

酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 II.对水稻吸收硅素及产量的影响

杨 丹^{1,2}, 张玉龙^{1,2}, 杨东伟³, 刘鸣达^{1,2*}

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866; 3.沈阳农业大学理学院, 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不同生育期硅素吸收状况及产量的影响,以期揭示施用硅肥提高不同类型土壤供硅能力、改善植株硅素营养及增加产量的作用机制。结果表明,从拔节期到抽穗期水稻植株体内硅的含量有较大幅度的降低,而后又逐渐升高。施用硅肥可明显提高水稻植株体内硅的含量,尤以高炉渣与葡萄糖配合施用和单施高炉渣两个处理效果最好,极显著高于对照及其他处理。在酸性水田土壤上施用硅肥的增产效果较为明显,高炉渣与葡萄糖配施处理的增产率高达 16.99%,且成熟期水稻植株含硅量与稻谷产量间存在显著的直线正相关关系;在中性水田土壤上施硅则无显著增产效果。总之,高炉渣与葡萄糖配合施用能更有效地改善土壤的供硅能力,进而提高水稻产量,其在酸性水田土壤上的施用效果尤为显著。

关键词:水田土壤;土壤溶液;硅;水稻;产量;高炉渣

中图分类号:S143.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0764-04

Effect of Silicon Fertilizer in Acid and Neutral Paddy Field Soils II. Effect on Silicon Uptake and Yield of Rice

YANG Dan^{1,2}, ZHANG Yu-long^{1,2}, YANG Dong-wei³, LIU Ming-da^{1,2*}

(1.College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866,China; 2.State Key Laboratory of Soil Science, Shenyang 110866,China; 3.College of Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of silicon fertilizer on silicon uptake during the growth stages of rice and yield of rice in acid and neutral paddy field soils in northern China to investigate the mechanisms of different types of silicon fertilizer on improving soil silicon supplying ability, plant silicon nutrition and rice yield. The results showed that silicon content in rice plants decreased greatly from jointing to heading stage, and then increased slowly. Silicon fertilizer could obviously improve the silicon content of rice plants. Silicon content in the treatments with blast furnace slag or mixture of blast furnace slag and glucose, was significantly higher than those in the control and other treatments. However the silicon content of rice plants was not increased in the treatment with sodium metasilicate in neutral paddy field soil. In the acidic paddy field soil, yield of rice increased obviously by applying silicon fertilizer. The mixture of blast furnace slag with glucose increased the yield by 16.99%. There was significant positive linear correlation between silicon content and rice yield. The rice yield was not increased with the application of silicon fertilizer in neutral paddy field soil. In conclusion, the fertilizer of mixture of blast furnace slag and glucose could improve silicon supplying capacity in the soil and increase the yield of rice, especially in acid paddy soil.

Keywords: paddy field soil; soil solution; silicon; rice; yield; blast furnace slag

前文^[1]述及施用硅肥可以有效地改善水田土壤的 pH 和氧化还原状况,显著地提高水稻整个生育期土

壤溶液中硅的浓度,特别是高炉渣与有机物料(葡萄糖)配合施用时效果最为明显。本文在此基础上研究了施用硅肥对水稻不同生育期硅素吸收状况及水稻产量的影响,以了解施用硅肥在提高不同类型土壤的供硅能力、改善植株硅素营养及提高产量方面的作用,为促进工矿废渣的农业利用及硅肥生产与应用提供进一步的科学依据。

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,讲师,博士,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:刘鸣达 E-mail:mdsauoil@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

供试土壤分别采自辽宁省的抚顺和盘锦,土壤理化性质见文献[1];供试肥料及水稻品种如前文^[1]所述。

盆栽试验共设 CK(不施硅)、高炉渣、高炉渣+葡萄糖、葡萄糖和偏硅酸钠 5 个处理,每个处理 4 次重复(其中一盆供生育期测定植株硅含量用),各处理肥料用量及施用方式详见前文^[1]表 3。

