西北植物学报,2014,34(5):0988－0994
Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.

文章编号:1000-4025(2014)05-0988-07　　**doi**:10.7606/j.issn.1000-4025.2014.05.0988

硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的生理机制研究

刘　媛[1],王仕稳[2],殷俐娜[2],刘　朋[2],邓西平[1,2*]

(1 西北农林科技大学 生命科学学院,陕西杨陵 712100;2 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨陵 712100)

摘　要:为了明确硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的机制,该试验采用水培方法,以黄瓜品种'津优一号'为材料,对幼苗进行中度盐胁迫,研究在盐胁迫下硅对黄瓜幼苗生长、光合特性、渗透调节物质和离子吸收的影响。结果显示:(1)正常条件下,硅对黄瓜幼苗生长及相关生理指标无明显影响;单独盐处理降低了幼苗叶片叶绿素含量、光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶片含水量,导致幼苗生长受抑。(2)盐胁迫下加硅显著提高了幼苗光合速率和叶片含水量,增加了生物量的积累;在盐胁迫初期,硅加盐处理黄瓜叶片渗透势略低于单独盐处理,此后均高于单独盐处理;硅加盐处理显著提高了叶片可溶性糖含量,尤其是蔗糖含量,而降低了其脯氨酸含量,但对可溶性蛋白含量无显著影响。(3)盐胁迫下黄瓜植株 Na^+ 含量大幅上升,K^+ 含量下降,K^+/Na^+ 比大幅降低;硅加盐处理降低了黄瓜叶片中 Na^+ 含量,提高了 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比。研究表明,盐胁迫条件下,硅能通过减轻叶片离子毒害和增加水分吸收,改善叶片水分状况,从而维持较高的光合能力,提高其抗盐能力;而渗透调节只在盐胁迫初期有轻微缓解作用,不是硅提高黄瓜幼苗抗盐性的主要途径。

关键词:黄瓜;硅;盐胁迫;渗透调节;离子吸收

中图分类号:Q945.78　　**文献标志码**:A

Studies on Physiological Mechanism of Salt Resistance Improved by Silicon in Cucumber

LIU Yuan[1], WANG Shiwen[2], YIN Lina[2], LIU Peng[2], DENG Xiping[1,2*]

(1 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the mechanism of silicon enhancing plant salt resistance, *Cucumis sativus* L. cv 'Jinyou No. 1' was grown in the hydroponic solution with silicon and NaCl. The effects of silicon on growth, photosyntheisis, osmotic adjustment and ion accumulation in cucumber seedlings were investigated. (1) Application of silicon alone had no effects on cucumber growth, while it partly reversed the salt-induced reduction in plant growth, chlorophyll content, water content, photosynthesis, stomatal conductance and transpiration. (2) The osmotic potential of silicon application was lower at beginning of salt stress, then became higher than salt alone application. Meanwhile, the osmolytes, especially, the sucrose levels, but not the proline, were significantly increased than that without silicon application under salt stress. The soluble protein content was not affected by silicon application. (3) Na^+ concentration was increased while K^+ concentration and K^+/Na^+ ratio were decreased in salt-treated plants. While, this tendency was partly reversed

收稿日期:2013-12-16;**修改稿收到日期**:2014-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31101597);中国科学院西部之光项目

作者简介:刘　媛(1989－),女,硕士研究生,主要从事植物水分抗旱与分子生物学研究。E-mail:lylyf1919@126.com

*通信作者:邓西平,博士,教授,主要从事植物水分抗旱与分子生物学研究。E-mail:dengxp@ms.iswc.ac.cn

by silicon application, especially in the leaves. It can be concluded that silicon application decreases Na^+ toxicity and improves the water status in plant, which allows a higher photosynthesis and growth rate, lead to salt tolerance. Osmotic adjustment, which has little effect at the beginning of salt stress, is not the main factor of silicon improving the salt tolerance.

