

硅酸盐及腐植酸对 Cr-Pb 污染土壤中小白菜的生长和生理的影响

罗小玲^{1,2,3}, 李淑仪¹, 蓝佩玲¹, 王荣萍¹, 廖新荣¹

(1.广东省生态环境与土壤研究所广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650; 2.中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 3.中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要:针对硅酸盐或腐植酸在重金属污染土壤上的最佳施用量研究较少的问题,为保障蔬菜的品质安全,本文通过土壤盆栽试验,研究了硅酸盐、腐植酸对 Cr 和 Pb 单一污染及 Cr-Pb 复合污染土壤中小白菜(*Brassica Chinensis*)的生物量、生理指标的影响。结果表明,施用硅酸盐对 Cr-Pb 污染的抑制效果较好。其中 1.0 g·kg⁻¹ 质量分数的硅酸盐施用效果最佳,在小白菜未受污染时能促进生长;在受 Cr-Pb 污染后虽然促生长作用不明显,但施用后能有效减轻 Cr-Pb 污染对小白菜体内超氧化物歧化酶(SOD)活性的抑制,缓解小白菜根部细胞受到的过氧化损伤。同时发现,施硅量过高(2.0 g·kg⁻¹)或当土壤中存在 Pb 污染时施用 1.5 g·kg⁻¹ 以上质量分数的硅酸盐则对生长产生抑制。腐植酸也能在一定程度上提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的活性,但是对小白菜受到过氧化胁迫的缓解效果不如硅酸盐明显,对小白菜生长的促进作用不显著。

关键词:小白菜;硅酸盐;腐植酸;Cr-Pb 复合污染

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2338-07

Effect of Silicates and Humic Acid on Growth and Physiology of *Brassica Chinensis* Under the Stress of Cr-Pb

LUO Xiao-ling^{1,2,3}, LI Shu-yi¹, LAN Pei-ling¹, WANG Rong-ping¹, LIAO Xin-rong¹

(1.Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2.South China Botanical Garden, Guangzhou 510650, China; 3.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pb pollution in soil was very severe in Guangdong. Cr concentration was less than the background value in most soil, but it exceeded standard in suburb cultivated land. The situation of soil heavy metal pollution was threatenning the quality and safety of vegetable production in Guangdong. Aiming at optimization of manuring level of silicates and humic acid, pot experiments were carried out to study the effects of silicates and humic acid on growth and physiology of *Brassica Chinensis* which were growing up in Cr, Pb and Cr-Pb contaminated soil. The results indicated that, the inhibitory effect of silicates on toxicity of Cr-Pb pollution was better than humic acid's, and 1.0 g·kg⁻¹ silicates has the best effect. That mass fraction of silicates could improve the growth of unpolluted *Brassica Chinensis*, and promote the SOD activity of *Brassica Chinensis* polluted by Cr-Pb, alleviate the damage of membrane lipid peroxidation of root's plasma membrane. While high level silicates (2.0 g·kg⁻¹) or interaction between Pb and high level silicates (above 1.5 g·kg⁻¹) would inhibit the growth. Humic acid could also promote SOD and POD activity in a certain degree, but its detoxification and promoting effect on growth were not significant.

Keywords: *Brassica Chinensis*; silicates; humic acid; Cr-Pb compounded pollution

近年来,广东地区高强度的经济开发给环境质量带来危害,工业废气、废水的排放使污染物大量进入大气和河流,而当地农民常将河涌淤泥作为有机肥料

施用到耕地中的做法又使土壤受到重金属的污染。据广州市环境保护局和环境科学研究所(1980—1996年)的调查资料表明^[1],广州市的土壤重金属 Cd 和 Pb 等几乎在所有的土壤中都超标,Cr 在多数土壤中低于广东省背景值,但在近郊耕地土壤中却超过标准。马谨^[2]对珠三角典型区域(东莞市)的土壤重金属污染调查也表明,由于当地电镀厂大量废水的排放及农民使用污水灌溉,土壤 Pb 污染相当严重,由此造成耕地

收稿日期:2007-12-28

基金项目:广东省农业领域攻关项目(2006B20601007,2007B060401030)

