

高大林, 叶文玲, 马友华, 等. 施硅对水稻幼苗吸收锌、铜的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 26-32.
GAO Dalin, YE Wenling, MA Youhua, et al. Impact of silicon application on zinc and copper absorption of rice seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(3): 26-32.

施硅对水稻幼苗吸收锌、铜的影响

高大林¹, 叶文玲¹, 马友华¹, 鲁洪娟^{1,2}

(1 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036;

2 天津市农业环境与农产品安全重点实验室/农业农村部 环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:【目的】研究不同硅(Si)肥水平下水稻幼苗的生长状况及锌(Zn)、铜(Cu)的吸收和转运情况。【方法】试验以水稻‘皖稻71号’为材料,通过水培方式,设置硅肥(以SiO₂计)水平分别为0(对照,CK)、30、60、90、120和150 mg·L⁻¹共6个处理,研究不同Si肥水平处理下水稻幼苗的生物量、Zn和Cu含量及积累状况。【结果】施用Si肥后,水稻幼苗叶片数、株高和根长均高于对照,水稻地上部和根部生物量(鲜质量)分别增加5.44%~52.81%和4.83%~42.49%,叶片数、株高、根长和地上部生物量均在90 mg·L⁻¹ SiO₂处理达到最高值。施Si处理的水稻幼苗根部Zn净吸收量提高了5.79%~77.43%,Cu净吸收量提高了6.51%~44.96%。60和90 mg·L⁻¹ SiO₂处理的Zn转运系数较对照分别提高10.91%和38.18%,Cu转运系数较对照分别提高8.70%和26.09%。水稻地上部Zn、Cu含量随着Si肥水平的提高而增加,90 mg·L⁻¹ SiO₂处理达到峰值,之后随Si肥水平的增加开始出现下降的趋势。【结论】综合考虑水稻生长指标、生物量和对Zn、Cu的吸收等因素,本研究中90 mg·L⁻¹ SiO₂处理是微量元素Zn、Cu吸收的最佳施用Si肥水平。

关键词: 硅肥; 水稻幼苗; 锌; 铜; 吸收

中图分类号: S143; S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)03-0026-07

Impact of silicon application on zinc and copper absorption of rice seedlings

GAO Dalin¹, YE Wenling¹, MA Youhua¹, LU Hongjuan^{1,2}

(1 Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2 Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety/Agro-Environment Production Institution, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: 【Objective】To study the growth of rice seedlings as well as absorption and transport of zinc (Zn) and copper (Cu) under different silicon (Si) application levels. 【Method】‘Wandao 71’ was used as material through water cultivation to study the biomass, zinc and copper contents and accumulation of rice seedlings under different silicon fertilizer levels of 0 (CK), 30, 60, 90, 120, 150 mg·L⁻¹, respectively. 【Result】The leaf number, plant height and root length of rice seedlings were all higher than those of the control, and the biomass (fresh weight) of rice shoots and roots increased over the control by 5.44%~52.81% and 4.83%~42.49%

收稿日期: 2020-07-02 网络首发时间: 2021-03-16 11:32:35

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210315.1814.002.html>

作者简介: 高大林(1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 450437134@qq.com; 通信作者: 鲁洪娟(1981—), 女, 讲师, 博士, E-mail: hjlu@ahau.edu.cn

基金项目: 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室开放基金资助项目(FECPP201905); 天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金(2019-01)

respectively. The leaf number, plant height, root length and above-ground biomass were the highest in 90 mg·L⁻¹ SiO₂ treatment. Zn and Cu net absorptions of rice root increased over the control by 5.79%–77.43% and 6.51%–44.96%, respectively. The Zn transport coefficients of 60 and 90 mg·L⁻¹ SiO₂ treatments increased over the control by 10.91% and 38.18% respectively, meanwhile those of Cu increased by 8.70% and 26.09% respectively. The contents of Zn and Cu in rice shoot increased with the increase of SiO₂ concentration, reached the peak value at 90 mg·L⁻¹ SiO₂ concentration, and then began to decline with the increase of SiO₂ concentration. 【Conclusion】 Considering the factors of rice growth index, biomass, and absorption of Zn and Cu, 90 mg·L⁻¹ SiO₂ treatment is the best Si fertilizer level for microelements of Zn and Cu absorption in the present study.

