

# 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根系质膜、液泡膜酶活性的影响

姚秋菊<sup>1</sup>, 张晓伟<sup>1</sup>, 吕中伟<sup>1</sup>, 魏国强<sup>2</sup>

(1. 河南省农业科学院 园艺研究所, 河南 郑州 450002; 2. 河南省农业厅, 河南 郑州 450002)

**摘要:**研究硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长及根细胞质膜  $H^+$ -ATPase、液泡膜  $H^+$ -ATPase、 $H^+$ -PPase 和  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性的影响。结果表明:盐胁迫严重抑制黄瓜幼苗生长,根细胞质膜  $H^+$ -ATPase、液泡膜  $H^+$ -ATPase、 $H^+$ -PPase 和  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性明显降低。硅处理明显提高盐胁迫黄瓜根液泡膜  $H^+$ -ATPase、 $H^+$ -PPase、 $Ca^{2+}$ -ATPase 活性,一定程度上维持了液泡膜质子泵活性,有效地防御了细胞质酸化,这可能是硅提高黄瓜耐盐性的一个重要因素。

**关键词:**盐胁迫;黄瓜;硅;质膜  $H^+$ -ATPase;液泡膜  $H^+$ -ATPase;液泡膜  $H^+$ -PPase; $Ca^{2+}$ -ATPase

中图分类号:S143.7<sup>+</sup>1;S642.201 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2008)06-0125-05

## Effects of Silicon on the Activities of Plasmalemma $H^+$ -ATPase, Tonoplast $H^+$ -ATPase and $H^+$ -PPase in Cucumber Seedlings under Salt Stress

YAO Qiu-ju<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-wei<sup>1</sup>, LV Zhong-wei<sup>1</sup>, WEI Guo-qiang<sup>2</sup>

(1. Institute of Horticulture, Henan Academy of Agriculture Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2. The Agricultural Department of Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The effects of exogenous Si on the changes of activities of the plasma membrane  $H^+$ -ATPase and tonoplast  $H^+$ -ATPase,  $H^+$ -PPase and  $Ca^{2+}$ -ATPase were investigated in roots of salt-stressed cucumber seedlings (*Cucumis sativus* L.). The results showed that salt stress significantly decreased the plant growth and the activities of plasma membrane  $H^+$ -ATPase and tonoplast  $H^+$ -ATPase,  $H^+$ -PPase and  $Ca^{2+}$ -ATPase. Addition of Si markedly increased the activities of plasma membrane  $H^+$ -ATPase and tonoplast  $H^+$ -ATPase,  $H^+$ -PPase and  $Ca^{2+}$ -ATPase under salt stress, maintained the activity of proton pumping of tonoplast to some extent and defensed effectively the cytoplasmic acidizing, which may be the important factor for improving the salt tolerance of cucumber by Si.

**Key words:** Salt stress; Cucumber (*Cucumis sativus* L.); Silicon; Plasma membrane  $H^+$ -ATPase; Tonoplast  $H^+$ -ATPase; Tonoplast  $H^+$ -PPase;  $Ca^{2+}$ -ATPase

盐害是植物逆境伤害中的主要因素之一。盐胁迫直接或间接干扰植物细胞内的各种代谢过程<sup>[1]</sup>,膜系统是植物盐害的主要敏感部位<sup>[2]</sup>。盐胁迫对质膜  $H^+$ -ATPase、液泡膜  $H^+$ -ATPase 和  $H^+$ -PPase 和膜脂组成有较大影响。植物质膜  $H^+$ -ATPase (P 型  $H^+$ -ATPase, P-ATPase) 和植物液泡膜上的 2 类质子泵  $H^+$ -ATPase (V 型  $H^+$ -ATPase, V-ATPase) 和  $H^+$ -PPase (V 型  $H^+$ -PPase, V-PPase), 共同致力于跨质膜、液泡膜  $H^+$  的建立,为控制细胞伸长生长、阴阳离子、糖、氨

