

盐基离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-}) 对小白菜 铬污染毒性的调控机制^①

徐胜光, 周建民, 毕得, 陈能场*, 谢志宜, 徐燕玲

(广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘要: 通过水培试验, 探讨了主要盐基离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-}) 对小白菜Cr (VI) 污染毒性的调控作用, 结果表明: ①Cr对小白菜有极强的致毒能力, 可有效抑制小白菜生长、Fe养分吸收和小白菜叶片硝酸还原酶活性, 故妨碍碳氮代谢进而降低小白菜产量品质; ②适度提高 NO_3^- -N浓度可有效减缓Cr对小白菜吸收Fe和硝酸还原酶活性的抑制毒性, 并刺激小白菜生长, 但 NO_3^- 同时也有协同促进小白菜吸收Cr的明显效果; ③适当提高 SO_4^{2-} 浓度能有效抑制小白菜对Cr吸收, 并提高小白菜硝酸还原酶活性, 但过高 SO_4^{2-} 浓度有一定盐胁迫毒害效应, 会影响其对降低小白菜Cr生物毒性的作用效果; ④ SiO_3^{2-} 对小白菜吸收Cr有较强的抑制作用, 但这种作用未起到减缓小白菜Cr生理毒性的明显效果。试验结果表明, 适当控制营养液 NO_3^- 浓度是抑制小白菜Cr吸收的关键, 针对不同的Cr污染水平来调节 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 浓度配比, 是抑制小白菜吸收Cr的有效技术措施。

关键词: 盐基离子; 小白菜; 铬毒性

中图分类号: S158.4; X131.3; S634.3

土壤重金属污染不仅会导致农作物减产和品质下降, 还会通过土壤-植物系统, 经食物链危害人体健康和生命安全。植物修复以其有效、非破坏和经济的优点, 已成为国内外的热点和前沿^[1-2], 但鉴于我国人多地少、人地矛盾突出, 现阶段还难以广泛应用。因此, 开发重金属污染农田的高效安全利用技术有其重要意义和迫切性。施肥作为农业生产中最普遍的增产措施, 具有促进重金属形态转化作用, 进而影响到重金属生物毒性。研究表明 N 肥主要通过 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的根际碱化和酸化效应来影响重金属的活性^[3], K_2SO_4 在旱地有促进 Cd 吸收的效果^[4], Si 肥能降低重金属对作物的毒害^[5]。Si、N 和 S 肥对重金属生物有效性的作用, 实质上是这些肥料中的主要盐基离子 (SiO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 与重金属间复杂相互作用的结果, 但其调控作用及其机制还不清楚。对于 Cr 污染土壤而言, 土壤总 Cr 含量并不是植物吸收而产生毒害的可靠指标^[6-8], 土壤盐基离子在不同条件下与活性重金属 Cr 间复杂的相互作用, 也会影响到 Cr 的生物有效性。本项研究旨在揭示重要盐基离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-}) 对小白菜 Cr 毒性的调控作用及其机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为小白菜 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)), 品种为台湾大头清江白菜, 由广东省农科院提供; 供试外源Cr (VI) 为 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 采用的肥料和化学试剂均为分析纯。水培试验中, 用 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 Na_2SiO_3 分别控制培养液 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 浓度。

1.2 试验方法

1.2.1 正交试验 选用L16 ($4^3 \times 2^6$) 正交表, 每处理种 12 株。其中, N1、N2、N3 和N4 分别代表 400、500、600 和 800 mg/L的 NO_3^- 水平, S1、S2、S3 和S4 分别代表 50、100、150 和 200 mg/L的不同的 SO_4^{2-} 水平; Cr1、Cr2、Cr3 和Cr4 分别代表 0.5、1.0、2.0、4.0 mg/L不同的Cr浓度水平, Si1、Si2 则分别代表 60、120 mg/L 的 SiO_3^{2-} 浓度水平, 另加 1 个不施Cr的CK处理, 采用文献[9]相同的基础营养液配方, 并根据正交试验处理作相应调整。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571117) 和广东省科技计划项目 (2004B20501001, 2006B20601008) 资助。