Key words: silicon fertilizer; rice seedling; zinc; copper; absorption

水稻 *Oryza sativa* 是人类主要的粮食作物, 养活了世界近 50% 的人口, 其产量和品质备受关注。目前, 稻米中微量元素缺乏现象非常严重, 以至于严重影响到人类对微量元素的摄取, 并引发一系列人体微量元素缺乏病症。锌 (Zn) 和铜 (Cu) 是植物生长发育所必需的微量营养元素, 其对植物正常的生理代谢及生长发育、产量和品质的提高都有着极其重要的影响^[1-3]。Zn、Cu 元素含量过低不仅关系着农作物的生长发育, 同时也影响着其可食部分的营养价值^[4-6]。目前, 粮食作物中由于缺乏 Zn、Cu 元素尤其是 Zn 元素引起的营养失衡问题较为普遍^[7-8], 因此本文将选择 Zn、Cu 这 2 种微量元素作为研究对象。硅 (Si) 被视为水稻的第 4 元素, 施用硅肥可以提高水稻产量、改善稻米品质、增强水稻自身的抗逆性^[9-10]。水稻体内的含 Si 量占总干物质量的 11%~20%, 高产的水稻含 Si 量则更高^[11]。大量研究表明, Si 能抑制 Zn、Cu 向植株地上部的转移, 缓解过量 Zn、Cu 对植物的毒害作用^[12-14], 相关研究大多为土壤中 Zn、Cu 或者其他重金属元素过量情况下施用 Si 肥的结果^[15-16], 而在正常范围内 Si、Zn、Cu 交互作用的研究尚不多见, Si 对水稻不同器官中 Zn、Cu 吸收和分配的影响尚不可知。所谓“秧好半年禾”, 幼苗质量的优劣直接影响水稻最终的产量和质量。本试验以‘皖稻 71 号’为材料, 研究不同 Si 肥水平对水稻幼苗生长及吸收 Zn、Cu 的影响, 为稻田施 Si 打下理论基础, 具有实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为‘皖稻 71 号’。试验所用 Si 肥为九水偏硅酸钠 (Na₂SiO₃·9H₂O, 相对分子质量为 284.20, 分析纯)。

1.2 试验方法

挑选颗粒饱满、大小均匀的水稻种子, 用体积分数为 5% 的次氯酸钠溶液浸泡 30 min, 去离子水洗净后, 无菌水浸种 24 h, 均匀排在铺有 2 层滤纸的培养皿中。待长至一叶一心时, 选取长势一致的幼苗进行水培试验。每盆种植 5 株水稻苗。

营养液使用 Hoagland 营养液配方, 共设 6 个 Si 肥 (以 SiO₂ 计) 处理, SiO₂ 质量浓度分别为 0(对照, CK)、30、60、90、120 和 150 mg·L⁻¹, 每个处理重复 3 次。营养液配好 (包括加入不同质量浓度的 Si) 后, 使用稀 HNO₃ 和 NaOH 溶液调节营养液的 pH, 使 pH 维持在 5.5 左右。每周更换 1 次营养液, 并调至相应 Si 浓度水平, 保证营养液中除陪伴离子 Na⁺浓度不同外, 其他离子浓度均与原营养液相同。

培养 1 个月后, 用去离子水将水稻苗完全洗净, 将地上部和根部分开, 测定其生长指标和植株不同部位的 Zn、Cu 含量。

1.3 测定方法

1.3.1 叶片数、株高、根长、鲜质量和干质量的测定

采集新鲜水稻样品, 记录叶片数。用游标卡尺测量株高 (幼苗茎基部至幼苗顶端叶尖的长度) 和根长 (幼苗茎基部到根尖的长度)。用去离子水冲洗水稻幼苗地上部和根部, 吸水纸吸干表面的水分, 称其质量即为鲜质量。随后在 105 ℃ 条件下杀青 30 min, 75 ℃ 条件下烘干至恒质量, 称其质量即为干质量。

