



张茂明,丁俊杰,刘凯,等.盐碱胁迫下外源硅对水稻绥粳306离子平衡调节的复式研究[J].黑龙江农业科学,2022(11):22-26.

# 盐碱胁迫下外源硅对水稻绥粳306离子平衡调节的复式研究

张茂明<sup>1,2</sup>,丁俊杰<sup>1,2</sup>,刘凯<sup>1,3</sup>,杨晓贺<sup>1,2</sup>,姚亮亮<sup>1,2</sup>,高雪冬<sup>1,2</sup>,邱磊<sup>1,2</sup>,来永才<sup>1,3</sup>

(1. 国家耐盐碱水稻技术创新中心东北中心,黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院佳木斯分院,黑龙江 佳木斯 154007; 3. 黑龙江省农业科学院,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**黑龙江省西部地区盐碱地水稻生产潜力巨大,为探究外源硅调控寒地盐碱地水稻耐盐碱的机理,本试验以绥粳306为材料,选用在盐碱土盆栽中种植和在盐碱地水田常规种植两种栽培方式,研究 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硅对水稻叶片、茎和根部器官主要无机离子的含量变化影响,明确盐碱条件下外源硅对水稻植株主要离子的吸收、运输和再分配规律。结果表明,盐碱胁迫下,外源硅添加能够显著降低水稻植株中 $\text{Na}^{+}$ 离子的含量,减弱盐碱地寒地水稻 $\text{Na}^{+}$ 与 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 离子间的拮抗效应,有效调控了水稻根向茎、茎向叶主要无机离子的运输比和运输选择比率。施用外源硅对寒地盐碱地水稻生理生态健康发展均有积极的作用。

**关键词:**硅;寒地;盐碱地;水稻;离子平衡

随着人口的日益增多、耕地减少、粮食生产安全等问题突出,人们逐渐把目光转投向盐碱地的开发利用。黑龙江省西部和吉林省部分地区的盐碱地有300万 $\text{hm}^2$ ,黑龙江省主要集中松嫩平原地区,盐碱地面积占松嫩平原现有耕地面积的7%<sup>[1]</sup>。其中有种植水稻条件的约有100万 $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,生产潜力巨大。国内外研究表明水稻对盐碱均有一定的耐受性<sup>[3-4]</sup>,适合在盐碱地区种植<sup>[5]</sup>。种植在盐碱土壤中的作物,会对细胞产生毒性作用,其细胞膜的结构会发生改变,致使细胞不能正常发挥功能,从而影响植物的正常生长。同时,盐碱增加了土壤的渗透压,对植物的吸收能力产生了阻力,使植物的光合作用和代谢功能丧失,从而导致植物的衰老,细胞脱水,植株萎蔫,最终导致植株死亡<sup>[6-7]</sup>。

盐碱胁迫下,大量的 $\text{Na}^{+}$ 会聚集在植物根、茎和叶细胞中, $\text{Na}^{+}$ 强制进入植物细胞后,损害植物细胞膜、细胞核等组织。并且由于 $\text{Na}^{+}$ 与 $\text{K}^{+}$ 能够产生拮抗作用,从而阻碍 $\text{K}^{+}$ 在植物体内的转运,导致 $\text{K}^{+}$ 的流失,而 $\text{K}^{+}$ 在维持植物正常渗