Key words: cucumber; silicon; salt stress; osmotic adjustment; ion absorption

盐是影响植物生长发育的环境因子之一，土壤盐渍化严重制约着农业生产的发展[1]。盐胁迫主要会对植物造成渗透胁迫和离子毒害两方面的影响。首先，高浓度盐离子会对植物造成渗透胁迫，影响植物水分吸收、光合作用和叶片生长；然后随着盐离子在叶片中逐渐累积到阈值，叶绿体、光合系统遭到次生氧化损伤，进一步导致了叶片的衰老死亡[1]。

硅(Si)是地壳中仅次于氧的第二大元素，尽管它不是植物必需元素，但植物吸收硅能显著提高抵抗多种生物和非生物逆境胁迫的能力[2]，如硅提高大麦[3]、番茄[4]、水稻[5]、黄瓜[6]等多种作物的抗盐能力。目前关于硅提高植物抗盐的机理主要涉及以下几个方面：提高根 H^+-ATPase 的活性[3]；维持叶片较高含水量以减少水分胁迫[4]；通过累积在根表面的硅减少质外体运输来减少 Na^+ 的吸收和向地上部分的运输[5]；提高植物抗氧化能力从而减少盐胁迫引起的活性氧伤害[6]。由此可见，硅提高植物抗盐能力不仅仅是通过物理屏障作用，也参与了植物生理代谢调节过程，但目前除硅的物理屏障作用研究比较深入外，对硅参与的生理代谢调节机理还不清楚。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是一种世界范围内广泛栽培的蔬菜作物，属于中度吸硅植物[7]且对盐敏感，幼苗期是研究其抗盐性的关键时期[8]。本试验采用水培法，对黄瓜幼苗进行中度盐胁迫，研究施硅对黄瓜幼苗生长状况的影响，并通过相关指标的测定，从渗透调节、离子毒害、光合作用及水分状况等方面明确硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的作用机制。

1　材料和方法

1.1　材料培养

试验于 2013 年 5～10 月在西北农林科技大学水土保持研究所人工智能温室进行。以黄瓜品种‘津优一号’(天津润科农业科技有限公司黄瓜研究所研制)为试材。黄瓜种子用 1% NaClO 消毒 20 min，经蒸馏水漂洗后，置于湿润滤纸上 28 ℃催芽 24 h，待种子露白后播于装有复合基质的穴盘中育苗，昼温 25 ℃～30 ℃，夜温 18 ℃～20 ℃，自然光照。待幼苗子叶展平后，挑选长势一致的健壮植株，定植于 1/4 日本山崎黄瓜营养液(pH 6.0±0.1)的中培养，每 3 d 换 1 次营养液，气泵通气。

1.2　试验处理

幼苗在 1/4 日本山崎黄瓜营养液培养 3 d 后，将一半幼苗移入含浓度 0.83 mmol/L 硅酸(由 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 经阳离子交换柱制得)[9]的营养液中，生长 5 d 后，于当日 21:00 分别将幼苗移入 1/4 日本山崎黄瓜营养液中进行不同处理，具体设置为：(1)对照(CK)；(2)65 mmol/L NaCl(盐处理，NaCl)；(3)0.83 mmol/L 硅酸(硅处理，Si)；(4)0.83 mmol/L 硅酸和 65 mmol/L NaCl(硅加盐处理，NaCl+Si)。分别于处理后 1.5、3.5、7.5 d 采样，将样品及时分析或用液氮冻干并放置于－80 ℃冰箱保存。处理期间每 2 d 换 1 次培养液，每天用 0.1 mol/L HCl 或者 KOH 调节 pH 为 6.0。

1.3　测定指标与方法

于处理后 1.5、3.5、7.5 d，每个处理随机选取 15 株幼苗，分为叶、茎、根三部分测量其干鲜重；采用丙酮提取法[10]进行叶绿素含量测定；采用 Li-6400 XT 便携式光合仪(LI-COR，2012)进行光合参数测定；参照公式[11]计算黄瓜幼苗叶片含水量；叶片渗透势采用美国 WESCOR 露点渗透压仪 5600[12]进行测定；采用水合茚三酮法[10]进行脯氨酸含量测定；采用考马斯亮蓝 G-250 染色法[10]测定可溶性蛋白含量；采用岛津糖分析系统(HPLC；Shimadzu，Kyoto，Japan)[12]进行可溶性糖含量分析；采用原子吸收分光光度计测定黄瓜幼苗叶片中 Na^+、K^+ 含量[13]。

1.4　数据处理

采用 SPSS 20.0 软件中的邓肯氏多重比较法进行数据统计分析，Sigmaplot 12.5 软件作图，显著性水平设定为 $\alpha=0.05$，数值为平均值±标准差。

