

## 硅对受土壤中镉污染的白菜生长和抗胁迫能力的影响

陈翠芳<sup>1,3,4</sup>, 钟继洪<sup>1,2,\*</sup>, 李淑仪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; <sup>2</sup>广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650; <sup>3</sup>中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; <sup>4</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 在土培盆栽条件下, 硅可提高白菜的地上部鲜重和茎鲜重, 但根鲜重下降, 叶鲜重略有下降。硅可抑制白菜吸收镉, 在0.3、0.6、1.2 mg·kg<sup>-1</sup>镉水平下, 施硅可显著降低白菜地上部的镉含量, 并在一定程度上提高叶中过氧化物酶(POD)活性, 但降低超氧化物歧化酶(SOD)活性。0.5、1.0 g·kg<sup>-1</sup>硅可提高白菜的叶绿素含量和过氧化氢酶(CAT)活性, 降低叶细胞膜透性, 从而提高其对镉胁迫的耐受力。较高的硅浓度对植物有一定的毒性, 叶绿素含量和CAT活性都下降, 细胞膜透性也增加。

**关键词:** 硅; 镉; 白菜; 生长; 抗胁迫

## Effect of Silicon on Growth and Anti-stress Ability of Chinese Cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr.) in Cadmium Contaminated Soil

CHEN Cui-Fang<sup>1,3,4</sup>, ZHONG Ji-Hong<sup>1,2,\*</sup>, LI Shu-Yi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; <sup>2</sup>Guangdong Key Laboratory of Agro-environment Integrated Control, Guangzhou 510650, China; <sup>3</sup>Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; <sup>4</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The result showed that silicon increased the fresh weight of Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) shoots and stems, but decreased those of leaves and roots. Silicon significantly reduced the cadmium content in the aerial part under 0.3, 0.6, 1.2 mg·kg<sup>-1</sup> Cd stress. And peroxidase activity increased, but superoxide dismutase activity decreased. At 0.5, 1.0 g·kg<sup>-1</sup> silicon, the chlorophyll content and catalase activity promoted, whereas the permeability of cell membrane decreased. But higher (2.0 g·kg<sup>-1</sup>) silicon had some phytotoxicity with incidences of lower chlorophyll content and catalase activity but higher membrane permeability.

**Key words:** silicon; cadmium; Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*); growth; anti-stress ability

镉(Cd)是土壤中普遍存在的一类有毒重金属, 具有很强的生物毒性, 对人体健康危害甚大。因此加强土壤镉污染治理和植物或农产品镉污染控制的研究得到了重视。有研究表明, 施硅(Si)能有效抵御植物遭受镉胁迫, 提高生物学产量, 改善植物的生理生化指标, 减少镉在植物体内的吸收和积累(蔡德龙等 2000; 陈秀芳等 2005; 杨超光等 2005)。此外, 硅增强植物抵抗多种生物和非生物胁迫的机制是人们关注的热点。有一种观点认为, 硅可能参与植物的生理或代谢过程(Liang 等 2003; 徐呈祥等 2004; Gong 等 2005; Shi 等 2005), 如施硅提高叶绿素含量, 增加抗氧化酶系的活性和抗氧化剂的含量[如超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase,

GR)和抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)等], 还可增加组织中可溶性糖或蛋白质含量, 减少丙二醛的积累和质膜透性等。迄今, 有关的生理研究一般是针对盐或生物胁迫下植物施硅后的生理生化指标变化进行的(孙万春等 2002; Zhu 等 2004), 而关于施硅影响镉胁迫下植物生理生化过程的研究较少, 其中涉及抗氧化酶活性的研究更少。因此, 有关施硅缓解植物镉毒害的生理生化影响的研究亟待加强。本文采用白菜土培盆栽, 探讨施硅对镉污染土壤的白菜生长及其抗镉毒害的生理和抗氧化酶活性的变化以及硅抑制白菜镉吸收的效应, 以

