

喷施硅铈溶胶缓解镉铅对小白菜毒害的研究*

崔晓峰^{1,2} 李淑仪^{1†} 丁效东¹ 廖新荣¹ 薛石龙^{1,2} 王荣萍¹ 王德汉²

(1 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

(2 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要 通过大田试验, 在轻度镉-铅复合污染菜地向小白菜叶面喷施用不同浓度的硅溶胶、铈溶胶及硅铈复合溶胶, 研究其对产量、品质、抗氧化酶活性及 Cd、Pb 吸收的影响。结果表明, 喷施硅铈溶胶均能促进小白菜生长, 增加小白菜生物量和提高维生素 C、可溶性糖的含量, 降低亚硝酸盐的含量; 显著增强抗氧化系统保护酶(SOD、POD)活性和降低小白菜地下部、地上部中镉、铅的含量及累积量。在不同浓度的施硅和施铈处理中, 喷施 $0.50 \text{ g kg}^{-1} \text{SiO}_2$ 处理和 $0.20 \text{ g kg}^{-1} \text{CeO}_2$ 处理在增产、提升品质和缓解重金属对小白菜毒害上效果最佳, 喷施硅铈复合溶胶虽效果显著, 但与单独施硅、施铈相比无明显提高。

关键词 小白菜; 硅、铈溶胶; 重金属; 吸收; 酶活性; 品质

中图分类号 X56; S-3 **文献标识码** A

随着现代工业的发展, 环境污染加剧, 工业“三废”的排放以及垃圾等废弃物和含金属的农药、化肥的不合理使用, 导致菜地土壤受重金属的污染, 进而污染蔬菜, 再通过食物链进入人体而给人体健康带来的危害。目前已发现有不少地区的近郊农田受重金属污染^[1-3], 其中镉铅污染较为严重。如何降低蔬菜对重金属吸收已成为环境污染领域研究的热点。

有研究发现, 硅能缓解重金属对植物的毒害和抑制根系吸收重金属^[4-6]。土壤施硅可极显著降低玉米根和茎叶中镉的浓度, 在镉等量情况下, 施硅极显著降低了玉米根、茎、叶吸收镉的绝对量及全株总吸收量^[7]。也有研究表明, 在玉米遭受铅污灌的逆境下, 铈能够减轻膜脂过氧化, 增大脯氨酸的累积效应, 稳定膜系统的结构与功能, 减轻玉米幼苗的铅伤害^[8]。目前硅、铈多以硅肥和稀土肥料的形式直接施入土壤, 由于硅肥的溶解性差、易被土壤胶体吸附固定, 稀土铈易于形成沉淀, 故其利用率均较低^[9-10]。李慧敏等^[11]通过喷施硅铈溶胶来抑制生菜吸收砷, 取得较好效果。鉴于此, 本文选择具有代表性的镉、铅轻度污染菜田 ($c(\text{Pb}) = 109.1 \text{ mg kg}^{-1}$, $c(\text{Cd}) = 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$, 根据无公害

农产品(或原料)产地环境标准(DB44/102.1-1999)^[12], 土壤中 $c(\text{Pb}) \leq 50 \text{ mg kg}^{-1}$, $c(\text{Cd}) \leq 0.3 \text{ mg kg}^{-1}$), 通过叶面喷施硅、铈溶胶研究对小白菜生长、品质改善和吸收镉、铅的影响, 以期为轻度污染土壤的蔬菜质量安全提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 溶胶制备

二氧化硅溶胶和二氧化铈溶胶的制备方法参照文献^[6]。

1.2 试验材料

用上述方法制备的 20 g kg^{-1} 硅溶胶和铈溶胶加去离子水稀释, 制得浓度分别为 0.25 g kg^{-1} 、 0.5 g kg^{-1} 、 $1.0 \text{ g kg}^{-1} \text{SiO}_2$ 的硅溶胶, 0.05 g kg^{-1} 、 0.10 g kg^{-1} 、 $0.20 \text{ g kg}^{-1} \text{CeO}_2$ 的铈溶胶及 $0.50 \text{ g kg}^{-1} \text{SiO}_2 + 0.05 \text{ g kg}^{-1} \text{CeO}_2$ 、 $1.00 \text{ g kg}^{-1} \text{SiO}_2 + 0.05 \text{ g kg}^{-1} \text{CeO}_2$ 的硅铈复合溶胶。

供试小白菜品种为矮脚葵扇黑叶白菜 (*Brassica Chinensis*), 购自广东省农业科学院。试验菜地为广州市白云区某菜场, 试验前土壤理化性质见表 1。