2　结果与分析

2.1　硅对盐胁迫下黄瓜幼苗鲜重及叶绿素含量的影响

图 1 显示，无盐胁迫时，加硅处理(Si)的黄瓜幼

苗生物量和叶绿素含量在各处理时间均与对照(CK)无显著差异。盐处理(NaCl)和硅加盐处理(NaCl+Si)黄瓜幼苗的鲜重在胁迫处理 1.5 d 与 CK 无显著差异,随后均显著降低,且时间越长降低幅度越大;同时,两处理幼苗的叶绿素含量在盐胁迫处理 1.5 和 3.5 d 均与对照无显著差异,随后比对照显著降低。其中,盐胁迫 7.5 d 后,硅加盐处理组幼苗鲜重和叶绿素含量较盐处理组分别显著增加了 23.0%和 14.7%($P<0.05$)。以上结果表明,加硅对正常条件下黄瓜幼苗生长无明显影响,但能有效维持盐胁迫下幼苗叶绿素含量的相对稳定,一定程度上缓解盐胁迫对黄瓜幼苗的生长抑制。

2.2 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗光合特性的影响

由表 1 可以看出,加硅处理(Si)黄瓜幼苗各时期的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均与对照(CK)无显著差异。盐处理(NaCl)和硅加盐处理(NaCl+Si)黄瓜幼苗的 P_n 在盐胁迫处理 7.5 d 时均比对照显著降低,但硅加盐处理显著高于盐处理;同时,两处理的 G_s 和 T_r 在各盐胁迫时期均显著低于对照,且降幅有随胁迫时间延长而增加的趋势,但硅加盐处理在胁迫处理 3.5 和 7.5 d 时显著高于盐处理;盐胁迫处理 7.5 d 后,硅加盐处理幼苗的 P_n、G_s、T_r 分别比单独盐处理增加了 37.3%、125%、146.1%。可见,施硅对正常条件下黄

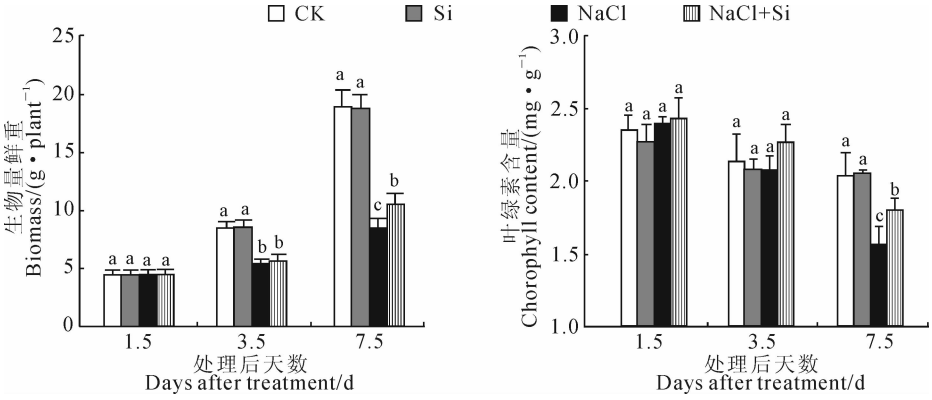

图 1 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长及叶绿素含量的影响

同期不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 1 Effects of NaCl and silicon on the biomass and chlorophyll content of cucumber seedlings

The different normal letters in the same stage indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below

表 1 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗光合特性的影响

Table 1 Effects of NaCl and silicon on gas exchange parameters of cucumber leaves

处理时间 Treatment time/d	处理 Treatment	净光合速率 P_n/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度 G_s/(mol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率 T_r/(mmol·m^{-2}·s^{-1})
1.5	CK	10.6±0.8 a	0.99±0.67 a	12.6±0.6 a
	Si	10.5±0.5 a	0.99±0.66 a	12.9±0.6 a
	NaCl	10.5±0.3 a	0.44±0.60 b	10.9±0.9 b
	NaCl+Si	10.5±0.9 a	0.56±0.64 b	10.9±0.4 b
3.5	CK	11.8±0.1 a	1.07±0.07 a	12.2±0.1 a
	Si	11.3±0.1 a	0.97±0.13 a	11.8±0.1 a
	NaCl	11.1±0.1 a	0.50±0.12 c	9.01±0.01 c
	NaCl+Si	11.1±0.1 a	0.81±0.04 b	10.5±0.1 b
7.5	CK	10.6±1.2 a	0.51±0.95 a	5.21±0.41 a
	Si	10.5±1.2 a	0.47±0.84 a	4.81±0.29 a
	NaCl	6.77±0.89 c	0.07±1.09 c	1.31±0.19 c
	NaCl+Si	9.29±0.96 b	0.17±0.93 b	3.22±0.46 b

