

改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响

李松, 孙向阳, 李素艳, 马其雪, 刘源鑫, 周文洁

引用本文:

李松, 孙向阳, 李素艳, 等. 改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1229–1235.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1182>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响

代允超, 吕家珑, 刁展, 刘金, 安伟强, 陈曦

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 80–86 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.012>

不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响

李丹, 李俊华, 何婷, 蒙佩佩

农业环境科学学报. 2015(9): 1679–1685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.008>

木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响

罗洋, 高晋, 罗绪强, 李仪

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1676–1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0042>

组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究

张迪, 丁爱芳

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2718–2726 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0881>

矿物-有机质复合调理剂对Pb污染土壤的改良效果

蔡如梦, 石林

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2438–2444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0887>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李松, 孙向阳, 李素艳, 等. 改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1229–1235.

LI Song, SUN Xiang-yang, LI Su-yan, et al. Effects of amendments on cadmium accumulation and transport and the physiological characteristics of pakchoi cabbage in cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1229–1235.



开放科学 OSID

改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响

李松, 孙向阳*, 李素艳, 马其雪, 刘源鑫, 周文洁

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要:为了缓解土壤镉污染对小白菜的胁迫,以园林绿色废弃物堆肥、生物炭和腐植酸为复合改良剂,研究了不同改良剂添加量对土壤理化性状、小白菜生物量、镉积累转运、叶片色素含量和生理特性的影响。结果表明:随着改良剂施用量的增加,土壤pH值、EC值和有机质含量增加,土壤有效态镉含量降低。施用改良剂后,小白菜根和叶的生物量分别提高了46%~53%和30%~64%。改良剂添加显著降低了小白菜根和叶中镉含量,同时根和叶的富集系数(BAF)分别降低了12%~30%和34%~49%,转运系数(TF)显著低于对照,但仍大于1。改良剂施用显著提高了小白菜叶片中的叶绿素a、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量。小白菜的丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸含量等抗逆性指标明显降低。研究表明,改良剂施用改善土壤理化性状,提高小白菜生物量和叶片色素含量,降低抗逆性指标,同时显著降低小白菜对镉的积累转运。

关键词:小白菜;镉;土壤理化性状;吸收;转运;生理特性

中图分类号:S634.3;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1229-07 doi:10.11654/jaes.2020-1182

Effects of amendments on cadmium accumulation and transport and the physiological characteristics of pakchoi cabbage in cadmium-contaminated soil

LI Song, SUN Xiang-yang*, LI Su-yan, MA Qi-xue, LIU Yuan-xin, ZHOU Wen-jie

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to alleviate the stress of soil cadmium pollution on pakchoi cabbage. In this study, green waste compost, biochar, and humic acid were used as composite amendments to examine the effects of different levels of addition on soil physicochemical properties and the biomass, cadmium accumulation and transportation, leaf pigment content, and physiological characteristics of pakchoi cabbage. The results showed that with an increase in the amounts of amendments applied, there were increases in soil pH and electrical conductivity values and organic matter content, whereas available cadmium content decreased. In response to amendment, there were also increases in the biomass of pakchoi cabbage roots and leaves of 46%~53% and 30%~64% respectively. Furthermore, the bioaccumulation factors of roots and leaves decreased by 12%~30% and 34%~49%, respectively, whereas although the translocation factor was significantly lower than that of the control, it was still greater than 1. In addition, the contents of chlorophyll a, total chlorophyll (a+b), and carotenoids in the leaves of pakchoi cabbage were significantly increased by the application of amendments. There were also significant reductions in the contents of malondialdehyde and proline and the activities of superoxide dismutase and peroxidase in pakchoi cabbage. In general, the application of amendments improved soil physicochemical properties, increased the biomass and leaf pigment contents of pakchoi, reduced indices of stress resistance, and significantly reduced the accumulation and transportation of cadmium in pakchoi cabbage.

