

石灰、活性炭对铬污染土壤的修复效果研究

杨林¹ 陈志明¹ 刘元鹏¹ 王玉军^{1,2†}

(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

(2 山东省高校农业环境重点实验室(山东农业大学), 山东泰安 271018)

摘要 通过模拟铬(Cr , $0 \sim 300 \text{ mg kg}^{-1}$)污染土壤盆栽试验, 研究石灰、活性炭及石灰 + 活性炭对铬胁迫下小白菜生长状况的影响及对铬污染土壤的修复效果。结果表明: 受铬污染的土壤明显使小白菜受到毒害, 但经石灰(L_1 、 L_2)、活性炭(C_2 、 C_3)及石灰 + 活性炭($L_1 C_1$ 、 $L_2 C_2$)处理均缓解了重金属的毒害症状, 显著促进小白菜的生长, 生物量较对照提高 $1 \sim 2$ 倍 ($p < 0.05$)。3 种改良剂相比, 在相同 Cr 浓度处理下, 活性炭对降低污染土壤中有效态铬的效果最好, 与 CK 相比, 有效态铬的含量降低至 0.086 mg kg^{-1} , 降幅达 77.36%。相关分析表明: 小白菜叶部铬含量和根部铬含量与土壤有效态铬含量表现出显著的正相关 ($p < 0.01$), 土壤 pH 与土壤有效态铬含量之间呈负相关 ($p < 0.05$), 所以在铬污染的土壤中, 可以提高土壤的 pH, 以减小土壤铬的植物有效性, 使其向植物迁移的风险减小。

关键词 小白菜; 铬污染土壤; 改良剂; 修复

中图分类号 S156.2 **文献标识码** A

由于污水灌溉、采矿、工业三废排放、城市生活垃圾堆放等众多原因, 农业土壤的铬(Cr)污染日益严重。Cr 作为五毒元素之一, 具有极强的致病致癌作用, 对人们的环境健康造成了严重的威胁^[1]。进入土壤中的重金属不仅能抑制植物生长发育, 并能通过食物链传递与富集, 最终危害人体的健康。因此, 对重金属污染土壤进行改良修复已成为土壤学和环境科学领域工作者研究的重点和热点^[2]。

土壤重金属污染修复技术有很多, 董汉英等^[3]采用批量淋洗对多金属污染土壤进行修复研究, 结果表明, EDTA 淋洗剂对土壤中 Zn、Pb、Cu、Ni 去除效果较好, 而对 Cr 去除效果较差。崔红标等^[4]利用磷灰石等改良剂对铜污染土壤进行修复研究, 结果表明, 磷灰石、石灰和木炭显著提高了土壤 pH, 降低了 Cu 的活性, 增加了土壤酶活性和微生物数量, 对 Cu 污染土壤具有较好的修复效果。施加改良剂因其经济、方便、不改变土壤结构的优势而被广泛应用^[5-6]; 除减少重金属溶解性之外, 改良剂还可以有效地减少重金属生物有效性和对健康的负面作用^[7]。Cheng 等^[8]通过在 Cd、Pb 和 Zn 污染的酸性土壤上进行小区试验, 发现施用石灰和钙镁磷肥消除了小白菜重金属毒害的生物学性状, 显著地降低了小白菜体内 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的含量。陈宏等^[9]

研究表明, 施加一定量的石灰、腐殖酸能显著抑制莴笋对汞的吸收, 增加土壤中汞的含量。陈晓婷等^[10]的研究发现, 石灰、活性炭对减轻土壤中 Cr 污染对植株的毒害具有良好效果。鉴于此, 为进一步研究石灰、活性炭及石灰 + 活性炭的作用, 本文以小白菜(*Brassica chinensis*)为例, 从土壤-植物系统角度出发, 研究 3 种改良剂对 Cr 污染土壤的改良效果。具体考察了土壤 pH、小白菜体内 Cr 含量及小白菜收获后土壤有效态 Cr 的变化, 探讨其作为土壤改良剂的可行性, 为重金属 Cr 污染土壤的修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

棕壤在中国的分布纵跨辽东与山东半岛, 带幅大致呈偏北方向。据山东省第二次土壤普查资料统计^[11], 棕壤占山东省土壤总面积的 14.09%, 是胶东、沂东丘陵区及鲁中南山区的代表性土壤。因此, 本试验供试土壤选择棕壤, 取自山东农业大学南校区试验站。采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 表层土, 自然风干, 剔除植物残体和石块, 过 5 mm 筛, 备用。供试土壤的基本性状见表 1。

† 通讯作者, E-mail: wangyj@sdau.edu.cn

作者简介: 杨林(1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程。E-mail: ylsdau0905@163.com

