

## 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响\*

李清芳<sup>1</sup> 马成仓<sup>1,2,\*</sup> 尚启亮<sup>1</sup>(<sup>1</sup> 淮北煤炭师范学院生物学系, 安徽淮北 235000; <sup>2</sup> 天津师范大学生物学系, 天津 300074)

**摘要** 利用盆栽试验研究了施硅( $K_2SiO_3$ )对玉米植株抗旱能力的影响. 结果表明:与对照相比,干旱胁迫下施硅提高了玉米植株的生物量积累,轻度和重度水分胁迫处理分别提高了31.1%~33.3%和23.7%~40.5%;施硅提高了玉米植株的净光合速率(10.9%~28.8%)和叶绿素含量(4.0%~11.9%);施硅使干旱胁迫下玉米植株的POD、SOD和CAT活性分别提高6.4%~26.4%、17.8%~26.8%和3.2%~33.5%,抑制了干旱胁迫下叶片细胞膜透性的增加和丙二醛含量的升高. 相关分析表明,干旱胁迫下玉米干生物量积累与日光合积累呈显著相关( $r=0.9357, P<0.05$ ),说明光合作用的提高是干旱胁迫下硅对生物量积累影响的主要因素. 较高的保护酶活性减轻了自由基的伤害作用,是硅增强植株抗旱性的另一重要因素.

**关键词** 玉米 硅 抗旱性 光合作用 保护酶

**文章编号** 1001-9332(2007)03-0531-06 **中图分类号** Q945.12 **文献标识码** A

**Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress.**

LI Qing-fang<sup>1</sup>, MA Cheng-cang<sup>1,2</sup>, SHANG Qi-liang<sup>1</sup>(<sup>1</sup> Department of Biology, Huaibei Coal Normal College, Huaibei 235000, Anhui, China; <sup>2</sup> Department of Biology, Tianjin Normal University, Tianjin 300074, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(3): 531-536.

**Abstract:** With pot experiment, this paper studied the effects of silicon supply on drought-resistance capability of maize plant. The results showed that under mild and severe drought stress, supplying silicon could increase the plant biomass by 31.1%—33.3% and 23.7%—40.5%, respectively, compared with the control. Silicon enhanced the net photosynthetic rate by 10.9%—28.8%, increased the chlorophyll content and POD, SOD and CAT activities by 4.0%—11.9%, 6.4%—26.4%, 17.8%—26.8% and 3.2%—33.5%, respectively, and restrained the increase of leaf plasma membrane permeability and MDA content. Correlation analysis indicated that there was a significant correlation between plant dry matter accumulation and diurnal photosynthetic cumulates ( $r=0.9357, P<0.05$ ), demonstrating that the enhancement of photosynthesis under effect of silicon supply was the main factor inducing the increase of dry matter accumulation under drought stress. The higher antioxidative enzyme activities with silicon supply lightened the injury effect of free radicals, being another important factor inducing the increase of plant drought-resistance capability.

**Key words:** maize; silicon; drought resistance; photosynthesis; antioxidative enzyme.

## 1 引言

自1926年美国加州大学 Sommer 率先提出硅是水稻良好生长所必需的元素后<sup>[32]</sup>,人们对硅元素的研究越来越重视. 研究主要在以下3个方面展开: 1) 硅对植物生长的促进作用. 研究表明,硅是大多数高等植物生长的有益元素,能改善作物的代