Keywords: pakchoi cabbage; cadmium; soil physicochemical properties; absorption; transportation; physiological characteristic

收稿日期:2020-10-14 录用日期:2021-01-15

作者简介:李松(1988—),男,河北保定人,博士研究生,从事土壤修复与健康研究。E-mail:songli996477@126.com

*通信作者:孙向阳 E-mail:sunxy@bjfu.edu.cn

基金项目:北京市自然科学基金项目(6202021)

Project supported: The Natural Science Foundation of Beijing, China(6202021)

由于人类活动的干扰加剧,土壤重金属污染日益严重,因此土壤修复迫在眉睫^[1]。《全国土壤污染状况调查公报(2014)》显示,约 2.0×10^7 hm²耕地受到重金属(主要是镉和铅)污染,占总耕地面积的19.4%,同时,镉已被正式认定为我国土壤中最突出的无机污染物^[2-3]。蔬菜是人类食物的重要来源,与其他粮食作物相比,叶菜类蔬菜更易积累重金属,食用受重金属污染的叶菜是人类接触重金属的主要途径之一^[4-5]。人体内70%的镉积累来自叶菜类蔬菜^[6],因此解决蔬菜特别是叶菜类蔬菜中的重金属超标问题是一项非常重要的任务。

许多研究证明,园林绿化废弃物堆肥、生物炭和腐植酸是环境友好且成本低的土壤改良剂。园林绿化废弃物堆肥作为农林业固体废物稳定化过程的主要产品,是改良土壤最廉价的材料之一^[3]。生物炭呈碱性,具有很高的多孔结构和阳离子交换能力,含有大量的羧基和羟基,可降低重金属的生物利用度,从而降低植物吸收和食物链转移^[4]。腐植酸是有机质的主要成分,它可以促进矿质营养的吸收和植物的生长^[7]。有研究表明,生物炭和腐植酸在一定比例范围内复配可提高油菜的生物量,显著降低油菜中镉的累积量^[8]。而将园林绿化废弃物堆肥、生物炭和腐植酸三者复配作为改良剂修复土壤镉的研究鲜有报道。

2012年,北京市园林垃圾总量约为 5.69×10^6 t,且逐年增加,一年的园林绿化废弃物资源化处理量约为 2.14×10^5 t^[3]。因此,本试验以园林绿化废弃物堆肥为主要材料,复配生物炭和腐植酸,得到复合改良剂,改良镉污染土壤,从而实现资源化再利用。本研究拟解决的关键问题:采用园林绿化废弃物堆肥、生物炭和腐植酸复配的改良剂进行盆栽试验,分析改良剂对土壤性状、小白菜镉积累转运及生理特性的影响,为改良剂在镉污染土壤中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集自华北平原雄安新区老河头镇(115°42'E, 38°49'N)的镉污染土壤。该土壤20世纪曾用河流污水灌溉,因此造成农田土壤重金属污染。采集0~20 cm的土壤,在25℃室温下干燥4周,筛分至<2 mm,并移除土壤中的动植物碎屑。土壤为潮土,pH值为7.92,EC值为 $331 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,有机质含量 $42.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,镉总含量 $4.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB

15618—2018)中的筛选值和管制值(土壤pH>7.5时,镉筛选值为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,管制值为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

本研究采用园林绿化废弃物堆肥、果木生物炭和腐植酸3种原料进行复配得到复合改良剂。试验中使用的园林绿化废弃物堆肥来自北京一家园林绿化废弃物消纳中心,原料主要是修剪残渣,如刺槐、臭椿、黄栌、槐、柳、杂草等植物的凋落物,原料经粉碎、添加微生物制剂、一级和二级发酵,完全分解。生物炭为中国陕西怡鑫生物能源有限公司提供的果炭(在500℃高温厌氧条件下热解5 h)。腐植酸由中国山东德州化学制品有限公司提供。将园林绿化废弃物堆肥和生物炭风干,研磨,过2 mm筛,备用。

1.2 盆栽试验

试验于2019年5月7日在北京林业大学温室中进行,小白菜种子为“京绿1号”,来自京研益农(北京)种业科技有限公司。为了研究园林绿化废弃物堆肥、生物炭和腐植酸复配改良剂对镉污染土壤中小白菜生理特性和镉吸收转运的影响,将改良剂[园林绿化废弃物堆肥:生物炭:腐植酸=8:1:1(m/m)]按不同添加量与镉污染土壤充分混合,设置不同质量比的4个处理:CK(0%)、T1(1%)、T2(2%)、T5(5%),每个处理3次重复,每盆土壤3 kg,共12盆。将小白菜种子种植在镉污染土壤中,当小白菜生长到10 cm时,每盆保留3株生长均匀的幼苗。定期进行养护管理,每周浇水3次,保持土壤持水量60%(m/m),并在20~30℃的温室条件下生长至收获。