收稿 2006-12-23 修定 2007-04-17

资助 广东省科技攻关项目(2005B20801003、2006B20601007)和广东省农业领域重大专项(2003A20504)。

\* 通讯作者(E-mail: jhzhong@soil.gd.cn; Tel: 020-87024516)。

期能为合理利用硅元素,降低重金属污染农田中蔬菜的镉污染,有效保障农产品的质量和食品安全提供参考。

### 材料与方法

葵扇矮脚黑叶白菜(*Brassica pekinensis* Rupr.)由广州长合种子有限公司生产。土壤采自广州增城县水稻田,其pH为4.74,有机质为3.00%,全量镉 $0.070\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效镉 $0.047\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效硅 $51.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

盆栽试验于2006年5月~7月在广东省生态环境与土壤研究所温室内进行。试验设硅和镉2个因素各4个浓度水平。 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 浓度为0( $\text{Si}_0$ )、0.5( $\text{Si}_{0.5}$ )、1.0( $\text{Si}_{1.0}$ )和 $2.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ( $\text{Si}_{2.0}$ ),Cd浓度设为0( $\text{Cd}_0$ )、0.3( $\text{Cd}_{0.3}$ )、0.6( $\text{Cd}_{0.6}$ )和 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ( $\text{Cd}_{1.2}$ ),4次重复,完全随机区组设计。基肥每千克土施尿素 $0.332\text{ g}$ 、磷酸二氢钾 $0.288\text{ g}$ 和氯化钾 $0.159\text{ g}$ ,折合成N $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\text{K}_2\text{O}$  $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基肥、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )和Cd( $2\text{CdCl}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )以固体形式加入土壤中并充分混匀,每塑料盆( $40\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 14\text{ cm}$ )装土 $9\text{ kg}$ ,加入去离子水,土壤含水量保持

为田间持水量的60%~70%,平衡1周后移栽苗龄达3周的白菜,每盆种6株。

白菜生长55 d后收获,收获前1周开始测定各项指标,收获当天测定地上部和地下部的鲜重,SOD活性测定用氮蓝四唑法(李合生2001);POD活性测定用愈创木酚法(李合生2001);CAT活性测定用紫外吸收法(邹琦2000);叶细胞膜透性测定参照关军锋(1999)和谈建康等(1998)文中的方法;叶绿素测定用叶绿素测定仪(Konic Minolta SPAD-502)直接测定读取SPAD值;植株镉含量测定用石墨炉原子吸收光谱法(中华人民共和国卫生部1996),样品经混合酸消解后上石墨炉原子吸收分光光度计(AAS ZEE nit 60)测定,试验全程以国家标准物质杨树叶(GBW07604)作质量监控,加标回收率100.47%。

用SPSS 11.5软件进行数据的统计分析。

### 结果与讨论

#### 1 硅对镉污染下白菜生长的影响

从表1可见,(1)白菜的地上部鲜重随着镉浓度的增大而下降,表明镉污染程度加重的土壤对白菜的生长不利,但施硅可在一定程度上提高白

表1 硅对镉污染下白菜鲜重的影响

Table 1 Effects of silicon on fresh weight of Chinese cabbage under Cd contamination