透压方面起着重要的作用,其还参与植物体内糖类、多种蛋白质及生长发育酶合成,扰乱植物正常生理代谢<sup>[8]</sup>。同时过多的盐离子不仅抑制 $\text{K}^{+}$ 吸收,还抑制其他多种营养元素的吸收<sup>[9]</sup>,造成植物体内营养成分此多彼少或者大量流失,最终导致植物不能正常生长发育,生理生化过程紊乱,造成作物品质下降。硅和碳已经被认知为植物生长最重要的微量元素,硅对植物的生长发育有积极作用,例如其能提高植物的光合作用和叶绿素含量,提高茎秆强度,促进有机物积累,提高作物的抗病性、抗盐性、抗寒性以及缓解重金属毒害等<sup>[10]</sup>。国内外诸多学者研究发现添加外源硅能够减少盐胁迫下作物中 $\text{Na}^{+}$ 过多积累,增加 $\text{K}^{+}$ 含量<sup>[11-12]</sup>,Liang等<sup>[13]</sup>研究发现,硅能调控 $\text{H}^{+}$ -ATPase和 $\text{H}^{+}$ -PPase活性,从而减少过多 $\text{Na}^{+}$ 进入植物细胞,其能将细胞质中过多的 $\text{Na}^{+}$ 区隔化进入液泡,防止其伤害各种细胞器,外源硅能促进盐胁迫下阳离子通道抑制剂多胺的合成<sup>[14]</sup>。综上所述外源硅有效抑制盐胁迫下植物积累过多的 $\text{Na}^{+}$ ,硅能使盐胁迫下植物体内离子维持平衡,从而提高其耐盐碱能力。虽然国内外对硅调控多种植物耐盐碱机制进行了研究,但目前缺少硅在寒地盐碱地水稻上离子平衡调节的研究,寒地盐碱地独特的生态环境及大面积的水稻种植,亟需明确硅在寒地水稻上的作用机理,为寒地盐碱地水稻生产过程中硅肥的施用,提供理论依据。

收稿日期:2022-07-29

基金项目:国家耐盐碱水稻技术创新中心东北中心建设项目(CZKYF2020A001);黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA20B104);黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX14)。

第一作者:张茂明(1974—),男,硕士,副研究员,从事盐碱地水稻栽培技术研究及作物病虫害防治研究。E-mail:zkzzmm@163.com。

通信作者:来永才(1964—),男,博士,研究员,从事现代农作制度、耕作栽培及农业资源利用研究。E-mail:yame0451@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

盆栽试验设在黑龙江省佳木斯市东风区黑龙江省农业科学院佳木斯分院试验田内。盆栽中的盐碱土采自肇源国家耐盐碱水稻技术创新中心东北中心试验田。采集试验田 0~20 cm 表土层,前茬作物为水稻。

常规种植试验设在黑龙江省大庆市肇源县超等蒙古族乡共和村水稻田(肇源国家耐盐碱水稻技术创新中心东北中心试验田)。

土壤的理化性质:土壤类型为盐碱土,pH9.87,土壤有机质 12.4 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷 31.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 147 mg·kg<sup>-1</sup>,有效氮 92.2 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 材料

供试水稻品种:绥粳 306(黑审稻 2020L0039),由黑龙江省农业科学院绥化分院提供。外源硅选用分析纯 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 制备的硅溶液。

### 1.3 方法

1.3.1 试验设计 试验采用单因子随机设计,每个试验地址设置 2 个处理,处理 1:外源硅浓度设置为 2 mmol·L<sup>-1</sup>;将 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 溶于水后通过阳离子交换树脂使溶液中的 Na<sup>+</sup> 离子低于 1×10<sup>-2</sup> mmol·L<sup>-1</sup>[15];处理 2:清水对照。

盆栽方式:每个处理种植 3 盆,4 次重复,共 24 盆。每个盆内装入 1.5 kg 的干土。水稻首先在苗床进行育苗,当“三叶一心”期挑选大小一致的植株进行移栽。试验期间用储存 2 d 的自来水灌溉,使土壤水分保持在田间饱和含水量以下。待水稻抽穗后开始进行外源硅处理,喷雾接种 1 次,同时进行清水对照处理。整个试验期间定期浇水,保持盐碱土壤在田间饱和含水量。