1.3 测定项目及方法

40 d后收获小白菜,将小白菜先用蒸馏水冲洗,再用20 mm Na₂EDTA浸泡15~20 min,以去除根表面的镉,最后用蒸馏水清洗干净。用纸巾吸净表面水分,进行小白菜质量的测定。用pH计在土水比1:5(m/V)的去离子水中测定pH值,用EC计在土水比1:10(m/V)的去离子水中测定EC值。采用CaCl₂萃取,电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对土壤样品中的有效态镉进行分析。

收获时,对从小白菜第1片展开叶向下数的第4片成熟功能叶进行叶绿素含量测定^[9]。小白菜叶中的游离脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性的测定,依据植物生理学实验指导完成^[9]。根和叶中的总镉含量采用微波消解法,电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。同时计算小白菜的生物富集系数(BAF)和转运系数(TF)。

$$\text{富集系数 (BAF)} = \frac{\text{叶(根)重金属含量}}{\text{土壤中该重金属含量}}$$

$$\text{转运系数 (TF)} = \frac{\text{叶重金属含量}}{\text{根重金属含量}}$$

1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 进行数据整理和绘图。采用 SPSS 统计软件包 (21.0 版) 进行方差分析 (ANOVA), 差异显著性分析采用 LSD 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 园林绿化废弃物堆肥的表征

图 1 是园林绿化废弃物堆肥的扫描电镜图。从图 1 可以看出, 园林绿化废弃物堆肥表面多孔, 具有发达的孔隙结构, 孔隙长度为 $5 \sim 20 \mu\text{m}$; 表面凹凸不平, 存在不规则的孔道结构, 孔道上存在一定量的介孔。

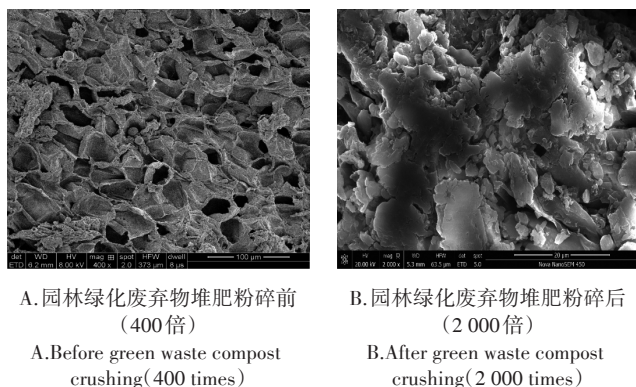
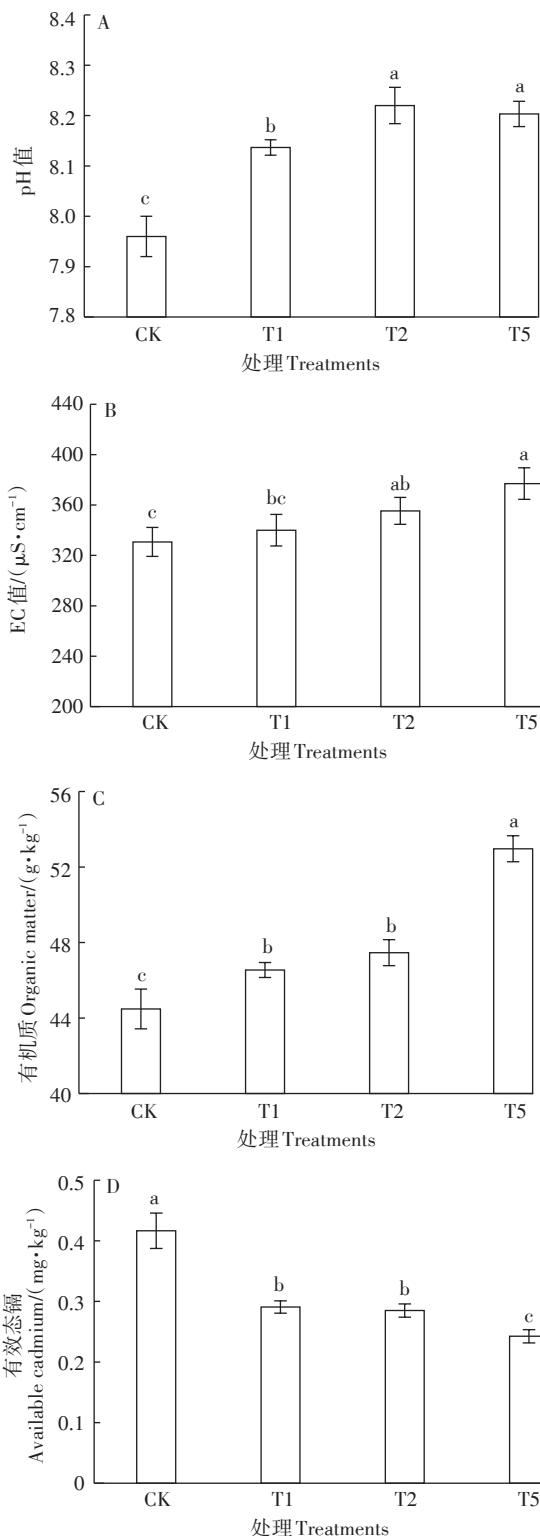