分别于水稻分蘖期(7 月 2 日)、拔节期(7 月 24 日)、抽穗期(8 月 13 日)、乳熟期(9 月 2 日)和成熟收获后采取水稻植株样本并测定其中硅含量;收获后考种测定水稻籽实产量。

1.2 测定项目与方法

水稻植株样本采回后洗净、烘干,以三酸(H_2SO_4 : HNO_3 : HClO_4 =1:8:1)消煮,用重量法测定硅含量^[2]。

2 结果与分析

2.1 施用硅肥对不同生育期水稻植株中硅含量的影响

分别于分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期和收获后采取的盆栽水稻植株样本中硅含量的测定结果如图 1 和图 2 所示。

总的来看,对于不同土壤和不同施肥处理而言,水稻植株体内硅的百分含量随生育期的变化呈相似的变化规律,即均表现为从拔节期到抽穗期植株体内硅的含量有较大幅度的降低,而抽穗期以后又逐渐升高。就不同土壤而言,在同一时期,中性水田土壤上栽培的水稻植株中硅的含量均高于酸性水田土壤上种植的水稻。

与不施硅肥的对照处理相比,从分蘖期开始,施用

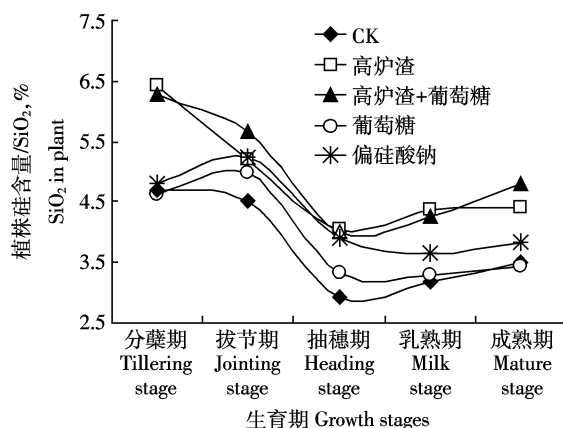


图 1 酸性水田土壤水稻植株中硅含量的动态变化

Figure 1 Dynamic change of SiO_2 in plants in acid paddy field soil

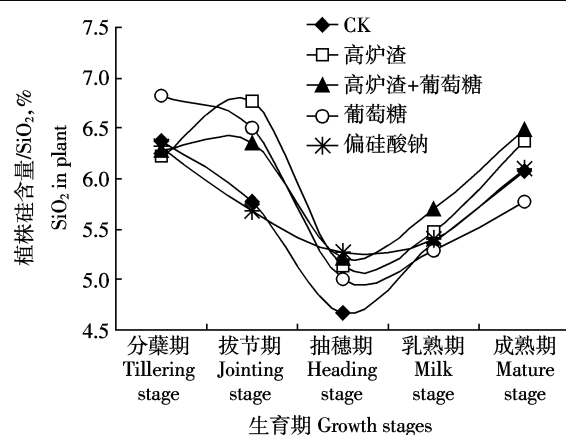


图 2 中性水田土壤水稻植株中硅含量的动态变化

Figure 2 Dynamic change of SiO_2 in plants in neutral paddy field soil

硅肥可以明显提高相同时期水稻植株体内硅的含量。这种作用在酸性水田土壤上以高炉渣与葡萄糖配合施用和单施高炉渣两个处理效果最好,施用偏硅酸钠的效果次之;在中性水田土壤上,高炉渣与葡萄糖配合施用和单施高炉渣的效果也较为突出,但施用偏硅酸钠的效果不明显。就施用葡萄糖的处理而言,在两种水田土壤中,施用葡萄糖可以在一定程度上提高抽穗期以前水稻植株中的硅含量,但在抽穗期以后这种影响不大。