常规种植方式:每个处理设置 1 000 m<sup>2</sup> 的小区。水稻首先在苗床进行育苗,当“三叶一心”期挑选大小一致的植株移栽本田。人工插秧,插秧规格为 30.0 cm×13.5 cm,每穴 4~5 株。氮、磷、钾施用比例为 2:1:1:6。施纯氮 90 kg·hm<sup>-2</sup>、纯磷 45 kg·hm<sup>-2</sup>、纯钾 72 kg·hm<sup>-2</sup>。氮肥施用方法为基肥:蘖肥:穗肥:粒肥=4:3:2:1;磷肥全部作基肥;钾肥分基肥、穗肥两次施入,每次各施 36 kg·hm<sup>-2</sup>。基肥纯氮 36 kg·hm<sup>-2</sup>,纯磷 45 kg·hm<sup>-2</sup>,纯钾 36 kg·hm<sup>-2</sup>;蘖肥纯氮 27 kg·hm<sup>-2</sup>;穗肥纯氮 18 kg·hm<sup>-2</sup>,纯钾 36 kg·hm<sup>-2</sup>;粒肥纯氮 9 kg·hm<sup>-2</sup>。灌溉方法为浅湿干,小区之间灌溉水相互不流通。待水稻抽穗后开始进行外源硅处理,喷雾接种 1 次,同时进

行清水对照处理。

1.3.2 盐碱胁迫下水稻离子含量测定 14 d 后取各处理水稻植株,将根茎叶用去离子水冲洗干净,然后置于 65 °C 烘箱中烘 48 h,用球磨机将样品研磨后称取 0.2 g 放入坩埚中,缓缓灼烧至无烟后,放入马弗炉中 550 °C 下灰化 3 h 致恒重,然后用 2~3 滴浓硝酸溶解灰化后的灰分,过滤后用去离子水定容到 25 mL。取 2 mL 溶液定容至 10 mL,然后装入 10 mL 离心管中,用等离子发射光谱仪测定 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的含量[16]。

1.3.3 离子运输相关指标的计算 离子运输比(Transport ratio, TR)反映植物体内离子的分布梯度,代表离子的运输倍数,其计算公式根据[17]的方法如下:

$$TR(X) = \frac{a \text{ 器官}(X)}{b \text{ 器官}(X)}$$

式中:a、b 代表水稻根、茎、叶等器官;X 代表 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的含量。

运输选择性比率(Transport selectivity ratio, TS)反映植物体内阳离子间在运输方面的协同或拮抗关系,具体计算公式[17]如下:

$$S_{Y,Na^+} = \frac{a \text{ 器官}[Y]/[Na^+]}{b \text{ 器官}[Y]/[Na^+]}$$

式中:a、b 代表水稻根、茎、叶等器官;Y 代表 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的含量。

运输选择性比率值越大说明源器官抑制 Na<sup>+</sup>、促进 K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 或 Ca<sup>2+</sup> 元素向库端运输能力越强,即库器官的选择吸收或运输能力越强。

1.3.4 数据分析 使用 DPS 7.05 对数据进行方差分析,用 Duncan's 法比较不同处理间平均值之间的差异显著性(P<0.01 或 P<0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源硅对盐胁迫下水稻阳离子含量的影响

2.1.1 盆栽试验 由图 1A 可知,盆栽栽培方式种植的水稻喷施硅 14 d 后,喷施硅的处理水稻叶片、茎和根部器官中 Na<sup>+</sup> 的含量分别较对照降低 6.72%、10.80% 和 12.01%,均显著低于 CK。由图 1B 可知,喷施硅的处理水稻叶和根部器官中的 K<sup>+</sup> 含量,分别较对照显著提高 18.82% 和 27.15%,茎中 K<sup>+</sup> 数量极显著提高了 36.42%。由图 1C 可知,喷施硅处理的水稻叶、茎和根部器官中的 Ca<sup>2+</sup> 含量分别较对照显著提高 16.83%、34.78% 和 40.74%。由图 1D 可知,喷施硅处理的水稻叶、茎、根部器官中的 Mg<sup>2+</sup> 分别较对照显著提高 6.83%、15.54% 和 15.97%。

