

水淬渣与钢渣硅肥对玉米硅、磷养分吸收及产量的影响^①

马新, 陈家杰, 刘涛, 唐诚, 褚贵新*

(新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子大学农学院农业资源环境科学系, 新疆石河子 832000)

摘要: 硅作为有益元素对促进作物生长发育及增强抗逆性等方面有显著效果。本研究在 2013—2014 年进行了 2 年田间小区试验, 对比研究了水淬渣硅肥和钢渣硅肥对玉米生长发育及产量的影响, 分析了施硅对玉米硅、磷营养吸收及硅肥利用率的效应。结果表明: 施硅可显著提高土壤有效硅含量($P < 0.05$), 如在抽雄、乳熟及成熟期水淬渣硅肥处理的土壤有效硅含量分别比不施硅肥处理(CK)处理提高 36.9%、15.3% 和 9.7%; 施硅处理均显著提高了玉米叶面积指数、干物质量和产量($P < 0.05$), 水淬渣和钢渣硅肥处理的玉米产量为 17 979 kg/hm² 和 17 134 kg/hm², 分别比 CK 处理提高 18.9% 和 13.3%。2 年结果均显示硅肥处理显著提高了成熟期玉米植株的吸硅量与吸磷量($P < 0.05$), 水淬渣与钢渣硅肥处理的年均吸硅量分别比 CK 处理增加 14.6% 和 10.4%, 其年均吸磷量分别比 CK 处理增加 11.5% 和 8.7%。玉米吸硅量与吸磷量呈极显著正相关($P < 0.01$), 硅肥处理可显著改善玉米生育期内磷素营养, 提高磷肥偏生产力; 水淬渣硅肥和钢渣硅肥年均硅肥利用率分别达 38.9% 和 27.8%, 且水淬渣硅肥利用率明显高于钢渣硅肥。

关键词: 钢渣; 水淬渣; 硅肥; 玉米; 硅素营养; 磷素营养

中图分类号: S147.5

虽然硅(Si)不是植物必需营养元素, 但越来越多的研究证实硅在提高作物产量^[1]、增强作物对生物与非生物胁迫的系统抗性^[2-3]、降低植物对重金属元素吸收积累^[4]等方面发挥显著作用。硅在地壳中是继氧之后含量第二的元素, 土壤全硅含量约为 310 g/kg, 但主要以不溶性 SiO₂ 以及极难溶性的各种硅酸盐矿物形态存在, 可被植物利用的有效硅仅占全硅的 0.02%~0.04%^[5]。自 Sommer 首次提出硅是水稻生长必需的元素后, 许多学者对硅肥肥效展开研究, 施硅在水稻^[6]、玉米^[7]、花生^[8]等作物上均表现出较好增产效应。研究表明, 硅肥肥效与土壤 pH、黏粒含量、Eh、有机质含量等影响土壤硅有效性的因素紧密相关^[9]。同时, 硅与其他营养元素的交互作用也是影响其肥效的重要因素, 如由于硅和磷在化学性质和结构上具有相似性, 因而许多学者对磷、硅交互作用进行了研究^[10-11]。研究表明施用硅酸钙等外源硅增加了土壤溶液中的磷浓度, 提高了有效磷的含量^[12]。SiO₃²⁻ 与 H₂PO₄⁻ 竞争黏土矿物表面的吸附位点, 增加土壤有效磷含量, 改善植物的磷素营养^[13]。施硅增加了土壤溶液中磷的含量, 显著增加了水稻穗及籽粒的磷累积量^[14]。但也有学者认为,