图 1 园林绿化废弃物堆肥的扫描电镜图

Figure 1 Scanning electron microscope (SEM) of green waste compost

2.2 改良剂对土壤 pH 值、EC 值、有机质含量和有效态镉含量的影响

图 2 为施用改良剂后土壤 pH 值、EC 值、有机质含量及土壤有效态镉含量的变化。由图 2A 可知, 与 CK 土壤相比, 改良剂的施用可以显著提高土壤的 pH 值, T1、T2、T5 处理分别提高了 0.18、0.26、0.24 个 pH 单位。园林废弃物堆肥是碱性添加物, 因此引起土壤 pH 值的增加。图 2B 显示, 改良剂的施用显著提高了土壤的 EC 值, 不同处理较 CK 分别提高了 3%、7% 和 14%, 同时 EC 值的增加不会造成土壤的盐碱环境。与 CK 相比, 改良剂的添加使土壤有机质显著增加 (图 2C), T1、T2、T5 处理较 CK 分别增加了 5%、7% 和 19%, 这是由于改良剂中加入了腐植酸, 而腐植酸是有机质的主要成分。改良剂的施用显著降低了土壤



不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate the difference in the processing are significant ($P < 0.05$). The same below

图 2 改良剂对土壤 pH 值、EC 值、有机质含量和有效态镉含量的影响

Figure 2 Effects of amendments on soil pH, EC, organic matter content and available cadmium content

有效态镉的含量(图2D),T1、T2、T5处理与CK相比,分别降低了30%、32%和42%。

2.3 改良剂对镉污染土壤中小白菜生物量的影响

从图3中可以看出,改良剂的施用显著增加了镉污染土壤中小白菜根和叶的生物量。与CK相比,T1、T2、T5处理分别提高了46%、53%和50%的根生物量;同时分别提高了30%、42%和64%的叶生物量。不同处理之间根生物量增加没有显著差异,但叶生物量增加有显著差异。总体而言,改良剂的施用显著促进了小白菜的生长。

2.4 改良剂对镉污染土壤中小白菜镉吸收转运的影响

表1为施用改良剂后小白菜根和叶的镉含量、富集系数及转运系数的变化情况。改良剂的添加显著降低了镉污染土壤中根和叶的镉含量。与CK相比,T1、T2、T5处理分别降低了13%、18%和33%的根部镉含量,同时分别降低了34%、43%和51%的叶中镉含量。改良剂可以显著降低根和叶中镉的富集系数,根和叶的富集系数分别较CK降低了12%~30%和34%~49%。随着改良剂施用量的增加,叶的转运系数呈现先降低后升高的趋势,但都显著低于CK,且均大于1,说明镉容易从根部向叶中转移。

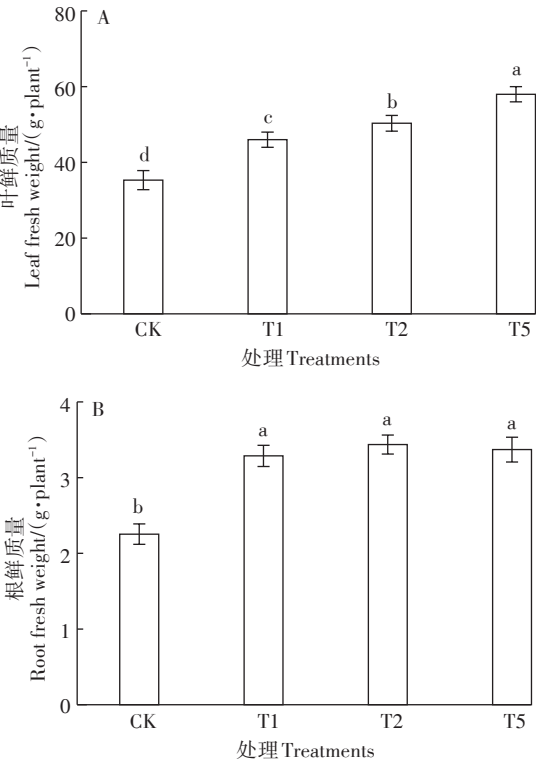


图3 改良剂对镉污染土壤中小白菜生物量的影响

Figure 3 Effects of amendments on biomass of pakchoi cabbage in cadmium contaminated soil