作者简介:罗小玲(1982—),女,壮族,硕士研究生,研究方向为土壤和植物环境污染控制。E-mail:rsllbg@163.com

通讯联系人:李淑仪 E-mail:lishuyi@soil.gd.cn

土壤的质量安全遭到破坏,使蔬菜等农作物的品质受威胁,而作为重要污染物的 Cr 和 Pb 对农作物产生的危害受到了人们的重视。目前,通过施用抑制剂减轻重金属对作物的毒害、抑制作物对重金属的吸收是无公害蔬菜生产的重要途径,硅酸盐和腐植酸已被证明对土壤重金属的毒害具有一定的抑制作用^[3-6]。硅酸盐的抑制作用主要通过重金属离子生成硅酸盐沉淀^[3-4]、改变土壤中重金属的存在形态从而降低其生物有效性^[5]等途径实现。腐植酸对金属离子毒害的抑制主要是通过离子交换作用和络合(或螯合)作用^[6]。腐植酸具有丰富的活性功能基团,能够和重金属发生各种形式的结合,从而成为土壤重金属的增溶剂或固定剂,影响重金属在土壤环境中的形态转化、移动性。针对硅酸盐或腐植酸在重金属污染土壤上的最佳施用量研究较少的问题,本文以小白菜为例,探讨二者对 Cr-Pb 污染土壤中种植小白菜的生物量、叶绿素相对含量、抗氧化酶系统活性等指标的影响,旨在阐明抑制剂缓解重金属毒害的机理,并为适宜的抑制剂种类及用量选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小白菜品种为矮脚葵扇黑叶白菜(*Brassica Chinensis*),供试土壤为水稻土,采自未受 Cr 和 Pb 污染的广东省增城市镇龙镇大涵村。土壤经风干并粉碎后过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

本试验中污染物为 Cr 和 Pb,共设计 4 个污染组,分别为:无污染组、Cr 单一污染组、Pb 单一污染组和 Cr-Pb 复合污染组。各组中污染物设计一个固定质量分数,其中,Cr 以重铬酸钠($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)形式加入,质量分数为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Pb 以硝酸铅 $[\text{Pb}(\text{NO}_3)_2]$ 形式加入,质量分数为 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

抑制剂分两种,分别为硅酸盐和腐植酸,均为单一加入。两种抑制剂分别与上述 4 个污染组组合,每种抑制剂在每个污染组设 4 个质量分数水平,共 32 个处理,每个处理 4 个重复。硅酸盐以硅酸钠

(Na_2SiO_3)形式加入,各个水平分别为:0.00、1.00、1.50 和 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;腐植酸以固体生化试剂形式加入,用量按照基肥总质量的 0%、1%、3%、5%计算,各个水平分别为:0.00、8.90、26.79、 $44.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

污染物和抑制剂均一次性均匀拌入盆栽土壤。小白菜于 2006 年 9 月 28 日育苗,10 月 18 日移栽入 $37.5\text{ cm}\times 27.5\text{ cm}\times 16\text{ cm}$ 塑料盆,每盆 6 株。2006 年 11 月 4 日收获。

1.3 样品采集及预处理方法

1.3.1 土壤样品采集及预处理方法

取盆栽基础土壤风干,按四分法取样后用玛瑙研钵磨碎分别过 2.0 mm、0.25 mm 和 0.15 mm 筛,于封口塑料袋中保存备用。

1.3.2 植物样品采集及预处理方法

在小白菜收获前,均匀采一定量的叶片,洗净并各取适量称重,用玻璃研钵在冰浴中迅速研碎,研磨时加入提取剂(POD 酶为磷酸二氢钾溶液^[7]、SOD 酶为磷酸缓冲液^[8]),转移入容量瓶定容,溶液离心过滤后待测过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性。各盆中剩余小白菜植株收获后将根、茎、叶用不锈钢剪刀剪开,依次称鲜重并用自来水、去离子水迅速清洗干净,然后放入清洗干净的托盘,80℃恒温杀青 30 min,60℃烘干至质量恒定,称干物质质量。用不锈钢粉碎机粉碎,过 0.5 mm 筛后放入封口样品袋于干燥处保存备用。

1.4 测定方法

生物量测定采用称量法(单株鲜重);过氧化物酶(POD)活性测定采用比色法^[7];超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑光还原比色法^[8];叶绿素含量测定使用 SPAD502 型叶绿素含量测定仪(上海泽仪仪器设备有限公司);小白菜根切片用 7002 Leica Histeresin 及其 Hardener 包埋,切片观察使用有数字化彩色摄像头(JVC TK-C1381,日本)的实体显微镜(Nikon SMZ800,日本,华南农业大学资环学院根系研究中心提供),用 FLYVIDEO 软件俘获图像。

1.5 数据处理

试验数据的统计处理采用 Excel 和 SAS 统计软件进行。

表 1 供试土壤的基本理化性质								
Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil								
项目	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效硅/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总铬/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总铅/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤	4.7	12.50	58.09	12.92	37.80	70.10	25.66	39.11