注:同列数值所附的不同小写字母表示同一项目同一时间不同处理间差异达 0.05 显著水平(邓肯氏多重比较);下同。

Note: Within each column, means followed by the different lowercase letters are significantly different among treatments by the Duncan's multiple range test at 0.05 level; The same as below.

瓜幼苗的光合特征没有明显影响，但能显著改善盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合和蒸腾作用，一定程度上缓解盐胁迫对光合作用的伤害。

2.3　硅对盐胁迫下黄瓜叶片含水量及水分利用效率的影响

如图 2 所示，加硅处理（Si）的黄瓜幼苗叶片含水量和水分利用效率在各处理时间均与对照（CK）无显著差异。盐处理（NaCl）和硅加盐处理（NaCl＋Si）黄瓜幼苗叶片含水量在胁迫处理 1.5 d 与 CK 无显著差异，随后均显著降低，且在胁迫处理 7.5 d 后，盐处理和硅加盐处理幼苗叶片含水量分别较对照下降了 32.7％和 25.4％（$P<0.05$）；同时，两处理幼苗的水分利用效率在盐胁迫处理后随时间的延长而显著提高。如盐胁迫处理 7.5 d 后，硅加盐处理幼苗水分利用效率较单独盐处理组提高了18.0％（$P<0.05$）。以上结果说明，硅对正常条件下黄瓜幼苗叶片含水量和水分利用效率无明显影响，但在盐胁迫下加硅能增加叶片含水量，提高水分利用效率，从而提高了幼苗 CO_2 同化效率。

2.4　硅对盐胁迫下黄瓜叶片渗透调节物质含量的影响

表 2 显示，在正常条件下，加硅处理（Si）的黄瓜幼苗叶片渗透势除 7.5 d 较高外，在其余处理时间均与对照（CK）无显著差异。单独盐胁迫处理显著降低了黄瓜幼苗叶片渗透势。其中，在胁迫处理后 1.5、3.5、7.5 d 时，盐处理（NaCl）幼苗叶片渗透势分别降低了 25.3％，62.8％，45.0％（$P<0.05$）；盐处理后 1.5 d，硅加盐处理（NaCl＋Si）的叶片渗透势较单独盐处理（NaCl）略微降低，但随着胁迫处理时间的延长，硅加盐处理幼苗叶片渗透势反而高于单独盐处理。

同时，正常条件下，加硅处理（Si）的黄瓜幼苗叶

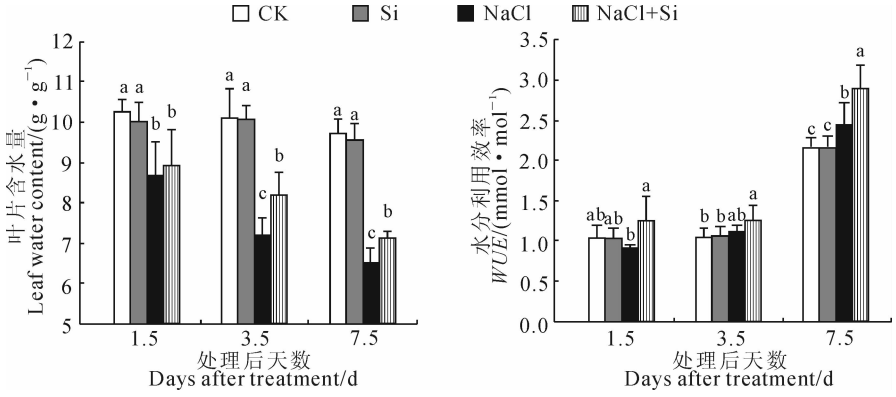

图 2　硅对盐胁迫下黄瓜叶片含水量及水分利用效率的影响

Fig. 2　Effects of NaCl and silicon on water content and water use efficiency of cucumber leaves