表1 改良剂对小白菜镉吸收转运的影响

Table 1 Effects of amendments on cadmium uptake and transport in pakchoi cabbage

处理 Treatments	镉含量 Cadmium content/(mg·kg ⁻¹)		BAF		TF
	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	叶 Leaf
CK	3.31±0.18a	10.60±0.90a	0.79a	2.53a	3.20a
T1	2.88±0.08b	6.97±0.47b	0.69b	1.68b	2.42b
T2	2.71±0.04b	6.00±0.27bc	0.66b	1.47bc	2.22b
T5	2.22±0.05c	5.22±0.23c	0.55c	1.30c	2.35b

注:数据为平均值±标准误差,表中同一列的不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Data=mean±SE, and the different lowercase letters in the same column in the table indicate that the differences in the processing are significant(P<0.05). The same below.

2.5 改良剂对镉污染土壤中小白菜叶片色素含量的影响

表2为小白菜叶片中叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素的含量。改良剂的施用显著提高了叶绿素a的含量,与CK相比,T1、T2、T5处理分别提高了20%、22%和28%。改良剂的施用提高了叶绿素b的含量,但与CK相比并没有显著差异。叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量的变化趋势与叶绿素a相同,都随着改良剂施用量增加而显著提高,不同处理与CK相比,叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量分别提高了16%~23%和17%~26%。

表2 改良剂对小白菜叶片色素含量的影响(mg·g⁻¹)

Table 2 Effects of improvers on pigment content in leaves of pakchoi cabbage(mg·g⁻¹)

处理 Treatments	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	叶绿素(a+b) Chlorophyll(a+b)	类胡萝卜素 Carotenoids
CK	2.26±0.12b	0.91±0.04a	3.17±0.16b	0.71±0.06b
T1	2.71±0.22a	0.97±0.13a	3.68±0.35a	0.89±0.08a
T2	2.76±0.16a	0.92±0.07a	3.68±0.23a	0.83±0.04a
T5	2.89±0.16a	1.02±0.09a	3.91±0.25a	0.85±0.02a

2.6 改良剂对镉污染土壤中小白菜生理特性的影响

图4为改良剂对镉污染土壤中小白菜的MDA含量、SOD活性、POD活性和脯氨酸含量的影响情况。从图4A可以看出,小白菜的MDA含量随改良剂施用量的增加呈显著下降的趋势,与CK相比,T1、T2、T5处理小白菜的MDA含量分别降低了61%、65%和71%。从图4B可以看出,小白菜的SOD活性随改良剂施用量的增加呈下降的趋势,其中T1、T2和T5处理的SOD活性分别下降至114、110、107 U·g⁻¹ FW,比