2 结果与讨论

2.1 硅酸盐、腐植酸对小白菜生物量的影响

从表 2、表 3 可看出,污染物对小白菜的生长有一定影响。比较各组的 Si₀ 或腐₀ 处理可发现,Cr 污染对小白菜生物量影响不明显,而 Pb 污染能使生物量略有增加。比较表 2、表 3 数据,在无污染处理组中,Si₁ 处理总生物量显著高于 Si₀,说明低质量分数硅酸盐对小白菜生长的促进作用比腐植酸明显,但随着硅酸盐施用量的增大,其对小白菜生长的促进作用逐渐减弱,Si₂ 处理的生物量回落到与 Si₀ 处理相当的水平,Si₃ 处理甚至使生物量大幅降低。而腐₁、腐₃ 处理的生物量与对照间差异不显著,腐₂ 处理虽然也能使生物量增大,但增幅没有 Si₁ 处理大。硅一般不认为是高等植物的必须元素,但硅对植物生长的促进作用不容忽视。研究表明,施硅肥有利于提高作物的光合作用,增强作物对病虫害的抵抗力,提高作物抗倒伏能力,提高作物抗逆性^[9-11]。

Pb 污染组的土壤加入硅酸盐后,小白菜生物量随着硅酸盐施加量的增加而显著降低,可见,虽然硅酸盐或 Pb 污染单独作用都能促进小白菜生长,但 Pb 与较高水平硅酸盐共存时对小白菜生长具有抑制作用。同时,无污染组及各个污染组中,Si₃ 处理的生物

量都显著低于 Si₀ 处理,说明 Si₃ 处理的施硅量过大,对生长产生抑制,超出适宜施硅量范围。

腐植酸在 Cr、Pb 单一污染及 Cr-Pb 复合污染这 3 个处理组中也均未能提高小白菜的生物量,且各组中腐₁、腐₂、腐₃ 处理与腐₀ 间差异不显著,其中 Pb 单一污染组的腐₃ 处理和 Cr-Pb 复合污染组的腐₂ 处理生物量低于组内的腐₀ 处理。

表 3 腐植酸对小白菜各项生理指标的影响
Table 3 Humic acid effect on physiology of *Brassica Chinensis*

处理组合		总生物量/ g	POD 酶活性/ ΔA ₄₀₀ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹	SOD 酶活性/ 酶单位·g ⁻¹	叶绿素 (相对含量)
Pb ₀ Cr ₀	腐 ₀	56.65 bcde	0.126 d	73.73 f	42.6 e
	腐 ₁	46.54 f	0.186 abc	181.28 abc	35.0 f
	腐 ₂	66.26 a	0.197 a	196.59 ab	42.3 e
	腐 ₃	49.66 ef	0.179 abc	213.81 a	36.8 f
Pb ₀ Cr ₁	腐 ₀	58.13 bcd	0.126 d	65.23 f	44.4 de
	腐 ₁	52.52 def	0.108 d	214.96 a	44.8 cde
	腐 ₂	51.50 def	0.175 abc	163.67 bcd	45.9 bcde
	腐 ₃	52.71 def	0.160 c	165.58 bcd	46.8 abcd
Pb ₁ Cr ₀	腐 ₀	64.08 ab	0.105 d	130.63 de	49.5 ab
	腐 ₁	56.94 bcde	0.163 bc	198.80 ab	48.1 abcd
	腐 ₂	55.92 bcde	0.192 ab	150.44 cde	48.7 abc
	腐 ₃	55.02 cde	0.163 bc	189.74 abc	47.5 abcd
Pb ₁ Cr ₁	腐 ₀	61.69 abc	0.110 d	123.59 e	49.0 ab
	腐 ₁	56.72 bcde	0.127 d	190.63 abc	48.2 abcd
	腐 ₂	53.59 cdef	0.189 abc	217.26 a	46.6 abcd
	腐 ₃	58.77 abcd	0.159 c	184.54 abc	50.5 a