收稿日期: 2011-03-09; 收到修改稿日期: 2011-10-25

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soil

土壤 Soil	pH	全氮 TN(g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalized N(mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P(mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K(mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter(g kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)
棕壤	7.20	0.836	65.75	26.70	112.4	17.19	37.98

供试小白菜为市售新四月慢。

供试 Cr 试剂为市售(分析纯)K₂Cr₂O₇。

供试改良剂为氢氧化钙(即石灰,天津市博迪化工有限公司),无定形粉末状活性炭(天津市塘沽滨海化工厂),石灰+活性炭。

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,各处理重复 3 次。供试风干土壤装入塑料盆(盆高 25 cm、直径 30 cm),每盆装土 5 kg。重金属 Cr 以分析纯 K₂Cr₂O₇形式施入土壤,土壤设置 4 个 Cr 浓度处理:0(Cr₀)、100(Cr₁)、200(Cr₂)、300(Cr₃)mg kg⁻¹,平衡 2 周。

盆栽试验设计的污染水平所达到的土壤环境质量等级,可参照表 2。

表 2 土壤环境质量标准(GB15618-1995)

Table 2 Standard for soil environmental quality (GB15618-1995)

级别 Level	一级 First level	二级 Second level	三级 Third level
pH	自然背景 Natural background	6.5~7.5	>6.5
Cr(mg kg ⁻¹)	≤90	≤200	≤300

注:一级标准:保护区自然生态,维持自然背景土壤环境质量的限制值;二级标准:保障农业生产,维护人体健康的土壤限制值;三级标准:保障农业生产和植物正常生长的土壤临界值 Note: First class: the limit values to protect regional natural ecology and maintain the natural background of soil environment quality; Second class: the limit values to protect agricultural production and human health; Third class: the critical values to protect agricultural and forestry production and the normal growth of plants

2 周后再按照下列方法分别施加改良剂。

(1)在所设每个土壤 Cr 浓度下,再设 4 个石灰浓度处理:0(L₀)、1(L₁)、1.5(L₂)、2(L₃)g kg⁻¹土,各处理重复 3 次。

(2)在所设每个土壤 Cr 浓度下,再设 4 个活性炭浓度处理:0(C₀)、2(C₁)、4(C₂)、8(C₃)g kg⁻¹土,各处理重复 3 次。

(3)在所设每个土壤 Cr 浓度下,再设 4 个石灰+活性炭浓度处理:0×0(L₀C₀)、1×2(L₁C₁)、1.5×4(L₂C₂)、2×8(L₃C₃)g kg⁻¹土,各处理重复

3 次。

按盆栽作物对养分的需求,氮、磷、钾施用量分别为 N 0.15 g kg⁻¹土、P₂O₅ 0.15 g kg⁻¹土、K₂O 0.2 g kg⁻¹土。将土壤、肥料及各改良剂混和均匀,装入盆中,加入去离子水使土壤含水量为田间最大持水量的 60% 左右,平衡 2 周。2 周后每盆播入小白菜种子 20 粒,间苗后每盆留 10 株。试验期间,土壤湿度控制在田间持水量的 60%,并保持正常的日光照射。

在小白菜生长 60 d 后收获,测定小白菜地上部和根部干重、Cr 含量及土壤 pH、土壤有效态 Cr 含量。

1.3 测定分析

1.3.1 土壤 pH 的测定 土壤 pH 采用土壤水浸提液 pH 测定法,具体实验方法参照文献[12]。

1.3.2 土壤有效态 Cr 的测定^[13-14] 按照土壤中不同结合态 Cr 区分的逐级提取方法,取土样分别用 H₂O、1 mol L⁻¹ NH₄Ac 进行连续提取,提取剂与土壤样品的质量比为 5:1。测定提取液中的作为有效 Cr 的水溶态 Cr、可交换态 Cr 含量。Cr 测定采用 GB7466-87 中高锰酸钾氧化一二苯碳酰二胍分光光度法。

1.3.3 小白菜干重的测定 将收获的小白菜样分为叶、茎和根三部分,先用自来水冲洗去除泥土,再用去离子水洗净,用吸水纸吸干小白菜表面水分。置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,在 75℃ 下烘干至恒重,然后称重。

1.3.4 小白菜体内 Cr 的测定 将烘干的植株用不锈钢粉碎机粉碎,过 0.5 mm 筛后放入封口塑料袋中于干燥处保存备用。精确称取处理后的样品 1.000 0 g 左右(精确至 0.000 1 g)于三角瓶中,用浓硝酸、浓硫酸消解至无色澄清溶液,转入 100 ml 容量瓶中定容,采用火焰原子吸收分光光度法测定 Cr 含量。