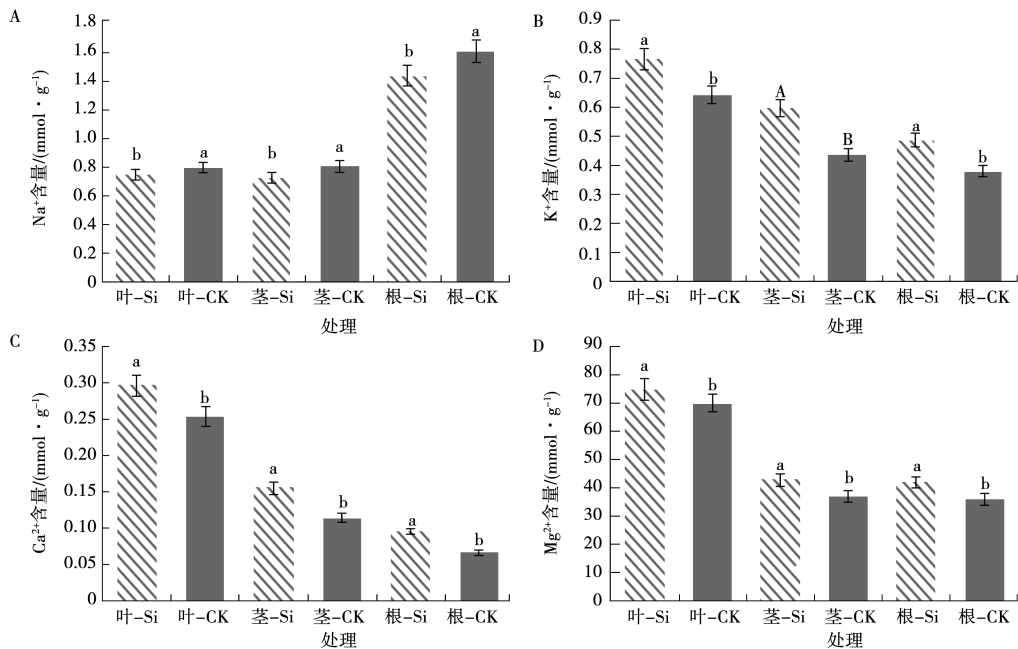


图1 盐胁迫下硅对盆栽试验水稻阳离子含量的影响

注:不同大小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ )。下同。

2.1.2 常规种植 由图2A可知,常规种植方式的水稻喷施硅14 d后,喷施硅的处理水稻叶片、茎和根中Na<sup>+</sup>含量分别较对照显著降低7.31%、11.90%和12.68%。由图2B可知,喷施硅的处理水稻的叶片、茎和根中的K<sup>+</sup>含量分别较对照显著

提高19.37%、23.47%和26.70%。由图2C可知,喷施硅处理的水稻叶、茎和根中的Ca<sup>2+</sup>含量分别较对照提高14.81%、32.00%和40.00%。由图2D可知,喷施硅处理的水稻叶、茎、根中的Mg<sup>2+</sup>分别较对照显著提高6.76%、14.77%和15.36%。

