

复合改良剂对镉污染土壤中小白菜品质的影响

胡丽萍¹, 周国兴², 李冲³, 王一茜¹, 何洪巨¹

(1. 北京市农林科学院 蔬菜研究中心, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 农业部都市农业(北京)重点实验室, 北京 100097; 2. 北京恒源嘉达科技有限公司, 北京 100080; 3. 北京市大兴区土肥工作站, 北京 102600)

摘要:以复合改良剂为试材, 以小白菜为研究对象, 采用盆栽试验方法, 种植在人工配置的不同程度镉污染土壤中(2、4、25、50、100 mg/kg), 研究不同浓度复合改良剂(0、600、900、1 200 mg/kg)对土壤有机质、pH 值、小白菜可食部位镉含量和营养品质的影响。结果表明:施用 900 mg/kg 复合改良剂可使镉污染土壤有机质含量提高 12.36%~72.24%, 但对土壤 pH 值无显著影响。施用复合改良剂可明显提高小白菜安全性和营养品质, 5 个镉处理小白菜可食部位镉含量降低 32.04%~44.87%, 维生素 C 含量增加 10.73%~48.62%, 可溶性糖含量提高 10.37%~59.52%, 粗纤维含量降低 11.53%~28.10%。因此, 复合改良剂能够用于重金属污染土壤的原位修复, 推荐其适宜用量为 900 mg/kg。

关键词:小白菜; 镉; 改良剂; 品质

中图分类号:S 634.306.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)18-0035-06

土壤是人类赖以生存的物质基础。随着现代经济的发展, 土壤生态环境日益恶化, 重金属污染问题越来越严重。各种途径带来的重金属进入土壤后被农作物吸收, 降低农作物的产量和品质, 并通过食物链进入人体, 危害人体健康。蔬菜, 尤其是叶菜, 更容易积累重金属^[1-5]。Cd 已经成为蔬菜重金属污染最为突出的元素之一^[6-7], 它能导致人体骨质疏松、变形和萎缩, 并长期富集在肾和肝脏中, 是一种典型的致癌物^[8-10]。有研究表明, 即使在土壤 Cd 未超标的情况下, 叶类蔬菜也可能出现 Cd 超标的现象^[3]。

目前, 多种技术被应用到土壤重金属污染治理中来, 如物理化学法、生物法等, 能有效降低重金属的污染风险。但是, 这些技术通常耗费大、成本高, 还会破坏土壤肥力和土壤结构^[11]。原位化学修复法是一种通过增加重金属的吸附、降低其在土壤中的溶解度和生物有效性, 从而减少污染物从土壤进入农作物的方法。原位修

复法成本低, 对土壤的影响和破坏少^[12-13], 适合大范围操作, 符合我国农业可持续发展的要求, 引起人们的广泛关注和研究。

前期试验结果表明, 四川大学化学工程学院提供的复合改良剂可以显著降低重金属污染土壤中水溶态 Cd 和 Pb 的含量^[14], 但该改良剂对农作物体内重金属含量和营养指标的系统性研究尚鲜见报道。因此, 该试验通过盆栽试验, 以代表性叶类蔬菜小白菜(*Brassica rapa* L. *Chinensis* Group.)为研究对象, 研究施用不同浓度复合改良剂对 Cd 污染土壤有机质、pH 值、小白菜营养品质和 Cd 含量的影响, 以期阐明复合改良剂缓解 Cd 毒害的机理, 找到适宜的改良剂用量, 为重金属污染土壤改良技术和小白菜安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自北京夏至农业科技有限公司日光温室。取 0~20 cm 表层土壤, 风干、弃去沙石和植物残体, 过 20 目筛。土壤理化性质及 Cd 含量见表 1。供试作物为小白菜, 种子购于北京京研益农科技发展中心。试验所用复合改良剂由四川大学化学工程学院提供。该改良剂由正铵、磷矿粉、腐殖酸、有机质、微生物生长所需营养元素及参与重金属离子反应的多种活性金属离子配置而成。

第一作者简介:胡丽萍(1981-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为蔬菜营养品质。E-mail: huliping@nerv.org。

责任作者:何洪巨(1966-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为蔬菜营养品质。E-mail: hehongju@nerv.org。