1.4 数据分析

数据经 Excel 软件整理、作图,用 SPSS 软件进行统计分析。

表3 不同改良剂处理对土壤 pH、有效态 Cr 含量的影响
Table 3 Effects of different soil amendments on soil pH and Cr availability

处理 Treatment	Cr ₀		Cr ₁		Cr ₂		Cr ₃	
	pH	有效态	pH	有效态	pH	有效态	pH	有效态
L ₀	6.91a	0.380a	6.97a	1.64a	7.09a	3.84a	7.14c	18.95a
L ₁	7.22a	0.313a	7.29a	1.04a	7.43a	3.44a	7.46c	14.72a
L ₂	7.40a	0.253a	7.57ab	0.874a	7.61	1.68a	7.74c	10.59a
L ₃	7.51b	0.227a	7.65ab	0.489a	7.75b	1.46a	7.82c	7.08a
C ₀	6.91a	0.380a	6.97a	1.64a	7.09a	3.84a	7.14a	18.95a
C ₁	6.90a	0.264a	6.97a	0.960ab	7.08a	2.46ab	7.02a	11.28ab
C ₂	6.78a	0.148ab	6.98a	0.490b	7.25a	1.21ab	7.25a	7.79b
C ₃	7.14a	0.086b	7.06a	0.271b	7.02a	0.949b	7.20a	3.86c
L ₀ C ₀	6.91a	0.380a	6.97ab	1.64a	7.09ab	3.84a	7.14ab	18.95a
L ₁ C ₁	7.30a	0.286a	7.34ab	1.16ab	7.40ab	2.61a	7.52ab	12.82ab
L ₂ C ₂	7.45a	0.205ab	7.48ab	0.497bc	7.58ab	1.44b	7.68ab	5.65b
L ₃ C ₃	7.52a	0.137b	7.57ab	0.401c	7.71ab	0.802b	7.81ab	4.25c

注:多重比较为同一改良剂不同用量间比较,小写字母不同表示差异显著($p < 0.05$),大写字母表示差异极显著($p < 0.01$),下同 Note: Multiple comparisons were done of the same amendment between different dosage. Different lowercase letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level, and different uppercase letters significant difference at $p < 0.05$ level. The same below

2 结果与讨论

2.1 不同改良剂对 Cr 污染土壤 pH、有效态 Cr 含量的影响

通过试验可知,随着土壤中添加 Cr 浓度的升高,土壤 pH 有升高的趋势,这与陈英旭等^[15]的研究结果一致。这是由于 Cr(VI)和有机质进行氧化还原反应的过程中会消耗掉一部分 H⁺,从而使土壤 pH 升高。

由表3可知,在相同 Cr 浓度下,随着土壤中石灰添加量的增加,土壤 pH 逐渐升高,而土壤有效态 Cr 的含量逐渐降低。这主要是由于石灰提高了土壤的 pH,使得重金属以碳酸盐或氢氧化物形式沉淀下来,而减少了生物有效性^[16]。土壤 pH 在 Cr₀、Cr₂ 处理下,石灰浓度为 L₃时,与对照相比分别提高了 0.6、0.66 个单位,差异显著($p < 0.05$);Cr₁ 处理下,石灰浓度为 L₂、L₃时土壤 pH 与对照相比分别提高了 0.6、0.68 个单位,差异显著($p < 0.05$);而在 Cr₃ 处理下,各石灰处理间没有显著性差异。土壤有效态 Cr 在 L₃石灰处理时分别降低为对照的 59.76%、29.78%、37.93% 和 37.36%,这主要是因为土壤 pH 升高,降低 Cr 的溶解度,促使 Cr 形成氢氧化铬沉淀,减少植物的吸收。

不同 Cr 处理下,土壤 pH 的变化与石灰处理不

同,活性炭的施入对土壤 pH 的影响均无显著性差异,而且活性炭的施入还有降低土壤 pH 的趋势,这可能是由于活性炭的加入提高了土壤的有机质含量,使土壤酸性增强;此外活性炭的加入还可以起到缓冲土壤溶液 pH 的作用。在 C₃活性炭处理时,土壤有效态 Cr 分别降低为对照的 22.63%、16.53%、24.71% 和 20.35%,与对照相比呈显著性差异($p < 0.05$)。相比较而言,在相同 Cr 浓度处理下,活性炭对降低污染土壤中有效态 Cr 的效果较好;与 CK 相比,有效态 Cr 的含量降低至 0.086 mg kg⁻¹,降幅达 77.36%。这是因为活性炭具有较大的表面积和很强的吸附能力,主要通过下列两个作用减小土壤重金属有效性^[17]:(1)活性炭可直接吸附污染土壤中的重金属;(2)活性炭的加入可以提高土壤有机碳的含量,起到固定重金属的作用。

