

几种化肥对外源 Cr(VI) 形态和小白菜吸收铬的影响

徐胜光, 周建民, 刘艳丽, 陈能场*, 谢志宜

(广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650)

摘要: 通过盆栽试验探讨了几种化肥对土壤铬的形态和小白菜吸收铬的影响。结果表明: 1) 外源 Cr(VI) 可显著增加土壤有效铬含量, 但增施氯化钾、硝酸钙和硫酸钠能有效抑制外源 Cr(VI) 向残渣态和有效态铬转化, 并促进外源 Cr(VI) 向有机态铬转化; 2) 增施硅酸钠可抑制外源 Cr(VI) 向残渣态铬转化, 但有利其向有机态、沉淀态和有效态转化, 对土壤铬的活化有明显效果; 3) 适量施用氯化钾和硫酸钠均可有效抑制小白菜对铬的吸收, 并提高产量品质, 但硝酸根离子有促进小白菜铬吸收的作用, 故增施硝酸钙会提高小白菜铬含量; 4) 增施硅酸钠对小白菜吸收铬有较强的抑制作用, 对降低小白菜铬吸收有明显效果, 但由于其活化铬提高了土壤铬毒性, 故妨害作物营养而降低小白菜产量。

关键词: 小白菜; 铬; 化肥

中图分类号: S158.4; X131.3; S634.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-2030 (2007) 04-0052-06

Influence of several chemical fertilizer on chromium availability and chromium uptake by *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) in chromium-contaminated soil

XU Sheng-guang, ZHOU Jian-min, LIU Yan-li, CHEN Neng-chang*, XIE Zhi-yi

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

Abstract: The effect of several chemical fertilizers on the chromium availability in soil and chromium uptake by pakchoi cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)) were conducted by means of pot experiment. The results showed that: 1) Soil available chromium content increased significantly with addition Cr(VI), and several chemical fertilizers including potassium chloride, calcium nitrate and sodium sulfate inhibited the transformation of addition Cr(VI) to residual Cr, available Cr and promoted the conversion of Cr(VI) to organic Cr in soil. 2) The conversion of the addition Cr(VI) to the residue Cr was also checked by sodium silicate fertilizer, but it promoted the transformation of the addition Cr(VI) to the organic Cr, available Cr and precipitated Cr, which showed that Cr availability was enhanced significantly in soil from it. 3) Cr uptake by pakchoi cabbage could be restrained by proper application of potassium chloride and sodium sulfate combine with high yield and quality. As the Cr uptake by pakchoi cabbage could be promoted by nitrate ions, applying the calcium nitrate addition increased Cr content in pakchoi cabbage. 4) Cr uptake was strongly inhibited by use of sodium silicate, while on the condition of Cr availability in soil increasing, Cr uptake by pakchoi cabbage still decreased obviously. However, plant nutrition was affected by the high Cr availability and toxicity in soil and thus it decreased the yields in this trial when applied with sodium silicate.

Key words: *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.); chromium; chemical fertilizer

由于铬及其化合物是冶金、电镀、制革、油漆等行业常用的基本原料, 因此这些行业有大量含铬废气、废水和废渣排放, 导致严重的环境污染^[1]。土壤含铬量并不是植物吸收而产生毒害的可靠指标, 土壤铬的形态、价态和含量共同决定着其对环境和作物的毒性^[2-4]。土壤水溶态、交换态、沉淀态、有机结合态和残渣态铬的生物毒性依次减弱, 对环境及作物的毒害作用相去甚远^[3-4]。土壤铬主要是 Cr(III) 和 Cr(VI)^[1-2], 土壤对 Cr(III) 和 Cr(VI) 的吸附和解吸行为对土壤铬的形态有重要影响^[5]。各种化肥通过生物和非生物转化机制产生的盐基离子会影响到土壤 pH 和离子状况, 进而影响到土壤对铬

收稿日期: 2006-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571117); 广东省科技计划项目 (2004B20501001, 2006B20601008)