谢<sup>[21]</sup>,促进生长发育,提高产量<sup>[6]</sup>;硅能增加植物茎壁厚度,提高抗倒伏能力<sup>[27]</sup>,改善叶着生姿态<sup>[3,27]</sup>,提高细胞壁的扩展性<sup>[10]</sup>,抑制蒸腾,改善水分效率<sup>[7,27]</sup>;硅能提高光合速率,提高氮、磷肥的增产效应<sup>[22,27]</sup>,影响植株氮、磷、钾、钙、镁的含量. 2) 硅与非生物胁迫的关系. 研究表明,硅能减轻作物铁、锰、镉、铬、铝、铜毒害<sup>[11,18,23-24,27]</sup>及盐害<sup>[15]</sup>,增强作物抗冻能力<sup>[5]</sup>和植物抗紫外线能力<sup>[9]</sup>. 3) 硅与生物胁迫的关系. 研究表明,硅能增强水稻<sup>[26]</sup>(*Oryza sativa* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays*

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB106802)和安徽省教育厅自然科学研究资助项目(2005kj194).

\* \* 通讯作者. E-mail: machengcang@eyou.com

2006-04-06 收稿,2006-12-05 接受.

L.)、黄瓜(*Cucumis sativus* L.)<sup>[17,29]</sup>等作物的抗病、虫害能力。

硅在土壤中的分布极为丰富,在地壳中的含量仅次于氧而位居第二位<sup>[18]</sup>,但由于土壤中的硅绝大多数是以硅酸盐结晶或沉淀形式存在,所以土壤溶液中硅的浓度一般都比较低。许多土壤表现供硅不足,因此,在适宜的情况下施硅肥能促进作物生长,提高作物产量和改良土壤性状。

干旱胁迫是植物经常遭受的逆境胁迫之一。关于硅对作物抗旱性影响的研究报道较少<sup>[1,8,20]</sup>。玉米是夏季作物,在生长过程中经常受到干旱的威胁,使产量降低。本文通过研究施硅对干旱胁迫下玉米植株光合系统和保护酶系统的影响,揭示硅对增强玉米植株抗旱性的作用及增产机制,为玉米田间施用硅肥提供科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计

试验于2003年和2005年在淮北的通风、光照良好的室外进行,选用直径40 cm的瓷盆,每盆装土9.0 kg。供试土壤为淋溶褐土,土壤pH 6.92,有机质7.5 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.51 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷7.76 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾140 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硅55.1 mg·kg<sup>-1</sup>,田间持水量15.29%。以硝酸铵、磷酸二氢钙和硫酸钾为基肥,以硅酸钾(K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)作硅肥,加入硅酸钾所引入的钾量从硫酸钾中扣除<sup>[16]</sup>。基肥和硅肥一次性施入土壤,混合均匀。施肥后测得土壤pH为6.96,各土样无显著差异。

土壤施硅分为3组(硅肥以SiO<sub>2</sub>计量),分别为:不施硅15盆,施SiO<sub>2</sub> 120 mg·kg<sup>-1</sup> 10盆,施SiO<sub>2</sub> 240 mg·kg<sup>-1</sup> 10盆。选取饱满均一的“夜单2号”玉米种子,用1.0 g·L<sup>-1</sup>的HgCl<sub>2</sub>溶液浸泡10 min,蒸馏水冲洗后,于恒温光照培养箱内25℃催芽18 h,2003年4月1日播种,每盆20粒,覆盖地膜,4月18日去掉地膜,间苗,每盆保留长势一致的幼苗5株。试验中根据土壤含水量,不定时浇灌自来水以保持各处理的土壤含水量一致。5月22日—6月5日进行干旱胁迫,共持续15 d。干旱胁迫强度分别设:CK(对照),田间持水量的80%~90%;L:轻度胁迫,田间持水量的55%~70%;S:重度胁迫,田间持水量的35%~50%。每个硅水平分别取5盆作轻度胁迫,5盆作重度胁迫,不施硅处理剩余5盆作对照,实验共7个处理,5次重复。胁迫开始时,将土壤含水量调整至预定限度,每天称重浇水使土壤含水

量维持在胁迫水平。6月4—5日测定净光合速率、叶绿素含量、叶片细胞膜透性、丙二醛(MDA)含量、自由基含量、植株鲜生物量和干生物量。

2005年4—6月重复上述实验,测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性、可溶性蛋白质含量、植株鲜质量和干质量。