1.3.2 水稻幼苗 Zn、Cu 含量测定 称取过 0.5 mm 筛孔的烘干样品 0.5~1.0 g, 置于瓷坩埚中, 在电炉上加热炭化, 再移入马弗炉 500 ℃ 条件下灰化 2~3 h, 冷却, 准确加入体积比为 1:1 的硝酸溶液 5 mL 溶解灰分, 用蒸馏水定容至 50 mL 容量瓶, 干滤纸过滤, 电感耦合等离子光谱发生仪 (ICP-OES, 720ES) 测定 Zn、Cu 含量。

1.4 数据处理与分析

根据以下公式计算元素净吸收量和元素转运系数:

元素净吸收量=元素的总积累量/根部干质量;

元素转运系数=水稻地上部元素含量/根系元素含量×100%。

试验数据用 SPSS 19 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 LSD 多重比较检验, 用 Excel 2007 程序进行数据的图表处理。

2 结果与分析

2.1 不同硅肥水平下水稻幼苗生长指标变化

从表 1 可以看出, $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理的水稻幼苗平均叶片数和根长均达到最高值 ($P<0.05$), 不

同处理间水稻幼苗的株高差异不显著。水稻的叶片数、株高和根长受 Si 浓度增加的影响趋势基本一致, 均先随着 Si 浓度的增加而增加, 至 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理达到最高值, 之后随 Si 浓度的继续增加而呈现降低的趋势。

2.2 不同硅肥水平下水稻幼苗生物量

从图 1 可以看出, 水稻幼苗地上部鲜质量和根部鲜质量随 Si 肥用量的增加呈现先增加后降低的趋势, 不同 Si 浓度水平下水稻幼苗地上部生物量和根系生物量的变化没有呈现显著的一致性, 其中地上部鲜质量在 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理达到最大值, 且与 120 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理间呈现显著差异 ($P<0.05$), 而根部鲜质量在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理达到最大值。

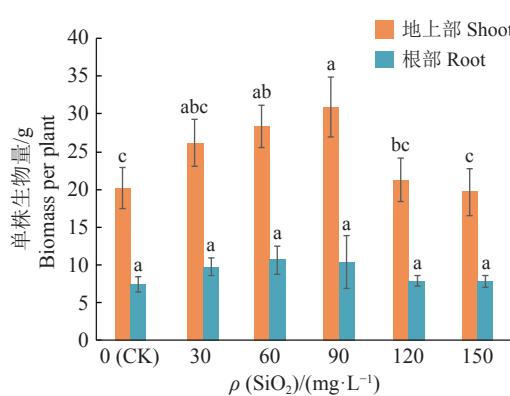
表 1 施硅处理对水稻幼苗叶片数、株高和根长的影响¹⁾

Table 1 Effects of silicon application on leaf number, plant height, and root length of rice seedlings

$\rho(\text{SiO}_2)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ Silicon fertilizer concentration	叶片数 Leaf number	株高/cm Plant height	根长/cm Root length
0 (CK)	$6.85 \pm 0.55\text{b}$	$42.08 \pm 4.85\text{a}$	$11.62 \pm 2.55\text{b}$
30	$7.10 \pm 0.69\text{b}$	$51.26 \pm 7.33\text{a}$	$12.72 \pm 2.12\text{b}$
60	$7.70 \pm 0.31\text{b}$	$52.42 \pm 7.69\text{a}$	$13.47 \pm 1.88\text{b}$
90	$9.00 \pm 0.67\text{a}$	$53.32 \pm 5.84\text{a}$	$16.13 \pm 1.54\text{a}$
120	$7.05 \pm 0.68\text{ab}$	$47.95 \pm 4.69\text{a}$	$15.45 \pm 3.32\text{ab}$
150	$6.85 \pm 0.40\text{b}$	$44.31 \pm 4.45\text{a}$	$13.74 \pm 2.93\text{b}$

1) 表中数据为平均值±标准差($n=3$), 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, LSD 多重比较检验)