处理	地上部鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	叶鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	茎鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	茎鲜重升高率/%	根鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	根鲜重降低率/%	
Cd <sub>0</sub>	Si <sub>0</sub>	52.95 <sup>a</sup>	29.15 <sup>a</sup>	23.80 <sup>b</sup>	0	1.43 <sup>a</sup>	0
	Si <sub>0.5</sub>	56.33 <sup>a</sup>	29.00 <sup>a</sup>	27.33 <sup>a</sup>	14.83	0.97 <sup>ab</sup>	-32.17
	Si <sub>1.0</sub>	56.30 <sup>a</sup>	28.35 <sup>a</sup>	27.95 <sup>a</sup>	17.44	0.96 <sup>ab</sup>	-32.87
	Si <sub>2.0</sub>	58.36 <sup>a</sup>	28.03 <sup>a</sup>	30.33 <sup>a</sup>	27.44	0.76 <sup>b</sup>	-46.85
Cd <sub>0.3</sub>	Si <sub>0</sub>	55.28 <sup>a</sup>	30.55 <sup>a</sup>	24.73 <sup>a</sup>	0	1.13 <sup>a</sup>	0
	Si <sub>0.5</sub>	55.60 <sup>a</sup>	29.20 <sup>a</sup>	26.40 <sup>a</sup>	6.75	1.04 <sup>a</sup>	-7.96
	Si <sub>1.0</sub>	55.48 <sup>a</sup>	28.35 <sup>a</sup>	27.13 <sup>a</sup>	9.70	0.86 <sup>a</sup>	-23.89
	Si <sub>2.0</sub>	54.88 <sup>a</sup>	26.28 <sup>a</sup>	28.60 <sup>a</sup>	15.65	0.64 <sup>a</sup>	-43.36
Cd <sub>0.6</sub>	Si <sub>0</sub>	47.13 <sup>a</sup>	29.05 <sup>a</sup>	18.08 <sup>b</sup>	0	1.16 <sup>a</sup>	0
	Si <sub>0.5</sub>	49.35 <sup>a</sup>	28.05 <sup>a</sup>	21.30 <sup>b</sup>	17.81	1.08 <sup>a</sup>	-6.90
	Si <sub>1.0</sub>	54.45 <sup>a</sup>	28.05 <sup>a</sup>	26.40 <sup>ab</sup>	46.02	1.08 <sup>a</sup>	-6.90
	Si <sub>2.0</sub>	53.75 <sup>a</sup>	26.35 <sup>a</sup>	27.38 <sup>a</sup>	51.44	0.96 <sup>a</sup>	-17.24
Cd <sub>1.2</sub>	Si <sub>0</sub>	46.60 <sup>a</sup>	28.45 <sup>a</sup>	18.15 <sup>c</sup>	0	1.19 <sup>a</sup>	0
	Si <sub>0.5</sub>	53.51 <sup>a</sup>	27.93 <sup>a</sup>	25.58 <sup>b</sup>	40.94	1.05 <sup>a</sup>	-11.76
	Si <sub>1.0</sub>	54.30 <sup>a</sup>	25.55 <sup>a</sup>	28.75 <sup>ab</sup>	58.40	0.77 <sup>a</sup>	-35.29
	Si <sub>2.0</sub>	56.56 <sup>a</sup>	24.73 <sup>a</sup>	31.83 <sup>a</sup>	75.37	0.76 <sup>a</sup>	-36.13

数据为4次重复的平均值;不同小写英文字母表示在同一镉水平下,不同硅浓度处理间的LSD差异显著性( $P<0.05$ );升高率和降低率为在同一镉水平下,施硅处理比不施硅处理升高或降低的比率。下表同此。

菜的地上部鲜重,且白菜生物产量随着施硅量的加大而逐渐增大。(2)施硅对白菜不同部位鲜重的影响有异:施硅显著增加茎鲜重,在较高程度(0.6、1.2 mg·kg<sup>-1</sup>)的土壤镉污染下,施较高量(2.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅促进茎生长的效果最佳;白菜叶片鲜重降低,但降幅较为平缓,不足14%;而施硅则会抑制根鲜重,并随着施硅量的增加而逐渐下降。(3)施硅可促进白菜地上部的生长,但对其根系的生长不利,这可能与施硅带入的钠离子对根所产生的盐害有关。

## 2 硅对白菜地上部吸收镉的抑制效应

由表2可知,在相同硅水平下,镉在白菜地上部的累积含量与镉浓度密切相关,其随着镉水平的增加而急剧上升。施硅显著削弱镉污染的土壤上白菜的地上部对镉的吸收和累积,在较高(0.6、1.2 mg·kg<sup>-1</sup>)镉水平下,施硅显著降低地上部的镉含量;0、0.3 mg·kg<sup>-1</sup>的镉水平下施用高量(2.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅抑制镉吸收的效果显著,而施用较低量(0.5、1.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅的抑制不显著。

表2 硅对镉污染下白菜地上部吸收镉含量的影响

Table 2 Effects of silicon on Cd content of Chinese cabbage shoots under Cd contamination

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 浓度 /g·kg <sup>-1</sup>	地上部的镉含量 /mg·kg <sup>-1</sup>			
	Cd <sub>0</sub>	Cd <sub>0.3</sub>	Cd <sub>0.6</sub>	Cd <sub>1.2</sub>
0	0.043 <sup>a</sup>	0.477 <sup>a</sup>	1.049 <sup>a</sup>	1.840 <sup>a</sup>
0.5	0.039 <sup>a</sup>	0.338 <sup>ab</sup>	0.748 <sup>b</sup>	1.071 <sup>b</sup>
1.0	0.032 <sup>a</sup>	0.268 <sup>ab</sup>	0.482 <sup>bc</sup>	0.816 <sup>b</sup>
2.0	0.027 <sup>a</sup>	0.143 <sup>b</sup>	0.212 <sup>c</sup>	0.457 <sup>c</sup>

