

## 低温胁迫下乌塌菜对外源硅的生理响应

吴燕<sup>1\*</sup>, 高青海<sup>2</sup>

安徽科技学院<sup>1</sup> 城建与环境学院农业资源利用重点学科, <sup>2</sup> 生命科学学院, 安徽凤阳 233100

**摘要:** 在土培条件下, 研究了低温胁迫下不同浓度的硅酸钠对乌塌菜幼苗生长及生理特性的影响。结果表明, 低温胁迫抑制了乌塌菜的生长, 降低了干物质的积累。外施硅可以显著提高乌塌菜叶片 SOD、POD、CAT 活性, 迅速积累大量的脯氨酸和可溶性蛋白, 从而有效缓解低温胁迫对乌塌菜幼苗的影响, 尤其是外施  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SiO}_3$  处理 15 d 时, 乌塌菜干物质积累达到了正常生长植株的 86.2%。但随着施用硅浓度的增加, 缓解效果则降低。

**关键词:** 乌塌菜; 低温胁迫; 硅; 生理响应

## Physiological Responses of Savoy to Exogenous Silicon under Chilling Stress

WU Yan<sup>1\*</sup>, GAO Qing-Hai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Urban Construction and Environment Sciences, Key Subject of Agricultural Resources Utilization; <sup>2</sup>College of Life Sciences, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China

**Abstract:** The effects of different silicon concentrations on growth and physiological characteristics of savoy were investigated under chilling stress. The results showed that the growth of savoy was inhibited and dry matter accumulation was decreased under chilling stress. Exogenous silicon could increased the activities of superoxide dismutase, peroxidase and catalase of savoy leaves, and quickly accumulated lots of proline and soluble protein, which efficiently alleviated the effects of chilling stress on savoy. Especially, on the 15th day under chilling stress, dry matter accumulation of savoy reached to 86.2% of plants grown under normal condition, but the alleviated effects decreased with added higher silicon.

**Key words:** savoy; chilling stress; silicon; physiological response

乌塌菜是十字花科芸薹属芸薹种白菜亚种的一个变种, 因为富含维生素C而受到人们的喜爱(舒英杰等 2005)。乌塌菜一般在晚秋或冬季进行栽培, 尽管乌塌菜喜凉爽气候, 但在温度较低的情况下, 其生长也受到低温胁迫, 从而抑制其正常的生长(张渝洁 2009)。近年来研究发现, 硅是植物生长的有益元素(Ma 和 Yamaji 2006), 硅肥不仅可以显著促进作物生长, 而且通过提高作物超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等保护酶活性来提高其抗盐(Zhu 等 2004)、抗病虫害、抗倒伏的能力, 缓解铁、镉、锰、铝等重金属对作物的毒害, 进而有效提高农作物质量和产量(侯彦林等 2005)。目前有关硅对乌塌菜生长影响方面的研究较少, 而且在低温胁迫下, 硅对乌塌菜生理特性是否有影响, 还未见报道。为此, 本研究以乌塌菜为材料, 探讨低温胁迫下, 硅对乌塌菜幼苗生长及生理特性的缓解作用, 以期硅在乌塌菜上的应用, 尤其是缓解

低温胁迫提供理论依据。

### 材料与方法

乌塌菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* L. var. *rosularis* Tsen et Lee)种子购自凤阳县种子公司, 品种为‘合肥黄心乌’。

试验于 2009 年 10~12 月在安徽科技学院生命科学学院蔬菜培养基地进行。首先精选饱满的种子进行育苗, 方法同常规。乌塌菜幼苗长至 4~5 叶时, 选择大小一致的乌塌菜幼苗移入营养钵(10 cm×10 cm)中。低温处理方法如下, 定植 8 d 后, 先在温度为 10 °C (昼)/5 °C (夜)的培养箱中预处理

收稿 2010-04-19 修定 2010-06-13

资助 安徽省教育厅自然科学基金(KJ2010B060)和安徽科技学院人才引进项目(ZRC2009250)。

\* 通讯作者(E-mail: wuyan109@126.com; Tel: 0550-6732036)。

2 d, 再置于温度为 4 °C (昼)/0 °C (夜), 光强为 60  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光周期为 12 h/12 h 的培养箱进行低温处理。本试验共设 5 个处理, 分别为 CK (20 °C 常温, 无喷施), T1 (低温, 喷清水), T2 (低温, 喷 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), T3 (低温, 喷 0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), T4 (低温, 喷 2  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), 每 3 d 喷施一次, 直到叶面滴水为止, 处理 20 d。