* 广东省现代农业产业体系特色蔬菜创新团队建设项目(粤农[2009]380号)、广东省院战略合作项目(2011B090300052)、国家自然科学基金项目(41001135)资助

† 通讯作者, Tel: 020-87024752; E-mail: lishuyi@soil.gd.cn

作者简介: 崔晓峰(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤和植物重金属污染控制。E-mail: cuixf2009@163.com

收稿日期: 2012-05-07; 收到修改稿日期: 2012-09-20

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil tested

土壤质地 Soil texture	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K (mg kg ⁻¹)	全镉 Total Cd (mg kg ⁻¹)	全铅 Total Pb (mg kg ⁻¹)	有效镉 Available Cd (mg kg ⁻¹)	有效铅 Available Pb (mg kg ⁻¹)
壤质黏土	7.13	36.1	1.78	96.5	311	1.117	109.1	0.429	1.353

1.3 试验设计

试验喷施硅铈溶胶浓度设 9 个处理:空白对照 (CK)、0.25 g kg⁻¹ SiO₂ (Si₁)、0.50 g kg⁻¹ SiO₂ (Si₂)、1.00 g kg⁻¹ SiO₂ (Si₃)、0.05 g kg⁻¹ CeO₂ (Ce₁)、0.10 g kg⁻¹ CeO₂ (Ce₂)、0.20 g kg⁻¹ CeO₂ (Ce₃)、0.50 g kg⁻¹ SiO₂ + 0.05 g kg⁻¹ CeO₂ (Si₂Ce₁)、1.00 g kg⁻¹ SiO₂ + 0.05 g kg⁻¹ CeO₂ (Si₃Ce₁)。每个处理重复 3 次,共 27 个试验小区,每个小区面积为 10 m²。小白菜于 2011 年 3 月 2 日育苗,3 月 16 日选择生长状况良好且均匀的菜苗移植各试验小区,28 d 后收获。每个小区移栽前施基肥(147 g 尿素、187 g 过磷酸钙、18 g 氯化钾),此外,分别在移植后 1 周淋施 73 g 尿素和 9 g 氯化钾,待叶片上水干后喷施硅、铈溶胶,以后每隔一周喷施一次,共 3 次,每次追肥后用喷雾器将溶胶均匀地喷在小白菜叶片表面,对照组喷施等量清水。

1.4 样品采集及处理

每个小区采集 3 株带根小白菜带回实验室。用不锈钢剪刀将小白菜茎叶与根剪开,称取 30 g 茎叶样品测定亚硝酸盐、维生素 C 含量及 SOD、POD 活性。剩余样品称鲜重后用自来水清洗,再用去离子水冲洗,80 °C 恒温杀青 30 min,60 °C 烘干至恒重,称重,粉碎,过 0.5 mm 筛后,放入封口样品袋,干燥处保存备用。

1.5 样品测定

亚硝酸盐测定采用盐酸萘乙二胺法 (GB/T5009.33-2003)^[13];维生素 C 含量测定采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[14];可溶性糖含量测定采用氰化盐-碘量法^[14];过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚氧化比色法^[15];超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑光还原比色法^[16];蔬菜中 Cd、Pb 含量测定方法见参考文献^[17]。

1.6 数据处理

所有数据均采用 Excel 2003 进行处理,用 SPSS 16.0 统计软件方差分析,在 5% 水平下采用最小显著差异法 (LSD) 对数据进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 喷施硅、铈溶胶对小白菜生物量的影响

由表 2 可知, Si₁、Si₂ 处理小白菜的生物量与对照相比有显著性增加,增幅分别为 11.4%、8.9%,而 Si₃ 处理与对照无显著差异。施铈处理中只有铈溶胶浓度高 (0.20 g kg⁻¹) 的 Ce₃ 处理生物量显著增加,浓度较低的铈处理对小白菜的生物量无显著影响。喷施硅铈复合溶胶对增加小白菜的生物量效果均不显著 (表 2)。与单独喷施硅、铈溶胶相比, Si₂Ce₁、Si₃Ce₁ 处理下小白菜生物量无显著变化。