表 2 硅酸盐对小白菜各项生理指标的影响

Table 2 Silicates effect on physiology of *Brassica Chinensis*

处理组合		总生物量/ g	POD 酶活性/ ΔA ₄₀₀ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹	SOD 酶活性/ 酶单位·g ⁻¹	叶绿素 (相对含量)
Pb ₀ Cr ₀	Si ₀	56.65 c	0.126 bcd	73.73 fgh	42. 6 d
	Si ₁	75.15 a	0.131 bcd	90.29 ef	45.9 bcd
	Si ₂	61.22 bc	0.063 f	45.11 h	45.8 bcd
	Si ₃	30.16 efg	0.152 a	315.64 a	47.7 abc
Pb ₀ Cr ₁	Si ₀	58.13 c	0.126 bcd	65.23 fgh	44.4 cd
	Si ₁	66.25 abc	0.120 bcde	249.72 c	48.5 ab
	Si ₂	62.02 bc	0.072 f	55.06 gh	48.4 ab
	Si ₃	24.21 fg	0.139 ab	108.47 de	48.7 ab
Pb ₁ Cr ₀	Si ₀	64.08 bc	0.105 e	130.63 d	49.5 ab
	Si ₁	60.75 bc	0.115 cde	283.98 b	47.0 abc
	Si ₂	45.99 d	0.072 f	81.92 efg	47.7 abc
	Si ₃	32.98 ef	0.130 bcd	75.23 fgh	51.0 a
Pb ₁ Cr ₁	Si ₀	61.69 bc	0.110 de	123.59 d	49.0 ab
	Si ₁	69.14 ab	0.132 bc	299.75 ab	47.3 abc
	Si ₂	38.49 de	0.075 f	63.38 fgh	49.3 ab
	Si ₃	21.22 g	0.140 ab	252.12 c	50.4 ab

注:利用 SAS 对同一指标所有处理进行整体 SSR(即 DUNCAN 法)分析,表中不同小写字母表示差异显著(p<0.05),下表同。

2.2 硅酸盐、腐植酸对小白菜根尖组织形态的影响

研究表明^[12],重金属诱导能使植物体内产生大量的活性氧自由基,这些自由基能损伤细胞膜中的不饱和脂肪酸和蛋白质,引起生物大分子变性及脂膜氧化,严重时可导致细胞解体崩溃。而根是植物吸收土壤养分、与土壤溶液进行离子交换的活跃部位,它与土壤溶液中的重金属离子接触最密切,最容易受到重金属毒害。

如图所示,图 1 是无污染对照的小白菜侧根横切面,图中可看到各种组织均保存完好,表皮、皮层、维管柱的细胞形状正常,由外向内各层细胞排列紧密。图 2 是受 Cr-Pb 复合污染而未施用硅酸盐或腐植酸处理的侧根横切面,可明显看到根部组织的氧化溃解症状非常严重,表皮和皮层只剩下零星的细胞,而且细胞排列松散,形状扭曲变形;由于外部保护层的缺失,使维管柱中的细胞也被破坏。

图 3 是 Cr-Pb 复合污染组 Si₁ 处理的侧根横切

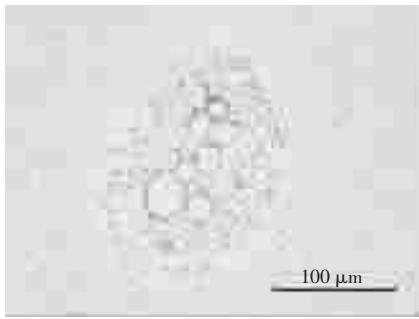


图 1 无污染无抑制剂处理小白菜侧根横切

Figure 1 Lateral root's transverse section of blank control

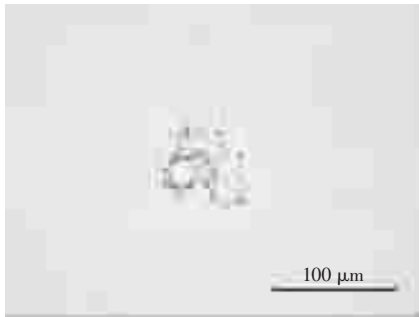


图 2 Cr-Pb 复合污染无抑制剂处理小白菜侧根横切

Figure 2 Lateral root's transverse section of Cr-Pb polluted with no-inhibitor treatment

Si(OH)₄ 上羟基与细胞壁多糖上的羟基通过亲水/亲水分子间弱相互作用,在细胞质外体空间内形成了有序的 SiO₂ 胶体。有序的 SiO₂ 胶体表面态具有硅醇的配体性质,可与 Cd²⁺等金属离子配合形成 Cd-Si 复合氧化物,从而降低了 Cd²⁺毒害。因此推断,硅酸盐与细胞壁的共同作用可在一定程度上隔离污染物,减少进入细胞的重金属离子数量,减轻植物所受毒害。

图 4 是 Cr-Pb 复合污染组腐₁处理的侧根横切面。可看到腐植酸的施用不能从根本上减轻根部受到的毒害,虽然根部生长情况较图 2 略有好转,但表皮和皮层细胞依然缺失、破损、变形。腐₂和腐₃处理情况与腐₁类似(图略)。