对硅累积量低的作物, 施硅可促进其对磷的吸收, 但对硅累积量高的作物, 施硅则会抑制作物对磷的吸收^[13]。

钢渣和水淬渣是工业炼钢产生的废弃物且每年排放数量大, 因其含硅量高(钢渣、水淬渣有效硅含量分别为 80~200 g/kg^[9]、300~350 g/kg^[15])因此通过一定工艺处理钢渣和水淬渣是高效利用废弃物研制开发硅肥的途径。日本于 20 世纪 50 年代开始利用钢渣等工业废渣作为硅肥大面积应用到水稻、玉米等作物上, 并取得明显成效。美国、德国、东南亚地区等国家已将施用硅肥作为提高作物产量的重要措施^[1]。我国于 20 世纪 80 年代开始利用钢铁厂高炉渣、粉煤灰等作为硅肥施用^[9], 结果表明钢渣对玉米增产效果明显, 施加钢渣玉米产量可平均增加 30.0%^[16]; 施入钢渣和水淬渣两种不同的渣硅肥, 均可显著促进水稻的生长、病害的防御和产量的形成^[9]; 钢渣可显著改善土壤肥力, 对土壤酸度的改良也具有良好的效果^[17]。玉米是重要的粮、饲作物, 也是一种喜硅作物。本文对比研究了钢渣硅肥和水淬渣硅肥对新疆石灰性土壤有效硅含量、玉米硅素营养及产量的影响, 并分析了施用硅肥对玉米硅、磷营养关系及

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB03B02)资助。

* 通讯作者(chuguixinshzu@163.com)

作者简介: 马新(1989—), 男, 新疆博乐人, 硕士研究生, 主要从事植物营养生理生态与新型肥料研究。E-mail: mx501393782@126.com

其利用效率的影响,旨在研究硅肥在石灰性土壤的肥效,为硅肥合理施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013—2014 年在沙湾县乌兰乌苏气象站进行(44°17'N, 85°51'E)。供试土壤为灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土, Calcaric Fluvisols), 耕层(0~20 cm)土壤 pH 8.52, 有机质 16.7 g/kg, 全氮 1.13 g/kg, 速效磷 23.87 mg/kg, 速效钾 246.8 mg/kg, 有效硅(SiO₂)261.3 mg/kg。供试硅肥分别为山西曲沃县瑞丰硅肥厂生产的钢渣硅肥(含 SiO₂ 200 g/kg)和河北秦皇岛领先科技生产的水淬渣硅肥(含 SiO₂ 251.7 g/kg), 两种硅肥均作追肥于苗期开沟条施。由于玉米采用 1 膜 2 行的栽培模式, 在每 1 行的外侧各开 1 条深度为

0.15 m 的沟施入硅肥, SiO₂ 施用量为 180 kg/hm²。供试氮肥为尿素(含 N 460 g/kg), 磷肥为磷酸一铵(含 P₂O₅ 610 g/kg), 钾肥为硫酸钾(含 K₂O 510 g/kg), N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 330、90、90 kg/hm²。试验共设 3 个处理: 对照, 即反施用氮磷钾肥; 钢渣硅肥+氮磷钾肥; 水淬渣硅肥+氮磷钾肥。氮磷钾肥施用方式均为水肥一体化随水滴施。供试玉米品种为春玉米“良玉 66 号”(Zea mays L. cv Liangyu 66)。每年 4 月 27—28 日播种, 0.4 m + 0.8 m 宽窄行覆膜种植, 膜宽 0.7 m, 膜间距 0.6 m, 株距 0.145 m, 1 膜 2 行, 种植密度为 105 000 株/hm²。试验采用随机区组设计, 重复 4 次, 小区面积为 24 m² (2.4 m × 10.0 m)。6 月 16 日开始滴水灌溉, 灌水定额为 6 750 m³/hm², 整个生育期滴灌 10 次, 施肥 8 次, 其他管理措施同一般大田。具体水肥分配情况见表 1。

表 1 玉米不同生育时期水肥分配状况
Table 1 Distribution proportion of water and fertilizer during maize growth period