2.2 喷施硅、铈溶胶对小白菜品质的影响

由表 2 可知,喷施硅溶胶能显著性增加小白菜中维生素 C、可溶性糖的含量,且硅溶胶浓度较高的处理 (Si₃) 效果更显著,增幅为 31.0%。施铈处理 (Ce₁、Ce₂、Ce₃) 维生素 C 的含量均有显著性增加,三者之间没有显著性差异。喷施硅铈复合溶胶的处理维生素 C 的含量与对照相比有显著性增加,但与 Ce₁ 处理相比无显著性增加。Si₂Ce₁ 处理与 Si₂ 处理之间维生素 C 的含量也无显著性差异, Si₃Ce₁ 处理维生素 C 的含量却较 Si₃ 处理显著增加。施硅处理中 Si₁、Si₃ 可溶性糖的含量与对照相比均有显著性增加,增幅分别为 32.0%、24.0%。喷施铈溶胶处理小白菜可溶性糖的含量均无显著变化。喷施硅铈复合溶胶的处理 (Si₂Ce₁、Si₃Ce₁) 可溶性糖的含量显著性增加,其增幅分别为 20.8%、16.0%。

喷施硅溶胶能显著降低小白菜中亚硝酸盐的含量,且硅溶胶浓度越高亚硝酸盐的含量越低 (表 2),3 个施硅处理 (Si₁、Si₂、Si₃) 亚硝酸盐含量降幅分别为 31.9%、46.0%、57.8%。叶面喷施铈溶胶也能显著性降低亚硝酸盐的含量,降幅为 21.2% ~ 61.3%。Si₂Ce₁ 处理亚硝酸盐的含量均高于单独施硅 (Si₂)、施铈 (Ce₁) 处理, Si₃Ce₁ 处理亚硝酸盐的含量与 Si₂、Ce₁ 处理均无显著性差异。

表 2 喷施硅、铈溶胶对小白菜生物量、品质和保护酶活性的影响

Table 2 Effects of spraying silicon sol and cerium sol on biomass, quality, POD activity and SOD activity of Cabbage

处理		生物量	维生素 C 含量	可溶性糖含量	亚硝酸盐含量	POD 活性	SOD 活性
Treatment		Biomass	Vitamin C	Soluble sugar	Nitrite content	POD activity	SOD activity
		(kg m^{-2})	content (g kg^{-1})	content (g kg^{-1})	(mg kg^{-1})	($\text{A470 min}^{-1} \text{g}^{-1}$)	(U g^{-1})
硅	CK	1.87 ± 0.04Bb	0.38 ± 0.03Cd	0.13 ± 0.01Cb	0.82 ± 0.11Aa	0.37 ± 0.02Cc	13.3 ± 0.5Cc
Si	Si ₁	2.08 ± 0.11A	0.48 ± 0.02B	0.17 ± 0.00A	0.56 ± 0.04B	0.42 ± 0.02B	17.1 ± 0.5B
	Si ₂	2.03 ± 0.09A	0.52 ± 0.02A	0.12 ± 0.01C	0.44 ± 0.05C	0.41 ± 0.02B	19.2 ± 1.3AB
	Si ₃	1.91 ± 0.23AB	0.50 ± 0.00AB	0.16 ± 0.01AB	0.34 ± 0.03D	0.48 ± 0.02A	17.0 ± 0.5B
铈	Ce ₁	1.96 ± 0.20b	0.46 ± 0.01c	0.12 ± 0.02b	0.38 ± 0.06c	0.42 ± 0.02ab	17.6 ± 1.6b
	Ce ₂	2.02 ± 0.12ab	0.52 ± 0.01a	0.13 ± 0.01ab	0.64 ± 0.04b	0.41 ± 0.03ab	20.4 ± 0.9a
	Ce ₃	2.04 ± 0.09a	0.48 ± 0.01b	0.12 ± 0.03ab	0.32 ± 0.01c	0.45 ± 0.02a	18.9 ± 1.6ab
硅铈	Si ₂ Ce ₁	1.85 ± 0.12Bb	0.48 ± 0.01Bb	0.15 ± 0.01ABa	0.58 ± 0.08Bb	0.46 ± 0.04ABa	19.3 ± 1.5ABab
Si and Ce	Si ₃ Ce ₁	1.90 ± 0.10Bb	0.41 ± 0.04Cd	0.15 ± 0.01Ba	0.38 ± 0.01Dc	0.44 ± 0.01Bab	21.0 ± 1.5Aa

注:数据 = 均值 ± 标准误差 ($n=3$)。同一栏中用不同小写字母表示施硅处理数据显著性差异 ($p < 0.05$); 同一栏中施铈处理数据后不用不同大写字母表示显著性差异 ($p < 0.05$)。下同 Notes: Data are means ± SE ($n=3$). Different lowercase letters in the same column denote significant differences between silicon treatments at $p < 0.05$; Different capital letters in the same column denote significant differences between cerium treatments at $p < 0.05$. The same below