2.2 成熟期水稻植株中硅含量的统计分析

对收获后水稻植株中硅含量的测定结果进行进一步的统计分析,结果列于表 1。

在酸性水田土壤上,处理间水稻植株硅含量存在极显著差异 ($F_{\text{植株硅-酸}}=30.89^{**}$, $F_{0.01}=5.99$, $n_1=4$, $n_2=10$),施用高炉渣、高炉渣与葡萄糖配施两个处理水稻植株硅含量均极显著高于对照处理,与施用葡萄糖、偏硅酸钠的处理也存在着显著或极显著差异,尤以高炉渣与葡萄糖配合施用处理水稻含硅量的增加最为显著,但施用偏硅酸钠未能显著提高植株对硅素养分的吸收。在中性水田土壤上,施用高炉渣及高炉渣与葡萄糖配合施用两个处理也在一定程度上提高了植株硅含量,施用偏硅酸钠处理植株硅含量略有增加,但处理间水稻植株含硅量存在的差异未达到 5% 的显著水平 ($F_{\text{植株硅-中}}=2.95$, $F_{0.05}=3.48$, $n_1=4$, $n_2=10$)。在两种土壤上施用葡萄糖均使植株硅含量有所下降,但与各自对照处理间的差异均未达到 5% 显著水平。

2.3 施用硅肥对水稻产量的影响

表 2 是收获后各处理水稻稻谷产量的测定结果。可以看出,施用硅肥对于栽培在不同土壤上的水稻产量的影响不同。在酸性土壤上,高炉渣和葡萄糖配施

表 1 成熟期水稻植株的硅含量(SiO_2 ,%)
Table 1 Content of silicon in rice plant in mature stage(SiO_2 ,%)

处理 Treatment	酸性水田土壤 Acid paddy field soil		中性水田土壤 Neutral paddy field soil	
	硅含量 Silicon content/%	增加率 Increasing rate/%	硅含量 Silicon content/%	增加率 Increasing rate/%
对照 CK control	3.52±0.11bC	—	6.07±0.21a	—
高炉渣 Blast furnace slag	4.40±0.10aAB	24.98	6.38±0.11a	5.11
高炉渣+葡萄糖 Blast furnace slag+Glucose	4.79±0.12aA	35.95	6.48±0.09a	6.87
葡萄糖 Glucose	3.42±0.09bC	-2.93	5.77±0.26a	-4.89
偏硅酸钠 Sodium metasilicate	3.84±0.10bBC	9.08	6.10±0.05a	0.55

注:标有不同小写字母表示差异达到 5%显著水平;标有不同大写字母表示差异达到 1%显著水平。下同。

Note: Values with the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test (lowercase represents the 5% significant level and uppercase represents the 1% significant level). The same below.

表 2 施用硅肥对水稻产量的影响
Table 2 Effects of Si-fertilizer application on rice yield

处理 Treatment	酸性水田土壤 Acid paddy field soil		中性水田土壤 Neutral paddy field soil	
	产量 Yield/g·pot ⁻¹	增产率 Increase rate/%	产量 Yield/g·pot ⁻¹	增产率 Increase rate/%
对照 CK control	150.17±2.53bC	—	172.51±4.06a	—
高炉渣 Blast furnace slag	170.25±3.34aAB	13.37	174.36±4.15a	1.07
高炉渣+葡萄糖 Blast furnace slag+Glucose	175.69±3.01aA	16.99	175.83±5.09a	1.93
葡萄糖 Glucose	154.81±3.28bBC	3.09	171.42±3.93a	-0.63
偏硅酸钠 Sodium metasilicate	170.38±3.52aAB	13.46	169.56±3.87a	-1.71