基金项目:北京市农委资助项目(20120129); 北京市叶类蔬菜创新团队资助项目(blvt18)。

收稿日期:2015-05-25

表 1

供试土壤基本性质

Table 1

Basic properties of the tested soil

全氮	有机质	全盐	碱解氮	有效磷	速效钾	pH 值	Cd 含量
Total nitrogen	Organic matter	Total salt	Available nitrogen	Available phosphorus	Available potassium	pH value	Cd content
/(g · kg ⁻¹)	/(g · kg ⁻¹)	/(g · kg ⁻¹)	/(mg · kg ⁻¹)	/(mg · kg ⁻¹)	/(mg · kg ⁻¹)		/(mg · kg ⁻¹)
0.69	11.70	0.48	87.90	8.20	105.00	8.12	0.15

1.2 试验方法

1.2.1 盆钵试验方法 在供试土壤的基础上添加 CdCl₂ · 2.5H₂O, 设置 2、4、25、50、100 mg/kg 5 个 Cd 供试浓度(2、4 mg/kg 为低浓度处理, 25、50、100 mg/kg 为高浓度处理), 加水充分搅拌均匀, 平衡 2 周以上。待土壤平衡后, 施入复合改良剂, 施用量为 0、600、900、1 200 mg/kg, 与 Cd 污染土壤充分搅拌均匀。每盆钵中装入 3 kg 土壤, 播种小白菜。每处理 3 次重复, 常规栽培管理。

1.2.2 样品采集及预处理 植株样品: 在小白菜收获期, 去除老叶后取可食用部分。土壤样品: 在小白菜收获后, 用土钻取 0~20 cm 表层土壤, 去除根系等杂物、风干、粉碎、过筛后用于土壤理化性质测定。

1.3 项目测定

采用重铬酸钾法测定土壤有机质含量; 采用 pH SJ-3F 型酸度计电位法测定土壤 pH 值^[15]。采用湿法消解-原子吸收石墨炉法测定小白菜中 Cd 含量。小白菜营养品质测定方法: 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量, 蒽酮比色法测定可溶性糖含量, 碱滴定法测定可滴定酸含量, 重量法测定粗纤维含量和干物重, 凯氏定

氮法测定蛋白质含量^[16]。

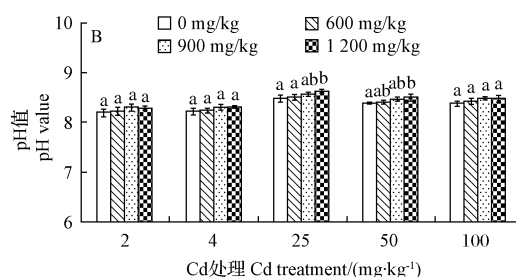
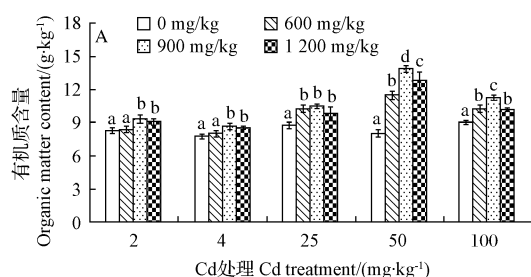
1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 进行数据的基本处理和绘图, SPSS 20.0 统计分析软件进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜有机质含量和 pH 值的影响

农作物只吸收土壤中的有效态重金属, 而不是吸收重金属的全量^[17]。土壤有机质含量和 pH 值是影响重金属有效性的 2 个关键因素^[15,18]。从图 1A 可知, 施用复合改良剂对不同浓度 Cd 处理污染土壤有机质含量具有明显提升作用。随着复合改良剂施用量的增加, 5 个不同浓度 Cd 污染土壤有机质含量均逐渐增加, 且均在施用 900 mg/kg 复合改良剂时达到最大值, 继续增加 1 200 mg/kg 改良剂施用量, 其含量反而有所降低。与不施用复合改良剂相比, 在 2、4、25、50、100 mg/kg Cd 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后, 土壤有机质含量分别增加 12.63%、12.36%、19.32%、72.24% 和 25.56%。



注: 同一 Cd 处理浓度不同字母表示各处理间在 5% 水平差异显著。下同。

Note: Different letters in the same Cd treatment mean significant difference at 0.05 level using Duncan's test. The same as follow.