1) The data in the table are average value ± standard deviation ($n=3$); Different lowercase letters in the same column indicates significant differences among different treatments ($P<0.05$, LSD multiple comparison test)



图中数据为平均值±标准差($n=3$), 相同水稻幼苗部位柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, LSD 多重比较检验)

The data in the figure are average value ± standard deviation ($n=3$); Different lowercase letters on the columns of the same rice seedling part indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, LSD multiple comparison test)

图 1 施硅处理对水稻幼苗单株生物量(鲜质量)的影响

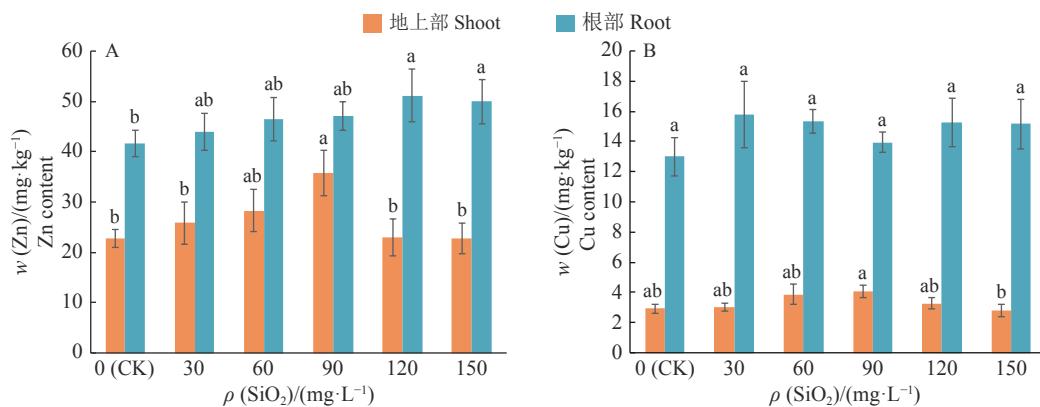
Fig. 1 Effects of silicon application on plant biomass (fresh weight) of rice seedlings

2.3 不同硅肥水平下水稻幼苗 Zn、Cu 含量

从图 2A 可以看出, 不同 Si 肥水平处理下的水稻幼苗 Zn 含量均表现为地上部低于根部, 各处理的水稻幼苗地上部 Zn 含量随 Si 肥水平的增加而先增加后降低, 根部 Zn 含量则持续增加。 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理的水稻地上部 Zn 含量显著高于 CK 和 30 、 120 、 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理, 120 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理的水稻根部 Zn 含量显著高于 CK ($P<0.05$)。

从图 2B 可以看出, 随着 Si 肥浓度的增加, 水稻幼苗地上部分 Cu 含量先增加后降低, 其中 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理的水稻地上部分 Cu 含量显著高于 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 处理 ($P<0.05$)。水稻根部 Cu 含量各处理间没有显著差异。

Zn 和 Cu 是植物的必需微量元素, 本试验中, $0\sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SiO_2 各处理水稻植株的 Zn、Cu 含



图中数据为平均值±标准差($n=3$), 各图中, 相同水稻幼苗部位柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, LSD 多重比较检验)

The data in the figure are average value ± standard deviation ($n=3$); In each figure, different lowercase letters on the columns of the same rice seedling part indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, LSD multiple comparison test)

图 2 施硅处理对水稻幼苗不同部位 Zn、Cu 含量的影响

Fig. 2 Response of Zn and Cu contents in different rice seedling parts to silicon application

量均在植物生长的正常范围内^[14]。

2.4 不同硅肥水平下水稻幼苗 Zn、Cu 积累量

由表 2 可以看出, 水稻幼苗对 Zn 的积累量明显高于对 Cu 的积累量, 幼苗地上部分的 Zn 积累量明显高于根部的 Zn 积累量, 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理水稻幼苗地上部分的 Zn 积累量显著高于 CK 和 30、120、150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理, 60 和 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理水稻幼苗根部的 Zn 积累量显著高于 CK 和 30