表 2　硅对盐胁迫下黄瓜叶片渗透势及渗透调节物质含量的影响

Table 2　Effects of NaCl and silicon on osmotic potential and organic osmolytes content of cucumber leaves

处理时间 Treatment time/d	处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar content/(μmol·g⁻¹) 蔗糖 Sucrose	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	总糖 Total	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(μg·g⁻¹)	脯氨酸含量 Proline content /(μg·g⁻¹)	渗透势(Ψ_π) Osmotic potential /MPa
1.5	CK	18.5±2.7c	25.4±2.0c	43.9±3.4b	87.7±6.9c	237±9a	150±24b	−0.74±0.01a
	Si	17.2±0.9c	22.3±1.9c	37.3±0.8b	76.7±2.0c	241±1a	152±23b	−0.71±0.01a
	Na	29.2±2.5b	33.9±5.0b	41.3±6.5b	104±9b	222±2a	212±32a	−0.93±0.04b
	Si＋Na	44.6±1.3a	50.6±4.7a	67.8±6.5a	163±9a	228±18a	147±7b	−0.95±0.02b
3.5	CK	2.62±0.32c	3.75±0.26a	5.69±0.20b	12.1±0.7c	223±6a	83.9±3.1b	−0.63±0.02a
	Si	2.31±0.12c	7.26±0.18b	9.21±0.73b	18.8±0.9c	230±8a	98.1±4.7b	−0.62±0.02a
	Na	34.4±5.7b	6.49±0.70b	10.2±2.5b	51.1±7.9b	195±3b	118±12a	−1.03±0.05c
	Si＋Na	48.3±2.6a	12.0±1.5a	26.0±4.8a	86.4±8.5a	202±6b	91.4±2.8b	−0.93±0.07b
7.5	CK	11.4±0.3c	14.5±2.7a	23.0±5.4a	48.8±8.1c	261±12a	108±5a	−0.73±0.01b
	Si	11.2±0.4c	5.12±0.52a	24.0±1.4a	49.9±4.6c	261±13a	102±10a	−0.68±0.01a
	Na	46.1±2.5b	15.0±2.8a	14.7±1.4b	75.9±4.6b	226±8b	94.2±9.3a	−1.06±0.04d
	Si＋Na	51.7±1.0a	19.0±2.8a	21.5±4.3a	92.2±8.0a	230±13b	74.7±5.9b	−0.98±0.04c

片脯氨酸含量和可溶性糖总量在各处理时间均与对照(CK)无显著差异。盐处理(NaCl)迅速且显著地提高了黄瓜叶片中脯氨酸含量(表 2),硅加盐处理(NaCl+Si)显著抑制了黄瓜幼苗叶片脯氨酸的累积,且在盐胁迫处理后 1.5、3.5、7.5 d 时,其脯氨酸含量较单独盐处理分别降低了 30%,22.4%,20.7%($P<0.05$);除 7.5 d 外,硅加盐处理幼苗叶片脯氨酸含量均维持在与对照相近的水平。此外,盐胁迫也显著增加了黄瓜幼苗叶片中可溶性糖的含量(表 2)。硅加盐处理幼苗叶片中可溶性糖总量较单独盐处理在胁迫处理后 1.5、3.5、7.5 d 分别提高了 56.2%、69.1%、21.6%($P<0.05$)。在非胁迫条件下,葡萄糖是黄瓜幼苗叶片中主要的可溶性糖,约占可溶性糖总量的 50%,而在盐胁迫条件下,可溶性糖含量的增加主要是蔗糖含量大幅增加所致。

另外,加硅处理的黄瓜幼苗叶片可溶性蛋白含量在各处理时间均与对照无显著差异,随着盐胁迫时间的延长,黄瓜幼苗叶片可溶性蛋白含量显著下降,但硅加盐处理与单独盐处理幼苗叶片中可溶性蛋白含量并无显著差异。

可见,正常条件下,施加硅对黄瓜幼苗渗透调节无明显影响;在盐胁迫下,硅加盐处理显著提高了黄瓜幼苗叶片可溶性糖含量,但其叶片渗透势只在胁迫初期略低于单独盐处理,表明渗透调节不是硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的主要原因。