基酸及其他小分子物质的主动运输提供能量。有关盐胁迫方面的研究表明,植物为了避免或减轻高浓度的盐害,或者将盐离子泵出细胞外,或者将盐离子区域化到液泡中,在此过程中,质膜  $H^+$ -ATPase、液泡膜  $H^+$ -ATPase 和  $H^+$ -PPase 起着非常重要的作用<sup>[3]</sup>。

章文华等<sup>[4]</sup>报道,在盐胁迫 9 d 时,大麦、小麦根系质膜和液泡膜  $H^+$ -ATPase 均有明显下降。豌豆根液泡膜  $H^+$ -ATPase 在 100 mmol/L 和 200 mmol/L NaCl 处理 1 d 时活性没有变化,第 3 天活性

收稿日期:2008-02-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30230250)

作者简介:姚秋菊(1973-),女,河南浚县人,助理研究员,硕士,主要从事蔬菜生理及新品种选育研究工作。

通讯作者:魏国强(1976-),男,河南偃师人,博士,主要从事蔬菜生理生化及新技术开发研究工作。

下降 20%,而 250 mmol/L NaCl 处理 1 d 引起酶活性降低约 25%<sup>[5]</sup>。盐处理 1~3 h,绿豆液泡膜  $H^+$ -ATPase 活性迅速增加,处理 12 h 后,活性下降;盐胁迫明显抑制绿豆根液泡膜  $H^+$ -PPase 活性<sup>[6]</sup>。向日葵在低浓度的盐胁迫后,液泡膜  $H^+$ -ATPase 和  $H^+$ -PPase 的活性明显增加,随着盐浓度的提高,出现下降的趋势<sup>[7]</sup>。赵利辉等<sup>[8]</sup>用 NaCl 处理 20 d 龄的大麦幼苗后,耐盐品种根液泡膜  $H^+$ -PPase 活性升高,而不耐盐品种则下降。NaCl 对离体膜微囊液泡膜  $H^+$ -PPase 活性有抑制作用。

设施栽培中由于施肥量大、地温高、蒸发旺盛、无雨水淋溶,盐分不易流失,容易引起土壤的次生盐渍化。硅是植物生长的有益元素<sup>[9]</sup>。研究证实,在缺硅的土壤上施用硅肥可显著促进作物生长,提高作物抗病、抗倒伏能力,促进作物抗铁、锰、铝等重金属毒害<sup>[8,9]</sup>。最近的研究还表明,适量加硅可显著提高作物的抗盐性,降低作物盐害<sup>[12,13]</sup>。本试验以当前我国设施栽培的主要蔬菜作物黄瓜为材料,研究硅对盐胁迫下幼苗根系质膜  $H^+$ -ATPase、液泡膜  $H^+$ -ATPase、 $H^+$ -PPase 和  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性的影响以探讨硅提高黄瓜耐盐性的生理机制。

## 1 材料和方法

### 1.1 试材及处理

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 选用津研 4 号,种子发芽后播种于蛭石中,当第 1 片真叶露尖后,挑选生长一致的幼苗移入带孔盖板的 10 L 塑料箱中,每箱 9 株,装入 8 L 用去离子水配制的完全营养液 (pH 6.2),完全营养液的组成为:Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 5.0 mmol/L, KNO<sub>3</sub> 5.0 mmol/L, NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1.0 mmol/L, MgSO<sub>4</sub> 2.0 mmol/L, Fe-EDTA 70.0  $\mu$ mol/L, MnSO<sub>4</sub> 10.0  $\mu$ mol/L, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 50.0  $\mu$ mol/L, ZnSO<sub>4</sub> 0.7  $\mu$ mol/L, CuSO<sub>4</sub> 0.2  $\mu$ mol/L, (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> 0.01  $\mu$ mol/L。第 2 片真叶完全展开后进行处理,设置 CK (不加硅和氯化钠);

Si 加硅不加氯化钠 (1.0 mmol/L Si); NaCl 不加硅加氯化钠 (50 mmol/L NaCl); Si + NaCl 加硅加氯化钠 (1.0 mmol/L Si + 50 mmol/L NaCl) 4 个处理,每个处理重复 3 次。不加硅处理中加入 1.7 mmol/L 的硫酸钾溶液,以平衡钾离子。试验期间,每 3 d 调 1 次 pH 值,6 d 更换 1 次营养液并全天通气,白天气温 22~28℃,夜间 17~20℃。分别于处理后 5, 10 d 取样。