处理 7 d 和 15 d 时, 各处理分别取 5 株, 测定植株鲜重, 而后烘干, 测定干重; 另取 5 株, 剪取第 3 片完全展开的功能叶, 剪碎后混合进行以下各项指标的测定, 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性采用 NBT 光还原法(张志良和瞿伟菁 2003); 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法(张志良和瞿伟菁 2003); 过氧化氢酶(catalase, CAT)活性参照 Cakmak 和 Marschner (1992) 的方法; 脯氨酸含量测定用酸性茚三酮显色法(张志良和瞿伟菁 2003); 可溶性蛋白测定用考马斯亮蓝 G-250 染色比色法(张志良和瞿伟菁 2003); 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量参照赵世杰等(1994)的

TBA 比色法。用 ORION TDS 型电导率仪测定(张志良和瞿伟菁 2003)组织叶片杀死前电导率(E1)、杀死后电导率(E2)及所用去离子水电导率(E0), 电解质渗漏率(EL)的计算公式为:

$$\text{EL}(\%) = (\text{E1} - \text{E0}) / (\text{E2} - \text{E0}) \times 100$$

## 实验结果

### 1 硅对低温胁迫下乌塌菜鲜重和干重的影响

从表 1 可以看出, 低温胁迫下, 外施硅可以有效缓解低温对乌塌菜幼苗生长的影响, 尤其是 T3 处理, 在低温胁迫下乌塌菜生长仍较快, 如在处理 15 d 时, 鲜重显著高于 T1 处理( $P < 0.05$ ), 为 T1 的 1.33 倍, 达到了对照处理的 81.8%。

外施硅可以有效促进低温胁迫下乌塌菜干物质的积累(表 1), 尤其是 T3 处理下, 在处理 15 d 时, 乌塌菜干重达到了对照的 86.2%, 比处理 T1 高 46.7%。由此说明, 低温胁迫下, 外施 0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  可以明显促进乌塌菜生长, 干物质积累增加, 但如果外施高浓度硅, 乌塌菜干物质积累增加幅度下降。

表 1 硅对低温胁迫下乌塌菜幼苗干鲜重的影响

Table 1 Effects of silicon on fresh and dry weight of savoy seedlings under chilling stress

处理	单株鲜重/g		单株干重/g	
	7 d	15 d	7 d	15 d
CK	93.22±8.12 <sup>a</sup>	122.84±8.12 <sup>a</sup>	10.72±1.04 <sup>a</sup>	13.69±1.15 <sup>a</sup>
T1	64.52±5.21 <sup>c</sup>	75.63±7.33 <sup>d</sup>	7.02±0.68 <sup>d</sup>	8.04±0.57 <sup>d</sup>
T2	67.27±4.32 <sup>c</sup>	83.74±6.42 <sup>c</sup>	7.84±0.67 <sup>c</sup>	8.68±0.74 <sup>d</sup>
T3	79.34±7.04 <sup>b</sup>	100.53±8.03 <sup>b</sup>	8.62±0.25 <sup>b</sup>	11.80±1.18 <sup>b</sup>
T4	66.62±5.62 <sup>c</sup>	89.72±7.34 <sup>c</sup>	7.53±0.35 <sup>c</sup>	9.58±1.03 <sup>c</sup>

同列数据后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2 硅对低温胁迫下乌塌菜保护酶活性的影响

由图 1 可知, 与对照相比, 低温胁迫下, 乌塌菜幼苗叶片保护酶活性升高, 外施硅可以显著提高乌塌菜叶片保护酶活性, 尤其是 T3 处理, 在处理 7 d 时, 乌塌菜叶片抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性均高于其它处理。T3 处理叶片的 SOD 活性比 T1 处理叶片高 23.7%, 而且 T1 处理叶片 SOD 活性随着处理时间的延长呈降低的趋势。在处理 15 d 时, 外施硅处理的乌塌菜仍保持较高的保护酶活性。由