* 通讯作者 (ncchen@soil.gd.cn)

作者简介: 徐胜光 (1973—), 男, 云南人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事污染生态学研究。E-mail: sgxu@soil.gd.cn

(不含Cr) 中培养 11 天, 使幼苗长成壮苗, 再按试验设计更换营养液。培养液 pH 用稀盐酸和氢氧化钠溶液调到 5.5, 每周更换 1 次营养液, 每天用气泵、气泡石、塑料管组装成供氧装置给培养液供氧 2 次, 每次持续 20 min 左右。试验实施 1 周后, 为降低 Cr 毒害过重对试验的影响, 营养液 Fe 浓度统一从 1.0 mg/L 提高到 2.0 mg/L。水培试验用盆规格为长 60 cm × 宽 40 cm × 高 20 cm, 定植板为泡沫板, 定植时用棉花固定幼苗。2005 年 11 月 4 日育苗, 同年 11 月 18 日正式实施试验处理, 12 月 28 日采收。

1.2.2 盐基离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 调控效果的佐证试验 试验设不含 Cr 的 CK1 和营养液 Cr 浓度 1.0 mg/L 的 CK2 两个对照处理, 并在 Cr 浓度统一为 1.0 mg/L 条件下, 设 N1'、N2'、N3' 等处理分别代表 400、500、600 mg/L NO_3^- 浓度水平, S1'、S2'、S3' 等处理分别代表 100、150、200 mg/L SO_4^{2-} 浓度水平, Si1'、Si2'、Si3' 处理分别代表 60、120、180 mg/L SiO_3^{2-} 浓度水平, 做水培试验进一步佐证正交试验结果。培养液配方同正交试验, 每处理种 3 盆, 每盆种 2 株。试验用盆的规格内径为 20 cm, 高 20 cm。试验实施时间同正交试验。

1.3 观测分析方法

小白菜硝酸还原酶活性采用活体法测定^[10]; 白菜地上部和根系样品经酸消解后, Fe 含量采用原子吸收

分光光度法测定, 小白菜 Cr 含量采用高锰酸钾氧化-二苯碳酰二肼比色法测定。

1.4 数据处理方法

数据经 Excel 软件整理、作图, 用 SPSS 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 外源 Cr 对小白菜 Cr 毒性的影响

由表 1 可见, Cr 对小白菜有极强的致毒性能, 在 Cr1 (0.5 mg/L) 处理水平条件下, 小白菜地上部鲜重即比 CK 有显著下降 ($p < 0.01$), Cr2 (1.0 mg/L) 处理小白菜地上部分鲜重降到 CK 的 1/3, 在 Cr3、Cr4 水平条件小白菜已难以生长, Cr 对小白菜生物毒性急剧增加。同时, 随着 Cr 浓度增加, 小白菜地上部和根系 Fe 含量较 CK 明显下降 ($p < 0.05$), Cr 有抑制小白菜 Fe 吸收的显著试验效果。Fe 是叶绿素重要成份之一, 也是硝酸还原酶辅酶铁氧还蛋白不可缺少的成分, 小白菜叶片硝酸还原酶活性随着 Cr 用量增加急剧下降, 说明 Cr 对叶片硝酸酶活性的抑制毒性因其浓度增加而显著增强。小白菜硝酸还原酶活性受到明显抑制, 会妨害 N 的代谢还原生化过程, 进而影响到各种氨基酸、蛋白、核酸以及其它含 N 有机营养物质的生物合成^[11-13], 故外源 Cr 对小白菜有很强的致毒性能。

表 1 外源 Cr 对小白菜产量性状、Cr 和 Fe 含量及硝酸还原酶活性的影响

Table 1 Effects of Cr on yields, Cr content, iron content and nitrate reductase activity of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.)