### 2.2 研究方法

生理指标的测定选取第3片展开叶。净光合速率日进程用CI-301光合系统(CID公司,美国)测定,从7:00到17:00,每2 h测定1次。日净同化积累值用公式:日净同化积累值=∑净光合速率×7200计算。干生物量采用加热烘干法测定;叶绿素含量采用分光光度法测定<sup>[33]</sup>;叶片细胞膜透性采用电导仪法测定<sup>[34]</sup>;MDA含量采用TBA显色法测定<sup>[34]</sup>;自由基含量采用羟胺氧化法测定<sup>[31]</sup>;POD活性采用愈创木酚法测定<sup>[33]</sup>;SOD活性采用NBT光化学还原法测定<sup>[34]</sup>;CAT采用滴定法测定<sup>[30]</sup>;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝比色法测定<sup>[33]</sup>。

### 2.3 统计方法

采用SAS系统分析软件对测定的各个指标进行方差分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 硅对干旱胁迫下玉米植株生物量的影响

干旱胁迫期间,不施硅植株叶片逐渐变黄,中午严重萎蔫,生长缓慢。相同干旱胁迫强度下,施硅植株的症状明显减轻。由表1可以看出,干旱胁迫使玉米植株生物量显著下降,施硅植株的生物量明显高于不施硅植株,轻度和重度水分胁迫下分别提高了31.1%~33.3%和23.7%~40.5%,重度胁迫下施硅240 mg·kg<sup>-1</sup>的玉米植株单株干重比施硅120 mg·kg<sup>-1</sup>植株提高了13.6%。表明施硅明显地减轻了干旱胁迫对玉米植株的不利影响,并且这种效应与施硅水平呈正相关趋势。

### 3.2 硅对干旱胁迫下玉米植株光合速率的影响

由图1可知,干旱胁迫下各处理净光合速率低于对照,重度胁迫低于轻度胁迫,施硅植株的净光合速率高于不施硅植株。在轻度胁迫下,施硅各水平之间无明显差异;而在重度胁迫下,净光合速率随着施硅量的增加而升高。在轻度胁迫下,施硅植株日净同化积累值比不施硅植株高10.9%~13.2%;重度胁迫下,施硅120和240 mg·kg<sup>-1</sup>的植株日净同化积累值分别比不施硅植株高16.4%和28.8%(图2)。

表 1 硅对干旱胁迫下玉米植株生物量的影响

Tab.1 Effect of silicon application on biomass of maize plants under drought stress

项目 Item	对照 Control	轻度胁迫 Mild stress ( $\text{mg SiO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )			重度胁迫 Severe stress ( $\text{mg SiO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
		0	120	240	0	120	240
单株鲜生物量 Fresh biomass ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ )	185.98a	72.04c	88.68b	86.00b	63.88d	70.08c	74.09c
单株干生物量 Dry biomass ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ )	43.56a	17.34d	22.73b	23.12b	14.01e	17.33d	19.69c

不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 硅对干旱胁迫下玉米叶片叶绿素含量的影响

Tab.2 Effect of silicon application on chlorophyll content of maize leave under drought stress

项目 Item	对照 Control	轻度 Mild stress ( $\text{mg SiO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )			重度 Severe stress ( $\text{mg SiO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
		0	120	240	0	120	240
叶绿素含量 Chlorophyll content ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FM)	1.51a	1.37d	1.43bc	1.46b	1.23e	1.38d	1.41cd
对照 Control(%)	100	90.7	94.7	96.7	81.5	91.4	93.4