此说明, 低温胁迫下, 外施硅处理可以提高乌塌菜叶片保护酶活性, 尤其是 0.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  处理效果显著, 而施用浓度过高, 保护酶活性呈下降趋势。

### 3 硅对低温胁迫下乌塌菜渗透调节物质含量的影响

由图 2 可知, 与对照相比, 低温胁迫下, 乌塌菜叶片脯氨酸和可溶性蛋白均表现为升高, 尤其是外加硅处理 7 d 时, T3 处理乌塌菜叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量最高, 分别达到 114.3  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW) 和 25.3  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)。随着处理时间的延长, 在处理 15 d

时, T1 处理叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量降低, 而外施硅处理的则还有所增加。植物在遭受逆境胁迫时, 自身会产生一些渗透调节物质来适应逆境, 渗

透调节物质含量的高低及变化的快慢均可反映植物本身对逆境的适应能力。低温胁迫处理时, 外施硅可以使乌塌菜叶片迅速积累渗透调节物质, 来适应

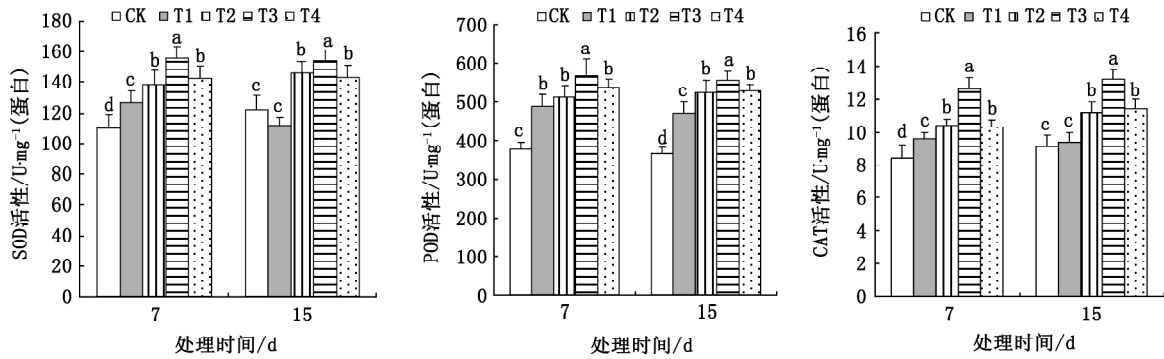


图1 硅对低温胁迫下乌塌菜幼苗叶片SOD、POD和CAT活性的影响

Fig.1 Effects of silicon on SOD, POD and CAT activity of savoy seedlings leaves under chilling stress

图中不同小写字母表示同一处理时间下不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下图同。

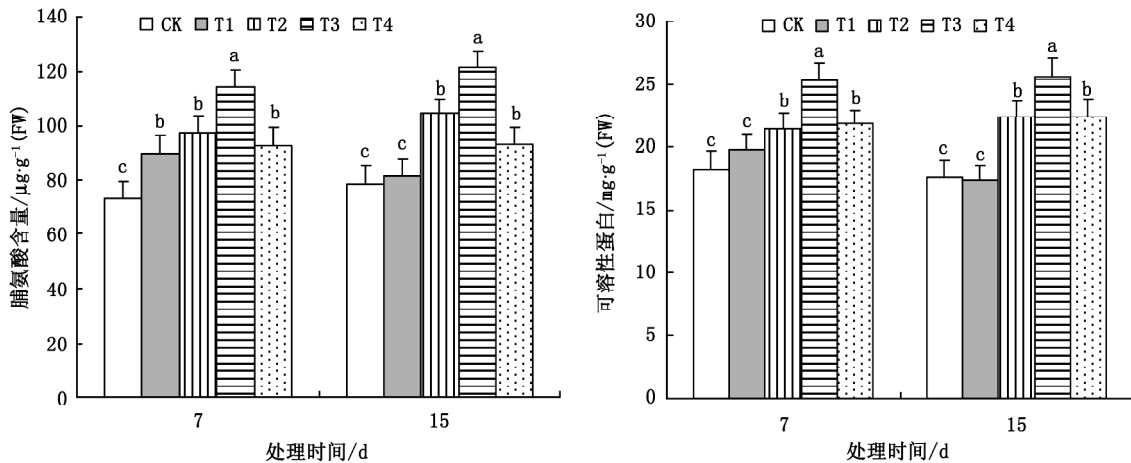


图2 硅对低温胁迫下乌塌菜叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响

Fig.2 Effects of silicon on proline and soluble protein contents of savoy seedlings leaves under chilling stress