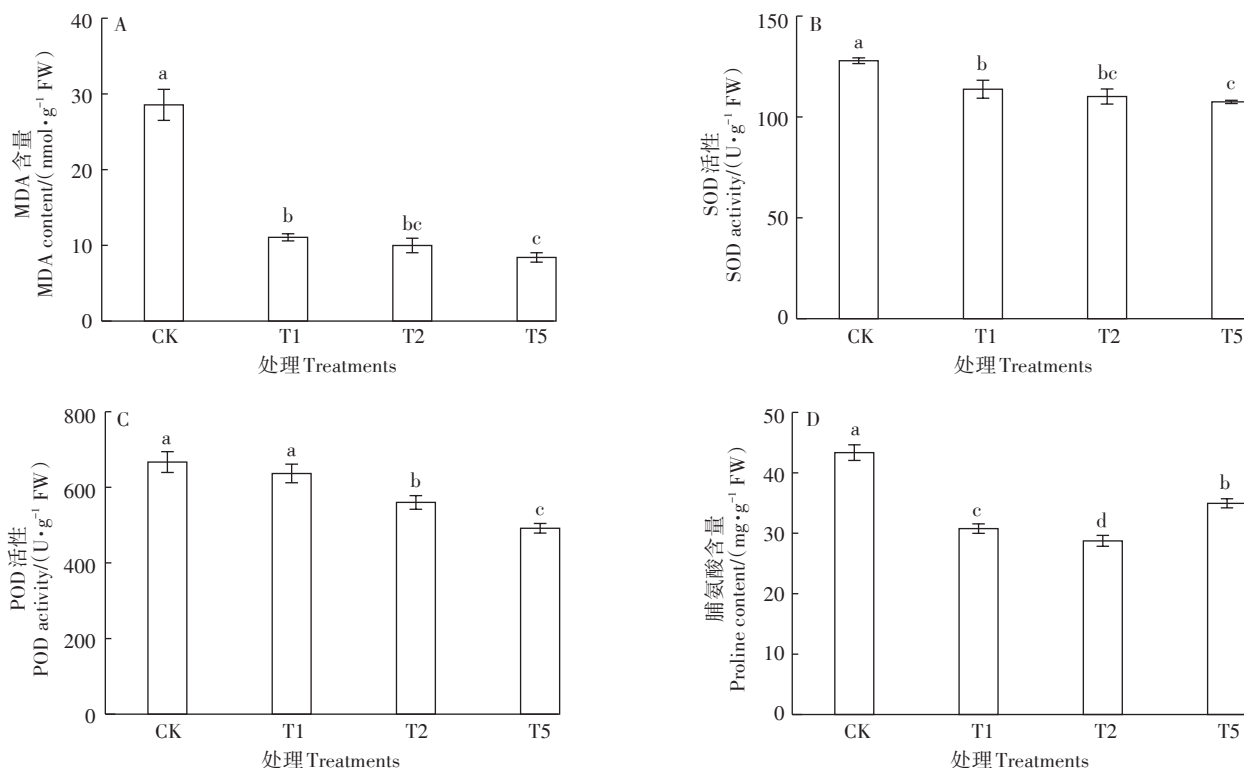


图4 改良剂对镉污染土壤中小白菜生理特性的影响

Figure 4 Effects of amendments on physiological characteristics of pakchoi cabbage in cadmium contaminated soil

CK下降11%、14%和16%,且与CK差异显著。从图4C可以看出,小白菜的POD活性随改良剂施用量的增加呈下降趋势,其中T1处理的POD活性比CK下降 $30 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ (4%),与CK差异不显著;T2和T5处理的POD活性下降16%和26%,与CK差异显著。从图4D可以看出,小白菜的脯氨酸含量随改良剂施用量的增加呈现先下降后升高的趋势,但均显著低于CK,T2处理脯氨酸活性降低幅度最大,下降了34%。

3 讨论

土壤改良剂会改变土壤的理化性质,从而改变土壤重金属有效态含量,进而影响其迁移性和植物特性^[3,10-11]。本研究结果表明,添加园林绿化废弃物堆肥、生物炭和腐植酸的复合改良剂可以显著提高土壤pH值、EC值和有机质含量,同时显著降低土壤有效态镉含量(CaCl_2),改良剂的添加提高了土壤EC值,但不会引起土壤盐碱化。堆肥和生物炭呈碱性,腐植酸呈酸性,由于堆肥添加比例大于腐植酸,因此导致土壤pH值增加。土壤pH值升高,导致重金属的有效态转化为氢氧化物和碳酸盐沉淀,降低了重金属在土壤中的迁移率和生物毒性效应^[12-14]。由图2可知,改

良剂的添加导致pH值升高了0.18~0.24个单位,同时显著降低了土壤有效态镉含量30%~42%,说明土壤pH值升高可以显著降低可提取态镉(CaCl_2)含量^[15]。图1中园林绿化废弃物堆肥的表面是多孔的,具有发达的孔隙结构,其孔隙长度为5~20 μm ,这种构造有利于金属离子的嵌入配位^[3]。生物炭也具有多孔结构,含有大量的羧基和羟基,可降低重金属的生物利用度^[4]。腐植酸是有机质的主要成分,堆肥和生物炭中也含有大量的有机质,因此土壤中有机质含量增加,提高土壤肥力的同时又增强了改良剂对重金属和有机污染物的吸附^[3,16-17]。在镉污染土壤中添加复合改良剂可以显著提高小白菜根和叶的生物量,这是由于园林绿化废弃物堆肥可以提高土壤养分含量^[3];生物炭增加了离子交换点,利于固定重金属^[4];腐植酸含有大量的有机质,提高了土壤的固氮、固钾和磷分解能力,有利于植物的生长^[7]。在盆栽试验中,复合改良剂的添加在降低土壤有效态镉含量的同时也促进了小白菜的生长。