2.5 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗离子吸收的影响

如图 3 所示,在正常条件下,加硅处理(Si)的黄瓜幼苗根、茎、叶中各离子含量在各处理时间均与对照(CK)无显著差异。黄瓜幼苗叶片中 Na^+ 含量在盐胁迫处理(NaCl)后显著增加,而叶片 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比大幅显著降低,且升降幅度随着盐胁迫时间的延长而增加;而盐胁迫时加硅处理显著减少了幼苗叶片对 Na^+ 的吸收和 K^+ 的流失,并在一定程度上提高了叶片 K^+/Na^+,如在盐胁迫处理后 7.5 d 时,单独盐处理(NaCl)较硅加盐处理(NaCl+Si)幼苗叶片中 Na^+ 含量高出 23.5%,K^+ 含量降低 13.2%($P<0.05$),硅加盐处理使 K^+/Na^+ 较单独盐处理提高了48.3%($P<0.05$)。黄瓜幼苗茎中

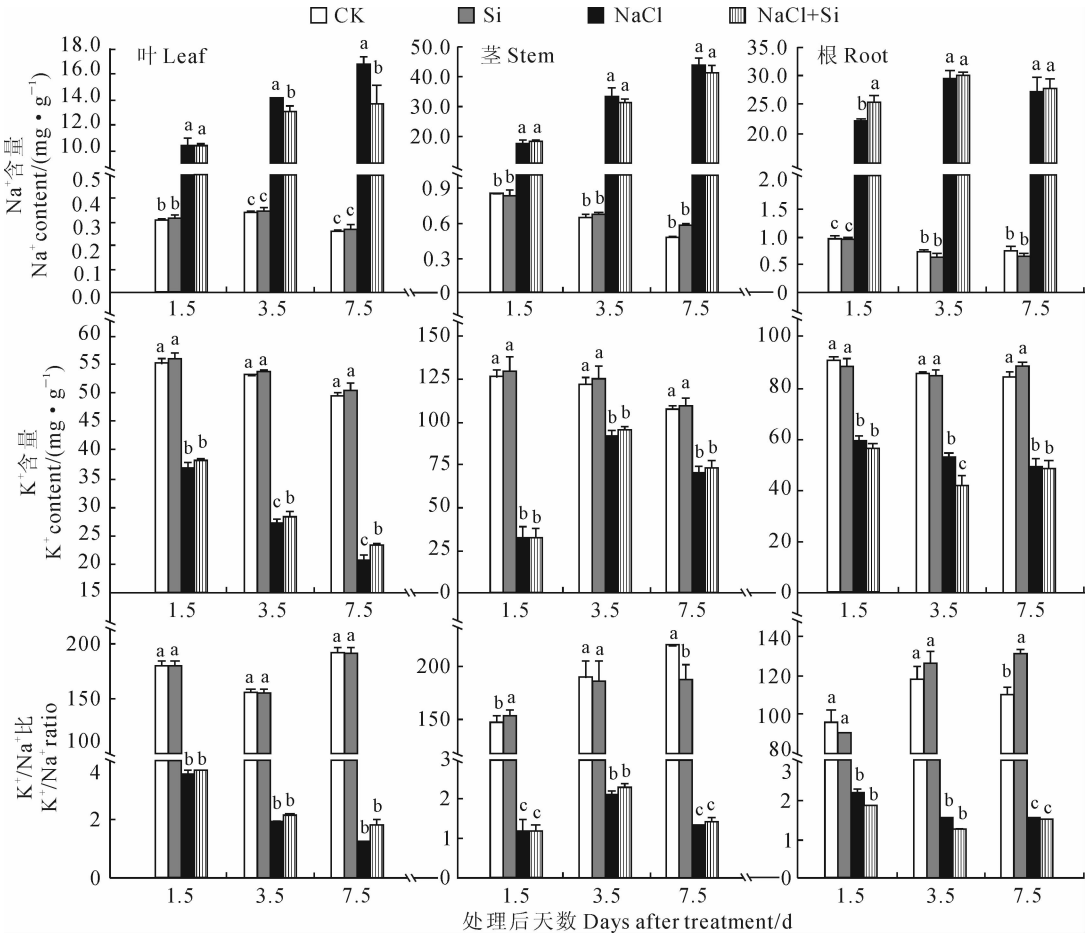

图 3 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗离子吸收的影响

Fig. 3 Effects of NaCl and silicon on ion absorption of cucumber seedlings

Na^+、K^+含量较叶和根中高，盐胁迫处理后，幼苗茎和根各离子含量及 K^+/Na^+ 比变化趋势与叶中相似，但硅加盐处理与单独盐处理间并无显著差异。另外，整株黄瓜幼苗的 Na^+ 含量随着盐处理时间的延长而逐渐累积增加，但在胁迫处理后 7.5 d，硅加盐处理仍比单独盐处理低 5.1%。

以上结果说明，正常条件下，施加硅对黄瓜幼苗中 Na^+ 和 K^+ 含量无明显影响，但加硅显著缓解了盐胁迫下幼苗叶片中 Na^+ 累积和 K^+ 的流失，改变了 K^+/Na^+ 比，减轻了离子毒害作用，从而一定程度上改善了黄瓜幼苗生长状况。

3　讨　论

生物量是植物抗盐性评价的一个重要指标，是植物对盐胁迫响应的综合体现[14]。本试验表明，施硅对非盐胁迫条件下黄瓜幼苗生长情况无明显影响，但能显著缓解盐胁迫对其生长的抑制作用，表明硅提高了黄瓜幼苗的抗盐能力。