### 1.2 质膜、液泡膜微囊的分离

所有操作过程均在 0~4℃ 下进行。取 10 g 幼根,加入 2 倍 (m/V) 体积预冷的研磨提取缓冲液

(HEPES-Tris 60 mmol/L, pH 7.5, 蔗糖 300 mmol/L, EDTA 5 mmol/L, EGTA 0.5 mmol/L, DTT 2 mmol/L, 1.5% PVP), 冰浴研磨。研磨液经 4 层纱布过滤, 8 000  $\times$ g 离心 20 min。取上清液,置于不连续蔗糖梯度 (含 45%, 33% 和 15% (m/V) 蔗糖溶液), 经 80 000  $\times$ g 梯度离心 2.5 h。分别取 15%~33% 梯度间和 33%~45% 梯度间的两层界面处离心沉淀物各 5 mL。将 15%~33% 梯度间取出物用梯度离心缓冲液 (HEPES-Tris 20 mmol/L, pH 7.5, EDTA 5 mmol/L, EGTA 0.5 mmol/L) 稀释至 2 倍体积,而 33%~45% 梯度间取出物再加 3 倍体积的梯度离心缓冲液至 4 倍体积。震荡混匀后 100 000  $\times$ g 离心 1 h。弃上清液。沉淀用 0.5 mL 悬浮液 (HEPES-Tris 20 mmol/L, pH 7.5, 蔗糖 300 mmol/L, EGTA 0.5 mmol/L, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O mmol/L) 悬浮,即分别得液泡膜和质膜微囊。

### 1.3 质膜 $H^+$ -ATPase 活性的测定

参照郝鲁宁和余叔文<sup>[14]</sup>的方法。0.5 mL 反应体系中含 HEPES-Tris (pH 6.5) 30 mmol/L, MgSO<sub>4</sub> 3 mmol/L, KCl 50 mmol/L, NaN<sub>3</sub> 5  $\mu$ mol/L, NaMoO<sub>4</sub> 1 mmol/L 和 0.03% Triton X-100、膜蛋白 10~20  $\mu$ g。用 50  $\mu$ L 30 mmol/L ATP-Tris (pH 7.5) 启动反应, 37℃ 下反应 30 min, 用钼酸铵-硫酸终止反应, 加入 10% 抗坏血酸试剂显色 40 min。在 660 nm 波长比色。由于质膜 ATPase 对 Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> 敏感, 酶活性测定时用加 Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> 2.5 mmol/L 的反应体系作参比, 并用未加 Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> 所测得的酶活性减去参比活性所得差值表示质膜  $H^+$ -ATPase 活性。用 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 作标准曲线, 酶活性用单位时间内单位酶蛋白水解无机磷的量表示。每处理重复 3 次, 取平均值。

### 1.4 液泡膜 $H^+$ -ATPase 活性测定

参照何龙飞<sup>[15]</sup>的方法。0.5 mL 反应体系中含 HEPES-Tris (pH 7.5) 30 mmol/L, MgSO<sub>4</sub> 3 mmol/L, KCl 50 mmol/L, NaN<sub>3</sub> 0.5 mmol/L, Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> 0.1 mmol/L, 钼酸铵 0.1 mmol/L, 膜蛋白 10~20  $\mu$ g, 用 50  $\mu$ L 30 mmol/L ATP-Tris (pH 7.5) 启动反应。由于液泡膜  $H^+$ -ATPase 对 KNO<sub>3</sub> 敏感, 酶活性测定时以添加 KNO<sub>3</sub> 50 mmol/L 的反应体系作对照, 并以未加 KNO<sub>3</sub> 所测得的酶活性减去对照所得差值表示液泡膜  $H^+$ -ATPase 的活性。酶反应过程及活性测定与质膜  $H^+$ -ATPase 相同。