2.3 喷施硅、铈溶胶对 Cd、Pb 胁迫下小白菜保护酶 POD、SOD 活性的影响

由表 2 可知,喷施硅溶胶能显著提高过氧化物酶(POD)的活性,且硅溶胶浓度较高时(Si₂、Si₃处理)POD活性提升更显著,约为35.3%、31.2%。3个喷施铈溶胶处理均能显著提高POD的活性,且三者之间也存在显著差异,Ce₂处理对POD活性提升幅度最大,Ce₁处理最小。喷施硅铈复合溶胶的Si₂Ce₁处理POD活性有显著性提高,而Si₃Ce₁处理与对照无显著变化。与Si₂、Si₃处理相比,Si₂Ce₁、Si₃Ce₁处理POD活性有所降低。Ce₁处理POD活性低于Si₂Ce₁处理,高于Si₃Ce₁处理。

喷施硅溶胶能显著提高超氧化物歧化酶(SOD)的活性(表2),提升幅度范围为27.9%~44.7%,Si₁、Si₂、Si₃处理之间SOD活性无显著性差异。与对照相比,喷施铈溶胶处理SOD的活性均有显著性提高,其中Ce₂处理提升幅度最大,约为54.1%,而另外两个铈处理之间无显著性差异。Si₂Ce₁处理与单独施硅(Si₂)、施铈(Ce₁)处理之间SOD活性无显著性差异, Si₃Ce₁处理SOD活性高于Si₃处理和Ce₁处理。

2.4 喷施硅、铈溶胶对小白菜中 Cd、Pb 分布的影响

由表 3 可知,喷施硅、铈溶胶能显著降低小白菜地上部和根部中 Cd 的含量及累积量。当喷施硅溶胶浓度为 0.50 g kg⁻¹(Si₂)时,小白菜地上部和根部

中 Cd 的含量及累积量显著低于对照,也低于另外两个施硅处理(Si₁、Si₃)。喷施铈溶胶浓度越高,小白菜地上部中 Cd 的含量降低幅度越大,当铈溶胶浓度为 0.20 g kg⁻¹时,Cd 的含量降低了 46.0%。喷施铈溶胶处理小白菜地上部中 Cd 的累积量无显著差异,但均低于对照。硅铈溶胶同时喷施对小白菜地上部中 Cd 的含量及累积量有显著的降低效果,且优于单独施硅(铈)。

喷施硅溶胶浓度高于 0.50 g kg⁻¹时硅能抑制小白菜根吸收 Cd,当喷施硅溶胶浓度为 1.00 g kg⁻¹时小白菜根部中 Cd 的累积量显著降低。喷施铈溶胶处理均能降低根部中 Cd 的含量,降幅分别为 26.0%、24.6%、22.3%,说明铈具有抑制小白菜根系吸收 Cd 的作用。喷施复合溶胶对根吸收 Cd 有显著地抑制作用,但与单独喷施硅溶胶(铈溶胶)无显著性差异。由此可知,喷施硅、铈溶胶能抑制小白菜根系吸收 Cd 及向地上部的运输,同时喷施硅铈溶胶对小白菜吸收、转运 Cd 的抑制效果与单独施硅(铈)相似。

表 4 数据表明,喷施硅铈溶胶能降低小白菜地上部和根部中 Pb 的含量及累积量。喷施硅溶胶处理中浓度较低的 Si₁、Si₂处理能显著降低地上部中 Pb 的含量及累积量。Ce₂、Ce₃处理小白菜地上部 Pb 的含量及累积量均显著降低,而 Ce₁处理则无显著变化。硅溶胶、铈溶胶同时喷施能显著降低小白菜地上部 Pb 的含量及累积量, Si₂Ce₁处理和 Si₃Ce₁处

理地上部 Pb 的含量降低幅度分别为 56.7%、52.5%,累积量降低幅度为 57.8、50.4%。在降低地上部 Pb 的累积量上, Si₂Ce₁ (Si₃Ce₁) 处理优于单独施硅 (Si₃)、施铈 (Ce₁) 处理。

喷施硅溶胶浓度越高小白菜根部 Pb 的含量及累积量越低 (表 4), 当硅溶胶浓度为 1.00 g kg⁻¹ (Si₃) 时, 根部 Pb 的含量及累积量最低。Ce₁、Ce₃ 处理均能抑制小白菜吸收 Pb 并降低其在根部的累积