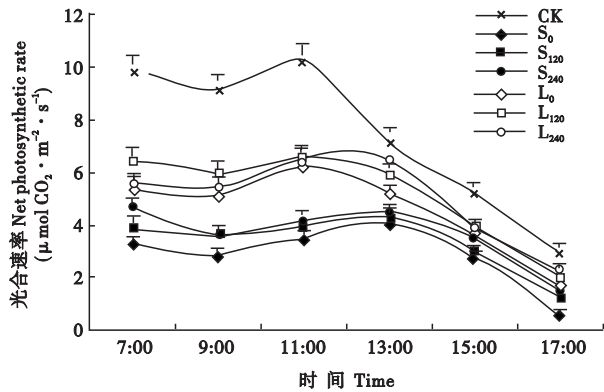


图 1 硅对干旱胁迫下玉米植株净光合速率日进程的影响

Fig.1 Effect of silicon application on diurnal changes of net photosynthetic rate of maize plants under drought stress.

CK: 对照 Control; L: 轻度胁迫 Mild stress; S: 重度胁迫 Severe stress. 下同 The same below.

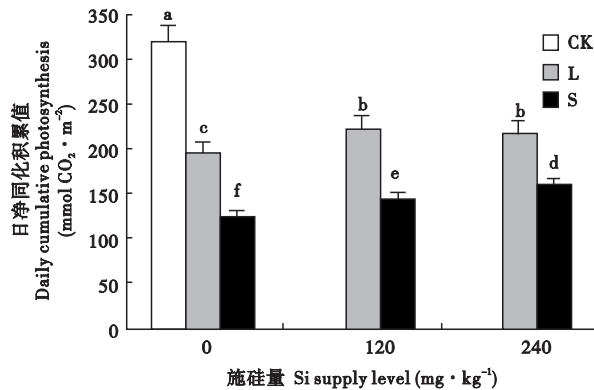


图 2 硅对干旱胁迫下玉米植株日净同化积累值的影响

Fig.2 Effect of silicon application on daily cumulative photosynthesis of maize plants under drought stress.

不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

### 3.3 硅对干旱胁迫下玉米植株叶绿素含量的影响

由表 2 可知,与对照相比,轻度和重度干旱胁迫下,植株叶绿素含量分别下降 9.3% 和 18.5%,而施

硅  $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的玉米植株叶绿素含量分别下降 5.3% 和 8.6%,施硅  $240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的植株仅下降 3.3% 和 6.6%。说明施硅缓解了干旱胁迫,保护了叶绿体的正常代谢。

### 3.4 硅对干旱胁迫下玉米叶片细胞膜透性和丙二醛含量的影响

由图 3 可知,随着干旱胁迫强度增大细胞膜透性增大,相同胁迫强度下施硅玉米植株的叶片细胞膜透性低于不施硅植株,其中轻度胁迫下施硅比不施硅低 10%,重度胁迫下施硅 120 和  $240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

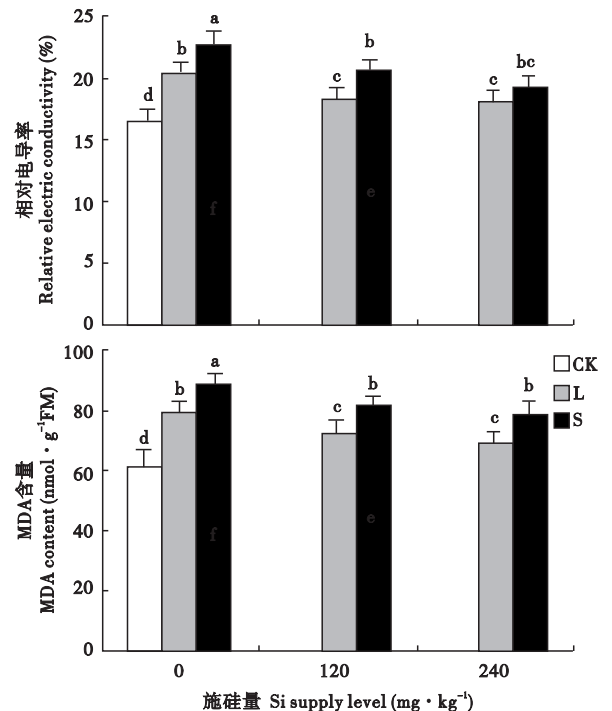


图 3 硅对干旱胁迫下玉米叶片细胞膜透性和丙二醛含量的影响

Fig.3 Effect of silicon application on permeability of the plasma membrane and MDA content of maize leave under drought stress.