### 1.5 液泡膜 $Ca^{2+}$ -ATPase 活性测定

参照  $H^+$ -ATPase 反应体系略作修改。去掉 3 mmol/L MgSO<sub>4</sub>, 加与不加 CaCl<sub>2</sub> 引起的酶活之差为  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性。其后步骤同  $H^+$ -ATPase 活性

测定。

1.6 液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase 活性的测定

参照何龙飞<sup>[15]</sup>的方法。0.5 mL 反应体系中含 HEPES-Tris(pH 8.0) 60 mmol/L ,MgSO<sub>4</sub> 3 mmol/L ,KCl 100 mmol/L ,EDTA 0.5 mmol/L ,NaN<sub>3</sub> 0.5 mmol/L , Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> 0.1 mmol/L ,钼酸铵 0.5 mmol/L ,膜蛋白 10 ~ 20 μg ,用 50 μL 30 mmol/L 焦磷酸钠 (pH 8.0) 启动反应。酶反应过程及活性测定与质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 相同。

1.7 膜蛋白质含量的测定

按 Bradford<sup>[16]</sup>的方法 ,以 BSA 为标准蛋白。

1.8 相对生长速率( RGR) 的测定

按 Matsushita 等<sup>[17]</sup>的方法测定。在处理第 5 , 10 天分别取 10 株 ,剪取地上部和根系 ,70 ℃ 烘干至

恒重 ,分别称重 ,W<sub>1</sub> 表示第 5 天地上部、根系干质量 ,W<sub>2</sub> 表示第 10 天地上部、根系干质量 ,相对生长速率按下式计算 :RGR = (W<sub>2</sub> - W<sub>1</sub>) / (T<sub>2</sub> - T<sub>1</sub>) ,T<sub>2</sub> 和 T<sub>1</sub> 分别表示 2 次测定的时间(d) 。

2 结果与分析

2.1 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长状况的影响

由表 1 可知 ,盐胁迫显著抑制黄瓜幼苗生长 ,NaCl 处理植株地上部和根系的相对生长速率仅为 CK 的 44.8 % ,46.9 % ;Si 处理显著提高盐胁迫黄瓜的生长量。在不加盐条件下 ,硅对植株的生长有一定的促进作用 ,但地上部和根系的相对生长速率与 CK 差异不显著。

表 1 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗地上部和根系相对生长速率的影响

| 处理<br>Treatment | 地上部 Shoot    |                      | 根系 Root     |                      |
|-----------------|--------------|----------------------|-------------|----------------------|
|                 | 生长量/ (g/ d)  | 相对生长率/ %             | 生长量/ (g/ d) | 相对生长速率/ %            |
|                 | Growth shoot | Relative growth rate | Growth root | Relative growth rate |
| CK              | 0.29 a       | 100.0                | 0.032 a     | 100.0                |
| Si              | 0.31 a       | 106.9                | 0.033 a     | 103.1                |
| NaCl            | 0.13 b       | 44.8                 | 0.015 c     | 46.9                 |
| Si + NaCl       | 0.20 b       | 69.0                 | 0.028 b     | 87.5                 |

注 :小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。  
Note :Small letters indicates significant differences at 0.05 level.

2.2 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根质膜、液泡膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性的影响

由图 1 可知 ,NaCl 处理显著降低黄瓜幼苗根质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 的活性 ,并随胁迫时间的延长而明显下降 ,Si + NaCl 处理显著提高盐胁迫黄瓜根质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性。Si 处理第 5 天时 ,根质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性与 CK 无明显差异 ,但第 10 天时 ,酶活性明显高于 CK。

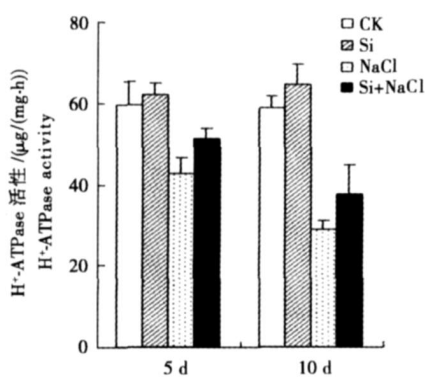


图 1 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性的影响

Fig.1 Effects of Si on the activity of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase of cucumber seedlings under salt stress