作者简介: 徐胜光, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: sgxu@soil.gd.cn。* 通讯作者: 陈能场, 研究员, 主要从事植物修复以及重金属污染修复的研究, E-mail: ncchen@soil.gd.cn。

的吸附和解吸行为, 但有关机制尚不清楚。本研究探讨了几种化肥(氯化钾、硝酸钙、硫酸钠和硅酸钠)对铬的形态和小白菜吸收铬的作用机制, 旨在为施肥控制、缓解作物铬污染毒害提供理论依据和关键技术。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤采自广州市九佛镇林区自然表土层(0~20 cm), 属花岗岩赤红壤, 土壤理化性质见表1。供试作物为小白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)), 品种为葵扇黑叶白菜, 广东省农业科学院提供。盆栽试验采用的肥料和化学试剂均为分析纯。

表1 供试土壤的理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of tested soil

总铬/ mg · kg ⁻¹	水溶态铬/ mg · kg ⁻¹	交换态铬/ mg · kg ⁻¹	沉淀态铬/ mg · kg ⁻¹	pH	有机质/ g · kg ⁻¹	有机态铬/ mg · kg ⁻¹	残渣态铬/ mg · kg ⁻¹	硝态氮/ mg · kg ⁻¹	硫酸根/ mg · kg ⁻¹	交换性钾/ mg · kg ⁻¹
Total Cr	Water-soluble Cr	Exchange Cr	Precipitated Cr		Organic matter	Organic Cr	Residual Cr	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Exchange K
19.82 ± 0.45	—	0.026 ± 0.04	0.778 ± 0.12	4.55 ± 0.03	35.80 ± 0.28	3.106 ± 0.45	15.91 ± 1.21	47.12 ± 3.58	22.94 ± 2.24	45.00 ± 2.58

1.2 试验处理

土培试验分2组, 第1组按不同铬施用量设如下处理: CK1、Cr1、Cr2、Cr3和Cr4, 按纯铬计分别为0、10、20、40、80 mg · kg⁻¹ (Na₂Cr₂O₇), 探讨施铬量对土壤铬的形态和对小白菜吸收铬的影响。第2组试验设计时, 考虑到硝态氮、氯离子、硫酸根和硅酸根对土壤吸附Cr(VI)的不同作用效果^[5], 除对照CK2外, 分别设有N1、N2、N3等不同硝酸钙处理, K1、K2、K3等不同氯化钾处理, S1、S2、S3等不同硫酸钠处理以及Si1、Si2、Si3、Si4等不同硅酸钠处理, 用于研究这几种化肥对土壤铬的形态和小白菜吸收铬的影响。各处理的铬施用量均为20 mg · kg⁻¹, 其中: N1、N2和N3处理硝酸钙(Ca(NO₃)₂ · 4H₂O)施用量分别为0.236、0.472、0.708 g · kg⁻¹, K1、K2、K3处理氯化钾(KCl)施用量分别为0.074、0.148、0.222 g · kg⁻¹, S1、S2、S3处理的硫酸钠(Na₂SO₄)施用量分别是0.142、0.284、0.426 g · kg⁻¹, Si1、Si2、Si3、Si4(Na₂SiO₃ · 9H₂O)处理的硅酸钠施用量分别为0.284、0.586、0.852、1.136 g · kg⁻¹。各处理均种12盆, 每盆1株。盆栽试验基本肥料用量: N 0.15 g · kg⁻¹ (尿素, 磷酸铵), P₂O₅ 0.10 g · kg⁻¹ (磷酸铵), K₂O 0.15 g · kg⁻¹ (碳酸钾), 每盆装土500 g。