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理 ($P<0.05$)。水稻幼苗地上部 Cu 积累量和根部 Cu 积累量相差不大, 60 和 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理水稻幼苗地上部分的 Cu 积累量显著高于 CK 和 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理 ($P<0.05$), 不同处理间水稻幼苗根部 Cu 积累量无显著差异。与 60 和 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理相比, 120 和 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理水稻幼苗地上部分 Zn、Cu 积累量有下降的趋势。

表 2 施硅处理对水稻幼苗 Zn、Cu 积累量的影响¹⁾

Table 2 Effects of silicon application on Zn, Cu accumulation amounts of rice seedling

$\rho(\text{SiO}_2)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	Zn 积累量/ μg		Cu 积累量/ μg	
	Zn accumulation amount		Cu accumulation amount	
	地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root
0 (CK)	75.94±14.36b	28.10±5.60b	9.75±1.98b	8.81±1.94a
30	102.94±22.11b	27.96±5.07b	12.05±2.58ab	10.15±2.47a
60	126.68±29.54ab	37.65±5.98a	17.29±4.30a	12.56±2.90a
90	174.78±42.01a	39.25±13.09a	19.79±4.29a	11.72±4.21a
120	78.61±23.54b	33.96±4.01ab	11.14±2.87ab	10.19±1.88a
150	74.60±16.06b	32.57±4.00ab	9.30±2.89b	9.97±2.06a

1) 表中数据为平均值±标准差($n=3$), 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, LSD 多重比较检验)

1) The data in the table are average value ± standard deviation ($n=3$); Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, LSD multiple comparison test)

2.5 不同硅肥水平下水稻幼苗根部 Zn、Cu 净吸收量和转运系数

由表 3 可知, 硅肥 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理的水稻幼苗根部 Zn 净吸收量和转运系数显著高于 CK

和 120、150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理 ($P<0.05$)。不同处理间水稻幼苗根部 Cu 净吸收量无显著性差异, 60 和 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 处理水稻幼苗 Cu 转运系数较高 ($P<0.05$)。

表 3 施硅处理对水稻根部 Zn、Cu 净吸收量和转运系数的影响¹⁾

Table 3 Effects of silicon application on Zn and Cu net uptake amounts and transport coefficient of rice root

$\rho(\text{SiO}_2)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	净吸收量/(mg·kg ⁻¹)		转运系数	
	Net uptake amount	Cu	Zn	Cu
Zn	Cu	Zn	Cu	
0 (CK)	154.12±15.52b	27.44±3.21a	0.55±0.02b	0.23±0.01bc
30	204.69±19.82ab	34.78±2.68a	0.58±0.06b	0.19±0.03bc
60	203.86±36.20ab	37.06±5.80a	0.61±0.05ab	0.25±0.05ab
90	273.45±78.37a	39.78±9.15a	0.76±0.09a	0.29±0.02a
120	169.17±27.46b	31.96±4.37a	0.45±0.08b	0.22±0.02bc
150	163.05±17.06b	29.23±4.54a	0.46±0.06b	0.18±0.02c

1) 表中数据为平均值±标准差($n=3$), 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, LSD 多重比较检验)

1) The data in the table are average value ± standard deviation ($n=3$); Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, LSD multiple comparison test)