表3 硅对干旱胁迫下玉米植株 POD、SOD 和 CAT 活性的影响

Tab.3 Effect of silicon application on POD, SOD and CAT activities of maize plants under drought stress

项目 Item	对照 Control	轻度 Mild stress (mg SiO <sub>2</sub> · kg <sup>-1</sup> )			重度 Severe stress (mg SiO <sub>2</sub> · kg <sup>-1</sup> )		
		0	120	240	0	120	240
POD 活性 POD activity (ΔA <sub>470</sub> · min <sup>-1</sup> · mg <sup>-1</sup> protein)	1.488a	1.197c	1.274b	1.280b	0.950d	1.167c	1.201bc
SOD 活性 SOD activity (U · h <sup>-1</sup> · mg <sup>-1</sup> protein)	0.372a	0.276c	0.325b	0.340b	0.224d	0.271c	0.284c
CAT 活性 CAT activity (mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> · min <sup>-1</sup> · mg <sup>-1</sup> protein)	0.920a	0.661c	0.682c	0.828b	0.412e	0.504d	0.550d

比不施硅分别低 8.9% 和 15.5%。说明干旱胁迫导致细胞膜损伤,使膜透性增大,施硅能减轻干旱胁迫对细胞膜的损伤。干旱胁迫下,施硅和不施硅玉米植株叶片 MDA 含量变化与细胞膜透性变化趋势相同。

### 3.5 硅对干旱胁迫下玉米植株自由基含量的影响

由图 4 可知,干旱胁迫使叶片自由基含量增大,相同胁迫强度下施硅玉米叶片自由基含量低于不施硅植株。其中轻度胁迫下施硅比不施硅低 8.7% ~ 10.3%,重度胁迫下施硅比不施硅低 14.3% ~ 15.6%。说明施硅能减轻干旱胁迫。

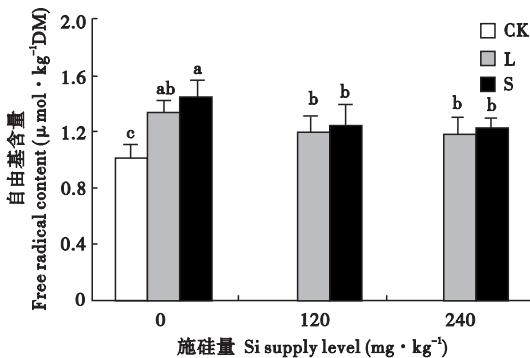


图4 硅对干旱胁迫下玉米叶片自由基含量的影响

Fig.4 Effect of silicon application on free radical content in maize leave under drought stress.

### 3.6 硅对干旱胁迫下玉米植株 POD、SOD 和 CAT 活性的影响

由表 3 可知,随着干旱胁迫强度的增大,玉米植株 POD、SOD 和 CAT 活性降低,而施硅玉米植株比不施硅植株的 POD 活性提高了 6.4% ~ 26.4%、SOD 活性提高了 17.8% ~ 26.8%、CAT 活性提高了 3.2% ~ 33.5%。说明施硅增强了玉米植株的抗胁迫能力。

## 4 讨 论

### 4.1 硅能提高玉米植株的抗旱能力

在干旱胁迫下,抗旱性强的植物能积累更多的生物量。Gong 等<sup>[8]</sup>研究发现,在干旱胁迫下,供硅的小麦植株比不供硅植株生物量大。笔者以前的实验