处理	地上部鲜重 (g/株)	根系鲜重 (g/株)	地上部 Cr 含量 (mg/kg)	地上部 Fe 含量 (mg/kg)	根系 Fe 含量 (mg/kg)	叶片硝酸还原酶活性 (NO_2^- , $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$)
CK	74.20 A	9.80 A	0.90 D	136.12 a	1612.2 a	46.44 A
Cr1	55.99 B	7.04 AB	5.89 C	116.83 ab	1423.39 ab	18.81 B
Cr2	27.50 C	4.43 B	7.08 C	125.15 a	1377.38 b	6.66 C
Cr3	9.92 D	3.67 B	20.17 B	74.72 b	1372.98 b	0.52 D
Cr4	2.63 E	1.68 C	42.34 A	68.71 b	1370.63 b	7.65 C

注: 同列不同大、小写字母表示邓肯氏检验在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 水平上差异显著, 下同。

2.2 NO_3^- 对小白菜 Cr 污染毒性的调控作用

正交试验发现 (表 2), 相同 Cr 浓度条件下, 随着 NO_3^- 浓度增加, 小白菜根系 Fe 含量明显增加, 叶片硝酸还原酶活性亦明显增强, NO_3^- 调控的佐证试验也获得相似的试验结果, 显示 Cr 对小白菜根系 Fe 吸收和叶片硝酸还原酶活性的抑制毒性, 因 NO_3^- 供 N 浓度增加而有效缓解。从 NO_3^- 调控效果的佐证试验结果看, N1'、N2' 水平对提高小白菜地上部鲜重有一定作用, 有促进小白菜生长的效应, 显示适度提高

NO_3^- 浓度一定程度还有降低小白菜 Cr 生物毒性的效果。但随着 NO_3^- 供 N 浓度增加, 小白菜 Cr 含量总体上也有明显上升的趋势, 提高 NO_3^- 供 N 浓度显然也有协同促进小白菜 Cr 吸收的效应。正交试验和 NO_3^- 调控佐证试验还表明, 过高的 NO_3^- 浓度水平会导致小白菜地上部鲜重的明显下降, 这与高水平 NO_3^- 浓度促进小白菜 Cr 的过度积累, 导致 Cr 生物毒性

表 2 NO₃⁻ 对小白菜产量性状、Cr和Fe含量及硝酸还原酶活性的影响Table 2 Effects of nitrate anions on yields, Cr content, iron content and nitrate reductase activity of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.)

处理	地上部鲜重 (g/株)	根系鲜重 (g/株)	地上部 Cr 含量 (mg/kg)	地上部 Fe 含量 (mg/kg)	根系 Fe 含量 (mg/kg)	叶片硝酸还原酶活性 (NO ₂ ⁻ , μg/(g·h))
正交试验 N1	27.58 a	4.59 a	16.96 b	115.3 a	1146.6 b	5.85 b
N2	23.06 ab	3.99 a	14.62 b	104.6 a	1220.0 b	8.57 ab
N3	27.92 a	4.76 a	18.59 ab	60.6 b	1500.6 ab	8.13 ab
N4	17.48 b	3.48 a	25.31 a	105.0 a	1677.3 a	11.09 a
佐证试验 CK1	70.06 a	9.33 a	0.92 c	136.1 a	1612.19 a	23.55 b
CK2	29.19 b	9.29 a	13.97 a	102.1 ab	765.8 b	6.70 c
N1'	35.79 b	7.23 ab	8.78 b	103.9 ab	992.3 b	6.21 c
N2'	34.19 b	6.63 ab	10.05 ab	64.6 b	708.4 b	20.94 b
N3'	17.10 c	4.30 b	12.59 ab	75.2 b	1276.1 ab	46.10 a

增强有关。

2.3 SO₄²⁻ 对小白菜 Cr 污染毒性的调控作用

水培试验研究发现 (表3), 在相同 Cr 浓度条件下, 适度提高营养液 SO₄²⁻ 浓度对降低小白菜 Cr 含量也有效果, 随着营养液 SO₄²⁻ 浓度的提高, 小白菜 Cr 含量有下降趋势 ($p<0.05$)。在适度范围内, 营养液 SO₄²⁻ 浓度增加会增强对 Cr 的颉颃作用, 这是 SO₄²⁻ 抑制小白菜 Cr 吸收的主要原因。此外, SO₄²⁻ 调