3 讨论与结论

3.1 施硅对水稻农艺性状的影响

不少研究已经证实 Si 在增强水稻抗倒伏性、提升水稻产量和品质方面的作用^[17-19]。我国安徽、河南、浙江、湖北等省施用 Si 肥后, 水稻的增产幅度可以达到 10%~20%。适宜浓度的 Si 可以增进杂交水稻叶片叶绿素和类胡萝卜素的含量, 提高叶片的光合速率, 增强根系的活力及根氧化力, 改善水稻的农艺性状^[20-21]。本研究结果证明, 施用 Si 肥后, 水稻的叶片数和根长均有不同程度的增加, 分别最高增加 31.39% 和 38.81%。但 Si 肥在水稻株高方面的增进作用并不显著, 说明施 Si 不会引起水稻幼苗的徒长, 有利于培育出粗壮、叶宽的幼苗。生长指标的变化带动了水稻生物量的变化, 在施用 Si 肥后, 水稻地上部和根部生物量(鲜质量)分别增加 5.44%~52.81% 和 4.83%~42.49%。随着 Si 肥施用量的增加, 水稻的生长指标和生物量均表现为先增加后降低的趋势, 各处理中以 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理表现为最佳, 证实了适度增施 Si 肥在水稻生长发育及生物量形成中的促进作用, 施用过量反而不利于水稻的生长。魏宾耘等^[22] 和曹庭悦等^[23] 研究发现, 叶面施 Si 后水稻糙米生物量最高增加近 30%。李清芳等^[24] 则发现 Si 在一定浓度范围内(0~2.5 mmol·L⁻¹)可促进小麦幼苗生长, 而高浓度(3.5 mmol·L⁻¹)则对小麦幼苗产生危害, 均和本研究结果相似。

3.2 施硅和水稻吸收 Zn、Cu 之间的关系分析

我国土壤平均 Zn 含量(w)为 100 μg·g⁻¹, 随着复种指数的提高以及氮、磷、钾肥用量的增加, 耕地缺 Zn 现象日益明显^[25], 全球约 50% 的谷物产区出现土壤有效 Zn 缺乏现象^[26]。作为植物生长必需的

微量元素, Zn、Cu 含量的高低不仅关系着水稻的生长发育, 也影响着其可食部分的营养价值^[4-6], 微量营养元素缺乏成为目前谷类最常见的矿质成分障碍之一^[27-28]。本试验采用水培方式进行, 与土培试验相比, 不存在 Zn、Cu 在土壤中的固定作用, 也避免了 Si、Zn、Cu 之间交互作用的干扰, 试验结果可以比较准确地反映不同浓度 Si 对水稻吸收、转运 Zn、Cu 的影响^[29]。从结果看, 水稻幼苗根部 Zn 含量随着营养液中 Si 浓度的增加而增加, 可解释为施用 Si 肥有利于提高水稻根系的活力, 同时增强其对 Ca、K、P 等营养元素的吸收, 进而促进了水稻的生长发育, 增加其对营养元素 Zn、Cu 的吸收和利用。但是在营养液中 Si 浓度太高的情况下, 水稻的 Zn、Cu 含量下降, 分析其原因是高浓度 Si 通过增加水稻地上部生物量稀释了水稻中 Zn、Cu 的含量, 致使水稻幼苗地上部 Zn 含量随 Si 浓度的增加而先增加后降低。因此, 本研究结果仅适用于水稻正常 Zn、Cu 含量范围内的生长状况。Zn、Cu 是植物生长的微量元素, 同时也是重金属元素, 浓度太高的情况下会对作物生长产生副作用。高浓度 Zn、Cu 情况下, Si 与 Zn 形成 Si-Zn 复合物的沉淀阻止 Zn²⁺进入细胞膜, 同时提高水稻抗氧化系统的活性, 抑制 Zn 从根系向地上部的运输, 显著降低植株中 Zn 的含量^[30-32]。Si 也通过促进 Cu 在水稻根部的积累或者减少土壤有效态 Cu 的含量, 减少其在地上部的积累, 这些均与本结果相反^[33-34]。对此 Mehrabanjoubani 等^[35] 曾经研究发现, 在低浓度 Zn 情况下, Si 有利于水稻地上部和根部对 Zn 的吸收, 然而高浓度情况下, 抑制了水稻地上部和根部对 Zn 的吸收。