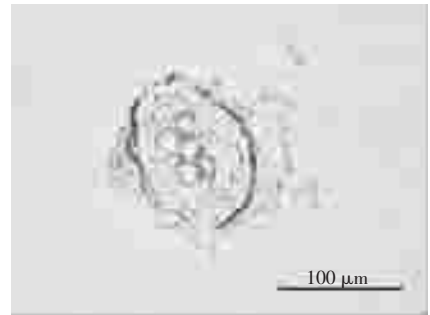


图 3 Cr-Pb 复合污染 Si₁ 处理小白菜侧根横切面

Figure 3 Lateral root's transverse section of Cr-Pb polluted with Si₁ treatment

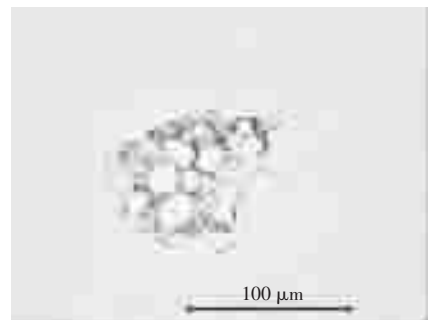


图 4 Cr-Pb 复合污染腐₁处理小白菜侧根横切面

Figure 4 Lateral root's transverse section of Cr-Pb polluted with Humic Acid₁ treatment

图 5 为 Cr-Pb 复合污染组 Si₂ 处理的侧根横切面。可以明显看到根部的生长情况较 Si₁ 处理有了更大改善,皮层、维管柱层次分明,细胞形状规则、排列完整,维管柱鞘上有少许深色物质沉淀。与图 1 相比不同的是皮层细胞体积明显增大,这可能与硅酸盐对生长的促进作用有关。另外,虽然从根部生长情况看复合污染时 Si₂ 施硅量解毒效果最佳,但是由于 Pb 与

面,可看到硅酸盐的施用极大地缓解了重金属引起的过氧化损伤,侧根皮层未缺失,维管柱完整,但细胞形状不如图 1 中规则,外围的细胞排列也不够紧密。在皮层细胞中有一圈深色的物质沉积,推测是被根部细胞排斥在外的 Pb 或 Cr 的沉淀物。杨居荣等^[13]对 Cd 和 Pb 在黄瓜和菠菜细胞各组分布的对比结果表明,Pb 以沉积于细胞壁上的占绝大比率,可达 77%~89%。李荣春^[14]发现烤烟在 Cd²⁺和 Pb²⁺处理下细胞膜外有大量的 Pb 颗粒,推测细胞膜可以阻止一部分 Pb 进入到细胞膜内。由此可见,细胞壁与细胞膜在阻挡重金属离子进入细胞的过程中具有重要作用。而同时在本试验中还可看到,这种深色沉淀物在受污染后的 Si₀ 处理(图 2)和腐植酸处理(图 4)中均未出现,由此可以推断,除了细胞壁和细胞膜的隔离作用外,硅酸盐的施用在阻挡重金属离子进入细胞的过程中也起到一定作用。Cocker 等的研究表明,硅能改变作物体内重金属的化学式,并与其在根的外层细胞壁发生共沉淀^[15],限制其从根部向茎部的运输,降低植株共质体中重金属离子的浓度^[16]。Wang 等^[17]在探讨硅对水稻苗耐 Cd²⁺能力影响时发现,硅修饰的细胞壁具有对 Cd²⁺较强的亲和性,明显抑制了 Cd²⁺毒害。这是由于

硅酸盐共同作用对生长产生抑制,使生物量下降较明显。 Si_3 处理则由于施硅量过大,小白菜整体生长异常,故不考虑其施硅量对过氧化胁迫的缓解程度(照片略)。

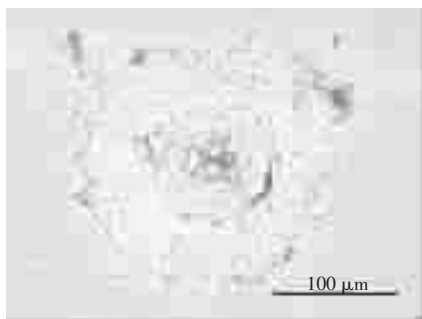


图 5 Cr-Pb 复合污染 Si_2 处理小白菜侧根横切面

Figure 5 Lateral root's transverse section of Cr-Pb polluted with Si_2 treatment

2.3 硅酸盐、腐植酸对小白菜体内 POD 酶活性的影响

重金属对植物的毒害主要是由于重金属的胁迫使植物体内产生了过多的自由基,其中又以氧自由基对生物体的伤害最大^[18],这些氧自由基包括超氧化物阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)、 H_2O_2 、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、单线态氧($^1\text{O}_2$)等^[19]。它们能损伤细胞膜中的不饱和脂肪酸和蛋白质,引起生物大分子变性及脂膜氧化^[12]。POD、CAT 和 SOD 是植物体内抗氧化酶系统中 3 种主要的保护酶,能够有效地清除植物体内过多的活性氧自由基,保护细胞膜的结构完整。其中 POD 酶的主要功能是清除 H_2O_2 。