图 1 复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜有机质和 pH 值的影响

Fig. 1 The effect of the complex amendment on organic matter and pH value of Cd contaminated pak choi soil

从图 1B 可知, 施用复合改良剂对不同浓度 Cd 处理污染土壤 pH 值具有一定的提升作用。但是, 除了 25 mg/kg 和 50 mg/kg 2 个浓度 Cd 污染土壤的 pH 值在施用 1 200 mg/kg 复合改良剂时明显高于不施用改良剂对照, 其余均与对照无显著差异。

2.2 复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜 Cd 含量的影响

如图 2 所示, 小白菜可食部位 Cd 含量随土壤 Cd 浓度的增加而增加, 这与前人的研究结果相符^[1,19-22]。随着复合改良剂施用量的增加, 小白菜可食部位 Cd 含量

逐渐降低。与不施用复合改良剂相比, 当复合改良剂施用量为 900 mg/kg 或 1 200 mg/kg 时, 5 个不同浓度 Cd 污染土壤小白菜 Cd 含量均显著降低。但是, 与施用 900 mg/kg 复合改良剂相比, 改良剂施用量增加到 1 200 mg/kg 时 5 个不同浓度 Cd 污染土壤小白菜可食部位 Cd 含量无显著性差异。与不施用复合改良剂相比, 在 2、4、25、50、100 mg/kg Cd 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后, 小白菜可食部位 Cd 含量分别降低 37.59%、42.08%、44.87%、32.04% 和 40.39%。

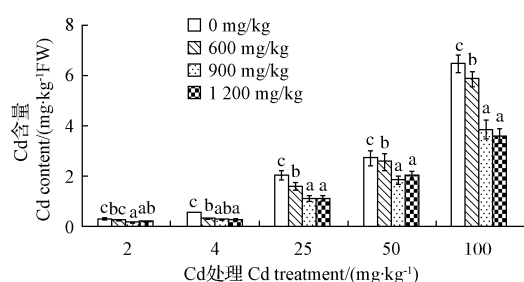


图2 复合改良剂对Cd污染土壤小白菜Cd含量的影响

Fig. 2 The effect of the complex amendment on the Cd content of pak choi

2.3 复合改良剂对Cd污染土壤小白菜营养品质的影响

蔬菜受体内重金属的影响,其糖分、维生素和其它物质含量都相应的有所变化,从而影响蔬菜的品质^[23]。如图3A、B所示,随土壤中Cd浓度的增加,小白菜可食部位维生素C和可溶性糖含量呈逐渐下降之势,这与谢建治等^[19]研究结果一致。其原因可能是重金属Cd能抑制小白菜合成维生素C和可溶性糖相关酶的活性,从而导致其含量降低^[19,23]。随着复合改良剂施用量的增加,小白菜维生素C和可溶性糖含量逐渐增加,当复合改良剂施用量为900 mg/kg时各处理小白菜维生素C和可溶性糖含量均显著高于不施用改良剂对照。与不施用复合改良剂相比,在2、4、25、50、100 mg/kg 5个浓度Cd污染土壤中施用900 mg/kg复合改良剂后,小白菜可食部位维生素C含量分别增加了10.73%、12.53%、25.00%、48.62%、37.28%,可溶性含量分别增加了15.33%、10.37%、39.08%、55.93%、59.52%(图3A、

B)。可知施用复合改良剂对高浓度Cd处理土壤(25、50、100 mg/kg)小白菜维生素C和可溶性糖含量的提升作用优于低浓度Cd处理土壤(2 mg/kg和4 mg/kg)。与施用900 mg/kg复合改良剂相比,改良剂施用量增加到1200 mg/kg并不能进一步显著提升小白菜维生素C含量以及2、4、50 mg/kg 3个浓度Cd处理土壤小白菜可溶性糖含量,但对25、100 mg/kg 2个浓度Cd处理土壤小白菜可溶性糖含量具有明显的提升作用。这些结果说明,施用900 mg/kg复合改良剂可有效缓解重金属Cd对维生素C和可溶性糖相关合成酶活性的抑制作用。