植物体内微量元素含量主要受生态环境和遗传因素的影响, 其中生态环境的影响大于遗传因素。Zn 和 Cu 相比较, Cu 含量受环境条件影响更大^[36]。水稻幼苗时期, 不同处理中 Zn、Cu 在水稻不同器官中的含量为根>茎叶, 这表明水稻从土壤中吸收的 Zn、Cu 大部分停留在根部, 少量向地上部分迁移。根部 Zn、Cu 净吸收量反映了水稻幼苗根系对 Zn、Cu 的吸收能力, 转运系数反映了 Zn、Cu 在水稻幼苗中由根部向地上部迁移的难易程度。本试验中, 在介质 Zn、Cu 含量正常范围内施用 Si 肥后, 根部 Zn 净吸收量提高了 5.79%~77.43%, Cu 净吸收量提高了 6.51%~44.96%, 同时 Zn、Cu 转运系数也有不同程度的提高, 60 和 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理的 Zn 转运系数较对照分别提高 10.91% 和 38.18%; 60 和 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理的 Cu 转运系数较对照分别提高 8.70% 和 26.09%。由此可见, Si 肥增加了水稻根系对 Zn 和 Cu 的吸收, 同时促进了 Zn 和 Cu 由根部向水稻地上部的迁移和运输, 进而增加了水稻地上部的 Zn、Cu 含量, 满足作物对 Zn、Cu 的需求。与 60 和 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理相比, 120 和 150 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理水稻幼苗地上部分 Zn、Cu 积累量出现下降, 分析原因: 一是水稻生长受到抑制, 导致生物量下降, 进而影响了地上部 Zn、Cu 的积累; 另外一个原因是水稻对 Zn、Cu 的吸收基本达到饱和。

从本研究结果看, 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理是有利于水稻生长发育并促进微量元素 Zn、Cu 吸收的最佳 Si 肥水平。而我国稻田生态系统中, 很多地区土壤 Si 含量(以 SiO₂ 计)低于此水平, 因此, 在我国稻田增施 Si 肥可以改善水稻成长指标和生物量, 促进水稻对微量元素的吸收, 为后期的水稻产量提高打下坚实的基础。

3.3 结论

不同 Si 浓度下, 水稻幼苗生长状况具有明显的差异性, 水稻幼苗叶片数、株高、根长以及地上部分鲜质量均在 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理达到最大值。Si 肥的施用增加了水稻根系对 Zn、Cu 的吸收, 同时促进了 Zn、Cu 由根部向水稻地上部的迁移和运输, 进而增加了水稻幼苗地上部分和根部的 Zn、Cu 含量和积累量, 水稻幼苗地上部 Zn、Cu 含量在 60、90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理达到最高值, 且位于作物生长的正常浓度范围内。综合考虑水稻生长指标、生物量和对 Zn、Cu 的吸收等因素, 90 mg·L⁻¹ SiO₂ 处理的用量可作为常规稻田的硅肥用量, 将有利于稻田生态系统微量元素 Zn、Cu 的吸收。

参考文献:

- [1] 叶廷红, 张赓, 李小坤. 水稻锌营养及锌肥高效施用研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, 56(6): 1-6.
- [2] ISHIMARU Y, BASHIR K, NISHIZAWA N K. Zn uptake and translocation in rice plants[J]. *Rice*, 2011, 4(1): 21-27.
- [3] SUN L, LIU Q, XUE Y, et al. Dynamic influence of S fertilizer on Cu bioavailability in rice (*Oryza sativa L.*) rhizosphere soil during the whole life cycle of rice plants[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 198-210.
- [4] 王子腾, 耿元波. 国内外主要粮食作物对施用锌肥响应的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 805-816.
- [5] 叶林顺, 刘慧璇, 谢咏梅, 等. 改性稻草吸附铜离子的动力学机理[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(8): 28-31.
- [6] 杨鹤, 张浩, 郁玉钢, 等. 叶面喷施锌对农田人参锌营养、生长发育及皂苷含量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2012, 33(3): 311-315.
- [7] 何普, 刘鸿雁, 吴龙华, 等. 高、低 Cd 积累水稻和小麦籽粒中 Cu、Zn 的富集特性[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 385-391.
- [8] SETH A D, SARKAR A, DATTA B, et al. Suitability of complex extractants for assessment of available soil zinc for nutrition of rice (*Oryza sativa L.*) in subtropical India[J]. *Soil Science*, 2017, 182(1): 28-35.
- [9] 饶震红, 杜凤沛, 李向东. 硅对农作物生长的影响[J]. *化学教育(中英文)*, 2019, 40(13): 1-9.
- [10] KLOTZBUCHER A, KLOTZBUCHER T, JAHN R, et al. Effects of Si fertilization on Si in soil solution, Si uptake by rice, and resistance of rice to biotic stresses in Southern Vietnam[J]. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16(2): 243-252.
- [11] 王力, 孙影, 张洪程, 等. 不同时期施用锌硅肥对优良食味粳稻产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6): 885-898.
- [12] LIANG Y C, WONG J C, WEI L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays L.*) grown in cadmium contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(4): 475-484.
- [13] SHI X H, ZHANG C C, WANG H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1): 53-60.
- [14] ZHANG C C, WANG L J, NIE Q, et al. Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa L.*)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 300-307.
- [15] 贾倩, 胡敏, 张洋洋, 等. 硅钙肥对水稻吸收铅、镉的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 24-30.
- [16] GU H H, ZHAN S S, WANG S Z, et al. Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa L.*) seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1): 193-204.