1.3 试验方法

土培试验用盆为内径15 cm、高20 cm的塑料杯, 使用前先在塑料杯底面打1个10 cm直径的圆孔, 插入相同孔径、长20 cm的纤维棒并保留杯内纤维棒长度5 cm, 然后将塑料杯底面的纤维棒插穿过带孔的塑料板, 放在里面装水、上表面面积略小于塑料板的塑料盆上面。试验实施前, 先在小塑料盆中将所用试剂和土混匀, 再放入塑料杯吸水, 待土潮湿后种上小白菜苗。试验期间均用此方法供水, 使土壤长期保持潮湿状态。土壤对Cr(VI)的吸附在24 h内可达到总吸附量的99%^[5], 故供水平衡1 d后便实施盆栽试验。试验于2004年8月14育苗, 8月28日移栽, 9月27日采收, 同时采样分析。此时, 土培试验已进行4周, 铬形态处于相对稳定状态^[3-4]。试验期间所有物料均在移栽前一次性和土混合, 移栽后不追肥。

1.4 测定方法

选择有代表性4盆进行土壤铬的形态、小白菜铬含量和土壤理化分析, 小白菜鲜重采用12个重复的平均值。其中, 土壤有效态(水溶态+交换态, 下同)、沉淀态、有机结合态铬采用文献[6]的方法提取, 经高锰酸钾氧化后, 用二苯碳酰二肼比色法测定; 土壤总铬、小白菜铬含量采用酸消解、高锰酸钾氧化-二苯碳酰二肼比色法测定; 土壤残渣态铬用总铬减去其他形态铬的方法获得。其他指标按照文献[7]的方法测定, 其中pH采用电位法, 硝态氮用镉柱还原法, 交换性钾用火焰原子吸收分光光度法, 有效硅用乙酸缓冲液提取-钼蓝比色法, 土壤硫酸根用氯化钡比浊法, 土壤有机质用低温外热重铬酸钾氧化-比色法, 小白菜维生素C含量用2,6-二氯酚酚滴定法测定。

1.5 数据处理方法

数据经Excel软件整理、作图, 用SPSS软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 外源铬在土壤中的转化

外源 Cr(VI) 在土壤中会迅速还原为 Cr(III) 而失去其活性^[2-4]。试验 4 周后分别用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO₃ 和 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KH₂PO₄ 提取 Cr(VI)，结果发现，NaOH 和 NaHCO₃ 提取出许多有机质而难以比色测定，KH₂PO₄ 浸提液中未检测到 Cr(VI)。

自然土壤中铬主要以沉淀态和残渣态存在，但土培试验用土属森林表土层，有机质含量高（表 1），土壤潮湿，形成有利于外源 Cr(VI) 向有机态转化的还原环境，故有机态铬比沉淀态铬高（图 1）。但绝大部分外源 Cr(VI) 转化为残渣态铬（图 1-A）。从试验结果看，4 周后土壤有效态铬随施铬量增加呈近线性的增加趋势（图 1-B），外源 Cr(VI) 对提高土壤有效态铬含量有明显效果。

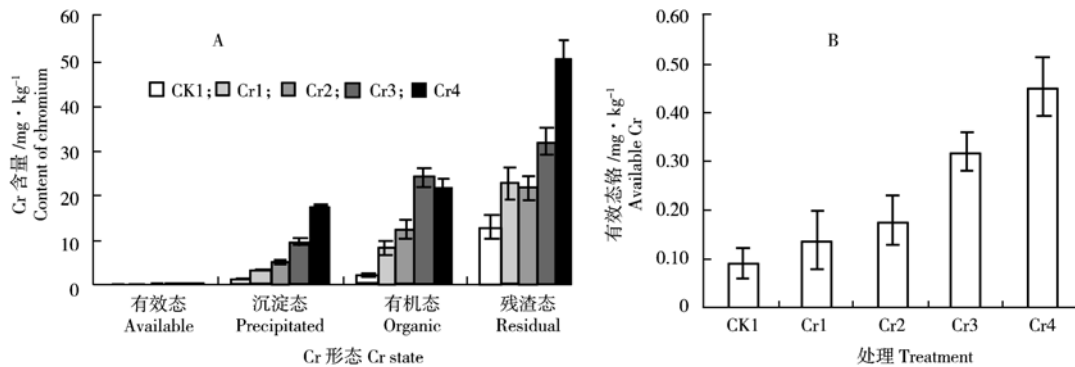


图 1 外源 Cr(VI) 对土壤铬形态的影响

Fig. 1 Effects of addition Cr(VI) on chromium state in soil

CK1: 不施 Cr(VI) control, without Cr(VI) use; Cr1、Cr2、Cr3、Cr4: 分别代表 10、20、30、40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cr(VI) 处理。The Cr(VI) application rate in Cr1, Cr2, Cr3, Cr4 treatment was 10, 20, 30, 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively.