控效果佐证实验表明, 适度提高营养液 SO₄²⁻ 浓度还有增强小白菜地上部硝酸还原酶活性和小白菜根系吸收 Fe 的效果。在正交试验中, 介质成份较 SO₄²⁻ 调控佐证试验复杂, 干扰因素较多, 掩盖了 SO₄²⁻ 对小白菜 Cr 生物毒性的调控作用, 对抑制小白菜 Cr 生物毒性作用并不明显。但过高 SO₄²⁻ 浓度条件下有一定盐胁迫毒害效应, 影响了其对降低小白菜 Cr 生物毒性的作用效果, 小白菜 Cr 含量有不降反升趋势。

表 3 SO₄²⁻ 对小白菜产量性状、Cr和Fe含量及硝酸还原酶活性的影响Table 3 Effects of sulfate anions on yields, Cr content, iron content and nitrate reductase activity of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.)

处理	地上部鲜重 (g/株)	根系鲜重 (g/株)	地上部 Cr 含量 (mg/kg)	地上部 Fe 含量 (mg/kg)	根系 Fe 含量 (mg/kg)	叶片硝酸还原酶活性 (NO ₂ ⁻ , μg/(g·h))
正交试验 S1	26.62 a	4.53 a	25.20 a	86.26 a	1346.70 a	17.21 a
S2	23.86 a	4.19 a	19.53 ab	102.15 a	1403.95 a	2.86 c
S3	22.51 a	4.08 a	16.14 b	104.90 a	1457.51 a	5.35 bc
S4	23.06 a	4.03 a	14.60 b	92.10 a	1336.23 a	8.22 b
佐证试验 CK1	70.06 a	9.33 a	0.92 c	136.12 a	1612.19 a	23.54 a
CK2	29.19 b	9.29 a	13.97 a	102.10 ab	765.80 b	6.70 b
S1'	24.02 c	5.35 b	10.34 ab	97.78 ab	886.35 b	15.45 ab
S2'	33.13 bc	7.41 ab	7.16 b	86.91 b	819.40 b	20.64 a
S3'	39.36 b	7.29 ab	9.56 b	97.91 ab	444.42 c	18.04 ab

2.4 SiO₃²⁻ 对小白菜Cr毒性的调控作用

水培正交试验中 (表 4), Si2 处理的小白菜地上部Cr含量明显要低于Si1, 处理间Cr含量差异达到了显著水平 ($p<0.05$), 显示适度提高SiO₃²⁻ 浓度也有抑制小白菜吸收Cr 的效应。SiO₃²⁻ 调控的佐证试验也获得相似的结果, 其中Si3'水平与相同Cr 浓度的CK2 处理间小白菜地上部Cr含量差异达到了显著水平 ($p<0.05$), 对抑制小白菜吸收Cr 效应尤其明显。试验结

果还表明, SiO₃²⁻ 调控对抑制小白菜Cr 吸收的作用, 未有效提高小白菜根系或地上部Fe含量, 也未明显增强小白菜叶片硝酸还原酶活性, 故未有明显降低小白菜Cr生物毒性的试验效果。显然, SiO₃²⁻ 促进细胞硅质化以及重金属与SiO₃²⁻ 在细胞壁的共沉淀作用^[11], 在抑制重金属吸收的同时, 也可能阻碍一些有益微量元素养分的吸收利用, 故SiO₃²⁻ 调控对抑制小白菜Cr毒性的作用不明显, 有关机制尚需进一步研究。

表4 SiO_3^{2-} 对小白菜产量性状、Cr和Fe含量及硝酸还原酶活性的影响Table 4 Effects of silicate ions on yields, Cr content, iron content and nitrate reductase activity of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.)