日期	生育期	出苗后天数(d)	滴水量(mm)	N(kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	K ₂ O(kg/hm ²)
6/14	出苗期	50	877.5	49.5	9.0	18.0
6/24	拔节期	60	877.5	33.0	13.5	18.0
7/2	小喇叭口期	68	877.5	19.5	13.5	18.0
7/9	大喇叭口期	75	810.0	49.5	13.5	18.0
7/16	抽雄期	82	810.0	19.5	10.8	4.5
7/24	抽丝期	90	675.0	39.6	11.7	4.5
8/3	籽粒形成期	100	675.0	33.0	9.0	4.5
8/13	乳熟期	110	540.0	26.4	9.0	4.5
8/31	蜡熟期	128	405.0	0	0	0
9/17	成熟期	145	202.5	0	0	0

1.2 测定项目及方法

在玉米抽雄期(播种后第 80 天)、乳熟期(播种后第 110 天)和成熟期(播种后 140 天)测定叶面积指数。叶面积指数利用冠层仪(LAI-2000)测定。按茎、叶、果穗不同部位采集植株样本, 105℃ 杀青 30 min 后, 75℃ 烘干至恒重, 测定干物质量。样品烘干称重后经粉碎测定各器官含硅量和含磷量。植株含磷量利用钼锑抗比色法测定, 含硅量采用镍坩埚碱熔融-硅钼蓝比色法测定。收获前进行田间调查测定产量, 收获后室内考种。同时, 分别在以上 3 个时期采集各处理 0~20 cm 土层土壤样本, 每个处理小区地膜内取 5 钻, 每钻相距 0.2 m, 地膜外 5 钻, 每钻相距 0.2 m, 然后把 10 钻土壤样品混合均匀后采用四分法取 1.0 kg 的样品作为该处理的分析样品, 在阴凉处风干, 磨碎, 以测定土壤有效硅含量。土壤有效硅采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测定。

硅肥利用率(apparent efficiency of Si fertilizer)=(硅肥处理作物地上部吸硅总量 - 对照处理作物地上部吸硅总量) / 硅肥投入量^[18]; 磷肥偏生产力 (partial factor productivity of applied P) = 施肥处理作物产量 / 磷肥投入量。

1.3 数据处理

利用 Excel 2007 进行数据整理, SPSS 17.0 统计软件进行统计分析和不同处理间显著性检验。利用 Graphpad prism 5.0 软件(Graphpad software, Inc., USA)进行绘图。

2 结果与分析

2.1 硅肥处理对土壤有效硅含量的影响

土壤有效硅是指能被当季作物吸收利用的硅。从图 1 可以看出, 各处理土壤有效硅含量均随玉米生育期而降低, 如两个施硅处理的有效硅均值由抽雄期的

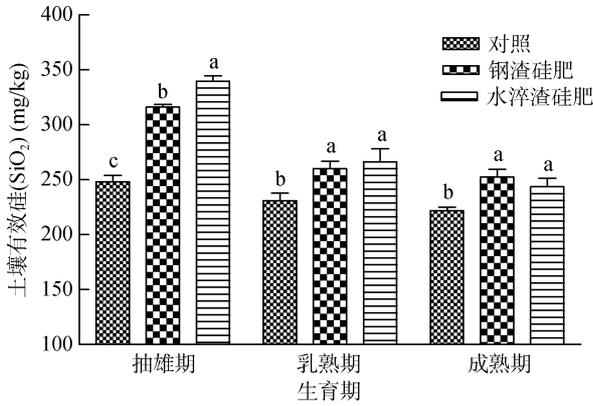


图 1 不同硅肥处理土壤有效硅动态变化

Fig. 1 Changes of soil available Si contents under different silicon fertilizers

327.9 mg/kg 降低至成熟期的 247.9 mg/kg。与对照处理相比，施硅可显著提高土壤有效硅含量($P < 0.05$)，如在抽雄、乳熟及成熟期水淬渣硅肥处理的土壤有效硅含量分别比对照处理提高了 36.9%、15.3% 和 9.7%，钢渣硅肥处理的有效硅含量在 3 个时期也显著