不同 Cr 处理下 pH 的变化随着石灰 + 活性炭添加量的增大而增大,这与石灰对土壤 pH 的影响效果类似,但没有石灰显著。Cr₁、Cr₂、Cr₃ 处理下,与各水平下对照相比,石灰 + 活性炭的加入对土壤 pH 没有显著性影响,但与空白对照相比,存在显著性差异($p < 0.05$)。各处理最大 pH 达到 7.81,较空白对照提高了 0.67 个单位。不同 Cr 处理下,石灰 + 活性炭浓度为 L₃C₃时,土壤有效态 Cr 分别降低为对照的 36.07%、24.42%、20.88% 和 22.44%,与对照相比均达到显著性差异($p < 0.05$)。由此可

见,不同 Cr 处理下,石灰和活性炭的联合施入可降低土壤中有效态 Cr 含量,降低 Cr 的生物活性,减轻 Cr 对植物的危害。

2.2 不同改良剂对 Cr 胁迫下小白菜生长发育的影响

不同改良剂处理对小白菜地上部和根部干重的影响见图 1~图 3 所示。

由图 1 可知,Cr 污染水平越高,对小白菜的生长危害越大。低浓度石灰的施入有助于小白菜的生长,Cr₂处理下,L₁、L₂石灰浓度处理与对照相比小白菜根部干重增加显著,为对照处理的 1.89 倍和 1.61 倍($p < 0.05$),但高浓度石灰的施入反而对小白菜生长产生很强的抑制作用。石灰浓度为 L₃时,小白菜地上部干重最小,与对照相比差异显著,分

别为对照处理的 35.62%、18.31% 和 11.94% ($p < 0.05$)。Cr₃处理下,石灰浓度为 L₃时,小白菜生长却极其缓慢,植株很小,甚至枯萎死亡,这可能有两个原因:(1)高浓度 Cr 对小白菜产生毒害作用。从图 1、图 2、图 3 可发现,在 Cr 浓度为 Cr₀~Cr₁(0~100 mg kg⁻¹)范围内,随着 Cr 浓度的增加,小白菜地上部干重和根部干重均在增高,这说明在此范围内 Cr 对小白菜的生长起到了促进作用。当 Cr 浓度达到 Cr₁~Cr₃(100~300 mg kg⁻¹)时,植株的生长受到抑制,且较对照的地上部干重明显降低。由此可见,土壤含 Cr 浓度为 100 mg kg⁻¹很可能是小白菜受 Cr 毒害的临界浓度。这与邓波儿等^[18]的研究结果相一致。(2)高浓度石灰(2 g kg⁻¹)和高浓度 Cr 一起作用,对小白菜生长产生毒害。

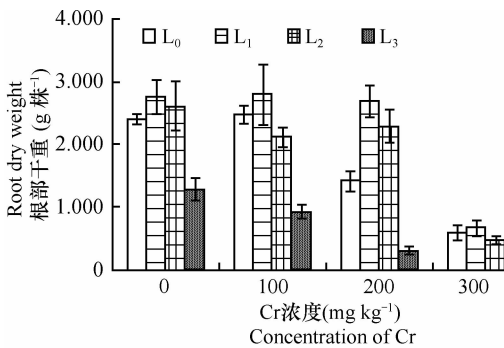


图 1 石灰对 Cr 污染土壤上小白菜根部干重和地上部干重的影响

Fig. 1 Effect of lime on dry weights of root and shoot of pakchoi in Cr contaminated soil

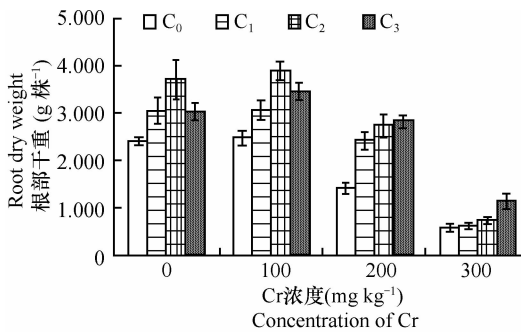
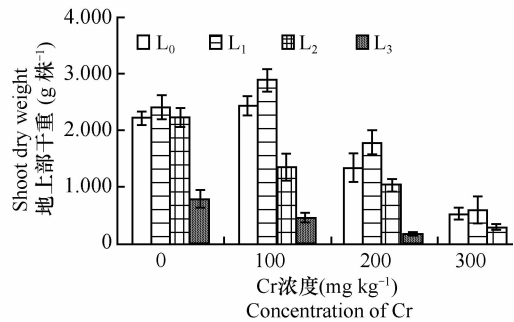


图 2 活性炭对 Cr 污染土壤上小白菜根部干重和地上部干重的影响

Fig. 2 Effect of activated carbon on dry weights of root and shoot of pakchoi in Cr contaminated soil