2.2 施肥对外源 Cr(VI) 形态转化的影响

2.2.1 氯化钾、硝酸钙和硫酸钠对土壤铬形态的影响 表 2 显示，随着化肥施用量的增加，几种化肥处理的有效态铬含量均呈下降趋势，K3、S3 处理与对照间的差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$)，且几种化肥均有提高土壤有机态铬含量效应 ($P < 0.05$)，说明这几种化肥对抑制外源铬的活性有一定效果。试验用土属森林表土层 (0~20 cm)，有机质含量较高而缓冲性较强，故这几种化肥的施用均未起到降低 pH 而提高铬活性的效果。此外，土壤 NO₃⁻、K⁺ 和 SO₄⁻ 因增施相关化肥而显著提高 ($P < 0.01$)，残渣态铬较对照则有程度不同的下降（表 2），说明施肥增加的盐基离子有削弱黏土矿物对 Cr(III) 吸附及晶格固定的作用。

2.2.2 硅酸钠对土壤铬形态的影响 由表 2 可见，土壤有效态铬含量随着硅酸钠施用量的增加而显著增加 ($P < 0.05$)，土壤沉淀态和有机态铬含量也有明显增加的趋势，而残渣态铬含量则显著下降 ($P < 0.05$)。这说明，硅酸钠对提高土壤铬活性有明显效果。显然，硅酸钠有效抑制了土壤矿物对外源 Cr(VI) 吸附固定作用，使相对多的外源 Cr(VI) 转化成有效态、沉淀态和有机态铬。这与硅酸根易通过非专性吸附被黏土矿物吸附^[8]，占据较多的 Cr(VI) 吸附位点有关；另外，电位高的 Cr(III) 在土壤矿物胶体表面直接与硅酸根配位基反应形成沉淀，也会一定程度上妨碍矿物对 Cr(III) 的吸附而降低土壤残渣态铬含量。

2.3 不同处理对小白菜吸收铬的影响

2.3.1 铬施用量对小白菜吸收铬的影响 由图 2 可见，在不增施化肥条件下小白菜铬含量随施铬量增加呈近线性增加趋势，说明外源 Cr(VI) 有效促进了小白菜对铬的吸收，此结果与有关资料一致^[3]。

2.3.2 氯化钾对小白菜吸收铬的影响 氯化钾对促进外源 Cr(VI) 向有机态转化，抑制铬活性，抑制小白菜吸收铬，降低小白菜铬含量（图 2）有一定效果 ($P < 0.05$)。其中，K2 和 K1 相比，小白菜生物量显著增加（表 3），铬含量也明显升高；K3 和 K2 相比，小白菜生物量并无显著增加，但铬含量却明显低于 K2。显然，除氯化钾能有效抑制铬活性及生物稀释效应之外，K3 条件下大幅增加的钾离子（表

2) 会增强对 Cr(III)的拮抗效应，对于抑制小白菜吸收铬也有一定作用(图2)。

表2 不同处理对土壤铬形态、pH和化学性质的影响

Table 2 Effects of different treatments on chromium state in soil, pH and chemical properties