高浓度的盐主要对植物造成渗透胁迫和离子毒害两方面影响[15]。在盐胁迫初期，高浓度的盐产生的渗透胁迫而导致植物吸水困难是抑制植物生长的主要因素[1]，植物通过累积渗透调节物质降低渗透势，提高细胞保水力来应对渗透胁迫[16]。可溶性糖和脯氨酸是植物累积的两种重要渗透调节物质[12,17]。本研究中，盐胁迫下施硅显著提高黄瓜幼苗叶片的可溶性糖含量，这与在水稻[18]、玉米[19]等植物中研究结果一致；其中，硅加盐处理大幅提高了黄瓜幼苗叶片的蔗糖含量，而在正常条件下葡萄糖是黄瓜叶片主要可溶性糖，这与在高粱[12]中的研究结果相似。但目前对植物在环境胁迫下脯氨酸积累的生理机制仍存在争议。有研究表明，脯氨酸在盐胁迫下大量积累是植物对盐渍逆境的一种适应，对提高植物抗盐性起着重要作用[20]；但也有研究认为盐胁迫下脯氨酸积累量更适于作为胁迫伤害指标[21]。本试验中，加硅显著降低了盐胁迫下黄瓜幼苗叶片的脯氨酸累积，这支持脯氨酸作为盐胁迫伤害程度的指标的观点；虽然本研究中硅加盐处理显著提高了黄瓜幼苗叶片的可溶性糖含量，但是硅加盐处理的叶片渗透势反而高于单独盐处理，表明渗透调节不是硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的主要原因。

在盐胁迫条件下，硅能减少植物中 Na^+ 的含量已得到广泛证实[5,22]。本实验中加硅降低了盐胁迫下黄瓜叶片中 Na^+ 的含量，表明硅能通过减轻离子毒害提高黄瓜的抗盐能力。前人的研究表明，硅可以通过沉积在叶表皮细胞壁上减少蒸腾，从而通过减少蒸腾流来减少 Na^+ 的吸收[23]，或者通过沉积在根系表面减少 Na^+ 的质外体运输来减少对 Na^+ 的吸收和向地上部分的运输[5]。本研究中，硅加盐处理黄瓜幼苗的蒸腾速率高于单独盐处理，说明硅可能是通过沉积在根表面来减少对 Na^+ 的吸收。

此外，增加吸水也是缓解高盐引起的渗透胁迫和离子毒害的一个重要途径。研究表明，盐胁迫下维持细胞较高的含水量对植物的生长至关重要，水可以保持细胞膨压，维持亚细胞结构的稳定，有利于渗透调节物质的累积[24]。本研究中硅加盐处理黄瓜植株叶片能维持较高的光合速率和叶片含水量，说明加硅增加了植株的水分吸收，改善了其水分状况，这也可能是硅提高黄瓜抗盐能力的重要途径之一，类似的结果在番茄[4]中也有报道，但是其如何增加吸收的机理还需进一步研究。