证明<sup>[20]</sup>,硅能提高干旱胁迫下黄瓜植株生物量积累,说明硅能增强黄瓜植株的抗旱能力。Lux 等<sup>[19]</sup>发现,高粱(*Sorghum bicolor* L.)根的硅化程度越高,抗旱能力越强。从本文结果来看,硅提高了干旱胁迫下玉米植株的生物量积累,表明硅能提高玉米植株的抗旱能力。

### 4.2 硅提高玉米植株抗旱能力的机理

植物的光合作用与水分状况密切相关。干旱能通过气孔限制(如影响气孔的关闭)、非气孔限制(如破坏光合膜结构)以及光合产物的分布(如抑制光合产物从叶中的输出)等抑制同化作用<sup>[4]</sup>。本研究表明,施硅能提高干旱胁迫下玉米植株的净光合速率。

叶绿素含量与光合作用密切相关,是衡量环境胁迫对植物影响的重要指标。硅对正常生长的小麦<sup>[2]</sup>、大豆(*Glycine max* L.)<sup>[13]</sup>植株叶绿素无显著影响,仅对盐胁迫植株叶绿素有保护作用<sup>[15]</sup>,本研究表明干旱胁迫导致玉米叶绿素含量降低,而硅能抑制这一过程,保障光合作用正常进行,表明硅增强了玉米植株的抗旱能力。

细胞膜透性是评定植物对环境胁迫反应的方法之一,其大小与胁迫强度呈正相关。细胞膜透性的增大是由膜损伤引起的,而细胞膜损伤与细胞膜脂质过氧化作用密切相关,逆境胁迫都是通过促进膜脂质过氧化作用而伤害植物细胞膜的。Agarie 等<sup>[1]</sup>研究表明,硅能维护干旱和高温胁迫下水稻细胞膜结构和功能的稳定性,增强水稻抗热、抗旱能力。Li-ang<sup>[14]</sup>证明硅降低了盐胁迫下大麦(*Hordeum vulgare* L.)的 MDA 浓度。本研究发现,硅有效地抑制了干旱胁迫下玉米植株膜脂过氧化水平和细胞膜透性的增大。这是硅增强玉米植株抗旱能力、缓解干旱胁迫伤害的重要证据。

不良环境能诱发植物产生大量的自由基,自由基对植物膜系统及蛋白质有伤害作用,但生物体内的保护系统能清除产生的自由基,减轻危害。SOD、POD 和 CAT 是保护系统的主要酶,它们的变化反映

了植物的保护反应. Schmidt 等<sup>[28]</sup>研究表明,低水分条件下,硅能提高植物的 SOD 活性. 本研究表明,硅提高了干旱胁迫下玉米植株的 POD、SOD 和 CAT 活性,抑制了自由基的积累,从而增强了玉米植株的抗旱能力.

关于硅增强植物抗逆性、促进植物生长发育的机制,开始的研究认为,硅沉积在叶片表皮细胞形成“角质—双硅层”结构,起支持、保护和抑制蒸腾的作用<sup>[12,18]</sup>. 随着硅营养研究的深入,又提出一些新观点. Epstein<sup>[6]</sup>认为,硅在植物生物学中的作用非常重要,营养液配方中应包括硅. Cherif 等<sup>[5]</sup>报道,水培液中的可溶性硅可显著且快速地提高接种过腐霉菌的黄瓜根系中的几丁质酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性,显著减轻黄瓜的真菌危害. 研究表明,盐胁迫下加硅可显著提高大麦叶片的超氧化物歧化酶活性,降低 MDA 浓度,提高根系 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性和脱氢酶活性<sup>[14,17]</sup>. Cherif 等<sup>[5]</sup>和 Richard 等<sup>[25]</sup>发现,感染病原菌的黄瓜植株在硅处理后,β-葡萄糖苷酶活力提高,同时产生具有真菌毒素的糖苷配基,增强植株的防病能力,说明硅可能启动了植株体内的防御机制,这种防御反应似乎是多元化的,它能激活一个与生化变化相连的级联反应. Agarie 等<sup>[1]</sup>认为,硅能维护细胞膜结构和功能的稳定性. 研究还表明,硅能提高作物的光合速率<sup>[21]</sup>,降低植物的水分蒸腾<sup>[22]</sup>,提高根系活力<sup>[13]</sup>. 这些研究结果显示,进入植物体的硅并非只是通过沉积在细胞壁上起支持和保护作用,很可能参与了生物和非生物胁迫下植物体内的代谢和生理活动<sup>[5,16]</sup>. 本研究结果也支持这一结论. 相关分析结果表明,干旱胁迫下生物量积累与日净同化积累呈显著相关,相关系数为  $r=0.9357$  ( $P<0.05$ ). 说明光合作用的提高是干旱胁迫下硅对生物量积累影响的主要因素. 较高的保护酶活性减轻了自由基的伤害作用是硅增强作物抗旱性的另一重要因素.