高于对照处理，但两种硅肥处理之间差异不显著(抽雄期除外)。

2.2 硅肥处理对玉米干物质质量和叶面积指数的影响

从表 2 看出，玉米干物质积累量随生育期而增加。硅肥处理显著增加了抽雄、乳熟及成熟期玉米的干物质质量($P < 0.05$)。抽雄期水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的干物质质量较对照处理分别增加了 25.6% 和 11.9%，水淬渣硅肥比钢渣硅肥处理的干物质质量提高了 12.3%，处理间差异显著($P < 0.05$)。在乳熟和成熟期水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理较对照处理分别增加了 12.1%、5.6% 和 19.4%、14.9%，但 2 种硅肥处理之间差异不显著。玉米叶面积指数随玉米生育期而下降。硅肥处理显著增加了抽雄、乳熟及成熟期玉米的叶面积指数($P < 0.05$)，如与对照处理相比，抽雄期水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理叶面积指数增加幅度分别为 27.6% 和 21.5%，成熟期，叶面积指数增加幅度分别为 62.4% 和 49.8%，但硅肥处理之间差异不显著。

表 2 不同硅肥处理对玉米干物质质量和叶面积指数的影响

Table 2 Dry matter accumulations and leaf area indexes of maize under different Si fertilizers during corn different growth stage

处理	干物质积累 (kg/hm ²)			叶面积指数		
	抽雄期	乳熟期	成熟期	抽雄期	乳熟期	成熟期
对照	11 561 c	19 146 b	30 915 b	3.363 3 b	2.223 3 b	0.710 0 b
钢渣硅肥	12 934 b	20 227 a	35 528 a	4.086 7 a	2.693 3 a	1.063 3 a
水淬渣硅肥	14 523 a	21 462 a	36 921 a	4.290 0 a	2.946 7 a	1.153 3 a

注：数据为 2013 年和 2014 年取样平均值；同列数据后不同字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著，下同。

2.3 硅肥处理对玉米硅素、磷素吸收的影响

由表 3 可知，玉米吸硅量随生育期而增加(2013 和 2014 年)。硅肥处理间玉米吸硅量在各时期没有显著性差异，但都显著高于对照处理(2013 和 2014 年) ($P < 0.05$)。如水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米吸硅量在抽雄期较对照处理分别增加了 60.7% 和 49.0%，成熟期分别增加了 15.5% 和 10.0% (2013 年)。2014 年呈现出同样规律。玉米吸磷量随生育期而增加

(2013 和 2014 年)。硅肥处理显著增加了成熟期玉米吸磷量($P < 0.05$)，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米吸磷量分别比对照处理增加 11.2% 和 7.7%，但 2 种硅肥处理之间差异不显著(2013 年)。抽雄期和成熟期硅肥处理均显著增加玉米吸磷量($P < 0.05$)，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米吸磷量在抽雄期分别比对照处理增加 43.0% 和 24.1%，在成熟期分别增加 11.7% 和 9.6% (2014 年)。

表 3 不同硅肥处理对玉米抽雄期和成熟期植株吸硅量、吸磷量的影响(kg/hm²)

Table 3 Absorbed amounts of Si and P by maize under different Si fertilizers at teaseling and maturing stages

处理	2013 年				2014 年			
	抽雄期		成熟期		抽雄期		成熟期	
	吸硅量	吸磷量	吸硅量	吸磷量	吸硅量	吸磷量	吸硅量	吸磷量
对照	189.94 b	38.04 a	455.28 b	75.74 b	224.60 b	32.68 b	510.75 b	95.48 b
钢渣硅肥	283.08 a	38.25 a	500.71 a	81.56 a	331.94 a	40.54 a	565.21 a	104.69 a
水淬渣硅肥	305.21 a	42.44 a	526.02 a	84.26 a	362.62 a	46.72 a	580.19 a	106.61 a

由表 4 可知，玉米含硅量随生育期而增加(2013 和 2014 年)。硅肥处理间玉米含硅量在各时期没有显

著性差异，但都显著高于对照处理(2013 和 2014 年) ($P < 0.05$)。如水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米含硅

