,使土壤 pH 升高;另一方面,有机物料分解时产生的有机酸和 CO_2 也可使土

壤 pH 降低^[15]。另外,高炉渣含有氧化钙等多种碱性氧化物,水解后增加了土壤中 OH^- 的浓度,中和了土壤中的致酸离子;硅酸钙可与土壤中 Al^{3+} 等反应形成稳定的非晶形羟基铝硅酸盐,也能提高土壤 pH^[16]。而且,碱性物质对土壤有机质的分解具有一定的促进作用。上述反应的综合作用可能更为复杂,导致各处理间的土壤 pH 在不同时期出现了一定的变化和差异。

土壤 Eh 的变化是构成土壤中氧化还原体系的各种组成成分与微生物共同作用的结果,同时氧化还原条件的变化又会影响氧化还原体系的物质组成和微生物的活动^[10]。通常淹水后土壤中的氧化还原型物质存在着一个顺序还原的过程,即淹水后首先是氧的来源被切断,加上微生物的呼吸作用加剧了氧的消失过程,接着由于微生物的作用使硝态氮被还原,然后是高价锰被还原成亚锰;还原条件的进一步加剧会使高价铁转化成亚铁,最后是硫酸根还原成的硫化氢和有机物在还原条件下被分解。不过这一系列过程并非严格按照上述顺序依次完成的,事实上由于微生物的参与以及各体系的反应速度的不同,有些反应会同时进行。而在撤水后,由于空气进入土壤孔隙中,导致土壤 Eh 又有所上升。

本试验中,施用含硅的高炉渣和偏硅酸钠后,由于硅酸胶体能够与铁、锰及其氢氧化物共同形成一些不易溶解的物质,在一定程度上可以降低土壤中 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的浓度,减少还原性物质的数量。另一方面,从水稻生理学的角度来看,供硅可以增强水稻通气组织的刚性,提高水稻输送氧的能力和根系的氧化力,从而使土壤中的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 氧化;硅还可激活水稻根际的过氧化物酶,促进好气微生物的活动,使 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 被氧化^[17]。此外,施用的葡萄糖在土壤中被分解又会加剧土壤的还原程度。这些机制的综合作用,最终导致了各处理间土壤 Eh 的差异(图4、图5)。

在淹水种稻的条件下,影响土壤溶液中硅浓度的因素有很多,包括土壤 pH、Eh、水稻的吸收利用等。淹水插秧后的一段时间内,2种土壤各处理土壤溶液中硅的浓度均有所升高直至达到高峰(图6、图7)。可能是由于土壤有机质嫌气分解产生的有机酸与铁、铝、锰、钙等元素螯合,使与之结合的硅被释放出来。此外,与三价铁共同沉淀的无定形铝硅酸盐以及被氢氧化铁包被的硅胶因铁被还原而释放出来,使土壤溶液中硅的浓度升高^[18-19]。

水稻经过缓苗逐渐进入分蘖期,旺盛的营养生长使其吸收利用硅的数量逐渐增多,甚至超过了因淹水

还原和施用硅肥而使土壤溶液中硅增加的数量。同时,随着淹水时间的延长,水田土壤中无定形氧化铁等物质的数量逐渐增加^[20],对硅的吸附可能有所加强。因此,各处理土壤溶液中硅浓度到 6 月 20 日以后均开始急剧下降。分蘖期结束后,水稻群体生物量增长减缓,对硅素的吸收也减少,致使 7 月 23 日前后硅浓度的降低速度变缓。水稻生殖生长期,植株吸收利用硅的数量可能和从硅肥及土壤中溶解出的硅的数量相当,因此两种土壤上各处理土壤溶液中的硅浓度总体上趋于稳定(图 6、图 7)。

在水稻整个生育期内,中性水田土壤溶解出的硅始终高于酸性水田土壤。其原因主要有两方面:第一,土壤中硅的浓度通常与土壤总碱度具有一定的正相关关系^[21],在弱碱性条件下,无定形硅可以产生一定程度的溶解^[22];第二,由于在弱碱性条件下钙、钾、钠等离子与硅胶反应形成可溶于水的表面配合物,其结果可能会造成土壤溶液中硅测定结果升高^[11];第三,与不同土壤中对硅产生吸附作用的物质(如无定形铁等)的数量多寡有关。与酸性土壤相比,供试的中性水田土壤中无定型铁含量低(表 1),对硅的吸附量较少,故其土壤溶液中硅的浓度要高一些(图 6、图 7)。

同一土壤上不同处理间土壤溶液中硅浓度升高的幅度不同,是由于施肥状况以及土壤中影响肥料(特别是高炉渣中硅)溶解的因素不同造成的。施用葡萄糖降低了土壤 Eh,促进无定性铝硅酸盐的溶解,有利于被铁、锰氢氧化物包被的硅胶的释放;同时在分解过程中产生了有机酸,促进了高炉渣及土壤中硅素的溶解释放,因此高炉渣与葡萄糖配施处理的施用效果最为明显(图 6、图 7)。而且,由于高炉渣中的钙可以中和酸性土壤中的 H^+ 或代换土壤胶体表面的 Na^+ ,进而促进了高炉渣中与钙结合的硅的溶解,所以表现出酸性土壤上土壤溶液中硅浓度升高的幅度为高炉渣>偏硅酸钠(图 6)。

4 结论

综上所述,施用硅肥并不能从根本上改变水稻生育期土壤 pH、Eh 和溶液中硅的动态变化规律,但与不施硅对照处理相比,施用硅肥可以显著地提高水稻整个生育期土壤溶液中硅的浓度。特别是高炉渣与葡萄糖配合施用处理在一定程度上改善影响水稻生长的土壤条件和提高硅素供应水平,这对于促进水稻生长,提高水稻产量必然会产生积极的影响。