## 3 硅对镉污染下白菜的几种生理生化指标的影响

表3~5显示:(1)在较低(0、0.3、0.6 mg·kg<sup>-1</sup>)镉浓度下,适量(0.5、1.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅可在一定程度上提高白菜叶绿素含量,但较高量(2.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅则降低叶绿素含量;较高(1.2 mg·kg<sup>-1</sup>)镉水平下,施硅降低白菜的叶绿素含量,叶绿素含量随着硅的增加而递减(表3)。

(2)随着镉浓度的提高,叶细胞膜受损伤程度加剧,电解质外渗率增大;但不同镉浓度范围内,适量施外源硅可在一定程度上降低白菜叶细胞质膜透性,但施用较高量(2.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅,质膜

表3 硅对镉污染下白菜叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of silicon on chlorophyll content of Chinese cabbage leaves under Cd contamination

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 浓度 /g·kg <sup>-1</sup>	叶绿素含量(SPAD 值)			
	Cd <sub>0</sub>	Cd <sub>0.3</sub>	Cd <sub>0.6</sub>	Cd <sub>1.2</sub>
0	45.0 <sup>b</sup>	49.7 <sup>a</sup>	47.8 <sup>a</sup>	47.8 <sup>a</sup>
0.5	48.9 <sup>a</sup>	50.7 <sup>a</sup>	48.7 <sup>a</sup>	47.0 <sup>a</sup>
1.0	49.9 <sup>a</sup>	50.3 <sup>a</sup>	49.4 <sup>a</sup>	45.9 <sup>a</sup>
2.0	49.1 <sup>a</sup>	47.4 <sup>a</sup>	47.4 <sup>a</sup>	45.2 <sup>a</sup>

表4 硅对镉污染下白菜叶片相对电导率的影响

Table 4 Effects of silicon on leaf relative conductivity of Chinese cabbage under Cd contamination

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 浓度 /g·kg <sup>-1</sup>	相对电导率 /%			
	Cd <sub>0</sub>	Cd <sub>0.3</sub>	Cd <sub>0.6</sub>	Cd <sub>1.2</sub>
0	15.05 <sup>a</sup>	15.37 <sup>a</sup>	16.06 <sup>a</sup>	18.53 <sup>a</sup>
0.5	14.83 <sup>a</sup>	14.73 <sup>a</sup>	15.58 <sup>a</sup>	17.17 <sup>a</sup>
1.0	13.94 <sup>a</sup>	14.41 <sup>a</sup>	15.21 <sup>a</sup>	16.89 <sup>a</sup>
2.0	16.52 <sup>a</sup>	16.47 <sup>a</sup>	17.41 <sup>a</sup>	19.46 <sup>a</sup>

表5 硅对镉污染下白菜 SOD、CAT 和 POD 活性的影响

Table 5 Effects of silicon on SOD, CAT and POD activities of Chinese cabbage under Cd contamination