施用复合改良剂在一定程度上可提高小白菜可滴定酸含量,但在不同浓度Cd污染土壤上表现有所不同(图3C)。随着改良剂施用量的增加,2、4、50、100 mg/kg 4个浓度Cd处理土壤小白菜可滴定酸含量逐渐增加,且均在施用1200 mg/kg改良剂时达到最大值。与不施用复合改良剂相比,施用1200 mg/kg改良剂后这4个浓度Cd处理土壤小白菜可滴定酸含量分别增加了28.57%、23.08%、14.30%、30.77%。与这4个浓度Cd处理土壤不同,在25 mg/kg浓度Cd处理土壤中施用600 mg/kg改良剂可使小白菜可滴定酸含量比不施用复合改良剂对照提高约10%,继续增加改良剂施用量小白菜可滴定酸含量反而有所降低。值得注意的是,25 mg/kg浓度Cd处理土壤小白菜可滴定酸含量总是低于其余4个浓度Cd处理土壤,其原因尚待进一步研究。

如图3D所示,2个低浓度Cd处理土壤(2、4 mg/kg)小白菜干物质显著高于其余3个高浓度Cd处理土壤(25、50、100 mg/kg),施用一定量复合改良剂可显著提高

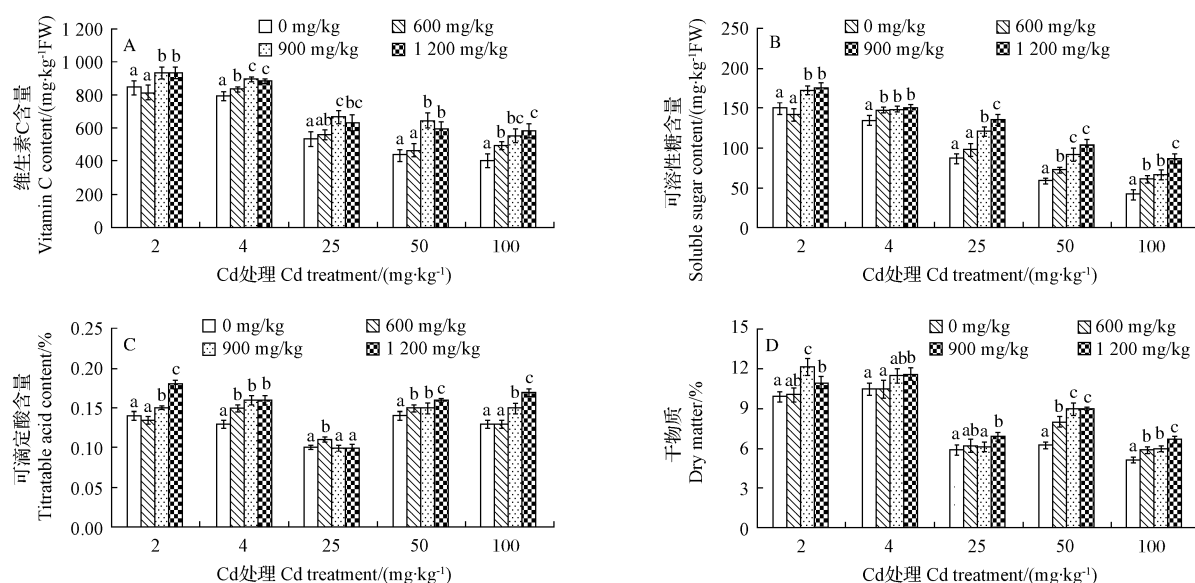
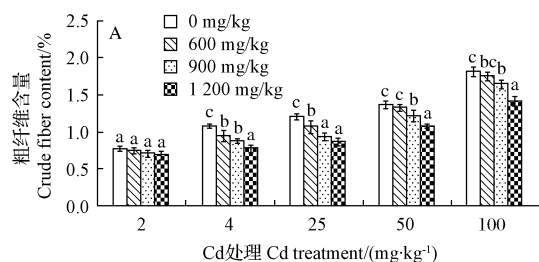


图3 复合改良剂对Cd污染土壤小白菜维生素C、可溶性糖、可滴定酸含量和干物质的影响

Fig. 3 The effect of the complex amendment on the content of vitamin C, soluble sugar, titratable acid and dry matter of pak choi