量, 其中 Ce₁ 处理效果更好。喷施硅铈复合溶胶对抑制根吸收 Pb 有显著作用, Si₂Ce₁ 和 Si₃Ce₁ 处理根部 Pb 的含量降低了 51.2%、67.3%, 累积量降低了 51.4%、67.2%。喷施复合溶胶对根吸收 Pb 的抑制作用与单独喷施硅溶胶 (铈溶胶) 无显著性差异。上述表明硅、铈能抑制根吸收 Pb 并阻碍 Pb 向地上部运输, 降低 Pb 在根部和地上部的累积量, 但硅铈同时喷施其作用效果并未加成。

表 3 喷施硅、铈对小白菜中 Cd 分布的影响

Table 3 Effects of spraying silicon sol and cerium sol on distribution of Cd in Cabbage

处理 Treatment		地上部 Shoot		根部 Root	
		含量 Content ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	累积量 Accumulation ($\mu\text{g m}^{-2}$)	含量 Content ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	累积量 Accumulation ($\mu\text{g m}^{-2}$)
硅	CK	14.09 ± 0.09Aa	23.29 ± 0.60Aa	20.61 ± 1.32Aa	4.54 ± 0.40A
Si	Si ₁	10.71 ± 1.56B	19.45 ± 1.90B	19.34 ± 0.59AB	4.53 ± 1.03A
	Si ₂	8.59 ± 0.56C	15.17 ± 0.25C	17.35 ± 1.05B	4.41 ± 0.94A
	Si ₃	10.57 ± 0.52B	18.23 ± 1.38B	15.31 ± 2.04BC	2.45 ± 0.49B
铈	Ce ₁	10.58 ± 2.85b	17.92 ± 3.53b	15.25 ± 2.06bc	2.56 ± 0.29ab
	Ce ₂	9.86 ± 0.88b	17.57 ± 1.98b	15.54 ± 1.42bc	3.51 ± 0.37ab
	Ce ₃	7.61 ± 1.34c	13.90 ± 3.13bc	16.01 ± 2.42b	3.90 ± 0.58a
硅铈	Si ₂ Ce ₁	7.12 ± 1.16Cc	11.67 ± 1.30Dc	14.27 ± 1.74Cc	2.61 ± 0.47Bb
Si and Ce	Si ₃ Ce ₁	8.36 ± 0.98Cbc	14.15 ± 2.39CDbc	15.51 ± 0.90Bb	3.50 ± 0.66ABab

表 4 喷施硅、铈溶胶对小白菜中 Pb 分布的影响

Table 4 Effects of spraying silicon sol and cerium sol on distribution of Pb in Cabbage

处理 Treatment		地上部 Shoot		根部 Root	
		含量 Content ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	累积量 Accumulation ($\mu\text{g m}^{-2}$)	含量 Content ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	累积量 Accumulation ($\mu\text{g m}^{-2}$)
硅	CK	5.99 ± 0.22Aa	9.90 ± 0.42Aa	280.8 ± 34.8Aa	62.22 ± 9.41A
Si	Si ₁	3.98 ± 0.63B	7.28 ± 0.99B	257.8 ± 31.6A	59.94 ± 15.23A
	Si ₂	3.75 ± 0.23B	6.64 ± 0.24B	164.8 ± 15.7B	39.84 ± 3.62B
	Si ₃	5.18 ± 1.22AB	8.60 ± 1.48AB	86.53 ± 11.80C	13.42 ± 1.20D
铈	Ce ₁	4.98 ± 0.84ab	8.58 ± 0.72ab	114.8 ± 16.6cd	19.14 ± 1.51c
	Ce ₂	3.69 ± 0.38b	6.52 ± 0.48b	220.2 ± 25.2ab	50.41 ± 9.16ab
	Ce ₃	4.26 ± 0.42b	7.60 ± 0.49b	177.0 ± 27.0b	45.07 ± 11.21b
硅铈	Si ₂ Ce ₁	2.60 ± 0.72Bb	4.18 ± 0.88Cc	136.6 ± 0.8Bc	24.61 ± 2.21Cc
Si and Ce	Si ₃ Ce ₁	2.84 ± 0.74Bb	4.91 ± 1.46Cc	92.14 ± 19.64Cd	21.31 ± 7.30Cc

3 讨论

3.1 叶面施硅、铈对小白菜生物量及品质的影响

饶立华等^[18]研究发现, 硅能增加植物叶片面

积, 改善个体及群体的光照条件, 增加叶绿素含量, 从而提高植物光合效率, 合成更多的有机物质。本研究发现, 喷施浓度为 0.25 g kg⁻¹、0.50 g kg⁻¹ 硅溶胶和 0.20 g kg⁻¹ 铈溶胶小白菜的生物量显著增加, 而喷施硅铈复合溶胶 (Si₂Ce₁、Si₃Ce₁) 并未增加小