处理的增产效果最为明显,高达 16.99%,其次为偏硅酸钠和高炉渣处理,分别增产 13.46%和 13.37%;而在中性水田土壤上,高炉渣和葡萄糖配合施用以及单独施用高炉渣处理的产量略有增加,增产率分别仅为 1.93%和 1.07%,葡萄糖和偏硅酸钠处理的产量均略有减少。可以说,酸性水田土壤上施用硅肥的增产效果明显好于中性水田土壤。对各处理的产量结果进行方差分析和多重比较,结果一并列入表 2。

方差分析结果表明,在酸性水田土壤上,各处理稻谷产量间的差异均达到了 1%显著水平($F_{\text{产量-酸}}=254.20^{**}$, $F_{0.01}=5.99$, $n_1=4$, $n_2=10$),即施用硅肥获得了极显著的增产效果,且施硅处理的水稻产量与对照处理间的差异也达到了 1%的显著水平,但施硅处理间的差异不显著。施用葡萄糖处理虽也有一定的增产效果,但与对照处理间的差异不显著,且显著低于施硅处理。在中性水田土壤上,处理间稻谷产量差异不显著($F_{\text{产量-中}}=2.82$, $F_{0.05}=3.48$, $n_1=4$, $n_2=10$),即硅肥的增产效果不明显。

进一步将水稻产量与成熟期植株硅含量进行相关分析,结果如图 3 所示。在酸性土壤上,成熟期水稻植株硅含量与稻谷产量间存在显著的对数正相关关系($r_{\text{酸}}=0.883^{*}$, $r_{0.05}=0.878$, $n=5$);而在中性水田土壤

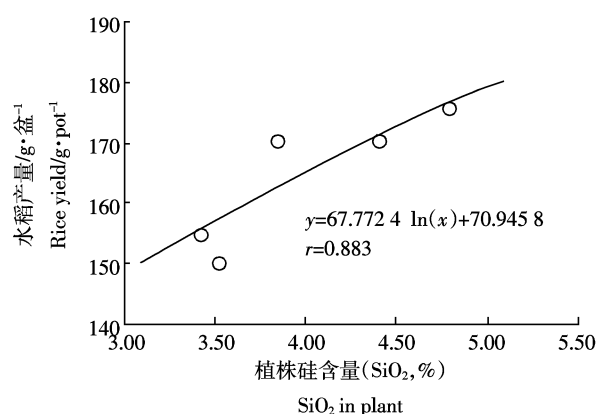


图 3 酸性水田土壤上水稻产量与植株中硅含量的关系

Figure 3 The relationship between rice yield and SiO_2 in rice plants in acid paddy field soil

上,二者间不存在显著相关关系($\text{Yield} = 6.572 4 \text{ SiO}_2 + 132.255 0$, $r_{\text{中}}=0.753$, $r_{0.05}=0.878$, $n=5$)。

3 讨论

由试验数据分析可知,水稻植株体内的含硅量在不同生育期的变化较为明显,不同土壤和不同施肥处理间的变化规律相似,且与前人观察到的现象一致^[3],这可能与水稻在不同生育期对硅吸收利用的生理特

点有关。而且从两种土壤上不同的施肥处理来看,水稻植株体内硅的含量与土壤中硅的供给有直接的关系,基本上与前文^[1]所述不同处理对于水稻生育期土壤溶液中硅浓度变化的影响是一致的。对同一水稻生育期采集的水稻样本进行比较,就同一施肥处理而言,以中性水田土壤上栽培的水稻植株含硅量较高,酸性水田土壤上栽培的水稻植株含硅量较低,说明中性水田土壤的供硅能力可能更强。值得注意的是,由于硅在植物体内的移动性差^[4],成熟水稻植株体内的硅多是在营养生长期以后开始吸收和积累的^[9]。因此,从保证水稻的硅素营养供应乃至提高产量的角度来看,改善水稻生殖生长期土壤供硅能力可能具有更为重要的意义。