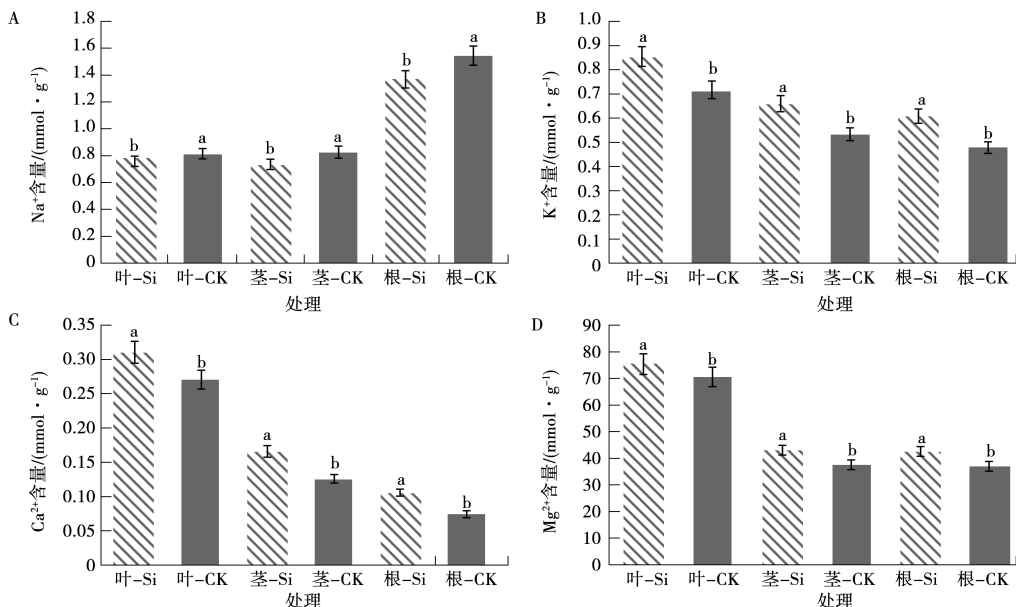


图2 盐胁迫下硅对常规种植水稻阳离子含量的影响

## 2.2 外源硅对盐胁迫下水稻离子比值的影响

2.2.1 盆栽试验 由表1可以看出,盆栽方式种植的水稻喷施硅14 d后,水稻叶部硅处理K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>极显著高于对照,Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>显著高于对照,而

Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>则差异不显著。水稻茎部硅处理的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>和Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>均显著高于对照。水稻根部硅处理K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>和Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>均极显著高于对照。

表 1 外源硅对盐胁迫下盆栽试验水稻叶、茎和根中阳离子比值的影响

器官	处理	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>
叶	Si	1.02 aA	0.40 aA	0.10 aA
	CK	0.81 bB	0.32 bA	0.09 aA
茎	Si	0.82 aA	0.22 aA	0.06 aA
	CK	0.54 bA	0.14 bA	0.05 bA
根	Si	0.34 aA	0.07 aA	0.03 aA
	CK	0.24 bB	0.04 bB	0.02 bB

注:不同大小写字母表示处理间差异显著( $P<0.01$ 或 $P<0.05$ )。下同。

2.2.2 常规种植 由表2可以看出,常规方式种植的水稻喷施硅14 d后,水稻叶部硅处理 $K^+/Na^+$ 极显著高于对照, $Ca^{2+}/Na^+$ 显著高于对照,而 $Mg^{2+}/Na^+$ 则差异不显著。水稻茎部硅处理 $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$ 和 $Mg^{2+}/Na^+$ 均显著高于对照。水稻根部硅处理 $Ca^{2+}/Na^+$ 显著高于对照,而 $K^+/Na^+$ 和 $Mg^{2+}/Na^+$ 极显著高于对照。

表 2 外源硅对盐胁迫下常规种植水稻叶、茎和根中阳离子比值的影响

器官	处理	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>
叶	Si	1.13 aA	0.41 aA	0.10 aA
	CK	0.88 bB	0.33 bA	0.07 aA
茎	Si	0.90 aA	0.23 aA	0.06 aA
	CK	0.65 bA	0.15 bA	0.05 bA
根	Si	0.45 aA	0.08 aA	0.03 aA
	CK	0.31 bB	0.05 bA	0.02 bB

### 2.3 外源硅对盐胁迫下水稻阳离子运输选择性比率的影响

2.3.1 盆栽试验 由表3可以看出,盆栽方式种植的水稻喷施硅后, $K^+$ 由茎向叶的运输极显著提升, $Mg^{2+}$ 由茎向叶的运输显著升高。喷施硅后 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 由根向茎的运输比虽有提升,但是差异不显著。

表 3 硅对盐胁迫下盆栽试验水稻阳离子运输选择性比率的影响

运输方向	处理	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>
根→茎	Si	0.42 aA	0.32 aA	0.49 aA
	CK	0.44 aA	0.29 aA	0.49 aA
茎→叶	Si	0.81 aA	0.55 aA	0.59 aA
	CK	0.68 bB	0.45 aA	0.53 bA