由图 2 侧根氧化溃解症状推断,受污染后小白菜体内氧自由基数量增加较多,POD 酶活性应该提高以维持生理平衡。但比较表 2、表 3 中各组的 Si_0 处理或腐₀ 处理发现,不论是受 Cr、Pb 单污染还是 Cr-Pb 复合污染,POD 酶活性与无污染时相比没有明显变化;并且施硅后,除 Cr-Pb 复合污染组的 Si_1 处理酶活性比该组 Si_0 处理提高外,其余组 Si_1 处理与 Si_0 处理差异不显著,且各组的 Si_1 处理间差异不大,即硅酸盐的施用对其活性影响也不明显,说明污染物对 POD 酶活性抑制的程度较轻;再与图 2 对比,POD 酶活性受抑制程度较轻而根部却发生氧化溃解,说明在缓解氧化毒害的过程中,POD 酶不是起缓解作用的主要酶类。

表 2 结果同时表明,各组中 Si_2 处理的 POD 酶活性均低于各组 Si_0 处理,且 Si_3 处理的 POD 酶活性均高于 Si_0 处理。其原因可能是 Si_2 处理所受到的过氧化

毒害已得到缓解(图 5),抗氧化酶只需较低活性即可维持生理平衡,而 Si_3 处理由于施硅量过大,对小白菜造成硅酸盐胁迫促使 POD 酶活性提高。

从表 3 可看到,施用腐植酸后,在无污染组和 Pb 单一污染组中,腐₁、腐₂、腐₃ 处理间差异不显著,但均高于腐₀ 处理。Cr 单一污染时,腐₁ 处理与腐₀ 间差异不显著,而腐₂、腐₃ 均高于腐₀。Cr-Pb 复合污染组,腐₁、腐₂、腐₃ 处理的酶活性均高于腐₀,而 3 个处理的高低依次为腐₂>腐₃>腐₁;与表 2 比较后发现,腐₁ 处理与 Si_1 处理的 POD 酶活性大小相等,但两个处理的根部生长情况迥异(腐₁ 处理如图 4; Si_1 处理如图 3);同时腐₂ 处理的 POD 酶活性显著高于 Si_2 处理,但 Si_2 处理的根部生长情况要明显好于腐₂ 处理(腐₂ 处理与腐₁ 处理结果类似,如图 4; Si_2 处理如图 5),这印证了上文中关于在缓解过氧化毒害的过程中 POD 酶不是关键酶类的推断。

2.4 硅酸盐、腐植酸对小白菜体内 SOD 酶活性的影响

在一定范围内,SOD 和 CAT 共同作用,能把具有潜在危害的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 ,并且减少具毒性的、高活性的氧化剂羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的形成,特别是 SOD,可把 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 歧化成 H_2O_2 和 H_2O ,一定程度上降低了植物体内自由基的水平^[20]。

比较表 2 和表 3 数据可见,受 Pb 单一污染和 Cr-Pb 复合污染的 Si_0 /腐₀ 处理的 SOD 酶活性有一定程度的提高,显然这是由污染物所诱导的氧化胁迫所致。施硅后,各组在 Si_1 处理均出现酶活性比该组 Si_0 处理大幅度提高的现象,说明在 Si_0 处理时污染物对 SOD 酶活性的抑制很强烈, Si_0 处理受污染后酶活性的提高是在受抑制条件下的有限提高。研究表明,重金属不仅通过产生氧胁迫导致对植物的毒害,还通过替代酶蛋白反应活性中心的金属离子或与酶蛋白中的-SH 基结合,使酶蛋白变性失活^[19]。本试验中 Cr、Pb 污染在对小白菜造成过氧化毒害的同时也对其体内 SOD 酶的活性产生抑制。而硅酸盐可使土壤中的重金属离子形成硅酸盐沉淀,减少具有生物可得性的金属离子数量,从而降低小白菜体内酶蛋白变性失活的几率。再比较复合污染组 Si_1 和腐₁ 处理的 SOD 酶活性大小发现,虽然受污染后施硅酸盐和腐植酸均能使 SOD 酶活性提高,但 Si_1 处理的提高幅度要远远大于腐₁ 处理,结合图 3 和图 4 可以推断,Cr 和 Pb 污染对 SOD 酶活性的抑制要比对 POD 酶活性的抑制强烈,而 SOD 酶活性的提高在缓解氧化胁迫中起到关键作用。