表 4 不同硅肥处理对玉米抽雄期和成熟期植株含磷量、含硅量的影响(g/kg)
Table 4 Si and P contents in maize under different Si fertilizers at teaseling and maturing stages

处理	2013 年				2014 年			
	抽雄期		成熟期		抽雄期		成熟期	
	含硅量	含磷量	含硅量	含磷量	含硅量	含磷量	含硅量	含磷量
对照	14.56 b	2.07 b	15.45 b	2.64 b	15.34 b	2.91 b	24.38 b	3.76 b
钢渣硅肥	16.23 a	2.56 a	19.13 a	3.15 a	16.96 a	3.29 a	26.11 a	3.96 a
水淬渣硅肥	16.67 a	2.78 a	19.77 a	3.37 a	17.25 a	3.31 a	27.61 a	4.03 a

量在抽雄期较对照处理分别增加了 14.5% 和 11.5%，成熟期分别增加了 28.0% 和 23.8% (2013 年)。2014 年呈现出同样规律。玉米含磷量随生育期而增加(2013 和 2014 年)。硅肥处理显著增加了成熟期玉米含磷量 ($P<0.05$)，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米含磷量分别比对照处理增加 27.7% 和 19.3%，但 2 种硅肥处理之间差异不显著(2013 年)。抽雄期和成熟期硅肥处理均显著增加玉米含磷量($P<0.05$)，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理的玉米含磷量在抽雄期分别比对照处理增加 13.7% 和 13.1%，在成熟期分别增加 7.2% 和 5.3% (2014 年)。

2.4 硅肥处理对玉米产量及产量构成的影响

由表 5 可知，硅肥处理与对照处理相比增产明显 ($P<0.05$)，施用水淬渣硅肥和钢渣硅肥玉米产量分别为 17 979 和 17 134 kg/hm²，较对照处理分别增产 18.9% 和 13.3%，但 2 种硅肥处理之间差异不显著。从产量构成因素上看，硅肥处理显著增加单穗重和百粒重($P<0.05$)，如与对照处理相比，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理玉米单穗重分别增加 15.9% 和 11.8%，百粒重分别增加 7.7% 和 5.9%。施用硅肥可增加穗长、穗粒数(且水淬渣硅肥优于钢渣硅肥)，降低秃尖长，但处理间没有显著差异。

表 5 不同硅肥处理玉米产量及相关性状变化
Table 5 Changes of maize yield and yield traits under different Si fertilizers

处理	产量(kg/hm ²)	穗长(cm)	穗粗(cm)	秃尖(cm)	穗粒数(个)	单穗重(g)	百粒重(g)
对照	15 120 b	17.6 a	4.95 a	2.08 a	523.1a	226.1 b	39.2 b
钢渣硅肥	17 134 a	18.2 a	4.92 a	1.92 a	523.2 a	252.8 a	41.5 a
水淬渣硅肥	17 979 a	18.3 a	5.05 a	2.03 a	551.6 a	262.0 a	42.2 a

注：数据为 2013 年和 2014 年取样平均值。

2.5 玉米硅、磷营养相互间关系及对硅、磷养分利用效率的影响

由图 2A 可知玉米吸硅量和吸磷量呈极显著正相关($r^2=0.462 9$, $P<0.01$)。玉米吸硅量与干物质积累量呈极显著正相关($r^2=0.692 2$, $P<0.01$, 图 2B)。硅肥利用率和磷肥偏生产力均是表征肥料利用效率的参数。由图 2C 可知，水淬渣硅肥处理的硅肥利用率在 2013 年和 2014 年分别高达 39.3% 和 38.6%，较钢渣硅肥处理显著提高 55.7% ($P<0.01^{**}$)和 27.5% ($P<0.05^*$)。由图 2D 可知，硅肥处理显著提高磷肥偏生产力(2013 年和 2014 年) ($P<0.05$)，水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理磷肥偏生产力 2013 年分别为 179.4 和 173.0 kg/kg，较对照处理增加 15.9% 和 11.8%；2014 年分别为 220.1 和 207.8 kg/kg，较对照处理增加 21.4% 和 14.6%；但硅肥处理间差异不显著(2013 和 2014 年)。