Cd 污染土壤小白菜干物质。在 2 mg/kg Cd 污染土壤条件下,施用 900 mg/kg 复合改良剂后小白菜干物质达最大值,比不施用改良剂对照增加 22.81%,继续增加改良剂施用量小白菜干物质反而有所降低。与 2 mg/kg Cd 污染土壤处理不同,4、25、50、100 mg/kg 4 个浓度 Cd 处理土壤的小白菜干物质在施用 1 200 mg/kg 复合改良剂时达到最大值,与不施用改良剂对照相比分别提高了 10.67%、17.66%、43.50%、30.16%。但是,在 4、50 mg/kg 2 个浓度 Cd 污染土壤条件下,施用 900 mg/kg 或 1 200 mg/kg 复合改良剂的小白菜干物质差异不显著。

图 4A 所示的是复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜粗纤维含量的影响。谢建治等^[24]试验表明,小白菜粗纤维含量与土壤中添加 Cd 质量分数之间的相关系数为 0.982 8,呈极显著正相关。该试验结果表明,随土壤中添加 Cd 浓度的增加,小白菜可食部位粗纤维含量逐渐增加,这与谢建治等^[24]的研究结果一致。其原因可能是土壤受到 Cd 污染使小白菜茎叶木质化和纤维化所致。小白菜粗纤维含量过高,将导致其口感硬且粗糙,品质变差。施用复合改良剂可以降低 Cd 污染土壤小白菜可食部位粗纤维含量,提升其口感和品质。随着复合改良剂施用量的增加,2、4、25、50、100 mg/kg 5 个 Cd 污染土壤小白菜粗纤维含量均逐渐降低,且均在施用 1 200 mg/kg 复合改良剂时达到最低值,与不施用改良剂对照相比分别降低了 11.53%、27.78%、28.10%、21.17%、21.98%。



在 2、4、25、50、100 mg/kg 5 个 Cd 污染土壤处理中,除了 2 mg/kg Cd 污染土壤处理降幅未达差异显著水平,施用复合改良剂能显著降低其余 4 个浓度 Cd 污染土壤小白菜粗纤维含量。其原因可能是在 2 mg/kg 浓度 Cd 污染土壤中,小白菜茎叶木质化和纤维化程度低于其余 4 个 Cd 污染土壤处理。

如图 4B 所示,随土壤中添加 Cd 浓度的增加,小白菜可食部位蛋白质含量在低、高浓度 Cd 处理土壤中变化趋势截然不同。在 2 个低浓度 Cd 处理土壤(2、4 mg/kg)中,小白菜蛋白质含量随土壤中添加 Cd 浓度的增加而降低,其原因可能是重金属 Cd 能抑制小白菜合成蛋白质相关酶的活性。在 3 个高浓度 Cd 处理土壤(25、50、100 mg/kg)中,小白菜蛋白质含量随土壤中添加 Cd 浓度的增加而增加。其原因可能是小白菜体内积累 Cd 的量越来越大,一部分蛋白质被 Cd 沉淀失活保存在小白菜体内,这些失活的蛋白质在测定过程中又被释放出来,从而提高其含量值。随着复合改良剂施用量的增加,2、4、25、50、100 mg/kg 5 个浓度 Cd 处理土壤小白菜蛋白质含量逐渐降低,在施用 900 mg/kg 复合改良剂时降到最低值,与不施用改良剂对照相比分别降低了 13.27%、12.50%、19.66%、22.30%、29.63%。继续增加改良剂施用量到 1 200 mg/kg,5 个浓度 Cd 处理土壤小白菜蛋白质含量又有所回升,但是与施用 900 mg/kg 改良剂差异不显著。

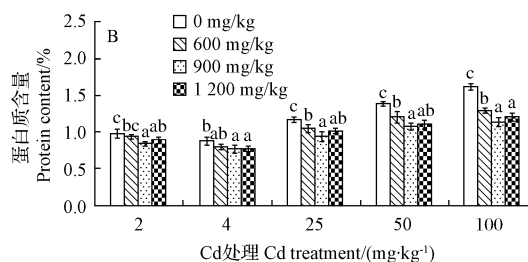


图 4 复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜粗纤维和蛋白质含量的影响

Fig. 4 The effect of the complex amendment on the content of crude fiber and protein of pak choi