白菜生物量。当喷施硅溶胶浓度为 1.00 g kg^{-1} 时,小白菜中维生素 C 及可溶性糖的含量显著增加,亚硝酸盐的含量显著低于对照和其他施硅处理(表 2)。喷施铈溶胶处理小白菜维生素 C 的含量显著增加,亚硝酸盐的含量显著降低,可能与稀土铈能促进植物吸收矿质元素和提高光合效率有关^[19]。

3.2 叶面施硅、铈对小白菜保护酶活性的影响

许多研究证实重金属胁迫导致植物体内的活性氧的产生和清除失衡,造成植物体内自由基累积,而植物体内抗氧化物保护酶 SOD、POD 能清除由于重金属胁迫而产生过多的氧自由基,从而缓解重金属对植物的毒害^[20]。本研究发现,喷施硅溶胶能显著提高小白菜体内 SOD、POD 活性,且其活性与硅溶胶浓度相关。硅溶胶浓度为 0.50 g kg^{-1} 时其 SOD、POD 活性最高,是对照的 1.45 倍、1.35 倍,低于或高于该浓度时其 SOD、POD 活性均降低,这与张丽娜等^[4]的研究结果一致。罗玉明等^[21]研究发现,铈能明显提高菱叶片 SOD、POD 活性,增加其清除自由基能力。本研究表明,喷施铈溶胶也能提高其 SOD、POD 活性,当铈溶胶浓度为 0.10 g kg^{-1} 时,与对照相比,其 SOD、POD 活性分别提高了 54.1%、35.1%,铈溶胶浓度高于或低于该浓度时,其效果均会降低。硅铈复合处理的小白菜 SOD、POD 活性虽显著高于对照,但与单独施硅(Si_2)、施铈(Ce_1)处理无显著提高,表明硅、铈同时使用其效果并未加成。

3.3 叶面施硅、铈对小白菜镉、铅含量及累积量的影响

本研究是将硅、铈以溶胶形式喷施到叶面,在小白菜生长前期(第一次喷施时),有少许溶胶洒到地面,而在生长中后期其叶片覆盖地面,喷施的溶胶将全部落在叶片上。由于喷施的溶胶浓度较低,且硅、铈直接施入土壤时利用率低^[9-10]。本研究表明,喷施硅溶胶的小白菜地上部和根部中镉、铅含量及累积量均显著降低,喷施硅溶胶浓度为 0.50 g kg^{-1} 时,地上部镉、铅含量及累积量最低;根部镉、铅含量及累积量随硅溶胶浓度升高而降低,硅溶胶浓度为 1.00 g kg^{-1} 的处理(Si_3)最低。Liu 等^[6]研究发现,水稻从叶面吸收的硅运输到根系,增强了水稻根系细胞壁对 Cd 的吸附固定能力,从而阻止了 Cd 从根系往地上部和籽粒中转运。硅与根系表皮下的纤维层和内皮层细胞中的硅结合蛋白相结合而沉积下来,进而降低细胞壁孔隙度^[22],本试验还发现硅能提高保护酶活性,缓解自由基对

细胞膜的损害,保护膜完整性,从而抑制 Cd、Pb 进入根部细胞。

胡忻等^[23]研究发现,铈可明显降低小麦幼苗茎叶及根系中镉的生物富集量,降低 Cd 的茎叶/根系比值,说明铈不仅能抑制小麦根系吸收镉,还能阻碍镉向茎叶中运输。本研究也发现,喷施铈溶胶的小白菜地上部和根部中镉、铅含量及累积量均显著降低, Ce_3 处理小白菜地上部镉含量及累积量最低, Ce_2 处理小白菜地上部铅含量及累积量最低,小白菜根部镉、铅含量及累积量均最低的是喷施铈溶胶浓度为 0.05 g kg^{-1} 的处理(Ce_1)。铈通过提高抗氧化系统保护酶活性及自身特性,清除由于重金属 Cd、Pb 胁迫产生的大量自由基,减轻膜脂过氧化程度^[24],从而保护膜的完整性,阻碍 Cd、Pb 进入细胞,降低小白菜地上部和根部 Cd、Pb 含量。喷施硅铈复合溶胶的小白菜镉、铅含量及累积量均显著低于对照,且某些指标降低幅度在还大于单独施硅或施铈。由此可知,喷施铈溶胶能降低小白菜中镉、铅含量及累积量,抑制根系对镉、铅的吸收及向地上部运输,喷施硅铈复合溶胶在一定程度上能增强这种抑制效果。