3 讨论

本研究结果表明：施用硅肥能够显著提高玉米产

量($P<0.05$)，其中，施用水淬渣硅肥和钢渣硅肥玉米产量较对照处理分别增产了 18.9% 和 13.3%。对产量构成因素的分析表明，两种硅肥均显著增加玉米百粒重($P<0.05$)，这和前人的研究结论一致^[1,19]。在 2013 年水淬渣硅肥比钢渣硅肥的利用率提高了 55.7%，2014 年提高了 27.5% 水淬渣硅肥利用率高且增产效果优于钢渣硅肥。其原因可能是前者为粉状，由于粉状比表面积大，施入土壤后充分与土壤中的水分接触，生成水溶物后易于被植物所吸收，可充分利用肥料中的有效硅成分，而钢渣硅肥生产工艺为粒状，且颗粒大小不均，施入土壤需要经过一段时间才能释放一定量的硅元素供植物吸收利用，且释放速率受颗粒大小影响。有研究表明，硅肥中硅的植物有效性随着粒径的缩小而呈增加的趋势^[20]。

本研究中，玉米施用硅肥后显著增产的原因，一方面可能是本试验区石灰性土壤有效硅含量虽然比较高(261.3 mg/kg)，但同时碳酸钙含量也很高，而大部分有效硅与非活性钙硅结合物存在，难以水解，不

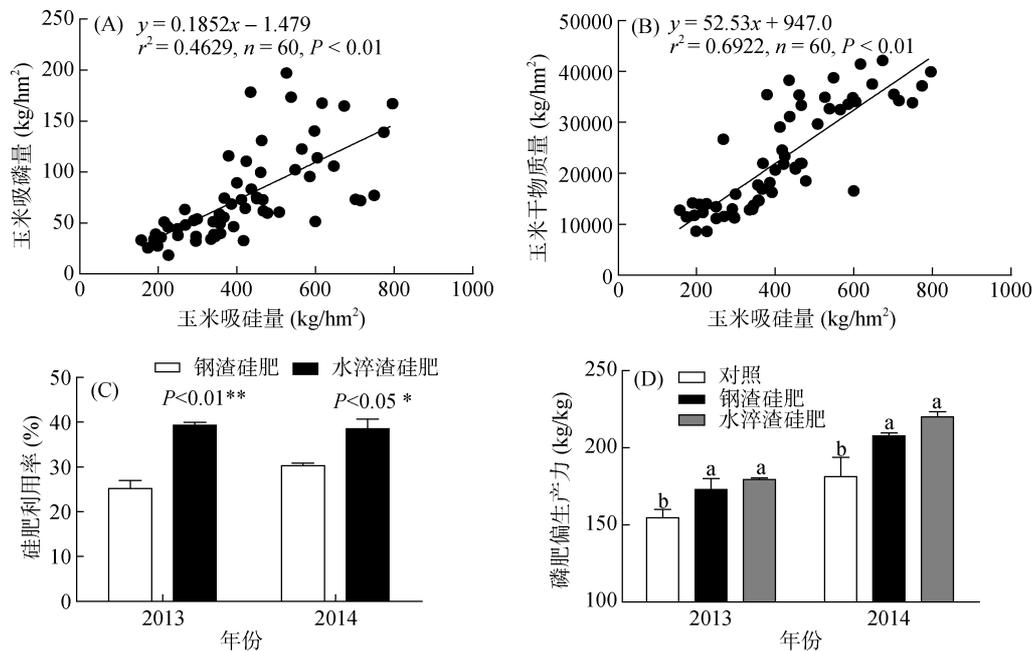


图 2 玉米硅、磷营养相互关系及对硅、磷养分利用效率的影响

Fig. 2 Relationship between maize Si and P nutrients and its effects on maize utilization efficiencies of Si and P nutrients