低温胁迫环境, 尤其是 T3 处理效果最佳。

#### 4 硅对低温胁迫下乌塌菜叶片电解质渗漏率和MDA含量的影响

由图3可知, 与对照相比, 低温胁迫下乌塌菜叶片相对电导率均升高。外施不同浓度的硅有利于缓解乌塌菜叶片的电解质渗漏率升高; 在处理7 d时, T3 处理的电解质渗漏率数值较小, 仅比对照提高了13.9%, 而T1处理电解质渗漏率比对照提高了75.7%。在处理15 d时, 外施硅仍有降低叶片

电解质渗漏率的效果。低温胁迫可加重膜脂过氧化作用, 其主要产物MDA含量的多少可表示植物细胞膜受伤害程度的大小(Kar和Mishra 1976)。由图4可知, 低温胁迫下乌塌菜MDA含量明显升高。在处理7 d时, T1 处理比对照增加了60.3%, 而T3处理可显著缓解叶片MDA含量升高( $P < 0.05$ ), 在处理15 d时, 作用效果仍很明显。由此说明, 低温胁迫下, 外施一定浓度的硅可以缓解低温胁迫对乌塌菜叶片细胞膜的影响, 进而减轻低温危害。

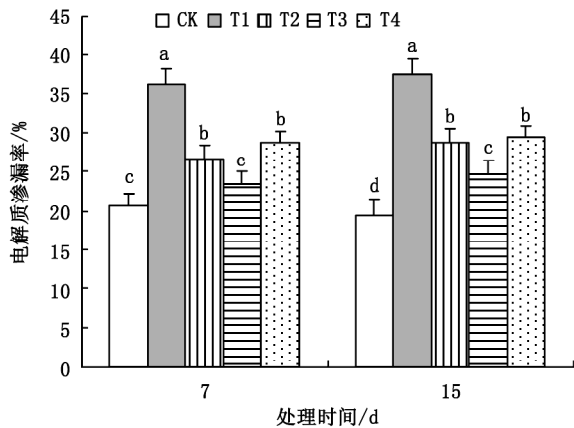


图3 硅对低温胁迫乌塌菜叶片电解质渗漏率的影响  
Fig.3 Effects of silicon on electrolytic leakage in savoy seedlings leaves under chilling stress

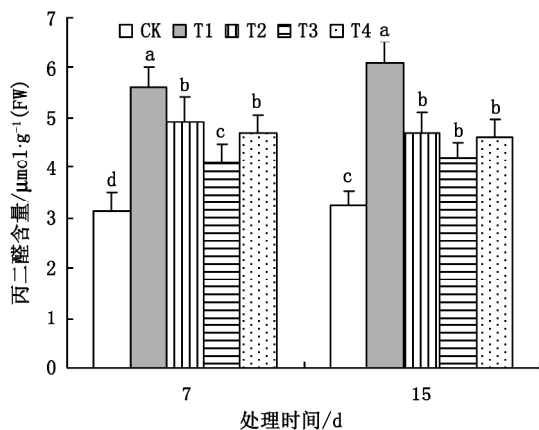


图4 不同浓度的硅对低温胁迫乌塌菜叶片丙二醛含量的影响  
Fig.4 Effects of silicon on MDA content in savoy seedlings leaves under chilling stress

## 讨 论

低温胁迫是限制植物生长发育、基因表达和产量的重要因子(吴建金 2010)。本文研究的结果表明,与对照相比,低温胁迫抑制了乌塌菜的生长,降低了根系活力,表现在鲜重、干重降低,影响了干物质的积累,外施 $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SiO}_3$ 可以有效缓解低温胁迫的影响,随着外施硅浓度的增加,缓解效果降低。类似的结果在小麦上也有报道,施硅可显著提高小麦在干旱(丁燕芳等2007)或低温胁迫(朱佳等2006)条件下的光合速率,从而增加干物质