处理 Treatment	有效态铬/ mg · kg ⁻¹ Available Cr	沉淀态铬/ mg · kg ⁻¹ Precipitated Cr	有机态铬/ mg · kg ⁻¹ Organic Cr	残渣态铬/ mg · kg ⁻¹ Residual Cr	pH	硝酸根/ mg · kg ⁻¹ NO ₃ ⁻	硫酸根/ mg · kg ⁻¹ SO ₄ ⁻	有效钾/ mg · kg ⁻¹ K	有效硅/ mg · kg ⁻¹ Si
CK2	0.36 ^a	5.33 ^b	12.30 ^c	21.95 ^a	4.85 ^a			127.50 ^C	
K1	0.37 ^a	5.30 ^b	17.14 ^a	17.13 ^c	4.82 ^a			155.00 ^{BC}	
K2	0.33 ^a	6.01 ^a	15.75 ^b	17.85 ^{ab}	4.93 ^a			170.00 ^{AB}	
K3	0.24 ^b	5.91 ^a	15.16 ^b	18.63 ^b	5.02 ^a			189.00 ^A	
CK2	0.36 ^{ab}	5.33 ^{bc}	12.30 ^c	21.92 ^a	4.85 ^a	12.47 ^{BC}			
N1	0.44 ^a	5.57 ^{ab}	15.75 ^a	18.18 ^b	4.88 ^a	5.13 ^C			
N2	0.33 ^{ab}	5.79 ^a	13.65 ^b	20.18 ^{ab}	4.75 ^a	31.36 ^B			
N3	0.27 ^b	1.38 ^c	16.49 ^a	21.80 ^a	4.78 ^a	59.44 ^A			
CK2	0.36 ^a	5.33 ^b	12.30 ^b	21.95 ^a	4.85 ^a		69.97 ^C		
S1	0.22 ^b	8.76 ^a	16.14 ^a	14.82 ^b	4.87 ^a		71.77 ^C		
S2	0.23 ^b	5.61 ^b	12.45 ^b	21.65 ^a	4.88 ^a		100.58 ^B		
S3	0.18 ^b	5.73 ^b	15.00 ^a	19.03 ^a	4.75 ^a		139.14 ^A		
CK2	0.36 ^c	5.33 ^b	12.30 ^b	21.95 ^a	4.85 ^b				36.58 ^C
Si1	0.48 ^{bc}	6.19 ^a	15.64 ^a	17.63 ^b	4.85 ^b				43.29 ^{BC}
Si2	0.60 ^b	6.05 ^a	17.60 ^a	15.69 ^b	5.05 ^{ab}				59.86 ^B
Si3	0.77 ^a	6.15 ^a	17.14 ^a	15.87 ^b	5.25 ^a				67.51 ^{AB}
Si4	0.81 ^a	5.45 ^a	18.78 ^a	14.90 ^b	5.25 ^a				94.54 ^A

注：1) 同列不同大、小写字母表示邓肯氏检验在1%、5%水平上差异显著。Values followed by different capital and small letters within columns mean significant difference at 1% and 5% levels using Duncan's test. The same as follows.

2) CK2: 基肥 + 20 mg · kg⁻¹ Cr(VI) Basic fertilizer + 20 mg · kg⁻¹ Cr(VI); K1、K2、K3: 在CK1基础上, 分别加施KCl 0.074、0.148、0.222 g · kg⁻¹ On the basis of the CK1, the application rate of KCl was 0.074, 0.148, 0.222 g · kg⁻¹; N1、N2、N3: 分别加施Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 0.236、0.472、0.708 g · kg⁻¹ The application rate of Ca(NO₃)₂ · 4H₂O was 0.236, 0.472, 0.708 g · kg⁻¹; S1、S2、S3: 分别加施Na₂SO₄ 0.142、0.284、0.426 g · kg⁻¹ The application rate of Na₂SO₄ was 0.142, 0.284, 0.426 g · kg⁻¹; Si1、Si2、Si3、Si4: 分别加施Na₂SiO₄ · 9H₂O 0.284、0.586、0.852、1.136 g · kg⁻¹ The application rate of Na₂SiO₄ · 9H₂O was 0.284, 0.586, 0.852, 1.136 g · kg⁻¹. The same as follows.