易被作物吸收利用,而施用硅肥后明显提高了土壤有效硅浓度。玉米属于喜硅作物,其吸收利用硅为主动吸收^[21]。刘鸣达等^[22]在碱性土壤(pH 8.8)中研究表明,有效硅含量超 250 mg/kg 的土壤施用硅肥,增产效果仍然明显,这与本研究结果相似。另一方面可能是硅肥的施入促进了作物对土壤磷素的活化^[23]。由本试验结果可知,硅肥处理较对照处理显著提高了磷肥偏生产力($P < 0.05$)。硅肥处理可显著提高玉米植株的吸磷量,并且玉米植株吸磷量和吸硅量存在极显著正相关关系($P < 0.01$),这与任军等^[24]研究结论一致。也有学者认为施用硅肥可增加叶面积指数,进而提高光合能力增加干物质量,这是硅促进作物产量提高的另一因素,如周青等^[25]研究认为硅肥提高产量的一个主要生理原因是施硅可延长叶片的功能期,促进叶片的生长进而增加干物质量。本研究也发现施入硅肥显著提高玉米生育期内叶面积指数($P < 0.05$),尤其在成熟期,水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理较对照处理可增加 62.4% 和 49.8%,而干物质分析发现,施入硅肥可显著提高玉米群体干物质量($P < 0.05$),这与叶面积指数总体变化动态相一致。

节水滴灌作为一种现代农业技术使新疆农业栽培方式发生了巨大变化。近年来,新疆膜下滴灌面积发展迅速,大部分玉米均采用节水滴灌施肥,主要包括常规的氮、磷、钾肥,而硅肥的施入主要以基施和追施为主。水肥一体化灌溉模式在提高水分利用效率的同时,可提高硅肥中有效硅的释放^[15],进而满足

玉米对硅的需求,水肥互作效应可得到充分发挥。本研究在氮、磷、钾肥施用量相同的情况下,水淬渣硅肥和钢渣硅肥处理均显著提高了玉米产量,由此说明产量的提高与硅素的吸收有密切的关系,滴灌条件下根据玉米对硅的需求适量补硅,可实现硅素养分资源高效利用和产量的协同提高。

4 结论

1) 水淬渣硅肥和钢渣硅肥均可显著提高石灰性土壤有效硅含量,玉米叶面积指数、干物质量,玉米分别增产 18.9% 和 13.3% ($P < 0.05$),水淬渣硅肥效果大于钢渣硅肥。

2) 施硅可显著促进玉米对硅、磷的吸收,水淬渣硅肥和钢渣硅肥 2 年的硅肥平均利用率分别达 38.9% 和 27.8%。

参考文献:

- [1] 王丽培. 硅肥用量及硅氮配施对夏玉米生长及抗逆性的影响[D]. 河南: 河南农业大学, 2010
- [2] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 531-536
- [3] 管恩太, 蔡德龙, 邱士可, 等. 硅营养[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(5): 64-66
- [4] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 116-121
- [5] 刘文国, 王林权, 白延红. 植物体有益元素硅的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2248-2253