参考文献:

- [1] 川口桂三郎. 水田土壤学[M]. 东京:讲谈社, 1978:293-299.
Kawaguchi K. Paddy soil science[M]. Tokyo:Kodansha, 1978:293-299.
- [2] Elawad S H, Gascho G J, Street J J. Response of sugarcane to silicate to silicate source and rate:I. Growth and yield [J]. *Agron J*, 1982, 74: 481-484.
- [3] 何电源, 臧惠林, 张效朴. 炉渣作为硅肥在红壤性水稻土上的效应[J]. 土壤学报, 1980, 17(4):355-364.
HE D Y, ZANG H L, ZHANG X P. The effect of silicate slags on rice in paddy soils derived from red earth[J]. *Acta Pedol Sin*, 1980, 17(4): 355-364.
- [4] 臧惠林. 我国南方利用钢铁冶金渣作农肥的初步总结[J]. 农业环境保护, 1986, 4(3):34-37.
ZANG H L. Preliminary research on using metallurgical slag as agricultural fertilizer in south China[J]. *Agriculture Environment Protection*, 1986, 4(3):34-37.
- [5] 张效朴, 臧惠林. 粉煤灰硅钙肥的增产原因及其有效施用条件[J]. 土壤, 1986, 18(2):67-78.
ZHANG X P, ZANG H L. Reason for yield increase of fly ash silicon-calcium fertilizer and its effective application of conditions [J]. *Soil*, 1986, 18(2):67-78.
- [6] Hassan G, Zoltán B, Peter G O, et al. Transcriptome of silicon-induced resistance against *Ralstonia solanacearum* in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2011, 75(3):83-89.
- [7] Hammerschmidt R. More on silicon-induced resistance[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2011, 75(3):81-82.
- [8] Song A L, Li Z J, Zhang J, et al. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1):74-83.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
LU R K. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing:China Agricultural Sciencetech Press, 1999.
- [10] 向万胜, 何电源, 廖先苓. 湖南省土壤中硅的形态与土壤性质的关系[J]. 土壤, 1993, 25(3):146-151.
XIANG W S, HE D Y, LIAO X L. Relationship between the form of silicon in soil and soil properties in Hunan province [J]. *Soil*, 1993, 25(3):146-151.
- [11] 熊 毅. 土壤胶体[M]. 北京:科学出版社, 1985.
XIONG Y. Soil colloid[M]. Beijing:Science Press, 1985.
- [12] 朱祖祥. 土壤学(上册)[M]. 北京:农业出版社, 1983.
Zhu Z X. Soil science (vol. 1)[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1983.
- [13] 贾文锦. 辽宁土壤[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1992:511-519.
JIA W J. Soil in Liaoning [M]. Shenyang:Liaoning Science and Technology Press, 1992:511-519.
- [14] 陈荣三, 王金晞, 柳海澄, 等. 硅酸及其盐的研究 X IV. Ca^{2+} , Na^+ 和

- K⁺与硅胶表面硅羟基的反应[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1983(1):73-83.
- CHEN R S, WANG J X, LIU H C, et al. Studies on silicic acid and its salts:xiv. Reaction of Ca²⁺, Na⁺ and K⁺ with surface silanol groups of silica gel[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 1983(1):73-83.
- [15] 于天仁. 水稻土的物理化学[M]. 北京:科学出版社, 1983:185-188.
- YU T R. Physical chemistry in paddy soil[M]. Beijing:Science Press, 1983:185-188.
- [16] 李学垣. 土壤化学及实验指导[M]. 北京:农业出版社, 1997.
- LI X Y. Soil chemistry and experimental instruction[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1997.
- [17] 胡家祺. 水稻的硅素营养[J]. 国外农学—水稻, 1982(6):23-25.
- HU J Q. Silicon nutrition of rice[J]. *Foreign Agriculture—rice*, 1982(6):23-25.
- [18] Elgawhary S M, Lindsay W L. Solubility of silica in soils[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1972, 36:439-442.
- [19] 刘鸣达, 张玉龙, 王耀晶, 等. 施用钢渣对水稻土 pH、水溶态硅动态及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):47-50.
- LIU M D, ZHANG Y L, WANG Y J, et al. Effects of slag application on dynamic changes of pH, water-Soluble silicon concentrations in paddy soil and rice yield[J]. *Chin J Soil Sci*, 2002, 33(1):47-50.
- [20] 苏玲, 林咸永, 章永松, 等. 水稻土淹水过程中不同土层铁形态的变化及对磷吸附解吸特性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(2):124-128.
- SU L, LIN X Y, ZHANG Y S, et al. Effects of flooding on iron transformation and phosphorus adsorption desorption properties in different layers of the paddy soils [J]. *J Zhejiang Univ (Agric & Life Sci)*, 2001, 27(2):124-128.
- [21] 俞仁培, 杨道平, 石万普, 等. 土壤碱化及其防治[M]. 北京:农业出版社, 1984:60-62.
- YU R P, YANG D P, SHI W P, et al. Soil alkalization control[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1984:60-62.
- [22] 臧惠林. 钢渣在我国南方水稻土壤施用效果的初步研究[J]. 土壤, 1987, 19(6):299-303.
- ZANG H L. Preliminary research on the effect of applying the steel slag in paddy soil in the south China[J]. *Soil*, 1987, 19(6):299-303.