由图 2 可知,除 Cr₃处理外,其他 Cr 处理下,活性炭的加入对小白菜地上部干重的影响与对照相比均差异显著($p < 0.05$)。Cr₀、Cr₁、Cr₂处理下,活性炭加入浓度为 C₂时,地上部干重达到最大,分别为对照处理的 1.42 倍、1.57 倍、1.63 倍。Cr₃处理下,活性炭加入浓度为 C₃时,地上部干重达到最大,为对照处理的 1.37 倍,与对照相比差异不显

著。由此可知,活性炭对低、中等 Cr 污染土壤修复效果较好,能够显著增加小白菜地上部生物量,但在高浓度 Cr 污染土壤上,活性炭修复效果不明显。将图 1 和图 2 对比可发现,经活性炭改良后小白菜的干重明显高于经石灰改良后小白菜的干重,这进一步说明活性炭对 Cr 污染土壤的改良效果要好于石灰。

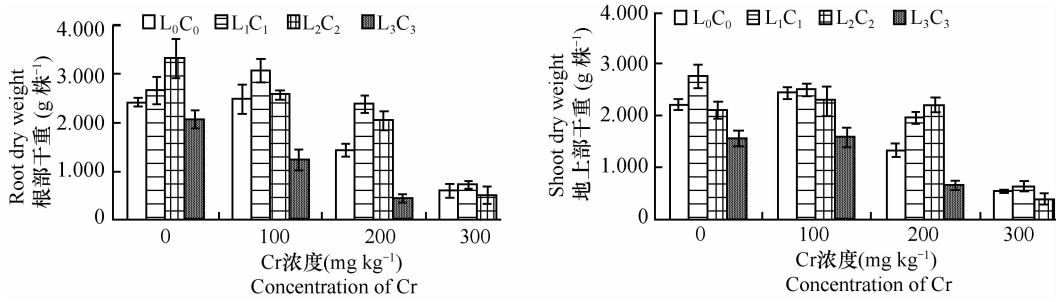


图3 石灰+活性炭对Cr污染土壤上小白菜根部干重和地上部干重的影响

Fig. 3 Effect of lime + activated carbon on dry weights of root and shoot of pakchoi in Cr contaminated soil

由图3可知,不同Cr处理下,小白菜地上部干重和根部干重均随石灰+活性炭施加量的增加先增加后降低。除在Cr₂处理下,石灰+活性炭施加浓度为L₂C₂时,小白菜地上部干重最大,是空白对照的1.66倍,差异显著($p < 0.05$)。Cr₀处理下,石灰+活性炭施加浓度为L₂C₂时,小白菜根部干重最大,是空白对照的1.37倍,差异显著($p < 0.05$);其他Cr处理下,小白菜地上部干重和小白菜根部干重均在石灰+活性炭施加浓度为L₂C₂时达到最大,差异显著($p < 0.05$)。不同Cr处理下,石灰+活性炭浓度为L₃C₃时小白菜地上部干重和根部干重最小,分别是对照的70.23%和64.30%、48.19%和

85.57%、49.27%和29.54%,与对照相比差异显著($p < 0.05$),可见高浓度石灰+活性炭的施入对小白菜生长有抑制作用。

将图3和图2对比可发现,经石灰+活性炭改良后小白菜的干重明显低于经活性炭改良后小白菜的干重,说明活性炭作为改良剂效果较石灰+活性炭作为改良剂好。以上结论可以看出石灰、活性炭、石灰+活性炭三种改良剂中,活性炭效果最好。

2.3 改良剂对小白菜吸收重金属Cr的影响

不同改良剂处理对Cr胁迫下小白菜体内Cr含量的影响如表4所示。

表4 不同改良剂处理小白菜体内Cr的含量

Table 4 Concentrations of Cr in pakchoi in different treatments (mg kg⁻¹)

处理 Treatment	Cr ₀		Cr ₁		Cr ₂		Cr ₃	
	叶部 In the leaf	根部 In the root	叶部 In the leaf	根部 In the root	叶部 In the leaf	根部 In the root	叶部 In the leaf	根部 In the root
L ₀	0.397a	0.851a	0.915a	1.607a	2.258a	3.495a	9.261a	13.37a
L ₁	0.351b	0.745a	0.805a	1.435a	1.728a	2.847a	7.435aA	11.86aA
L ₂	0.318a	0.648a	0.725a	1.071a	1.513a	2.217a	6.300a	9.699a
L ₃	0.292a	0.586a	0.679ab	0.857ab	1.370ab	1.977ab	—	—
C ₀	0.397a	0.851a	0.915a	1.607a	2.258a	3.495a	9.261a	13.37a
C ₁	0.355a	0.721a	0.870a	1.285a	1.742a	2.524b	6.641a	10.51a
C ₂	0.296a	0.628a	0.608ab	0.880ab	1.237a	1.832a	4.648a	8.676a
C ₃	0.217b	0.529b	0.598ab	0.663aA	1.070a	1.446a	3.085A	6.52aA
L ₀ C ₀	0.397a	0.851a	0.915a	1.607a	2.258a	3.495a	9.261a	13.37a
L ₁ C ₁	0.334a	0.751b	0.815a	1.342b	1.718a	2.716b	7.562a	10.06b
L ₂ C ₂	0.302a	0.656a	0.664a	0.920a	1.247a	2.282a	6.158a	9.732a
L ₃ C ₃	0.262b	0.610a	0.651b	0.797a	1.231b	1.810a	—	—