- [6] 商全玉, 张文忠, 韩亚东, 等. 硅肥对北方粳稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6): 661–664
- [7] 宋淑玲, 李开松, 张东. 硅肥在玉米上的应用试验初探[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 216–218
- [8] 常春荣, 龚觅真, 廖基兴. 硅肥对南方花生产量和品质效应研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(11): 432–435
- [9] 宁东峰. 钢渣硅钙肥高效利用与重金属风险性评估研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014
- [10] Ma J F, Takahashi E. Effects of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice[J]. Plant and Soil, 1990, 126(1): 115–119
- [11] Haynes R J. Effect of lime, silicate, and phosphate applications on the concentrations of extractable aluminum and phosphate in a spodosol[J]. Soil Science, 1984, 138(1): 8–14
- [12] Anderson D L, Snyder G H, Warren J D. Availability of phosphorus in calcium silicate slag[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1992, 23(9/10): 907–918
- [13] 何电源. 土壤和植物中的硅[J]. 土壤学进展, 1980(5): 1–11
- [14] 李仁英, 沈孝辉, 谢晓金, 等. 施硅对土壤-水稻系统中磷迁移的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 423–428
- [15] 邵建华. 硅肥的应用研究进展[J]. 四川化工与腐蚀控制, 2000, 3(6): 44–47
- [16] 杨辉, 李华, 马晨晨, 等. 不锈钢尾渣对玉米产量及重金属含量的影响[J]. 山西农业科学, 2013, 41(8): 843–848, 869
- [17] 卢再亮, 李九玉, 徐仁扣. 钢渣与生物质炭配合施用对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤, 2013, 45(4): 722–726
- [18] 段玉, 张君, 李焕春, 等. 马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究[J]. 土壤, 2014, 46(2): 212–217
- [19] 张磊, 王玉峰, 陈雪丽, 等. 硅钙肥在玉米上的应用效果研究[J]. 黑龙江农业科学, 2011(7): 48–50
- [20] Takahashi K. Effects of slags on the growth and the silicon uptake by rice plants and the available silicates in paddy soils[J]. Bulletin Shikoku Agric Exp Sta, 1981, 38: 75–114
- [21] 李晓艳, 孙立, 吴良欢. 不同吸硅型植物各器官硅素及氮、磷、钾素分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 193–198
- [22] 刘鸣达, 张玉龙, 陈温福. 土壤供硅能力评价方法研究的历史回顾与展望[J]. 土壤, 2006, 38(1): 11–16
- [23] 胡克伟, 关连珠, 颜丽, 等. 施磷对水稻土硅素吸附与解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 214–218
- [24] 任军, 郭金瑞, 邢秀琴, 等. 硅肥对玉米的增产效果及增产机理初探[J]. 玉米科学, 2002, 10(2): 84–86
- [25] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 玉米施用硅肥的增产效果及其对群体质量的影响[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 81–83

Comparison of Water Cooling Slag and Steel Slag Amendment on Maize Growth, Si and P Nutrition as well as Yield

MA Xin, CHEN Jiajie, LIU Tao, TANG Cheng, CHU Guixin*

(Oasis Eco-agriculture Key Laboratory of Xinjiang Production and Construction Group/Department of Resources and Environmental Science, Agronomy College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: As a beneficial element, Si plays a significant role on crop growth promotion and resistance strengthen. In the present study, a two-year field experiment was carried out in 2013 and 2014. The influence of water-cooling slag and steel slag on the growth and yield of maize were studied, and the effects of Si application on maize Si and P uptake as well as Si fertilizer utilization efficiency were analyzed. It was found that both Si fertilizers of water-cooling slag and steel slag significantly increased soil available Si content ($P < 0.05$). For instance, compared to the CK, the treatment of water-cooling slag application increased soil available Si by 36.9%, 15.3% and 9.7% in tasseling, dough and mature stage, respectively. The two kinds of Si fertilizer treatments significantly improved the leaf area index and dry matter accumulation of maize ($P < 0.05$). Also, maize yields of 17 979 kg/hm² in water-cooling slag treatment and 17 134 kg/hm² in steel slag treatment were gained, 18.9% and 13.3% higher than the CK, respectively. Compared with the CK, Si fertilizer application increased Si and P uptake by maize plant significantly ($P < 0.05$), by 14.6% for Si uptake and 11.5% for P uptake in water-cooling slag treatment and by 10.4% for Si uptake and 8.7% for P uptake in steel slag treatment, respectively. A significant positive correlation was observed between maize Si uptake and P nutrition ($P < 0.01$) furthermore, Si fertilizer application increased obviously plant P nutrition and P partial productivity. Si fertilizer utilization efficiency was 38.9% in water-cooling slag treatment and 27.8% in steel slag treatment, indicating water-cooling slag fertilizer is better than steel slag.

Key words: Steel slag fertilizer; Water-cooling slag; Si fertilizer; Maize; Si nutrition; P nutrition