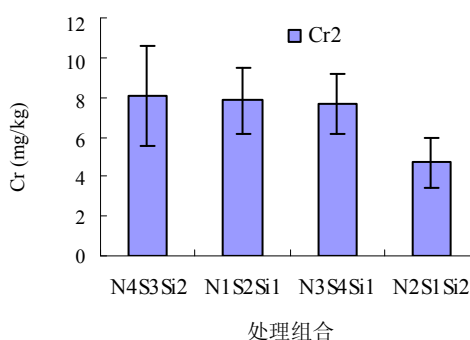
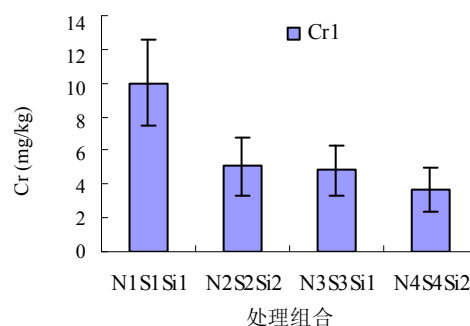
处理		地上部鲜重 (g/株)	根系鲜重 (g/株)	地上部 Cr 含量 (mg/kg)	地上部 Fe 含量 (mg/kg)	根系 Fe 含量 (mg/kg)	叶片硝酸还原酶活性 (NO_2^- , $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$)
正交试验	Si1	26.93 a	4.49 a	21.06 a	82.12 b	1351.3 a	9.29 a
	Si2	21.09 a	3.93 a	16.67 b	110.59 a	1420.9 a	7.53 a
佐证试验	CK1	70.06 a	9.33 a	0.92 c	136.12 a	1612.2 a	23.55 a
	CK2	29.19 bc	9.29 a	13.97 a	102.10 b	765.8 b	6.70 b
	Si1'	30.28 bc	7.09 ab	6.57 b	94.40 b	621.2 b	2.07 c
	Si2'	42.83 b	8.60 a	6.68 b	97.00 b	455.4 c	2.35 c
	Si3'	24.93 c	5.95 b	8.45 ab	116.50 ab	1525.4 ab	7.02 b

3 讨论

Cr (VI) 对作物有极强的毒性，而土壤微生物通过生物氧化作用能够把Cr (III) 氧化成Cr(VI) [13]，所以，探讨Cr(VI) 对作物的毒性及其调控机理，对于技术上采取合理的施肥调控来缓解Cr污染生物毒性具有重要意义。从本试验结果看，Cr(VI) 对小白菜吸收Fe有很强的抑制毒性，而Fe是叶绿体重要成分之一[14]，缺Fe会严重影响植物的光合作用，进而影响到植物碳氮代谢等一系列酶催化反应过程。在缺Fe条件下，不同形态N素 (NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N) 对新叶Fe营养状况的影响有显著差异[15-16]， NH_4^+ -N 可使根系总Fe量降低 39.5%， NO_3^- -N 只降低 19.4% [17]，显示 NO_3^- -N 对促进植物Fe吸收有重要作用。本试验条件下 NO_3^- 对Cr (VI) 弱，有协同促进小白菜吸收Cr (VI) 效应，但由于 NO_3^- 也促进了小白菜对Fe养分吸收，增强了小白菜叶片的硝酸还原酶活性，故合理施用对缓解小白菜Cr毒性有一定作用。 SO_4^{2-} 对Cr (VI) 弱作用相对较强，且S参与一系列酶和蛋白质代谢过程，包括合成半胱氨酸和谷胱甘肽[18]，故适当 SO_4^{2-} 浓度对于缓解Cr毒性有一定效果。 SiO_3^{2-} 对Cr (VI) 有相对更强的弱作用， SiO_3^{2-} 导致的植物细胞硅质化以及与重金属在细胞壁的共沉淀作用[19]，均有利于抑制小白菜Cr吸收，但其对缓解Cr毒性和抑制Fe吸收以及硝酸还原酶活性作用不明显，未起到有效降低小白菜Cr生物毒性的作用。

