

蒋欣梅, 薛冬冬, 于锡宏, 等. 玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 1000-1006.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.027

玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响

蒋欣梅, 薛冬冬, 于锡宏, 吴凤芝, 许铎月, 李钰锋, 曲娟娟, 闫雷
(农业农村部东北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 东北农业大学, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 本研究以小白菜为试验材料, 采用模拟镉污染土壤的盆栽试验, 研究玉米秸秆生物炭(施用量为 10 g/kg、20 g/kg、30 g/kg)对镉污染土壤中小白菜生长的影响。结果表明: 与常规土壤相比, 镉污染土壤中小白菜的生长受到抑制, 自然伸展高度、叶片开展度和单株鲜质量均下降。在镉污染土壤中, 随着小白菜的生长, 土壤中镉含量降低, 小白菜可食用部位镉含量增加, 施用适量的玉米秸秆生物炭可有效降低土壤中镉含量, 缓解镉对小白菜的胁迫, 使叶绿素含量、可溶性蛋白质含量和可溶性糖含量有所增加, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性下降。综合各项指标, 发现施用 20 g/kg 玉米秸秆生物炭对镉污染土壤胁迫的缓解效果最佳。

关键词: 镉污染; 玉米秸秆生物炭; 小白菜; 生长

中图分类号: S634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-1000-07

Effects of corn-stalk biochar on the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil

JIANG Xin-mei, XUE Dong-dong, YU Xi-hong, WU Feng-zhi, XU Hua-yue, LI Yu-feng, QU Juan-juan, YAN Lei

(Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops, Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Using Chinese cabbage as experimental material, effects of corn-stalk biochar (10 g/kg, 20 g/kg, 30 g/kg) on the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil were studied. The results showed that the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil was inhibited, and natural extension height, leaf development and single plant fresh weight were decreased. In cadmium contaminated soil, soil cadmium content decreased, and cadmium content in edible parts increased with the growth of Chinese cabbage. The application of appropriate corn-stalk biochar could effectively reduce soil cadmium content, alleviate cadmium stress, increase the contents of chlorophyll, soluble protein and soluble sugar, decrease the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and peroxidase (CAT). In conclusion, the application of 20 g/kg corn-stalk biochar can alleviate cadmium stress effectively.

Key words: cadmium pollution; corn-stalk biochar; Chinese cabbage; growth

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划子课题项目(2017YFD0801104-4); 国家大宗蔬菜产业技术体系岗位专家项目(CARS-23-C10); 黑龙江省现代农业产业技术协同创新推广体系项目

作者简介: 蒋欣梅(1968-), 女, 浙江诸暨人, 硕士, 副研究员, 主要从事蔬菜栽培与生理及山野菜产业化研究。(E-mail) jxm0917@163.com

通讯作者: 闫雷, (E-mail) yanlei_74@163.com; 吴凤芝, (E-mail) fzwu2006@aliyun.com

土壤是植物生长的基础。近年来, 由于人类用工业废水灌溉农田, 大量使用化肥、农药, 过度进行矿区开采等, 导致土壤重金属污染日益严重, 其中镉污染已引起人们广泛关注^[1]。据调查, 中国 11 个省份的 25 个地区均受到不同程度的镉污染, 镉污染的农田占总耕地的六分之一^[2]。2000 年农业农村部的 14 个省份的蔬菜进行安全检测, 发现蔬菜中镉超标率高达 24%, 其中镉污染最严重蔬菜中的镉含量

是食品中污染物含量限值的 20 多倍^[3]。湖南省部分地区的大米和土壤中镉含量较高^[4]。重金属镉具有较强的毒性,不易移动,所以积累在土壤中,植物吸收土壤中的镉会影响植物生长发育及生理代谢,并经过食物链最终传递到人体内,危害人类健康^[5]。根据食品安全国家标准,叶菜类蔬菜中镉的最大限量为 0.2 mg/kg^[6]。郭晓静^[7]在研究镉污染土壤中 6 种植模式间蔬菜产量和镉积累量的差异时,发现不同种类蔬菜可食用部位镉积累量差异较大,叶菜类蔬菜中的镉积累量最高。

生物炭是一种新兴的土壤钝化材料,是生物质在厌氧条件下高温裂解形成的炭质材料,比表面积大,孔隙发达,含有大量较稳定的官能团^[8],其主要有 3 种吸附方式:表面吸附、物理吸附、共同沉淀。生物炭的物理结构和吸附功能可以钝化镉的活跃程度,其化学性质可以改变土壤条件,降低可利用形态镉的含量,减少植物对镉的吸收,并缓解镉对植物的毒害作用^[9]。在土壤低镉污染条件下,水稻土壤中的有效态镉含量降低,稻米中总镉含量降低^[10]。在土壤中轻度镉污染条件下施用生物炭,可降低花生籽粒中的镉含量^[11]。生物炭可通过降低土壤酸度,使有效态镉向不活跃形态转化,降低镉的有效性^[12]。

表 1 供试土壤和玉米秸秆生物炭的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil and corn-stalk biochar