从图 2 可知 ,NaCl 处理显著降低黄瓜幼苗根液泡膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性 ,酶活性随胁迫时间的延长明

显降低 ,Si + NaCl 处理显著提高盐胁迫黄瓜根液泡膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性。Si 处理根液泡膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性与 CK 无明显差异。

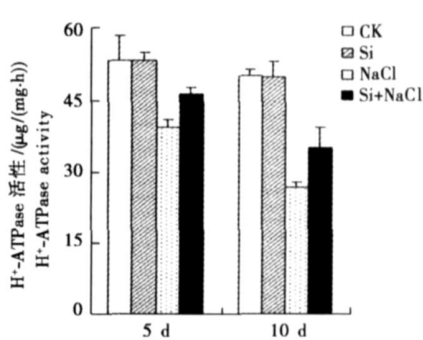


图 2 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根液泡膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性的影响

Fig.2 Effects of Si on the activity of tonoplast H<sup>+</sup>-ATPase of cucumber seedlings under salt stress

2.3 硅对盐胁迫黄瓜幼苗根液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase、Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活性的影响

由图 3 可知 ,在第 5 天时 ,NaCl 处理显著降低黄瓜幼苗根液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase 活性 ,Si + NaCl 处理提高了盐胁迫植株根液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase 活性 ;随胁迫时间的延长 ,在第 10 天时 ,NaCl 处理植株根液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase 活性明显升高 ,但仍小于 CK ,无显著差异 ;Si + NaCl 处理植株根液泡膜 H<sup>+</sup>-PPase 活性高于

NaCl 处理;Si 处理的酶活性与 CK 无明显差异。

从图 4 可知, NaCl 处理显著降低黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性,且酶活性随胁迫时间的延长明显降低;Si + NaCl 处理显著提高盐胁迫黄瓜根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性;Si 处理根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性与 CK 无明显差异。

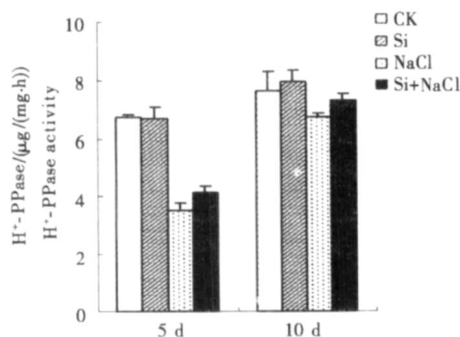


图 3 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性的影响

Fig. 3 Effect of Si on the activity of tonoplast  $\text{H}^+$ -PPase of cucumber seedlings under salt stress

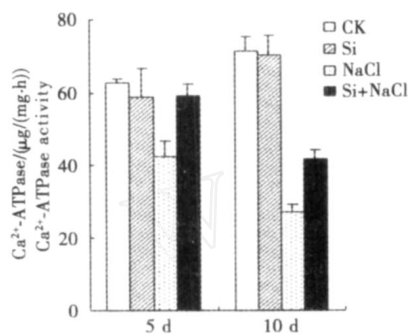


图 4 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的影响

Fig. 4 Effects of Si on the activity of tonoplast  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase of cucumber seedlings under salt stress

### 3 结论与讨论

质膜  $\text{H}^+$ -ATPase、液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 和  $\text{H}^+$ -PPase 是形成跨膜质子电化学梯度,产生质子驱动力的主要酶类。依赖质子驱动力,通过  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ 、 $\text{K}^+/\text{H}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+$  交换等途径,植物细胞进行主动的离子吸收及运输<sup>[18]</sup>。