3 讨论与结论

蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物,重金属在蔬菜体内积累,直接或间接进入人体后易对人体造成伤害。随着人类生活水平的不断提高,人们对蔬菜的安全性和营养品质的要求也越来越高。因此,降低蔬菜中重金属的积累,提高蔬菜营养品质势在必行。重金属 Cd 从土壤向蔬菜体内转移的迁移率较大^[1],容易富集在蔬菜体内,即使在土壤 Cd 含量没有达到限量标准的情况下,叶类蔬菜仍有可能出现 Cd 含量超标^[3]。因此,对于叶类蔬菜生产基地,尤其应该严防土壤 Cd 污染,并加强对 Cd 污染土壤的改良治理工作。

鉴于农作物只吸收土壤中的有效态重金属而非重金属全量^[17],而重金属有效性主要受土壤有机质含量和 pH 值的影响^[12,18],因此目前的重金属原位化学修复法主要是围绕调节重金属污染土壤的有机质含量和 pH 值而展开的。张亚丽等^[25-26]的研究表明,施用有机肥可明显降低土壤中有效态 Cd 的含量,猪粪效果优于秸秆类,降幅约为 40%。李雪芳等^[22]研究了土壤有机质含量与蔬菜中 Cd、Hg 和 As 富集量的关系,发现随着有机质含量的增加,Cd、Hg 和 As 的富集系数均降低,其中 Cd 的富集系数极显著降低。土壤中施入有机肥料后,增加的土壤有机质可络合 Cd^{2+} ,降低了 Cd^{2+} 的有效性,增大了

Cd^{2+} 从土壤迁移到作物体内的难度^[22,26]。因此,提高重金属污染土壤的有机质含量可降低重金属的有效性,从而减少农作物对其的吸收。该试验结果表明,施用 900 mg/kg 复合改良剂可使 Cd 污染土壤有机质含量提高 12.36%~72.24%。

影响重金属有效性的另一个关键因子是土壤 pH 值。土壤 pH 值提高可促使土壤中 Cd、Pb 等重金属离子形成氢氧化物或碳酸盐结合态沉淀,降低重金属迁移性和生物有效性,减少植物对重金属的吸收^[12,27]。与之相反,土壤 pH 值降低可导致氢氧化物或碳酸盐结合态重金属的溶解、释放,也可增加吸附态重金属的释放,从而增加了植物对重金属的吸收^[28]。可见,提高土壤 pH 值有助于降低植物中 Cd、Pb 等重金属含量^[2,10,29-30]。但该试验土壤为碱性(表 1),进一步显著提升土壤 pH 值将不利于小白菜生长。该试验结果表明,施用 900 mg/kg 复合改良剂并不能显著提高 Cd 污染土壤 pH 值。这些结果说明,该试验所采用的复合改良剂主要是通过提高土壤有机质含量来降低土壤 Cd 有效性的。另外,复合改良剂中所含的磷矿粉(氟磷酸钙)释放出磷酸根与 Cd^{2+} 离子生成更稳定的磷酸盐重金属沉淀,也有助于降低土壤中 Cd^{2+} 的生物有效性。

蔬菜可食部位 Cd 含量与土壤中有效态 Cd 含量呈显著正相关,即土壤中有效态 Cd 含量越低,蔬菜可食部位 Cd 含量越低^[22]。在该试验中,施用 900 mg/kg 复合改良剂可使小白菜可食部位 Cd 含量降低 32.04%~44.87%,降低幅度显著。增加改良剂施用量到 1 200 mg/kg 时,小白菜可食部位 Cd 含量与施用 900 mg/kg 复合改良剂相比并无显著差异。