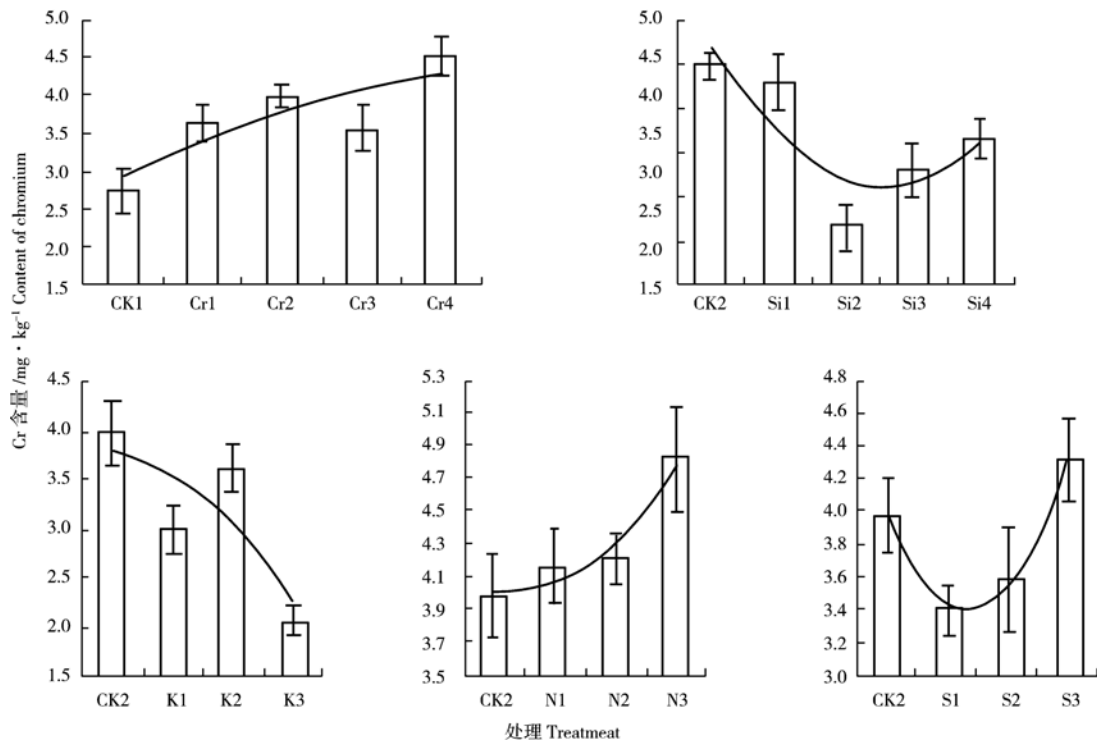


图2 不同处理对小白菜铬含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on the chromium content of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)

2.3.3 硝酸钙对小白菜吸收铬的影响 试验发现, 增施硝酸钙有降低土壤有效铬含量的效果, 但并未起到抑制小白菜吸收铬的作用, 实际上随硝酸钙施用量增加, 小白菜铬含量亦呈上升趋势(图2), 说明增施硝酸钙有效促进了小白菜对铬的吸收。相关分析结果表明, 硝酸根离子与小白菜铬含量呈正相关($r=0.91$), 说明硝酸根离子有协同促进小白菜吸收铬的效应。水培试验发现, 硝酸根离子可有效促进小白菜对 Cr(VI) 吸收(另文发表)。显然, 硝酸根离子协同促进小白菜吸收铬的效应, 是小白菜铬含量增加的主要因素之一。

2.3.4 硫酸钠对小白菜吸收铬的影响 研究发现, S1、S2 处理的小白菜铬含量比 CK2 处理低 14.6% 和 10.0%, 对抑制铬吸收有一定作用。但 S3 处理小白菜铬含量较高(图2), 说明过高的施硫量并不利于降低小白菜铬生物有效性。