的积累。

逆境条件下植物体内产生更多的活性氧自由基,从而加剧了膜脂过氧化,导致膜系统受损,最终使组织受到破坏(马德华等 1998)。低温胁迫诱导植物体内 SOD、APX 和 POD 等活性升高,对活性氧自由基起着清除作用(Elstner 1982)。本研究表明,低温胁迫下乌塌菜叶片保护酶 SOD、CAT 和 POD 活性升高,外施硅可以较大幅度地提高保护酶活性,而且持续时间较长,这为乌塌菜叶片活性氧自由基清除起着重要的作用。这与外施硅可以提高黄瓜(Zhu 等 2004; Liu 等 2009)、小麦(Liang 等 2008)、大麦(Liang 等 2003)等作物的抗氧化酶活性,从而提高作物的耐盐性、抗寒性等结果相似。关于渗透调节物质与植物耐寒性的关系已有许多报道,但观点尚不统一。本试验研究中发现,与对照相比,低温胁迫下乌塌菜叶片的脯氨酸和可溶性蛋白的含量升高,尤其是外施硅处理,乌塌菜叶片渗透调节物质迅速积累,升高幅度较大,这为缓解低温胁迫奠定了基础,这与茄子上研究相似(高青海等 2006)。

低温胁迫下外施硅处理乌塌菜叶片保护酶活性显著升高,脯氨酸和可溶性蛋白大量积累,这可以有效快速清除乌塌菜体内大量活性氧自由基和维持渗透平衡,减轻低温胁迫对乌塌菜叶片细胞膜的损害,降低膜脂过氧化水平,表现在叶片电解质渗漏率和相对电导率升幅较小,进而缓解低温对乌塌菜的伤害作用。总之,低温胁迫下,外施一定浓度的硅可以缓解低温胁迫对乌塌菜生长的影响,但外施硅浓度过高,缓解效果则降低。

## 参考文献

- 丁燕芳, 梁永超, 朱佳, 李兆君(2007). 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响. 植物营养与肥料学报, 13 (3): 471~478
- 高青海, 吴燕, 徐坤, 高辉远(2006). 茄子嫁接苗根系对低温环境胁迫的响应. 应用生态学报, 17 (3): 390~394
- 侯彦林, 郭伟, 朱永官(2005). 非生物胁迫下硅素营养对植物的作用及其机理. 土壤通报, 36 (3): 426~429
- 马德华, 卢育华, 庞金安(1998). 低温对黄瓜幼苗膜脂过氧化的影响. 园艺学报, 25 (1): 61~64
- 舒英杰, 周玉丽, 徐俊(2005). 乌塌菜 Vc 含量动态变化的初步研究. 安徽技术师范学院学报, 19 (3): 14~16
- 吴建金(2010). 设施蔬菜低温冷害的防范技术. 天津农业科学, 16 (1): 44~47

- 张渝洁(2009). 低温弱光对不同品种青菜生理生化指标的影响. 江苏农业科学, (5): 179~180
- 张志良, 瞿伟菁(2003). 植物生理学实验指导(第3版). 北京: 高等教育出版社, 39, 276
- 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟(1994). 植物组织中丙二醛测定方法的改进. 植物生理学通讯, 30 (3): 207~210
- 朱佳, 梁永超, 丁燕芳, 李兆君(2006). 硅对低温胁迫下冬小麦幼苗光合作用及相关生理特性的影响. 中国农业科学, 39 (9): 1780~1788
- Cakmak I, Marschner H (1992). Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol*, 98: 1222~1227
- Elstner EF (1982). Oxygen activation and oxygen toxicity. *Annu Rev Plant Physiol*, 33: 73~96
- Kar M, Mishra D (1976). Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiol*, 57: 315~319
- Liang Y, Chen Q, Liu Q, Zhang W, Ding R (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *J Plant Physiol*, 160: 1157~1164
- Liang Y, Zhu J, Li Z, Chu G, Ding Y, Zhang J, Sun W (2008). Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. *Environ Exp Bot*, 64: 286~294
- Liu JJ, Lin SH, Xu PL, Wang XJ, Bai JG (2009). Effects of exogenous silicon on the activities of antioxidant enzymes and lipid peroxidation in chilling-stressed cucumber leaves. *Agr Sci China*, 8 (9): 1075~1086
- Ma JF, Yamaji N (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci*, 11: 392~397
- Zhu Z, Wei G, Li J, Qian Q, Yu J (2004). Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci*, 167: 527~533