在各组中, Si_2 处理的 SOD 酶活性均低于 Si_0 处理,这也与 POD 酶情况类似,推测是由于施加 Si_2 水平的硅酸盐后,过氧化胁迫已经充分缓解(图 5),SOD 酶活性只需维持较低水平即可满足生理需要;同时除 Pb 单一污染组外,其余污染组的 Si_3 处理酶活性均高于组内的 Si_0 处理,这印证了 Si_3 水平施硅量过高的推断, Si_3 处理对小白菜造成硅酸盐胁迫,扰乱其生理平衡,致使 SOD 酶活性再度提高。

从表 3 可看到,施腐植酸处理的部分,除 Pb 单一污染组的腐₂处理外,其余各组、各个腐植酸水平的 SOD 酶活性均比组内的腐₀处理高,但各组 3 个腐植酸水平间大多没有显著差异,并均显著低于对应的 Si_1 处理,说明腐植酸的施用虽也能在一定程度上减轻重金属对 SOD 酶活性的抑制,但减轻程度较低,不足以缓解小白菜根部的过氧化损伤。

2.5 硅酸盐、腐植酸对小白菜叶绿素含量的影响

表 2 所示,在无污染组, Si_1 、 Si_2 、 Si_3 处理的叶绿素相对含量均高于 Si_0 处理,说明硅的施用能提高小白菜叶绿素含量、促进光合效率。但同时也发现,受 Cr 和 Pb 单一污染、Cr-Pb 复合污染或污染物与硅酸盐共存比单独施硅酸盐时的叶绿素含量高。

表 3 证明,Pb 对叶绿素的合成有促进作用。在无污染组,施腐植酸处理的叶绿素含量反而低于对照,而各个污染组的叶绿素含量均高于无污染组,且含 Pb 污染组的叶绿素含量要高于 Cr 单一污染组。

叶绿体是植物进行光合作用的场所,叶绿素含量的多少直接影响光合能力的强弱。某些金属离子在一定质量分数范围内会对叶绿素的合成具有促进作用,张义贤^[21]用 Pb^{2+} 处理油菜 5~9 d,发现在一定的浓度范围内, Pb^{2+} 处理的叶绿素含量高于对照。这在本试验中也得到证实。

3 结论

(1) $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硅酸盐单独作用对未受污染的小白菜生长具有明显促进作用,能显著提高生物量。而 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上质量分数的硅酸盐与 Pb 污染共存时对生长产生抑制,同时 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硅酸盐不论单独作用或与 Cr、Pb 污染物共存时都显著抑制生长。腐植酸的各个质量分数水平对生长的影响都不明显。

(2) 硅酸盐通过使土壤中重金属离子形成硅酸盐沉淀等形式减少土壤中能进入小白菜体内的 Cr 和 Pb 离子数量,降低由此引起的酶变性失活的几率,使

抗氧化酶系统中 SOD 酶的活性得到充分表达以缓解重金属引起的过氧化损伤。单从减轻过氧化损伤情况看, $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水平施硅量效果最佳,但该施硅量下 Si 与 Pb 共同作用对小白菜生长产生较大的抑制,生物量损失严重。而 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硅酸盐既能保证受 Cr-Pb 污染的小白菜正常生长,又能较好地缓解由污染物诱导的过氧化胁迫对根部细胞的毒害,施用效果较理想。腐植酸虽然在设计的 3 个用量水平上都能一定程度地减轻 Cr-Pb 污染对小白菜抗氧化酶系统活性的抑制,但由于对 SOD 酶受抑制的减轻程度较弱,不足以缓解污染所引起的过氧化损伤。