注:—未长出小白菜,下同 Note:—No pakchoi growing. The same below

由表4可知,随着土壤Cr浓度的增加,小白菜叶部和根部Cr含量显著升高,叶部最大值(Cr₃对照

处理)达到空白的23.3倍,根部最大值(Cr₃对照处理)达到空白的29.1倍($p < 0.01$),差异极显著。

Cr₀处理下, L₁石灰浓度时, 小白菜叶部 Cr 含量降低为空白的 88.41% ($p < 0.05$), 差异显著, 而后继续降低, 但降低量变化差异不显著。Cr₁、Cr₂处理下, 石灰的施用均显著降低了小白菜叶部和根部 Cr 含量, 最低含量(L₃石灰浓度下)分别降至对照的 74.21%、60.67% 和 65.46%、56.47% ($p < 0.05$)。Cr₃处理下, 施用石灰降低了小白菜叶部和根部 Cr 含量, 但降低量与对照相比差异不显著, L₂石灰浓度时叶部 Cr 含量为对照的 68.02%, 根部 Cr 含量为对照的 76.80%。

Cr₀处理下, 活性炭用量为 C₃时, 小白菜叶部、根部 Cr 含量分别为空白的 54.66%、67.39%, 差异显著($p < 0.05$), 其他处理与对照相比差异不显著。Cr₁处理下, 活性炭浓度为 C₂和 C₃时, 小白菜叶部 Cr 含量显著减少, 分别为对照的 66.50% 和 65.36% ($p < 0.05$)。Cr₂处理下, 小白菜叶部 Cr 含量随活性炭浓度变化不显著, 但总体随活性炭浓度

的增加逐渐减少。Cr₃处理下, 活性炭的施用与对照相比显著降低了小白菜叶部 Cr 含量, C₃活性炭浓度下小白菜叶部 Cr 含量与对照相比差异极显著, 降至对照的 33.32% ($p < 0.01$)。

Cr₀、Cr₁、Cr₂处理下, 石灰 + 活性炭施用均显著降低了小白菜叶部 Cr 含量, 最低含量(L₃C₃浓度下)降至对照的 66.00%、71.15% 和 54.52% ($p < 0.05$); 而小白菜根部 Cr 含量在 L₁C₁时减少量最大, 而后减少量变化不显著, 最低含量分别降为对照的 71.67%、49.59%、51.79% 和 72.78%。

由表 4 可发现, 经不同改良剂处理后, 叶菜中 Cr 含量明显降低, 低于《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB18406.1-2001)的国家标准($\leq 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$), 说明改良剂对 Cr 污染土壤有一定的改良效果; 不同 Cr 浓度污染水平下, 经活性炭改良后小白菜体内 Cr 的含量最少, 这进一步说明三种改良剂中, 活性炭对 Cr 污染土壤的改良效果最好。

表 5 土壤 pH 及有效态 Cr 与小白菜吸收 Cr 间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of soil pH with Cr availability and Cr uptake of pakchoi

改良剂 Modifiers	项目 Item	土壤 pH Soil pH	土壤有效态 Cr Soil available Cr	叶部 Cr 含量 Content of Cr in the leaf	根部 Cr 含量 Content of Cr in the root
石灰 Lime	土壤 pH Soil pH	1	-0.543 *	-0.537 *	-0.541 *
	土壤有效态 Cr Soil availableCr		1	0.939 **	0.934 **
活性炭 Activated carbon	土壤 pH Soil pH	1	-0.620 *	-0.647 **	-0.649 **
	土壤有效态 Cr Soil available Cr		1	0.991 **	0.965 **
石灰 + 活性炭 Lime-activated carbon	土壤 pH Soil pH	1	-0.089	-0.042	-0.051
	土壤有效态 Cr Soil availableCr		1	0.931 **	0.915 **

注: * 和 ** 分别表示显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 相关 Note: * and ** indicates significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively

2.4 土壤 pH 及有效态 Cr 含量与小白菜吸收 Cr 的关系

由表 5 可知, 土壤 pH 与土壤有效态 Cr 含量之间呈负相关, 这与姜身永等^[19]、章杰等^[20]的研究结果一致。说明土壤的酸性条件是促进金属溶解和活化的一个因素。土壤的酸性增强时, 土壤有效态 Cr 有增大的趋势, 而土壤有效态 Cr 是可以被植物直接吸收的形态, 所以在 Cr 污染的土壤中, 可以增大土壤的 pH, 从而减小土壤 Cr 的植物有效性, 使其向植物迁移的风险减小。小白菜叶部 Cr 含量和根部 Cr 含量与土壤有效态 Cr 含量表现出显著的正相

关, 说明土壤 Cr 含量对小白菜叶部和根部 Cr 吸收量影响显著。

3 结 论

在 C₃(8 g kg⁻¹) 活性炭处理时, 土壤有效态 Cr 分别降低为对照的 22.63%、16.53%、24.71% 和 20.35%, 与对照相比呈显著性差异 ($p < 0.05$)。石灰、活性炭及石灰 + 活性炭这三种改良剂相比较而言, 在相同 Cr 浓度处理下, 活性炭对降低污染土壤中有效态 Cr 的效果最好, 与 CK 相比, 有效态 Cr 的含量

降低至 0.086 mg kg^{-1} , 降幅达 77.36%。因此, 三种改良剂对降低污染土壤中有效态 Cr 的效果为: 活性炭 > 石灰 + 活性炭 > 石灰, 当将有效态重金属作为评价改良剂的修复效果时, 推荐使用活性炭这种材料。

本试验的进一步研究将从小白菜生理生化(细胞膜透性、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性以及丙二醛(MDA)含量的变化等)方面去求证小白菜死亡到底是高浓度 Cr 对其产生毒害作用还是高浓度 Cr 和高浓度石灰 ($> 2 \text{ g kg}^{-1}$) 一起作用导致的, 并对其机理进行研究。