2.3.5 硅酸钠对小白菜吸收铬的影响 不同水平的硅酸钠处理都不同程度地降低了小白菜铬含量(图2), 其中 Si2 处理的小白菜铬含量与对照间的差异达显著水平($P < 0.05$)。硅素营养通过细胞硅质化及硅与重金属离子在细胞壁的共沉淀作用^[9-10], 对于抑制小白菜铬吸收有一定作用。此外, 水培试验表明, 硅酸根有抑制小白菜吸收 Cr(VI) 的显著效应(另文发表), 这对硅酸钠降低小白菜铬含量也会有一定效果。

2.4 不同处理对小白菜产量和维生素 C 含量的影响

外源 Cr(VI) 对小白菜有很强的致毒性, 有显著的减产效应^[11]。本试验在 Cr(VI) 施用量达到 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时也未导致显著的减产($P > 0.05$) (表3)。显然, 外源 Cr(VI) 迅速还原转化失活以及土壤铬含量(表1) 较低是不减产的主要原因。但外源 Cr(VI) 使小白菜铬含量增加, 会妨害维生素 C 的生物合成, 不利于提高蔬菜品质(Cr4 除外)。增施氯化钾、硝酸钙、硫酸钠等化肥使铬对小白菜维生素 C 合成的妨害得到有效缓解($P < 0.05$) (表3), 有效提高产量, 并对降低小白菜铬生物毒性有积极作用。硅酸钠处理则有一定的减产效应, 这与硅酸钠活化铬而提高小白菜根际铬的毒性有关。

表3 不同处理对小白菜产量和维生素 C 含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on the yields and vitamin C content of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)

处理 Treatment	鲜重/g · pot ⁻¹ Fresh weight	维生素 C 含量/mg · kg ⁻¹ Vitamin C content	处理 Treatment	鲜重/g · pot ⁻¹ Fresh weight	维生素 C 含量/mg · kg ⁻¹ Vitamin C content
CK1	16.05 ± 2.58 ^{ab}	865.38 ± 12.5 ^a	CK2	14.99 ± 2.04 ^a	575.28 ± 14.80 ^b
Cr1	16.32 ± 3.12 ^{ab}	623.67 ± 8.68 ^{ab}	Si1	14.25 ± 2.85 ^a	735.51 ± 21.50 ^{ab}
Cr2	14.99 ± 2.04 ^{ab}	575.28 ± 14.80 ^{ab}	Si2	12.23 ± 3.12 ^{ab}	892.5 ± 32.35 ^a
Cr3	13.84 ± 2.10 ^b	473.13 ± 13.4 ^b	Si3	10.63 ± 2.58 ^b	836.05 ± 22.58 ^a
Cr4	17.43 ± 1.65 ^a	968.84 ± 7.08 ^a	Si4	11.91 ± 2.64 ^{ab}	765.97 ± 24.50 ^{ab}
CK2	14.99 ± 2.04 ^b	575.28 ± 14.80 ^b	CK2	14.99 ± 2.04 ^b	575.28 ± 14.80 ^b
K1	16.63 ± 2.51 ^{ab}	654.86 ± 22.50 ^{ab}	N1	12.57 ± 3.45 ^b	842.5 ± 21.50 ^{ab}
K2	19.65 ± 3.15 ^a	809.16 ± 21.55 ^a	N2	22.38 ± 2.78 ^{ab}	833.36 ± 17.75 ^{ab}
K3	19.35 ± 2.35 ^a	794.65 ± 35.80 ^a	N3	26.57 ± 3.50 ^a	903.00 ± 28.50 ^a

3 讨论

土壤溶液中 Cr(III) 价位高, 容易被黏土矿物吸附固定转化成残渣态铬^[12]。但增施化肥带入较多的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子与 Cr(III) 竞争吸附位点, 会削弱黏土矿物对 Cr(III) 的吸附作用; 施肥产生的盐基阴离子通过专性吸附机制占据许多 Cr(VI) 吸附位点, 对抑制矿物对 Cr(VI) 吸附也有作用, 故几种化肥均不同程度地降低了残渣态铬含量(表2)。除硅酸钠外, 氯化钾对抑制铬向残渣态转化的作用相对突出(表2)。土壤对氯离子吸附很弱^[5], 但氯离子有利于 Cr(III) 的解吸^[4], 这是氯化钾能够有效降低残渣态铬含量的重要因素。硝酸根和硫酸根对促进 Cr(III) 解吸作用不如氯离子, 且两种养分均为大量营养成分而被植物吸收利用较多, 会削弱其对 Cr(III) 解吸效应, 故对抑制外源 Cr(VI) 向残渣态转化的作用也相对较小。