4 结 论

在镉铅复合污染的菜地上,喷施硅、铈溶胶均能促进小白菜生长,增加其生物量和提高其维生素 C、可溶性糖含量,降低其亚硝酸盐含量。硅、铈溶胶对增强抗氧化系统保护酶 SOD、POD 活性效果显著,且硅、铈溶胶同时施用也能显著提高保护酶活性,从而有效清除重金属胁迫下产生的大量自由基,缓解重金属对小白菜的毒害。喷施硅、铈溶胶能抑制小白菜根系对 Cd、Pb 吸收及向地上部运输,显著降低根系、地上部中 Cd、Pb 含量及累积量,降低其通过食物链进入人体的风险。

在本研究 3 个施硅处理和 3 个施铈处理中, $0.50 \text{ g kg}^{-1} \text{SiO}_2$ 处理和 $0.20 \text{ g kg}^{-1} \text{CeO}_2$ 处理在增产、提升品质和缓解重金属对小白菜毒害上效果最佳;喷施硅铈复合溶胶虽然在增产、提升品质和缓解重金属对小白菜毒害上均有显著效果,但与单独施硅、施铈相比无明显提高。

参 考 文 献

- [1] 张超兰,白厚义. 南宁市郊部分菜区土壤和蔬菜重金属污染评价. 广西农业生物科学, 2001(9): 201—205. Zhang C L,

- Bai H Y. Valuing soil and vegetable polluted by heavy metal in suburb of Nanning (In Chinese). *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2001(9): 201—205
- [2] 戴军, 刘腾辉. 广州菜地生态环境的污染特征. *土壤通报*, 1995, 26(3): 102—104. Dai J, Liu T H. Characteristics of the ecological environment pollution of vegetable plot in Guangzhou (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(3): 102—104
- [3] 马往校, 段敏, 李岚. 西安市郊区蔬菜中重金属污染分析与评价. *农业环境保护*, 2000, 19(2): 96—98. Ma W X, Duan M, Li L. Assessment of pollution of heavy metals on vegetables from outskirts of Xi'an (In Chinese). *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(2): 96—98
- [4] 张丽娜, 宗良纲, 任德, 等. 硅对低 Cd 污染水平下水稻幼苗生长及吸收 Cd 影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 494—499. Zhang L N, Zong L G, Ren C, et al. Effects of Si on rice seedling growth and uptake of Cd in the low level of Cd pollution (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 494—499
- [5] 李淑仪, 林翠兰, 许建光, 等. 施硅对小白菜吸收累积和迁移重金属铬的影响. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 66—69. Li S Y, Lin C L, Xu J G, et al. Silicon induced effects of chrome uptake and cumulate as well as transplanted by *Brassica Chinensis* (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 66—69
- [6] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3): 1 466—1 472
- [7] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(1): 116—121. Yang C G, Dou H, Liang Y C, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil (In Chinese). *Scientia Agricultural Sinica*, 2005, 38(1): 116—121
- [8] 徐秋曼, 陈宏, 程景胜. 稀土元素铈减轻铅对玉米毒害的机理初探. *西南大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(3): 70—74. Xu Q M, Chen H, Cheng J S. The mechanism of alleviation of Ce against Pb stress of maize seedlings (In Chinese). *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2008, 30(3): 70—74
- [9] Savant N K, Snyder G H, Datnoff L E. Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*, 1997, 58: 151—199
- [10] 黄淑峰, 李宗云, 胡方方, 等. 稀土铈生物学效应的研究进展. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 351—356. Huang S F, Li Z Y, Hu F F, et al. Research progress on biological activity of rare Earth element cerium (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl.): 351—356
- [11] 李慧敏, 刘传平, 李芳柏, 等. 叶面喷施铈硅复合溶胶抑制砷生菜积累效应研究. *生态环境学报*, 2010, 19(5): 1 108—1 113. Li H M, Liu C P, Li F B, et al. Foliar application of ceria-silica sol reduced arsenic accumulation in lettuce (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5): 1 108—1 113
- [12] 广东省质量技术监督局. 无公害农产品(或原料)产地环境标准. 1999. Administration of Quality and Technology Supervision of Guangdong Province. Producing environmental standards of the pollution-free agricultural production (raw magenta) (In Chinese). 1999
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 食品卫生检验方法理化部分(一)(GB/T 5009. 33—2003). 北京: 中国标准出版社, 2004. Standardization Administration of the People's Republic of China. General principles for the methods of food hygienic analysis physical and chemical section (first) (GB/T 5009. 33—2003) (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2004
- [14] 劳家桎. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988: 615—623. Lao J C. Handbook for soil agricultural chemical analysis (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1988: 615—623
- [15] Cakmak I, Strboe D, Marschner H. Activities of hydrogen peroxide scavenging enzymes in germinating wheat seeds. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44: 127—132
- [16] Ginannopolities C N, Ries S K. Superoxide dismutase occurrence in higher plants. *Plants Physiology*, 1977, 59: 309—314
- [17] 杨惠芬, 李明元. 食品卫生理化检验标准手册. 北京: 中国标准出版社, 1998: 101—104. Yang H F, Li M Y. Food hygiene physical testing and standards manual (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1998: 101—104
- [18] 饶立华, 谭连祥, 朱玉贤, 等. 硅对杂交稻形态结构和生理的效应. *植物生理学通讯*, 1986(3): 20—24. Rao L H, Tan L X, Zhu Y X, et al. The effect of silicon on the morphological structure and physiology of hybrid rice (In Chinese). *Plant Physiology Communications*, 1986(3): 20—24
- [19] 谢永荣, 杨娉娉, 马巧, 等. 稀土元素对作物生长的影响. *作物杂志*, 2011(1): 5—9. Xie Y R, Yang P P, Ma Q, et al. Effects of rare earth elements on growth of crops (In Chinese). *Crops*, 2011(1): 5—9
- [20] 罗立新, 孙铁珩, 靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 495—499. Luo L X, Sun T H, Jin Y H. Accumulation of superoxide radical in wheat leaves under cadmium stress (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 495—499
- [21] 罗玉明, 保曙琳, 丁秉中, 等. 稀土元素铈缓解镉对菱叶的毒害效应研究. *土壤学报*, 2006, 43(5): 808—813. Luo Y M, Bao S L, Ding B Z, et al. Moderating effect of cerium on cadmium toxication of trap bispinosa leaves (In Chinese). *Acta pedologica sinica*, 2006, 43(5): 808—813
- [22] 史新慧, 王贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1 112—1 116. Shi X H, Wang H, Zhang F S. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1 112—1 116
- [23] 胡忻, 陈逸珺, 王晓蓉, 等. 稀土元素铈对小麦幼苗镉伤害的防护效应. *南京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(6): 671—677. Hu X, Chen Y J, Wang X R, et al. The protective effects of cerium on the damage to wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings caused by cadmium (In Chinese). *Journal of Nanjing*