综上所述，本研究中加硅处理的黄瓜幼苗主要通过以下两个方面来提高其抗盐能力：一是加硅处理减少了盐胁迫下黄瓜幼苗对 Na^+ 的吸收，减少其在叶片中的累积，减轻了离子毒害，从而维持较高的叶绿素含量，保证了光合作用的进行；二是加硅可能增加黄瓜幼苗根系对水分的吸收，从而在盐胁迫下维持叶片中较高的水分含量和蒸腾速率，较高的叶片含水量进一步稀释了幼苗叶片中 Na^+ 浓度，并缓解了盐胁迫对幼苗生长代谢的抑制。在本研究中，虽然硅加盐处理也使黄瓜幼苗叶片中可溶性糖含量大幅增加，但是硅加盐处理的幼苗叶片渗透势高于单独盐处理，说明渗透调节不是硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的主要途径。

参考文献：

[1] MUNNS R, TESTER M. Annual Review of Plant Biology[M]. Palo Alto: Annual Reviews, 2008: 651－681.

[2] LIANG Y CH, SUN W CH, ZHU Y G, *et al*. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 422－428.

[3] LIANG Y CH, ZHANG W H, CHEN Q, *et al*. Effect of exogenous silicon (Si) on H^+-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, **57**(3): 212－219.

[4] ROMERO-ARANDA M R, JURADO O, CUARTERO J. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2006, **163**(8): 847－855.

[5] GONG H J, RANDALL D P, FLOWERS T J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow[J]. *Plant Cell and Environment*, 2006, **29**(10): 1 970－1 979.

[6] ZHU Z J, WEI G Q, LI J, *et al*. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. *Plant Science*, 2004, **167**(3): 527－533.

[7] NIKOLIC M, NIKOLIC N, LIANG Y CH, *et al*. Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species[J]. *Plant Physiology*, 2007, **143**(1): 495－503.

[8] FAN H F, DU C X, GUO S R. Nitric oxide enhances salt tolerance in cucumber seedlings by regulating free polyamine content[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 86: 52－59.

[9] SONOBE K, HATTORI T, AN P, *et al*. Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leaf water relation in sorghum grown with or without silicon under water stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, **32**(3): 433－442.

[10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 47－231.

[11] JONES M M, TURNER N C. Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits[J]. *Plant Physiology*, 1978, **61**(1): 122－126.

[12] YIN L N, WANG S W, LI J Y, *et al*. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of Sorghum bicolor[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(11): 3 099－3 107.

[13] MATSUSHITA N, MATOH T. Characterization of Na^+ exclusion mechanisms of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, **83**(1): 170－176.

[14] SAIRAM R K, RAO K V, SRIVASTAVA G. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration[J]. *Plant Science*, 2002, **163**(5): 1 037－1 046.

[15] GORHAM J, JONES R W, MCDONNELL E. Biosalinity in Action Bioproduction with Saline Water[M]. Dordrecht: Springer, 1985: 15－40.

[16] LEE G, CARROW R N, DUNCAN R R, *et al*. Synthesis of organic osmolytes and salt tolerance mechanisms in *Paspalum vaginatum*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **63**(1): 19－27.

[17] MING D F, PEI Z F, NAEEM M S, *et al*. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2012, **198**(1): 14－26.

[18] PEI Z F, MING D F, LIU D, *et al*. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, **29**(1): 106－115.

[19] SONOBE K, HATTORI T, AN P, *et al*. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, **34**(1): 71－82.

[20] NAYYAR H, WALIA D P. Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, **46**(2): 275－279.

[21] DELACERDA C F, CAMBRAIA J, OLIVA M A, *et al*. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, **49**(2): 107－120.

[22] WANG X SH, HAN J G. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**(3): 278－285.

[23] GAO X P, ZOU CH Q, WANG L J, *et al*. Silicon improves water use efficiency in maize plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, **27**(8): 1 457－1 470.

[24] SINGH V, PALLAGHY C K, SINGH D. Phosphorus nutrition and tolerance of cotton to water stress: II. Water relations, free and bound water and leaf expansion rate[J]. *Field Crops Research*, 2006, **96**(2): 199－206.