一般认为,土壤有效硅含量小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  为严重缺硅土壤, $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  为缺硅土壤,大于  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  为不缺硅土壤. 同时,研究表明当土壤有效硅含量在  $200 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围时,施硅肥仍然有增产效果. 本研究表明,在干旱地区,施硅增强了玉米植株的抗旱能力,这对促进作物生长,提高产量有重要意义.

#### 参考文献

- [1] Agarie S, Hanaoka N, Ueno O. 1998. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.) monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, **1**: 96–103
- [2] Ahmad R, Zaheer S, Ismail S. 1992. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Science*, **85**: 43–50
- [3] Ando H, Kakuda K, Fujii H, et al. 2002. Growth and canopy structure of rice plants grown under field conditions as affected by Si application. *Soil Science and Plant Nutrition*, **48**: 429–432
- [4] Chaves MM. 1991. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, **42**: 1–16
- [5] Cherif M, Asselin A, Belanger RR. 1994. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathology*, **84**: 236–242
- [6] Epstein E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **91**: 11–17
- [7] Gao X, Zou C, Wang L, et al. 2004. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, **27**: 1457–1470
- [8] Gong HJ, Chen KM, Chen GC, et al. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, **26**: 1055–1063
- [9] Goto M, Ehara H, Karita S, et al. 2003. Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crop. *Plant Science*, **164**: 349–356
- [10] Hossain MT, Mori R, Soga K, et al. 2002. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*, **115**: 23–27
- [11] Kidd PS, Llugany M, Poschenrieder C, et al. 2001. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*, **52**: 1339–1352
- [12] Kim SG, Kim KW, Park EW, et al. 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology*, **92**: 1095–1103
- [13] Li Q-F (李清芳), Ma C-C (马成仓), Li H-P (李韩平), et al. 2004. Effect of soil available silicon on growth, development and physiological function of soybean. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **15**(1): 73–76 (in Chinese)
- [14] Liang YC. 1999. Effect of silicon on enzyme activity, and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil*, **209**: 217–224
- [15] Liang YC, Shen QR, Shen ZG. 1996. Effects of silicon