综上所述,施质量分数为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硅酸盐能在保证小白菜正常生长的同时又能有效减轻重金属 Cr-Pb 污染对小白菜的毒害,在无公害蔬菜的生产上具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] 广东省统计局. 广东统计年鉴(1999)[M]. 北京:中国统计出版社, 1999. 68-71.
Guangdong Province Statistic Bureau. Statistical yearbook of Guangdong province(1999)[M]. Beijing:China Statistic Press, 1999. 68-71.
- [2] 马 瑾,潘根兴,万洪富,等. 珠江三角洲典型区域土壤重金属污染调查研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(5):636-638.
MA Jin, PAN Gen-xing, WAN Hong-fu, et al. Investigation on heavy metal pollution in a typical area of the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):636-638.
- [3] 顾明华,黎晓峰. 硅对减轻水稻的铝胁迫效应及其机理研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, 8(3):360-366.
GU MING-hua, LI Xiao-feng. Effect of silicon on alleviation of aluminum toxicity and corresponded mechanisms in rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3):360-366.
- [4] 杜彩琼,林克惠. 硅素营养研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2002, 17(2):192-196.
DU Cai-qiong, LIN Ke-hui. Research advance of silicon nutrition[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2002, 17(2):192-196.
- [5] 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[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1):116-121.
YANG Chao-guang, DOU Hu, LIANG Yong-chao, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2005, 38(1):116-121.
- [6] 陈 盈,颜 丽,关连珠,等. 不同来源腐殖酸对铜吸附量和吸附机制的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):479-481.
CHEN Ying, YAN Li, GUAN Lian-zhu, et al. Adsorption and desorption pattern of copper by humic acids from three different sources[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):479-481.
- [7] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. (第 2 版), 北京:高等教育出版社, 1990. 154-155.

- ZHANG Zhi-liang. Expetiment instruction of plant physiology[M]. (The Second Edition), Beijing:China Higher Education Press, 1990. 154–155.
- [8] 邹 奇. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 163–165.
- ZOU Qi. Expetiment instruction of plant physiology[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000. 163–165.
- [9] Datnofft L E, Deren C W, Snyder G H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida[J]. *Crop Protection*, 1997, 16(6):525–531.
- [10] Matichenkov V V, Calvert D V. Silicon as a beneficial element for sugarcane[J]. *Journal American Society of Sugarcane Technologists*, 2002, 22(2):21–30.
- [11] 许建光. 硅抑制小白菜吸收重金属铬的作用机理研究[D]. 北京:中科院研究生院, 2007. 17–18, 44.
- XU Jian-guang. Studies on the mechanism of silicon controlling the adsorption of heavy metal chromium in pakchoi(*Brassica Chinensis*)[D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007. 17–18, 44.
- [12] 王志香, 周光益, 吴仲民, 等. 植物重金属毒害及其抗性机理研究进展[J]. 河南林业科技, 2006, 27(2):26–28.
- WANG Zhi-xiang, ZHOU Guang-yi, WU Zhong-min, et al. Research development about heavy metal poison plants and plants resistance mechanism[J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2006, 27(2):26–28.
- [13] 杨居荣, 等. Cd、Pb 在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态[J]. 中国环境科学, 1993, 13(4):263–268.
- YANG JU-rong, et al. The intracellular distribution of Cd、Pb in plant and their soluble binding form [J]. *China Environmental Science*, 1993, 13(4):263–268.
- [14] 李荣春. Pb、Cd 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 22(4):238–242.
- LI Rong-chun. Effects of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2000, 22(4):238–242.
- [15] Cocker K M, Evans D E, Hodson M J. The amelioration of aluminum toxicity by silicon in higher plants:Solution or an inplanta mechanism[J]. *Physiol Plant*, 1998, 104:608–614.
- [16] Shi X H, Zhang C H, Wang H, et al. Effect of si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1–2):53–60.
- [17] Wang L J, Wang Y H, Chen Q, et al. Silicon induced cadmium tolerance of rice(*Oryza sativa* L.)seedlings[J]. *J Plant Nutr*, 2000, 23:1397–1406.
- [18] 余叔文. 植物生理与分子生物学[M]. (第二版), 北京:科学出版社, 1999. 366–389.
- YU Shu-wen. Plant physiology and molecular biology[M]. (The Second Edition), Beijing:Science Press, 1999. 366–389.
- [19] 代全林. 重金属对植物毒害机理的研究进展 [J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(2):49–53.
- DAI Quan-lin. A review of toxicant mechanisms of heavy metals against plants[J]. *Study on Subtropical Agriculture*, 2006, 2(2):49–53.
- [20] 徐勤松, 施国新, 杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统和亚显微结构的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2):30–34.
- XU Qin-song, SHI Guo-xin, DU Kai-he. Effect of Cd²⁺ on antioxidase system and utrastructure of *Ottelia Alismoides*[J]. *Rural Ecological Environment*, 2001, 17(2):30–34.
- [21] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2004, 27(4):410–413.
- ZHANG Yi-xian. The toxic effects of mercury cadmium and lead to *Brasica chineses* L.[J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 2004, 27(4):410–413.