参考文献

- [1] 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1990—1994. Guo G L, Zhou Q X, Li X Y. Advances in research on in situ chemical immobilization of heavy metals in contaminated soils (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1990—1994
- [2] 赵其国. 土壤与环境问题国际研究概况及发展趋势. 土壤, 1998, 30(6): 281—290. Zhao Q G. A review and perspective on soil and environmental problem (In Chinese). Soils, 1998, 30(6): 281—290
- [3] 董汉英, 仇荣亮, 赵芝灏, 等. 工业废弃地多金属污染土壤组合淋洗修复技术研究. 土壤学报, 2010, 47(6): 1126—1133. Dong H Y, Qiu R L, Zhao Z H, et al. Sequential elution technique for remediation of multi-metal contaminated brownfield soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1126—1133
- [4] 崔红标, 梁家妮, 范玉超, 等. 磷灰石等改良剂对铜污染土壤的修复效果研究——对铜形态分布、土壤酶活性和微生物数量的影响. 土壤, 2011, 43(2): 247—252. Cui H B, Liang J N, Fan Y C, et al. Amelioration effect of apatite and other amendments in Cu contaminated soils—The distribution of Cu Forms, soil enzyme activity and number of microbial (In Chinese). Soils, 2011, 43(2): 247—252
- [5] Cheng S F, Zeng Y H. In-situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 140: 73—81
- [6] 崔红标, 周静, 杜志敏, 等. 磷灰石等改良剂对重金属铜铬污染土壤的田间修复研究. 土壤, 2010, 42(4): 611—617. Cui H B, Zhou J, Du Z M, et al. Field remediation of Cu/Cd polluted soil by apatite and other amendments (In Chinese). Soils, 2010, 42(4): 611—617
- [7] 招启柏, 朱卫星, 胡钟胜, 等. 改良剂对土壤重金属(Cd、Pb)的固定及对烤烟生长的影响. 中国烟草学报, 2009, 15(4): 26—32. Zhao Q B, Zhu W X, Hu Z S, et al. Cadmium and Lead immobilization by applying amendments in polluted soils and their effects on tobacco (*Nicotiana tabacum*) growth (In Chinese). Chinese Journal of Tobacco, 2009, 15(4): 26—32
- [8] Cheng X T, Wang G, Liang Z C. Effect of amendments on growth and element uptake of pakchoi in a cadmium, zinc and lead contaminated soil. Pedosphere, 2002, 12(3): 243—250
- [9] 陈宏, 魏世强. 化学调控剂对土壤和莴笋中 Hg, Cd, Pb 含量的影响研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 111—113. Chen H, Wei S Q. Effects of adjust control agent on Hg, Cd, Pb content in soil and asparagus (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 111—113
- [10] 陈晓婷, 王果, 张亭旗, 等. 石灰与泥炭配施对重金属污染土壤上小白菜生长和营养元素吸收的影响. 农业环境保护, 2002, 21(5): 453—455. Chen X T, Wang G, Zhang T Q, et al. Incorporation of lime with peat on growth and nutrient elements uptake of pakchoi (*Brassica chinensis*) grown in heavy metal contaminated soil (In Chinese). Agro-environmental Protection, 2002, 21(5): 453—455
- [11] 霍太英, 陆桂华, 薛联青. 山东棕壤灌溉条件下总氮、总磷流失特点试验研究. 环境保护, 2008, 7(4): 43—45. Huo T Y, Lu G H, Xue L Q. Experimental study of total nitrogen, total phosphorus outflow characteristic on the condition of Shandong brown earth irrigation (In Chinese). Environmental Protection, 2008, 7(4): 43—45
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis, 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [13] 常文越, 陈晓东, 王磊, 等. 土著微生物修复 Cr(VI) 污染土壤还原后有效铬分析及其稳定性的初步实验研究. 环境保护科学, 2008, 34(2): 78—80. Chang W Y, Chen X D, Wang L, et al. Experimental study on reduction remediation of chromium (VI)-contaminated soil by aboriginal microbe (In Chinese). Environmental Protection Science, 2008, 34(2): 78—80
- [14] 刘云惠, 魏显有, 王秀敏, 等. 土壤中铬的吸附与形态提取研究. 河北农业大学学报, 2000, 23(1): 16—20. Liu Y H, Wei X Y, Wang X M, et al. A study on the adsorption of chromium in soil and the form extraction (In Chinese). Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(1): 16—20
- [15] 陈英旭, 何增耀, 吴建平. 土壤中铬的形态及其转化. 环境科学, 1994, 15(3): 53—56. Chen Y X, He Z Y, Wu J P. Forms and transformation of chromium species in soils (In Chinese). Environmental Science, 1994, 15(3): 53—56
- [16] Lombi E, Zhao F J, Wieshammer G, et al. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: Biological effects. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 445—452
- [17] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中铬铅影响的研究. 土壤学报, 2006, 43(2): 233—237. Hu Z S, Zhang G Y, Wang G Z, et al. Effects of soil amendments on cadmium and lead contents in tobacco (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 233—237
- [18] 邓波儿, 刘同仇, 李惠英. 石灰、有机肥对铬污染土壤改良效果的研究. 土壤肥料, 1991(6): 19—22. Deng B E, Liu T C, Li H Y. Effects of lime and organic fertilizer on the chromium contaminated soil (In Chinese). Soils and fertilizers, 1991(6): 19—22
- [19] 姜身永, 侯明. 土壤几种化学性质对土壤 Cr 形态的影响. 桂

林工学院学报,2008,11(4):558—560. Jiang S Y, Hou M. Effect of several soil chemical properties on soil chromium speciations (In Chinese). Journal of Guilin University of Technology, 2008,11(4):558—560

[20] 章杰,文勇立,王永,等. 种养结合循环利用模式下土壤重金属含量与有效态含量的相关分析. 西南民族大学学报:自然科学版,2010,36(6):970—973. Zhang J, Wen Y L, Wang Y, et al. Correlation analysis of the heavy metal contents and the effective contents in the combination of planting and breeding recycling mode (In Chinese). Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2010,36(6):970—973

科学版,2010,36(6):970—973. Zhang J, Wen Y L, Wang Y, et al. Correlation analysis of the heavy metal contents and the effective contents in the combination of planting and breeding recycling mode (In Chinese). Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2010,36(6):970—973

EFFECTS OF LIME AND ACTIVATED CARBON ON REMEDYING CHROMIUM CONTAMINATED SOIL

Yang Lin¹ Chen Zhiming¹ Liu Yuanpeng¹ Wang Yujun^{1,2†}

(1 Resource and Environmental College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

(2 Key Laboratory of Agricultural Environment in Universities of Shandong (Shandong Agricultural University), Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract Effects of soil amendments, including lime, activated carbon and lime-activated carbon, remedying Cr contaminated soil were studied and compared in a pot experiment growing pakchoi. Results show that the vegetable was chronically affected by Cr added into the soil, but this adverse effect could be counteracted by applying soil amendments, As a result, fresh weight of the plant increased. The addition of the soil amendments also significantly reduced Cr availability in the soil. Comparison revealed that among the three soil amendments, activated carbon was the best in the soil as compared with the use of other two. Therefore, activated carbon is highly recommended as a soil amendment remedying Cr contaminated soils.

Key words Pakchoi (*Brassica chinensis*); Cr contaminated soil; Modifiers; Amendment