重金属抑制蔬菜植物细胞的分裂和伸长,刺激和抑制一些酶的活性,影响蛋白质合成,降低光合作用和呼吸作用,伤害细胞膜系统,从而影响蔬菜的生长发育和品质^[23]。因此,蔬菜受到重金属污染,不仅会表现出外在的受害特征如生长缓慢、失绿、矮小、减产等,而且还可以进一步影响到营养品质指标如维生素 C、粗纤维、可溶性糖、蛋白质、硝酸盐等含量的高低。谢建治等^[31]的研究表明,污灌区叶菜类(芹菜、白菜和大葱)、根菜类(芥菜和萝卜)和果菜类(辣椒)的营养品质指标(粗纤维、粗蛋白质和还原糖)含量明显低于清灌区的各项指标。谢建治等^[19,24]进一步采用盆栽的试验方法,研究了 Cd 对小白菜各营养指标的影响。结果表明,随土壤中添加 Cd 量的增加,小白菜叶绿素、还原糖和维生素 C 含量逐渐下降;粗纤维含量随土壤中 Cd 添加量的增加逐渐增加;而粗蛋白含量随土壤中 Cd 添加量的增加呈先降后升的趋势^[19,24]。吕金印等^[21]发现,随着 Cd^{2+} 处理浓度的增

加,青菜、塌地乌、小白菜、菠菜和芥菜 5 种叶菜硝酸盐和纤维素含量升高,维生素 C 和可溶性糖含量降低。李廷亮等^[32]也得出相似结论,即在 Cd 处理条件下,5 种叶菜维生素 C 和还原糖较对照处理都有一定程度的降低,硝酸盐含量有一定程度的增加。这些研究结果表明,因重金属污染而导致蔬菜营养品质的降低是不可轻视的。在重金属污染改良治理中,改良剂对植物体内营养品质的影响也是非常重要的研究内容。

该试验发现,随着土壤中添加 Cd 浓度的增加,小白菜可食部位维生素 C 和可溶性糖含量呈逐渐下降之势,粗纤维含量逐渐增加,而蛋白含量先降低后增加,这些结果与前人的研究结果一致^[19,21,24,31-32]。施用复合改良剂对 Cd 污染土壤小白菜营养品质具有一定的提升作用,尤其是对提高小白菜维生素 C 和可溶性糖含量,同时降低其体内粗纤维含量效果显著。施用 900 mg/kg 复合改良剂可使小白菜可食部位维生素 C 含量提高 10.73%~48.62%,可溶性糖含量提高 10.37%~59.52%;施用 1 200 mg/kg 复合改良剂可使小白菜可食部位粗纤维含量降低 11.53%~28.10%,降低幅度略大于施用 900 mg/kg 复合改良剂。

综上所述,复合改良剂可通过提高 Cd 污染土壤有机质含量降低 Cd^{2+} 有效性,从而显著降低小白菜可食部位对其的积累,并可显著增加小白菜体内维生素 C 和可溶性糖含量,降低其粗纤维含量,提升 Cd 污染土壤小白菜的营养品质。因此,复合改良剂能够用于重金属污染土壤的原位修复,推荐其适宜用量为 900 mg/kg。

参考文献

- [1] 杜应琼,何江华,陈俊坚,等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及其生长的影响[J]. 园艺学报,2003,30(1):51-55.
- [2] 祖艳群,李元,陈海燕,等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(3):289-292.
- [3] 江解增,许学宏,余云飞,等. 蔬菜对重金属生物富集程度的初步研究[J]. 中国蔬菜,2006(7):8-11.
- [4] 陈瑛,李廷强,杨肖娥,等. 不同品种小白菜对镉的吸收积累差异[J]. 应用生态学报,2009,20(3):736-740.
- [5] 韩承华,江解增. 重金属污染对蔬菜生产的危害以及缓解重金属污染措施的研究进展[J]. 中国蔬菜,2014(4):7-13.
- [6] 薛艳,沈振国,周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. 土壤,2005,37(1):32-36.
- [7] 李小牛,周长松,杜斌,等. 北方污灌区土壤重金属污染特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):205-212.
- [8] KLAASSEN C D, LIU J, CHOUDHURI S. Metallothionein: an intracellular protein to protect against cadmium toxicity [J]. Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 1999(39):267-294.
- [9] PATRICK L. Toxic metals and antioxidants; Part II. The role of antioxidants in arsenic and cadmium toxicity [J]. Alternative Medicine Review, 2003, 8(2):106-128.
- [10] 周航,周歆,曾敏,等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效

果[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 437-444.