- [17] 杨良金, 唐宗伟, 黄胜海, 等. 水稻施用硅肥的增产效果[J]. *土壤*, 2001, 44(3): 166-167.
- [18] 刘红芳, 宋阿琳, 范分良, 等. 高供氮水平下不同硅肥对水稻茎秆特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 758-768.
- [19] 梁永超, 张永春, 马同生. 植物的硅素营养[J]. *土壤学进展*, 1993, 21(3): 7-14.
- [20] RIOTTE J, SANDHYA K, PRAKASH N B, et al. Origin of silica in rice plants and contribution of diatom earth fertilization: Insights from isotopic Si mass balance in a paddy field[J]. *Plant and Soil*, 2018, 423(1): 481-501.
- [21] SUKYANKIJ S, THANACHIT S, ANUSONTPORN- PERM S, et al. Assessment of soil Zn availability for Khao Dok Mali 105 rice: A case study in Thailand[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2020, 23(2): 181-190.
- [22] 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 等. 不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3855-3861.
- [23] 曹庭悦, 刘鸣达, 沃惜慧, 等. 硅、磷配施对水稻镉吸收转运的影响及其机制[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 37-44.
- [24] 李清芳, 周秀杰, 马成仓. 硅对小麦幼苗几项生理生化性质的影响[J]. *淮北煤师院学报(自然科学版)*, 2001, 23(4): 37-40.
- [25] 董瑜皎, 袁江, 吕世华. 2 个氮水平下不同施锌方式对覆膜水稻产量及锌吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1655-1661.
- [26] CAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 69(1): 172-180.
- [27] CAKMAK I, KALACI M, EKIZ H, et al. Zinc deficiency as an actual problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60(1): 175-188.
- [28] 覃莉茉, 周建宽. 水稻增施中微量元素硅肥与锌肥效果研究[J]. *现代农业科技*, 2019, 18(1): 10-13.
- [29] 黄昌勇, 徐建明. *土壤学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [30] ANWAAR S A, ALI S, ALI S, et al. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5): 3441-3450.
- [31] WANG R, FU W, WANG J, et al. Application of rice grain husk derived biochar in ameliorating toxicity impacts of Cu and Zn on growth, physiology and enzymatic functioning of wheat seedlings[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103(4): 636-641.
- [32] 卢志红, 谭雪明, 朱美英, 等. 硫硅配施对土壤铜形态和水稻吸收铜的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(9): 1806-1813.
- [33] BOSNIC D, NIKOLIC D, TIMOTIJEVIC G, et al. Silicon alleviates copper (Cu) toxicity in cucumber by increased Cu-binding capacity[J]. *Plant and Soil*, 2019, 441(1/2): 629-641.
- [34] 汪亚会, 覃雨虹, 马彦蓉, 等. 生物炭配施微肥对菜园土壤有效态重金属含量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(5): 18-24.
- [35] MEHRABANJOURANI P, ABDOLZADEH A, SADEGHIPOUR H R, et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes[J]. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2015, 27(1): 19-29.
- [36] 俄胜哲. 攀西地区稻米中微量元素含量变异及影响因素初探[D]. 成都: 四川农业大学, 2005.

【责任编辑 李晓卉】