施用高炉渣、尤其是高炉渣与葡萄糖配合施用处理明显提高了酸性水田土壤上栽培的水稻植株中硅的含量,而施用偏硅酸钠、葡萄糖处理的效果不显著,这可能与各处理对土壤供硅能力影响的不同有十分密切的关系。也正是因为施用硅肥可能改善了水稻的硅素营养和生长条件,从而提高了水稻的产量,这一点从对植株含硅量与稻谷产量之间的相关分析结果中得到了证实。在酸性水田土壤上栽培的水稻,稻谷产量与水稻植株中硅含量之间存在着显著的正相关关系。说明酸性水田土壤中硅素养分的缺乏已经成为限制水稻增产的主要因素,施用硅肥是提高水稻产量的主要原因。而对于中性水田土壤来说,土壤供硅能力可能很强,施用硅肥虽然可能进一步增加土壤硅素养分的供应,但此时硅素养分并不是水稻生长与产量的限制因子,所以水稻植株中的硅含量及稻谷产量均未显著增加,且二者之间也无明显的相关关系。

从酸性水田土壤上的所有处理来看,以高炉渣和葡萄糖配合施用处理增产效果最好,其次为单施高炉渣或偏硅酸钠处理。这说明在本试验中,就硅肥类型而言,高炉渣提高土壤供硅能力和改善水稻生长条件的效果与偏硅酸钠可能并无本质的差别。从高炉渣的施用方式来看,高炉渣与葡萄糖配合施用较单施高炉渣的效果更好一些,这是由于葡萄糖在淹水条件下分解促进了高炉渣中硅的溶解和释放,从而提高了高炉渣的肥效,进一步改善了土壤的供硅能力(参见前文^[1]图6和图7)。而单独施用葡萄糖虽然能够在水稻生

育前期促进土壤中硅的释放,但同时也加剧了土壤的还原程度,这可能会在一定程度上影响水稻对其他某些养分的吸收利用(前文图6和图7)。另外,在水稻生殖生长期,施用葡萄糖处理的供硅水平仅比对照略高而低于施用硅肥各个处理,而此时却是水稻需硅的高峰期。所以仅施用葡萄糖对于改善作物硅素营养的效果不大。由于以上的原因,单施葡萄糖处理的增产效果低于所有施硅的处理。因此,仅仅通过改变土壤还原条件来促进土壤硅素释放并不能从根本上解决土壤硅素匮乏的问题,只有采取施用硅肥和调节土壤条件相结合(如硅肥和有机肥配合施用)的措施,才能更有效地改善土壤供硅能力,提高作物产量。

4 结论

综上所述,高炉渣与葡萄糖配合施用能更有效地改善土壤的供硅能力,增加水稻植株含硅量,进而提高水稻产量,其在酸性水田土壤上的施用效果尤为显著。

参考文献:

- [1] 杨丹,刘鸣达,姜峰,等.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[J].农业环境科学学报, 2012, 31(4):757-763.
YANG D, LIU M D, JIANG F, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils I. Effect on dynamic change of pH, Eh and silicon of soil solution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):757-763.
- [2] 劳家桢.土壤农化分析手册[M].北京:农业出版社, 1988.
LAO J C. Soil agrochemical analysis manual [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1988.
- [3] 陈永勤.水稻吸收和积累硅的特点[J].贵州农业科学, 1990(6):37-40.
CHEN Y Q. Characteristics of silicon uptaking and accumulation in rice [J]. *Guizhou Agric Sci*, 1990(6):37-40.
- [4] 高井康雄 著,金安世 译.施肥原理与技术[M].北京:农业出版社, 1982.
Takai Y, Jin A S (translator). Fertilization theory and technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982.
- [5] 長谷部亮,飯村康二.水耕培地のケイ酸供給濃度と水稻の生育[J].日本土壤肥料學雜誌, 1986, 57(1):42-48.
Hasebe A, Iimura K. Effect of silicic acid concentration in paddy soil on growth and development of rice[J]. *Jpn J Soil Sci Plangt Nutr*, 1986, 57(1):42-48.