鉴于 NO_3^- 对小白菜吸收Cr (VI) 的协同促进作用，只有控制好 NO_3^- 浓度才能有效抑制小白菜对Cr (VI) 吸收，而适当浓度的 SiO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 有抑制小白菜吸收Cr (VI) 的效应，故合理搭配 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 应可有效抑制小白菜对Cr的吸收。从正交试验的结果看 (图 1)，Cr1 水平下N4S4Si2 处理组合小白菜地上

部Cr含量最低，这说明Cr (VI) 污染程度轻情况下高浓度 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 搭配有利于抑制小白菜Cr吸收；在Cr2 和Cr3 条件下，N2S1Si1 和N2S4Si1 处理组合小白菜地上部Cr含量相对较低，也起到了有效抑制小白菜吸收Cr的作用；但在Cr4 条件下 N1S4Si2 处理组合小白菜Cr含量最低，高Cr (VI) 污染条件下通过降低 NO_3^- 浓度并和高 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} 浓度搭配，对抑制小白菜对Cr吸收有相对好的效果。



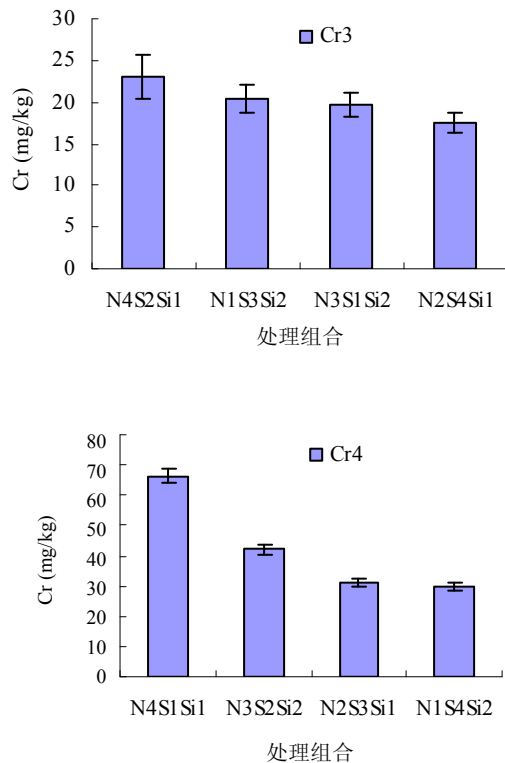


图 1 不同处理组合对小白菜 Cr 含量的影响
Fig. 1 Effects of different treatments on Cr content
of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)

参考文献:

- [1] Prasad MNV. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, 50 (5): 686-700
- [2] Wu LH, Luo YM, Xing XR, Christie P. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102 (3): 307-318
- [3] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 张青. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展. *农业环境科学学报*, 2006, 25(Z1): 328-333
- [4] 依纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响. *中国农业大学学报*, 1996, 1 (5): 79-84
- [5] 许建光, 李淑仪, 王荣萍. 硅肥抑制作物吸收重金属的研究进展. *中国农学通报*, 2006, 22 (7): 495-499
- [6] Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. *Environment International*. 2005 (31): 739-753
- [7] Arduini I, Masoni A, Ercoli L. Effects of high chromium applications on miscanthus during the period of maximum growth. *Environmental & Experimental Botany*, 2006, 58: 234-243
- [8] 陈英旭, 骆永明, 朱永官, 朱祖祥, 何增耀. 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. *土壤学报*, 1994, 31 (1): 77-85
- [9] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 魏秀国, 杨秀琴, 王少毅, 何文彪. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及其生长的影响. *园艺学报*, 2003, 30 (1): 51-55
- [10] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-58
- [11] Barcelo J, Poschenrieder C, Vazquez MD, Gunse B, Vernet JP. Beneficial and toxic effects of chromium in plants: solution culture, pot and field studies. *Studies in Environmental Science // Irb Kheoruenromne. Paper Presented at the 5th International Conference on Environmental Contamination. Morges, Switzerland*, 1993: 55
- [12] Bishnoi NR, Chugh LK, Sawhney SK. Effect of chromium on photosynthesis, respiration and nitrogen fixation in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. *J. Plant Physiol.*, 1993, 142: 25-30
- [13] Sethunathan N, Megharaj M, Smith L, Kamaludeen SPB, Avudainayagam S, Naidu R. Microbial role in the failure of natural attenuation of chromium (VI) in long-term tannery waste contaminated soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105: 657-661
- [14] Terry N, Abadia J. Function of iron in chloroplasts. *Journal of Plant Nutrition*, 1986, 9: 609-646
- [15] Alloush GA, Bot LJ, Sanders FE, Kirkby EA. Mineral nutrition of chickpea plants supplied with NO₃-N or NH₄-N. I. Ionic balance in relation to iron stress. *Journal of Plant Nutrition*, 1990, 13(12): 1575-1590
- [16] Mengel K, Bübl W. Verteilung von Eisen in blättern von weinreben mit HCO₃-induzierter Fe-chlorose. *Z. Pflanzenernährung Bodenkd*, 1983, 146: 560-571
- [17] 郭世伟, 邹春琴, 张福锁, 江荣风. 铁营养状况及不同形态氮素对玉米体内不同铁库铁再利用的影响. *土壤学报*, 2001, 38(4): 464-470
- [18] 全先庆, 张洪涛, 单雷, 毕玉平. 植物金属硫蛋白及其重金属解毒机制研究进展. *遗传*, 2006, 28 (3): 375-382
- [19] Liang YC, Wong JWC, and Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, 2005, 58: 475-483

Regulation and Control of Base Anions (NO_3^- , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-}) on Cr Toxicity in *Brassica Campestris* L. ssp. *Chinensis*(L.) and the Mechanism

XU Sheng-guang, ZHOU Jian-min, BI De, CHEN Neng-chang, XIE Zhi-yi, XU Yan-ling

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

Abstract: By hydroponics experiment, the effects of main base anions (NO_3^- , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-}) on Cr(VI) toxicity of pakchoi cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.)) and its mechanism were studied. The results showed that: ①With the increase of Cr content in water culture, the growth of pakchoi cabbage and its iron uptake were restrained obviously by Cr, therefore the activity of nitrate reductase and the metabolism of carbon, nitrogen were also inhibited intensively, which showed that Cr was highly toxic to pakchoi cabbage in this hydroponics experiments. ②Cr uptake by pakchoi cabbage can be promoted significantly by nitrate anions (NO_3^-), and from it the inhibition of iron uptake by pakchoi cabbage reduced and leaf nitrate reductase activity which abated by Cr in nutrient solution was also mitigated, showing that the toxicity of Cr to pakchoi cabbage can be mitigated by nitrate anions when applied properly. ③On the condition of the same content of Cr in nutrient solution, at the proper range, with the increasing of sulfate anions (SO_4^{2-}) concentration in nutrient solution, Cr uptake by pakchoi cabbage decreased obviously and leaf nitrate reductase activity was also enhanced. However, high sulfate anions concentration in water culture resulted in salt toxicity somewhat to pakchoi cabbage and therefore reduced its resistance of Cr toxicity. ④It obviously showed that Cr uptake by pakchoi cabbage can be restrained from the increase of silicate anions concentration in water culture, but there was no positive effect in leaf nitrate reductase activity from these effects of silicate anions, and the growth of pakchoi cabbage which restrained by Cr was also not obviously promoted by it, showing that these effects on Cr uptake by silicate anions can not obviously detoxify for pakchoi cabbage. In this study, results showed that the proper rate of nitrate concentration is the key that restraining Cr uptake by pakchoi cabbage in water culture, and it was an effective technological measure to restrain Cr uptake by regulating the ratio of base anions according to this hydroponics experiment.

Key words: Base ions, *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*(L.), Cr toxicity