化肥施用对抑制外源 Cr(VI) 向残渣态转化, 以及土壤有机质含量较高(表1)、长期保持潮湿状态造成的还原环境均有利于铬向有机态转化^[4]; 另外, 根系分泌物与重金属间存在着络合反应^[13], 会影响到重金属形态^[14-16]。在本试验条件下氮、硫、钾肥在促进小白菜生长的同时, 土壤有机态铬含量也

呈增加趋势, 反映有机态铬与化肥促进小白菜生理代谢活动有关, 其原因还有待进一步研究。

化肥对土壤铬生物有效性的影响是多方面的。首先, 施肥产生的盐基离子会影响到铬的生物有效性, 表现在硅酸钠活化铬对小白菜生长的明显抑制作用, 以及适量施用硫酸钠、氯化钾对抑制铬活性的作用可有效抑制小白菜对铬的吸收。其次, 盐基离子对 Cr(VI) 和 Cr(III) 协同促进或抑制效应对铬生物有效性也有影响, 如硝酸根有协同促进小白菜铬吸收作用, 而硅酸根则抑制小白菜对铬的吸收。从本试验结果看, 合理施氮是控制小白菜铬吸收的关键, 适当增施硫、钾和硅肥, 是控制小白菜铬污染的有效措施。

参考文献:

- [1] 李晶晶, 彭恩泽. 综述铬在土壤和植物中的赋存形式及迁移规律 [J]. 工业安全与环保, 2005, 31(3): 31-33
- [2] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tavera H, et al. Chromium toxicity in plants [J]. Environment International, 2005, 31: 739-753
- [3] Arduini I, Masoni A, Ercoli L. Effects of high chromium applications on miscanthus during the period of maximum growth [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 58(3): 234-243
- [4] 陈英旭, 骆永明, 朱永官, 等. 土壤中铬的化学行为研究. V. 土壤对 Cr(III) 吸附和沉淀作用的影响因素 [J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 77-85
- [5] 章永良. 土壤中六价铬的吸附与提取 [J]. 环境化学, 1990, 9(4): 43-47
- [6] 陈英旭, 何增耀, 吴建平. 土壤中铬的形态及其转化 [J]. 环境科学, 1994, 15(3): 53-56
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 469-480
- [8] 侯光炯. 土壤学 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 66-68
- [9] Diels L, van der Lelie N, Bastiaens L. New developments in treatment of heavy metal contaminated soils [J]. Rev Environ Sci Bio Technol, 2002(1): 75-82
- [10] Ciccu R, Ghiani M, Serci A, et al. Heavy metal immobilization in the mining-contaminated soils using various industrial wastes [J]. Miner Eng, 2003, 16: 187-192
- [11] 周易勇, 刘同仇, 邓波儿. 六价铬污染对小白菜产量、养分吸收及若干生理指标的影响 [J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 255-257
- [12] 吴平霄. 黏土矿物材料与环境修复 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 264-277
- [13] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 根系分泌物与重金属的化学行为研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 425-431
- [14] Chen Y X, Lin Q, Luo Y M, et al. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Chemosphere, 2003, 50: 807-811
- [15] López Bucio J, Nieto-Jacobo M F, Ramírez-Rodríguez V, et al. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils [J]. Plant Sci, 2000, 160: 1-13
- [16] Jones D L, Karrah P R, Kochian L V. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake [J]. Plant Soil, 1996, 180: 57-66

责任编辑: 夏爱红