质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 为选择性吸收  $\text{K}^+$ 、拒  $\text{Na}^+$  提供动力<sup>[19]</sup>。Liang 报道<sup>[13]</sup>硅显著提高盐胁迫大麦根质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性,本试验表明,盐胁迫明显抑制黄瓜幼苗根质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性,适当浓度的硅处理可提高幼苗根质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性,可能为盐胁迫下黄瓜根系对离子的选择性吸收提供了动力<sup>[4]</sup>,进而降低根系对  $\text{Na}^+$  吸收或促进  $\text{Na}^+$  的排出,使整株植物的平均  $\text{Na}^+$  量明显下降。

液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 和液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 是结合

在同一膜上的 2 类不同的酶。2 种酶平行泵运  $\text{H}^+$  进入液泡,两者的作用地位并不固定。许多研究已证实在正常生理条件下,液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 在维持跨膜 pH 梯度方面是占主要作用的质子泵。液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 只是泵运质子的辅助系统,但在特定的发育阶段和特定条件如缺氧和盐胁迫下,液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 对质子泵运的作用加强<sup>[20]</sup>。本研究表明,硅显著增强盐胁迫黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性,有研究表明,液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性增强,为液泡膜的  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  交换提供动力,使根系吸收的  $\text{Na}^+$  较多地滞留在根部,控制了向地上部的运输<sup>[4]</sup>。Nakamura 等报道<sup>[6]</sup>在 NaCl 胁迫下,细胞质中  $\text{Na}^+$  浓度的增加抑制了豌豆根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性,使液泡液碱性化,导致细胞伤害,体外试验也证明  $\text{Na}^+$  显著抑制液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性。王宝山等<sup>[21]</sup>用 200 mmol/L NaCl 处理小麦 3 d,发现小麦根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性显著下降。本试验结果表明,在盐处理第 5 天时,黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性显著降低,第 10 天时有所回升,但仍明显小于 CK;但总的看来,盐胁迫降低了黄瓜根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性,硅处理缓解了盐胁迫植株根液泡膜  $\text{H}^+$ -PPase 活性的下降程度。

$\text{Ca}^{2+}$  在植物信号转导过程中具有第二信使的作用,几乎所有不同的胞外刺激信号都能引起胞内钙离子浓度的变化。液泡膜上具有比较完善的  $\text{Ca}^{2+}$  转运系统<sup>[22]</sup>,使液泡成为植物细胞的主要钙库,行使调节胞质  $\text{Ca}^{2+}$  浓度,引起细胞一系列的生理生化反应的重要功能。已有研究指出, $\text{Ca}^{2+}$  和 CaM 可以部分解除胁迫对液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 的抑制作用<sup>[22]</sup>。所以  $\text{Ca}^{2+}$  作为一个胞内信号源,既可通过液泡膜上的  $\text{Ca}^{2+}$  通道向胞质释放  $\text{Ca}^{2+}$ ,又可通过液泡膜上的  $\text{Ca}^{2+}/2\text{H}^+$  反向运输蛋白和  $\text{Ca}^{2+}$  泵从胞质回收  $\text{Ca}^{2+}$ 。而这些生理行为又都涉及了液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 的活性变化。所以,环境因子通过  $\text{Ca}^{2+}$  传递胁迫信号而引起液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 对逆境的积极应答是应该加以肯定的。本试验结果表明,盐胁迫明显抑制黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性,外源硅可提高幼苗根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性。盐胁迫降低黄瓜幼苗根液泡膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性,同时伴随着液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性的急剧下降,从而使胞质内  $\text{H}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的稳衡被打破,影响了细胞对胁迫信号的感受,造成生理代谢紊乱。硅处理提高盐胁迫黄瓜根液泡膜  $\text{H}^+$ -ATPase、 $\text{H}^+$ -PPase 和  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性,在一定程度上维持了盐胁迫黄瓜根液泡膜质子泵活性,且避免高浓度  $\text{Ca}^{2+}$  对胞质的毒