2.3.2 常规种植 由表4可以看出,常规栽培方式种植的水稻喷施硅后, $K^+$ 由根向茎、茎向叶的运输极显著提升, $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 由茎向叶的运输显著升高。喷施硅后 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 由根向茎的运输比同盆栽栽培方式结果相一致,没有变化或虽有提升但是差异不显著。

表 4 硅对盐胁迫下常规种植水稻阳离子运输选择性比率的影响

运输方向	处理	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>
根→茎	Si	0.50 aA	0.35 aA	0.54 aA
	CK	0.45 bB	0.33 aA	0.53 aA
茎→叶	Si	0.80 aA	0.55 aA	0.59 aA
	CK	0.74 bB	0.46 bA	0.52 bA

### 3 讨论

本试验中水稻在盆栽种植和常规种植两种栽培模式下,其根、茎、叶中 $Na^+$ 的含量在喷施硅后显著降低,说明外源硅可以减少植株细胞中 $Na^+$ 的含量,从而降低受到的 $Na^+$ 毒害。喷施硅后两种栽培方式水稻植株中 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 均有显著的提高,说明硅能够提高植物对 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 的吸收,增强植物的抗逆能力,这与叶利民<sup>[18]</sup>在水稻幼苗中的研究结果相一致。在其他作物中Yunus等<sup>[11]</sup>研究显示,添加外源硅能减少盐胁迫下西红柿幼苗叶片中 $Na^+$ 过多积累,增加叶片中 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 的积累,增加了叶片的 $Na^+/K^+$ 和 $Na^+/Ca^{2+}$ 。Liang<sup>[12]</sup>研究发现,添加外源硅能减少盐胁迫下大麦根、茎中的 $Na^+$ 含量,增加 $K^+$ 含量,使 $K^+/Na^+$ 比值维持在较高水平。本研究也同样发现外源硅降低了盐胁迫下水稻植株中 $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$ 的比值,这与在外源硅介导上黄瓜耐盐性的研究结果一致。证明外源硅可以有效维持盐胁迫过程中的水稻不同器官的离子稳态平衡<sup>[19]</sup>。

一般情况下,植物体内的离子总量与各部位的离子分布是保持动态平衡的。在维持植物机体正常的新陈代谢中离子的分布起着重要作用。盐胁迫下,植物机体内正常的离子代谢被打破,细胞内的离子稳态失衡, $Na^+$ 在植物组织内大量积累,硅介导的盐胁迫下渗透势的降低和水分状况的改善以及 $Na^+$ 在叶片中的分布也可能在一定程度上有助于植物的耐盐。同时硅对寒地盐碱地水稻植物光合作用及活性酶等影响也是下一步的研究方向。

### 4 结论

添加外源硅能够显著降低盐碱胁迫下水稻植株中 $Na^+$ 的含量,同时能够提高 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 的含量及 $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$ 、 $Mg^{2+}/Na^+$ 比值。外源硅添加下 $Na^+$ 与 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 离子间的拮抗效应减弱,有效调控了主要阳离子运输比和运输选择性比率,有效维持了主要阳离子在植株体内的运输和再分配。以上研究说明引用外源硅的介入,能够缓解盐胁迫下对寒地水稻造



成的毒害,有利于水稻离子平衡的调节,促进其健康生长。

# 参考文献:

[1] 王浩民,吴明官. 黑龙江省松嫩平原盐碱地治理方略[J]. 黑龙江水利科技,2015,43(10):1-6.

[2] 张唤,黄立华,李洋洋,等. 东北苏打盐碱地种稻研究与实践[J]. 土壤与作物,2016,5(3):191-197.

[3] SHANNON M C, RHOADES J D, DRAPER J H, et al. Assessment of salt tolerance in rice cultivars in response to salinity problems in California[J]. Crop Science, 1998, 38 (2):394-398.

[4] MASS E V, HOFFMAN G J. Crop salt tolerance-current assessment[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1977, 103(2):115-134.