[11] MIGNARDI S, CORAMI A, FERRINI V. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn[J]. Chemosphere, 2012, 86(4): 354-360.

[12] BROWN S, CHRISTENSEN B, LOMBI E, et al. An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb, and Zn *in situ*[J]. Environmental Pollution, 2005, 138(1): 34-45.

[13] CARRILLO ZENTENO M D, de FREITAS R C A, FEMANDES R B A, et al. Sorption of cadmium in some soil amendments for *in situ* recovery of contaminated soils[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2013, 224(2): 1418-1426.

[14] 楚秀梅, 赵展恒, 余兆婧, 等. 重金属 Pb 和 Cd 在不同修复材料中的迁移机制[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2014, 29(1): 42-48.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.

[16] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[17] WALLACE A, BERRY W L. Dose-response curves for zinc, cadmium and nickel in combination of one, two, or three [J]. Soil Science, 1989, 147(6): 401-410.

[18] KIRKHAM M B. Cadmium in plants on polluted soils, effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. Geoderma, 2006, 137(1): 19-32.

[19] 谢建治, 张书廷, 刘树庆, 等. 潮褐土重金属 Cd 污染对小白菜营养品质指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 678-682.

[20] 陈瑛, 李廷强, 杨肖娥. 镉对不同基因型小白菜根系生长特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 170-176.

[21] 吕金印, 张微, 柳玲. Cd²⁺ 处理对几种叶菜可食部分 Cd 含量及品质

的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4): 856-862.

[22] 李雪芳, 王林权, 尚浩博, 等. 小白菜和小青菜对镉、汞、砷的富集效应及影响因素[J]. 北方园艺, 2014(1): 16-21.

[23] 胡超, 付庆超. 土壤重金属污染对蔬菜发育及品质的影响之研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 519-523.

[24] 谢建治, 李博文, 刘树庆. Cd、Zn 污染对小白菜营养品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(1): 42-45.

[25] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效益[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 212-218.

[26] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草堆肥污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1997-2000.

[27] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.

[28] VANGRONSVELD J, COLPAERT J V, van TICHELEN K K. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: physico-chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation[J]. Environmental Pollution, 1996, 94(2): 131-140.

[29] 江海燕, 王志国, 赵秋香, 等. 胡敏酸改性膨润土钝化污染土壤 Pb&Cd 及机理[J]. 环境保护科学, 2014, 40(1): 46-50.

[30] 王发园, 王玲, 王旭刚, 等. 钝化剂在烟草植物修复铅镉污染土壤中的作用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2): 789-794.

[31] 谢建治, 刘树庆, 刘玉柱, 等. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(4): 325-327.

[32] 李廷强, 谢英荷, 刘子娇. Cd、Cr、Pb 对几种叶类蔬菜生长状况及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2008, 36(4): 20-22.

Effect of a Complex Amendment on the Quality of Pak Choi Under Cd Contamination Stress

HU Liping¹, ZHOU Guoxing², LI Chong³, WANG Yiqian¹, HE Hongji¹

(1. Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Beijing Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097; 2. Beijing Hengyuan Jiada Science & Technology Co. Ltd., Beijing 100080; 3. Soil and Fertilizer Workstation in Daxing, Beijing 102600)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the effect of a complex amendment on the soil organic matter content, pH, Cd uptake and nutritional quality of pak choi (*Brassica rapa* L. Chinensis Group.) planted in five levels (2, 4, 25, 50, 100 mg/kg) of Cd contaminated soil in which different concentrations of amendments (0, 600, 900, 1 200 mg/kg) were added. The results showed that when applying 900 mg/kg amendment, the soil organic matter content increased from 12.36% to 72.24%. However, applying the amendment had no significant effect on the pH of soil. The security and nutritional quality of pak choi were obviously improved comparing with no amendment application. The Cd and crude fiber content of pak choi decreased from 32.04% to 44.87% and from 11.53% to 28.10%, respectively. Furthermore, the contents of vitamin C and soluble sugar of pak choi increased from 10.73% to 48.62% and from 10.37% to 59.52%, respectively. These datas indicated that the complex amendment could be used in the in-situ repair of heavy metal contaminated soil, and the recommended dosage was 900 mg/kg.

Keywords: pak choi; cadmium; amendment; quality