- on salinity tolerance of two barley cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, **19**: 173 – 183
- [ 16 ] Liang Y-C ( 梁永超 ), Ding R-X ( 丁瑞兴 ), Liu Q ( 刘 谦 ). 1999. Effects of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism. *Scientia Agricultura Sinica* ( 中国农业科学 ), **32**( 6 ): 75 – 83 ( in Chinese )
- [ 17 ] Liang Y-C ( 梁永超 ), Sun W-C ( 孙万春 ). 2002. Resistance of cucumber against anthracnose induced by soluble silicon and inoculated *Colletotrichum lagenarium*. *Scientia Agricultura Sinica* ( 中国农业科学 ), **35**( 3 ): 267 – 271 ( in Chinese )
- [ 18 ] Liang Y-C ( 梁永超 ), Zhang Y-C ( 张永春 ), Ma T-S ( 马同生 ). 1993. Nutrition of silicon for plant. *Advance in Pedology* ( 土壤学进展 ), **21**( 3 ): 7 – 14 ( in Chinese )
- [ 19 ] Lux A, Luxova M, Hattori T, *et al.* 2002. Silicification in sorghum ( *Sorghum bicolor* ) cultivars with different drought tolerance. *Physiologia Plantarum*, **115**: 87 – 92
- [ 20 ] Ma CC, Li QF, Gao YB, *et al.* 2004. Effects of silicon on drought resistance of cucumber plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, **50**: 623 – 632
- [ 21 ] Ma C-C ( 马成仓 ), Li Q-F ( 李清芳 ), Shu L-Z ( 束良佐 ), *et al.* 2002. Preliminary explanation of the mechanism about effects of silicon on maize seed germination and seedling growth. *Acta Agronomica Sinica* ( 作物学报 ), **28**( 5 ): 665 – 669 ( in Chinese )
- [ 22 ] Ma JF, Takahashi E. 1989. Effect of silicic acid on phosphorus uptake by rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, **35**: 227 – 234
- [ 23 ] Morikawa CK, Saigusa M. 2002. Si amelioration of Al toxicity in barley ( *Hordeum vulgare* L. ) growing in two Andosols. *Plant and Soil*, **240**: 161 – 168
- [ 24 ] Neumann D, Nieden UZ. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry*, **56**: 685 – 692
- [ 25 ] Richard RB, Patricia AB, David LE. 1995. Soluble silicon: Its role in crop and disease management of greenhouse crops. *Plant Disease*, **4**: 329 – 336
- [ 26 ] Rodrigues FA, Vale FXR, Korndorfer GH, *et al.* 2003. Influence of silicon on sheath blight of rice in Brazil. *Crop Protection*, **22**: 23 – 29
- [ 27 ] Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, *et al.* 1999. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of Plant Nutrition*, **22**: 1853 – 1903
- [ 28 ] Schmidt RE, Zhang X, Chalmers DR. 1999. Response of photosynthesis and superoxide dismutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. *Journal of Plant Nutrition*, **22**: 1763 – 1773
- [ 29 ] Schuerger AC, Hammer W. 2003. Suppression of powdery mildew on greenhouse-grown cucumber by addition of silicon to hydroponic nutrient solution is inhibited at high temperature. *Plant Disease*, **87**: 177 – 185
- [ 30 ] Shandong Agricultural College ( 山东农学院 ), Northwest Agricultural College ( 西北农学院 ). 1985. Experimental Guide to Plant Physiology. Jinan: Shandong Science and Technology Press. ( in Chinese )
- [ 31 ] Tang Z-C ( 汤章城 ). 1999. Experimental Guide of Modern Plant Physiology. Beijing: Science Press. ( in Chinese )
- [ 32 ] Xia S-T ( 夏石头 ), Xiao L-T ( 萧浪涛 ), Peng K-Q ( 彭克勤 ). 2001. Physiological effects of silicon in higher plants and its application in agricultural production. *Plant Physiology Communication* ( 植物生理学通讯 ), **37**( 4 ): 356 – 360 ( in Chinese )
- [ 33 ] Zhang Z-L ( 张志良 ). 1990. Experimental Guide to Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press. ( in Chinese )
- [ 34 ] Zhu G-L ( 朱广廉 ), Zhong H-W ( 钟海文 ), Zhang A-Q ( 张爱琴 ). 1990. Experiment of Plant Physiology. Beijing: Peking University Press. ( in Chinese )

---

作者简介 李清芳,女,1961年生,副教授.主要从事生物无机研究,已发表论文30余篇. E-mail: lqf1229@eyou.com

责任编辑 张凤丽

---