镉在植物体内的积累随土壤性质、改良剂类型、植物种类的不同而不同^[18]。植物中重金属的含量与土壤中有效态重金属含量呈正相关^[19]。因此施用改

良剂后,土壤pH值升高,土壤有效态镉含量降低,这是小白菜根和叶中重金属含量减少的主要原因。植物对重金属的吸收和转运是评价重金属对植物生长危害性的主要指标^[20]。BCF被认为是评价重金属在土壤-植物系统中迁移难易程度和描述重金属在植物体内积累趋势的重要指标。TF表征植物根系将重金属离子从地下输送到地上的能力。改良剂施用后小白菜的BCF和TF值均降低,说明小白菜-镉系统中镉的迁移能力降低,镉离子通过根系从地下转运到地上的能力下降。这主要是由于改良剂改变了土壤性质(pH值升高、有机质含量升高、有效态镉含量降低),导致镉的迁移转运能力降低,从而降低了小白菜对重金属的生物利用度。叶菜类蔬菜对重金属迁移率高^[21],改良剂可以有效抑制小白菜对镉的吸收,从而减少了人体摄入量,降低健康风险。小白菜的镉含量虽然降低效果明显,但并未降低到食品安全限量标准内,下一步需要调整3种原材料的配比或加大施用比例,进一步降低小白菜的镉含量,使其符合食品安全限量标准。

镉离子可以抑制植物叶绿素的合成,降低植物光合作用并抑制植物生长^[22]。改良剂的施用提高了小白菜叶的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量,这表明改良剂有助于提高小白菜叶绿体结构的稳定性,保护叶片色素,提高光合作用,促进小白菜的生长。植物受到镉胁迫会产生活性氧自由基,为了缓解自由基并减少镉胁迫引起的氧化损害,植物会释放多种酶和非酶防御机制。镉促使脂质过氧化,导致MDA含量不必要的增加,同时镉胁迫下植物的游离脯氨酸含量也会增加^[23]。添加生物炭可以显著降低镉处理土壤中的脯氨酸和MDA水平^[10]。本试验中,改良剂的施用显著降低了MDA和脯氨酸含量,缓解了镉对小白菜叶片的毒害作用,对细胞器膜完整性有积极作用。MDA和脯氨酸含量的显著降低可能是由于镉吸收量和土壤中有效态镉含量的降低。SOD和POD是植物抗氧化系统中的酶,植物体内镉积累会导致SOD和酶编码基因的活性增强,从而导致抗氧化酶的升高^[11],POD可作为多种植物镉金属毒性的生物标志物^[24]。SOD将O²⁻解毒为H₂O₂,而POD在过氧化氢的催化作用中起着至关重要的作用^[25]。Mehmood等^[26]证明了镉毒性对SOD和POD活性的上调作用,以及生物炭改良剂对其活性的下调作用。生物炭的添加显著降低了植物叶片和嫩枝中的POD活性,这是由于SOD分解了更多的超氧化物而产生的

更高的氧化应激活性氧和过氧化氢^[27]。施用改良剂降低了小白菜根和叶中镉的积累转运能力,增强了小白菜对镉毒性的自我调节,这可能是导致SOD和POD活性降低的主要原因。

4 结论

(1)在镉污染土壤中添加复合改良剂,可以提高土壤pH值和EC值,增加土壤有机质含量,降低土壤有效态镉含量,提高土壤质量。

(2)施用复合改良剂,显著提高了镉污染土壤中小白菜根和叶的生物量,提高叶片色素含量,显著降低小白菜根和叶中镉的积累转运。

(3)施用复合改良剂,显著缓解了镉对小白菜的毒害作用,小白菜叶中的MDA含量、SOD活性、POD活性和脯氨酸含量等抗逆性指标明显降低。

参考文献:

- [1] Li Z, Ma Z, Kuijp T, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 843-853.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, et al. Analysis of the bulletin of national soil pollution survey[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] Li S, Sun X, Liu Y, et al. Remediation of Cd-contaminated soils by GWC application, evaluated in terms of Cd immobilization, enzyme activities, and pakchoi cabbage uptake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(9): 9979-9986.
- [4] Kamran M, Malik Z, Parveen A, et al. Biochar alleviates Cd phytotoxicity by minimizing bioavailability and oxidative stress in pak choi (*Brassica chinensis* L.) cultivated in Cd-polluted soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 109500.
- [5] 梁泰帅, 刘昌欣, 康靖全, 等. 硫对镉胁迫下小白菜镉富集、光合速率等生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1455-1463. LIANG Tai-shuai, LIU Chang-xin, KANG Jing-quan, et al. Effects of sulfur on cadmium accumulation, photosynthesis and some other physiological characteristics of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under cadmium stresses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1455-1463.
- [6] Bashir S, Salam A, Chhajro M A, et al. Comparative efficiency of rice husk-derived biochar(RHB) and steel slag(SS) on cadmium(Cd) mobility and its uptake by Chinese cabbage in highly contaminated soil[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(12): 1221-1228.
- [7] Zhang L, Sun X Y, Tian Y, et al. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 176: 70-78.