处理	SOD 活性 / U·g <sup>-1</sup> (FW)			CAT 活性 / U·g <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup>		POD 活性 / U·g <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup>	
Cd <sub>0</sub>	Si <sub>0</sub>	63.78 <sup>a</sup>	32.25 <sup>a</sup>	190 <sup>a</sup>			
	Si <sub>0.5</sub>	55.11 <sup>a</sup>	32.25 <sup>a</sup>	248 <sup>a</sup>			
	Si <sub>1.0</sub>	54.60 <sup>a</sup>	32.83 <sup>a</sup>	280 <sup>a</sup>			
	Si <sub>2.0</sub>	48.47 <sup>a</sup>	31.00 <sup>a</sup>	285 <sup>a</sup>			
Cd <sub>0.3</sub>	Si <sub>0</sub>	44.46 <sup>a</sup>	32.50 <sup>a</sup>	305 <sup>a</sup>			
	Si <sub>0.5</sub>	44.22 <sup>a</sup>	32.56 <sup>a</sup>	310 <sup>a</sup>			
	Si <sub>1.0</sub>	44.17 <sup>a</sup>	33.69 <sup>a</sup>	314 <sup>a</sup>			
	Si <sub>2.0</sub>	41.26 <sup>a</sup>	32.00 <sup>a</sup>	357 <sup>a</sup>			
Cd <sub>0.6</sub>	Si <sub>0</sub>	44.17 <sup>a</sup>	31.50 <sup>a</sup>	333 <sup>a</sup>			
	Si <sub>0.5</sub>	44.09 <sup>a</sup>	32.67 <sup>a</sup>	352 <sup>a</sup>			
	Si <sub>1.0</sub>	43.00 <sup>a</sup>	33.42 <sup>a</sup>	360 <sup>a</sup>			
	Si <sub>2.0</sub>	40.48 <sup>a</sup>	30.94 <sup>a</sup>	375 <sup>a</sup>			
Cd <sub>1.2</sub>	Si <sub>0</sub>	44.16 <sup>a</sup>	31.44 <sup>a</sup>	342 <sup>a</sup>			
	Si <sub>0.5</sub>	41.70 <sup>a</sup>	32.25 <sup>a</sup>	346 <sup>a</sup>			
	Si <sub>1.0</sub>	41.35 <sup>a</sup>	33.31 <sup>a</sup>	332 <sup>a</sup>			
	Si <sub>2.0</sub>	38.14 <sup>a</sup>	30.06 <sup>a</sup>	328 <sup>a</sup>			

透性则增大(表4)。这与高柳青和杨树杰(2004)在小麦中的结果一致。

(3)随着土壤中镉浓度的提高,白菜的SOD活性呈现下降趋势,而其POD活性则呈现一定的上升趋势。施硅可进一步降低白菜的SOD活性,施适量(0.5、1.0 g·kg<sup>-1</sup>)的硅浓度可在一定程度上提高白菜的CAT和POD活性;而较高量(2.0 g·kg<sup>-1</sup>)硅下,CAT活性比不施硅的略有下降;在较高(1.2 mg·kg<sup>-1</sup>)镉胁迫下,POD活性略有下降,但仍维持在一个较高水平(表5)。

### 参考文献

- 蔡德龙, 陈常友, 小林均(2000). 硅肥对水稻镉吸收影响初探. 地域研究与开发, 19 (4): 69~71
- 陈秀芳, 赵秀兰, 夏章菊, 佟振峰(2005). 硅缓解小麦镉毒害的效应研究. 西南农业大学学报(自然科学版), 27 (4): 447~450
- 高柳青, 杨树杰(2004). 硅对小麦吸收镉的影响及其生理效应. 中国农学通报, 20 (5): 246~249
- 关军锋(1999). Ca<sup>2+</sup>对苹果果实细胞膜透性、保护酶活性和保护物质含量的影响. 植物学通报, 16 (1): 72~74
- 李合生主编(2001). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 167~169
- 孙万春, 梁永超, 杨艳芳(2002). 硅和接种黄瓜炭疽菌对黄瓜过氧化物酶活性的影响及其与抗病性的关系. 中国农业科学, 35 (12): 1560~1564
- 谈建康, 安树青, 王铮峰, 朱学雷, 张久海, 陈兴龙, 李国旗(1998). NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对小麦叶片自由基含量及质膜透性的比较研究. 植物学通报, 15 (增刊): 82~86
- 徐呈祥, 刘兆普, 刘友良(2004). 硅在植物中的生理功能. 植物生理学通讯, 40 (6): 753~757
- 杨超光, 豆虎, 梁永超, 娄运生(2005). 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响. 中国农业科学, 38 (1): 116~121
- 中华人民共和国卫生部(1996). GB/T 5009.15-1996 食品中镉的测定方法. 北京: 中国标准出版社
- 邹琦主编(2000). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 168~170
- Gong HJ, Zhu XY, Chen KM, Wang SM, Zhang CL (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Sci, 169: 313~321
- Shi QH, Bao ZY, Zhu ZJ, He Y, Qian QQ, Yu JQ (2005). Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. Phytochemistry, 66: 1551~1559
- Zhu ZJ, Wei GQ, Li J, Qian QQ, Yu JQ (2004). Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Sci, 167: 527~533