[5] MIAO L, LIANG Z W, MA H Y, et al. Application of sheep manure in saline-sodic soils of Northeast China 1-Effect on rice (*Oryza sativa* L.) yield and yield components[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2010, 8(3): 524-529.

[6] QU Y, TANG J, LI Z, et al. Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of Northeast China[J]. Sustainability, 2020, 12(23):10095.

[7] MILLER G, SUZUKI, N, CIFTCI-YILMAZ S, et al. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses[J]. Plant Cell Environ, 2010, 33:453-467.

[8] 彭莉润,谢昶琰,刘慧冉,等. 不同梨砧木幼苗钾营养效率的差异[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(3):465-472.

[9] 乌凤章,朱心慰,胡锐锋,等. NaCl 胁迫对 2 个蓝莓品种幼苗生长及离子吸收、运输和分配的影响[J]. 林业科学, 2017, 53(10):40-49.

[10] 张阳,赵瑞,刘士广,等. 叶面喷施硅肥对水稻农艺性状和

抗性的影响[J]. 激光生物学报, 2021, 30(3):270-275.

[11] YUNUS Q, ZARI M. Effect of exogenous silicon on ion distribution of tomato plants under salt stress [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2017, 48 (16):1843-1851.

[12] LIANG Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress[J]. Plant & Soil, 1999, 209(2):217.

[13] LIANG Y, ZHANG W, CHEN Q, et al. Effects of silicon on H<sup>+</sup>-ATPase and H<sup>+</sup>-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53:29-37.

[14] YIN L N, WANG S W, Tanaka K, et al. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. [J]. Plant, Cell & Environment, 2016, 39(2):245-258.

[15] LI Z, UNZUÉ-BELMONTE D, CORNELIS J T, et al. Effects of phytolith rice-straw biochar, soil buffering capacity and pH on silicon bioavailability[J]. Plant and Soil, 2019, 438(1-2):187-203.

[16] 孟元发. 外源硅对苜蓿盐胁迫的缓解效应及调控机理[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2020.

[17] SHARKEY T D, BERNACCHIC C J, FARQUHAR G D, et al. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C<sub>3</sub> leaves[J]. Plant, Cell and Environment, 2007, 30 (9):1035-1040.

[18] 叶利民. 硅对盐胁迫下水稻幼苗保护酶活性和离子吸收的影响[J]. 东北农业科学, 2012, 37(3):22-24.

[19] 吴雪霞,朱月林,朱为民,等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗光合作用和离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4):1105-1109.

## Compound Study on Ion Balance Regulation of Exogenous Silicon on Rice Suigeng 306 Under Salt Alkali Stress

ZHANG Mao-ming<sup>1,2</sup>, DING Jun-jie<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>1,3</sup>, YANG Xiao-he<sup>1,2</sup>, YAO Liang-liang<sup>1,2</sup>, GAO Xue-dong<sup>1,2</sup>, QIU Lei<sup>1,2</sup>, LAI Yong-cai<sup>1,3</sup>

(1. Northeast Branch of National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice, Harbin 150086, China; 2. Jiamusi Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China; 3. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanism of exogenous silicon regulating the saline alkali tolerance of rice in cold saline alkali land in Western Heilongjiang Province, Suigeng 306 was used as material. Two cultivation methods, pot planting in saline alkali soil and conventional planting in saline alkali paddy field, were selected to study the effect of 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> exogenous silicon on the content changes of major inorganic ions in rice leaves, stems and root organs, to clarify the absorption, transportation and redistribution of major ions in rice plants by exogenous silicon under saline alkali conditions. The results showed that under saline alkali stress, the addition of exogenous silicon could significantly reduce the content of Na<sup>+</sup> ions in rice plants, weaken the antagonistic effect between Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> ions, and effectively regulate the transport ratio and transport selection ratio of major inorganic ions from root to stem and stem to leaf. The application of exogenous silicon has a positive effect on the physiological and ecological health development of rice in cold saline alkali land.

**Keywords:** silicon; cold area; saline alkali land; rice; ion balance