University : Natural Sciences Editor, 2001, 37(6): 671—677

- [24] 钱秋琼, 刘莉, 杨静, 等. 铈对低温胁迫下茄子种子发芽及幼苗生长生理的影响. 园艺学报, 2005, 32(4): 710—712.
Qian Q Q, Liu L, Yang J, et al. Physiological effects of cerium

on seed germination and seeding of eggplant under chilling stress (In Chinese). Acta Horticulture Sonica, 2005, 32(4): 710—712

EFFECTS OF SPRAYING SILICON AND CERIUM SOLS ON RELIEVING TOXICITY OF Pb AND Cd IN THE CABBAGE

Cui Xiaofeng^{1,2} Li Shuyi^{1†} Ding Xiaodong¹ Liao Xinrong¹ Xue Shilong^{1,2} Wang Rongping¹ Wang Dehan²

(1 Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

(2 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract A field experiment of foliar application of silicon sol, cerium sol and silicon-cerium composite sol of different concentrations on cabbage in field mildly contaminated with cadmium and lead, was conducted to study effects of the application on yield, quality, antioxidant enzymes (SOD, POD) activities and Cd/Pb absorption, and hence to determine optimum concentration of the silicon sols and cerium sols to be sprayed for relieving toxicity of Cd and Pb. Results show that spraying both silicon and cerium sols could promote growth of cabbage, increase contents of vitamin C and soluble sugar; reduce nitrite content, enhance activities of SOD and POD, the antioxidant enzymes, and decrease contents and accumulation of Cd and Pb in root and shoot. In conclusion, among the treatments of silicon sols and cerium sols different in concentration, the one of 0.50 g kg⁻¹ (SiO₂) silicon sols and/or 0.20 g kg⁻¹ (CeO₂) cerium sols was the most significant in effect, but no significant difference was observed between the treatment of spraying one single sol and the treatment of spraying both sols in combination.

Key words Cabbage; Silicon, cerium sol; Heavy metal; Sorption; Antioxidant enzyme activities; Quality

(责任编辑:汪叔生)