- [8] 郭军康, 任倩, 赵瑾, 等. 生物炭与腐植酸复配对油菜 (*Brassica campestris* L.) 生长与镉累积的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2425–2432. GUO Jun-kang, REN Qian, ZHAO Jin, et al. Effects of biochar and humic acid on growth and cadmium accumulation in rape[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2425–2432.
- [9] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006. CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Experimental guidance of plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [10] Sabir A, Naveed M, Bashir M A, et al. Cadmium mediated phytotoxic impacts in *Brassica napus*: Managing growth, physiological and oxidative disturbances through combined use of biochar and *Enterobacter* sp. MN17[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265: 110522.
- [11] 刘莉. 镉胁迫对水稻幼苗干物质积累和活性氧代谢的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 3: 147–150. LIU Li. Effects of Cd stress on biomass accumulation and active oxygen metabolism of rice seedlings and their genotype difference[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 3: 147–150.
- [12] He Y, Lin H, Jin X, et al. Simultaneous reduction of arsenic and cadmium bioavailability in agriculture soil and their accumulation in *Brassica chinensis* L. by using minerals[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 198: 110660.
- [13] Yang X, Igalavithana A D, Oh S E, et al. Characterization of bioenergy biochar and its utilization for metal/metalloid immobilization in contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 704–713.
- [14] 李丹, 李俊华, 何婷, 等. 不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1679–1685. LI Dan, LI Jun-hua, HE Ting, et al. Effects of different amendments on soil Cd forms and Cd uptake by Chinese cabbage in Cd-contaminated calcareous soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9): 1679–1685.
- [15] Liang J, Yang Z, Tang L, et al. Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost[J]. *Chemosphere*, 2017, 181: 281–288.
- [16] 周丹丹, 王薇, 张军, 等. 生物炭中溶解性有机质对污染物环境行为的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1492–1498. ZHOU Dan-dan, WANG Wei, ZHANG Jun, et al. Effect of biochar-derived dissolved organic matter on environmental behavior of pollutants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7): 1492–1498.
- [17] 何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 342–346, 354. HE Zi-lin, XIAN Yang, MENG Xiao-xia, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-contaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 342–346, 354.
- [18] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 700–703. SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi, et al. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 700–703.
- [19] 罗继鹏, 陶琦, 吴可人, 等. 超积累植物内生微生物群落组成特征及其功能研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(5): 515–529. LUO Ji-peng, TAO Qi, WU Ke-ren, et al. Research progress in composition and function of hyperaccumulator-associated endogenous microorganism community[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences)*, 2018, 44(5): 515–529.
- [20] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 134–139. CUI Xiao-feng, LI Shu-yi, DING Xiao-dong, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 134–139.
- [21] 李思聪. 不同植物对典型重金属污染沉积物的修复及效果评价[D]. 天津: 天津大学, 2013. LI Si-cong. Remediation and effect evaluation of different plants on typical heavy metal contaminated sediments[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [22] Khan A Z, Ding X, Khan S, et al. Biochar efficacy for reducing heavy metals uptake by Cilantro (*Coriandrum sativum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) to minimize human health risk[J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125543.
- [23] 张家洋. 重金属铅镉短期胁迫对蓬菜蕉生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 340–345. ZHANG Jia-yang. The effect of Pb and Cd on physiological and biochemical indexes of *Monstera Deliciosa* Liebm. in the short-term conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 340–345.
- [24] Singh H P, Mahajan P, Kaur S, et al. Cadmium: Toxicity and tolerance in plants[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, 11(3): 229–254.
- [25] Noman A, Ali Q, Naseem J, et al. Sugar beet extract acts as a natural bio-stimulant for physio-biochemical attributes in water stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2018, 40(6): 110.
- [26] Mehmood S, Saeed D A, Rizwan M, et al. Impact of different amendments on biochemical responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants grown in lead-cadmium contaminated soil[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 132: 345–355.
- [27] Pei Z F, Ming D F, Liu D, et al. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2009, 29(1): 106–115.