害,最终提高黄瓜的耐盐性。

### 参考文献:

- [1] 陈海燕,崔香菊,陈熙,等. 盐胁迫及  $\text{La}^{3+}$  对不同耐盐性水稻根中抗氧化酶及质膜  $\text{H}^{+}$ -ATPase 的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(7): 1086 - 1093.
- [2] 米海莉,郑国琦,许兴,等. NaCl 胁迫对宁夏枸杞幼苗根系质膜和液泡膜  $\text{H}^{+}$ -ATPase 活性的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 24(4): 0748 - 0752.
- [3] Mimura T. Homeostasis and transport of inorganic phosphate in plants[J]. Plant Cell Physiol, 1995, 36(1): 1 - 7.
- [4] 章文华,刘友良. 盐胁迫下钙对大麦和小麦离子吸收分配及酶活性的影响[J]. 植物学报, 1993, 35(6): 435 - 440.
- [5] Yu H F, Chen J, Wang X C. Effects of salt stress on the activity and the amount of tonoplast  $\text{H}^{+}$ -ATPase from pea roots[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(6): 586 - 591.
- [6] Nakamura Y, Kasano K, Shimamoto N, et al. Stimulation of the extrusion of protons and  $\text{H}^{+}$ -ATPase activities with the decline in pyrophosphatase activity of the tonoplast in intact mung bean roots under high NaCl stress and its relation to external levels of  $\text{Ca}^{2+}$  [J]. Plant Cell Physiol, 1992, 33: 139 - 149.
- [7] Ballesteros E, Donaire J P, Belver A. Effects of salt stress on  $\text{H}^{+}$ -ATPase and  $\text{H}^{+}$ -PPase activities of tonoplast-enriched vesicles isolated from sunflower roots[J]. Physiol Plant, 1996, 97: 259 - 268.
- [8] 赵利辉,罗庆云,章文华,等. 大麦幼苗根系液泡膜质子泵对苗的发育和盐胁迫的响应[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(2): 95 - 97.
- [9] Epstein E. Silicon [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1999, 50: 641 - 664.
- [10] Galvez L, Clark B, Gourley L M, et al. Silicon interaction with manganese and aluminum toxicity in sorghum[J]. Plant Nutr, 1987, 10: 1139 - 1147.
- [11] Cocker KM, Evans D E, Hodson MJ. The amelioration of aluminum toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in planta mechanism[J]. Physiol Plant, 1998, 104: 608 - 614.
- [12] Ahmad R, Zaheer S H, Ismail S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Sci, 1992, 85: 43 - 50.
- [13] Liang Y C. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress[J]. Plant and Soil, 1999, 29: 217 - 224.
- [14] 郝鲁宁,余叔文. 大麦根细胞质膜  $\text{Ca}^{2+}$  转运系统对盐胁迫的响应[J]. 植物生理学报, 1993, 19(6): 275 - 284.
- [15] 何龙飞,沈振国,刘友良. 铝胁迫对小麦根系液泡膜 ATP 酶、焦磷酸酶活性和膜脂组成的效应[J]. 植物生理学报, 1999, 25(4): 350 - 356.
- [16] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248 - 254.
- [17] Matsushita N, Matoh T. Characterization of  $\text{Na}^{+}$  exclusion mechanism of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants[J]. Physiol Plant, 1991, 83: 170 - 176.
- [18] Braun Y, Hassidim M, Lerner H R, et al. Evidence for a  $\text{Na}^{+}/\text{H}^{+}$  antiporter in membrane vesicles isolated from roots of the halophyte *Atriplex nummularia* [J]. Plant Physiol, 1988, 87: 104 - 108.
- [19] 郑青松,王仁雷,刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响[J]. 植物生理学报, 2001, 27(4): 325 - 330.
- [20] Carystinos G D, MacDonald H R, Monroy A F, et al. Vacuolar  $\text{H}^{+}$ -translocating pyrophosphatase is induced by anoxia or chilling in seedlings of rice[J]. Plant Physiol, 1995, 108: 641 - 649.
- [21] 王宝山,赵可夫. NaCl 胁迫对玉米根质膜  $\text{H}^{+}$  分泌和氧化还原系统的影响[J]. 植物学报, 1997, 39(4): 341 - 346.
- [22] 夏朝晖,陈珈. 胁迫反应中的液泡膜  $\text{H}^{+}$ -ATPase[J]. 植物生理学通讯, 1998, 34(2): 168 - 174.