材料	pH	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	镉含量 (mg/kg)
土壤	7.420	20.450	1.030	23.070	113.000	50.270	0.087
玉米秸秆生物炭	8.750	32.910	1.820	29.870	38.470	71.230	—

1.2 试验方法

于 2018–2019 年在东北农业大学向阳基地进行了 2 年试验,每年均于 5 月 1 日开始。采用模拟镉污染土壤的盆栽试验,每盆(盆高为 190 mm,盆口径为 240 mm)装有常规土壤 3 kg。将 1.8 mg/kg 的镉配制成相应的 $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液后喷洒到土壤中。根据预备试验结果可知,土壤沉降 30 d 后可达到稳定状态,此时土壤中有效态镉含量趋于稳定并保持不变,试验中稳定状态下的土壤镉含量为 1.76 mg/kg,其中有效态镉含量为 1.02 mg/kg。

当土壤中镉达到稳定状态后,于 6 月 1 日向镉污染土壤中施入不同水平的玉米秸秆生物炭,施用量分别为 10 g/kg、20 g/kg、30 g/kg,处理代码分别

关于生物炭缓解镉污染的研究,主要集中在生物炭对土壤镉积累量及形态的影响上,采用花生壳生物炭可以减少不同镉污染程度下小白菜中镉的积累量^[13],生物炭缓解镉污染对植物安全性及生长方面影响的研究鲜有报道。不同材料生物炭的理化性质有所差异,势必会影响镉的吸附效果。黑龙江省作为中国的农业大省,玉米种植面积非常大,玉米采收后的秸秆处理已成为亟需解决的问题。为此,针对北方蔬菜生产过程中存在的镉污染土壤问题,本研究拟以小白菜为试验材料,采用盆栽方式,通过模拟土壤镉污染环境,研究施用玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响,明确生物炭缓解蔬菜镉积累的作用机制,以为蔬菜安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小白菜品种为华东高档青梗菜,由哈尔滨市道外区亚奇种苗经销部提供,玉米秸秆生物炭(以玉米秸秆为原料,在 400 °C 条件下烧制而成)由东北农业大学资源与环境学院提供,供试土壤为东北农业大学向阳基地的常规土壤,供试土壤和玉米秸秆生物炭的理化性质见表 1。

为 D1、D2、D3。同时,也将玉米秸秆生物炭按照上述施用量施入常规土壤中,处理代码分别为 T1、T2、T3。以不添加镉且不添加玉米秸秆生物炭的处理为对照 1(CK1),以添加镉但不添加玉米秸秆生物炭的处理为对照 2(CK2),将尿素、过磷酸钙、硫酸钾按照 2:2:1 的用量比例进行混合,并与玉米秸秆生物炭一起添加到常规土壤和镉污染土壤中。将小白菜种子直接播种在盆中,每盆保苗 3 株,每个处理 10 盆,共 30 株,3 次重复,随机区组排列,在小白菜生长发育期间进行常规管理。

从播种后第 20 d 开始随机取样,测定相关指标[土壤总镉含量、小白菜可食用部位镉含量、叶绿素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、超氧化物歧化

酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性],之后每隔7 d取样1次,连续取样5次。在最后1次取样时测定植株自然伸展高度、叶片开展度和单株鲜质量。土壤有效态镉含量采用 Tessier 提取法测定^[14],土壤总镉含量采用 GB/T 17141-1997 原子吸收法测定^[15],小白菜可食用部位镉含量采用 HNO₃-HClO₄ 消煮法测定^[16],叶绿素含量的测定采用乙醇提取比色法^[17],可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[18],可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[18],POD 活性的测定采用愈创木酚法^[18],SOD 活性的测定采用氮蓝四唑法^[18],CAT 活性的测定采用高锰酸钾滴定法^[17]。

用 SPSS 23.0 数据处理软件进行数据分析与统计,采用 Duncan's 新复极差法分析差异显著性。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆生物炭对土壤及小白菜可食用部位镉含量的影响

2.1.1 小白菜可食用部位镉含量

表 2 显示,在常

规土壤中种植的小白菜,无论是否添加玉米秸秆生物炭,其可食用部位均存在极微量的镉。当小白菜种植于镉污染土壤中时,随着小白菜的生长,植株体内镉含量逐渐增加。对于没有施用玉米秸秆生物炭的 CK2,在小白菜播种后第 34 d 时可食用部位镉含量已经超过了 0.200 mg/kg(叶菜类蔬菜中镉的最大限量为 0.200 mg/kg),此时可食用部位已经不安全了。施用玉米秸秆生物炭可以在一定程度上减少小白菜对镉的吸收,表现为在测定的各个时间段,种植在镉污染土壤中的小白菜可食用部位镉含量均随着玉米秸秆生物炭施用量的增加而降低。在播种后第 34 d,D1 处理下小白菜可食用部位镉含量虽然显著低于 CK2,但也存在超标现象,D3 处理下小白菜可食用部位镉含量略低于 D2,两者之间差异不显著,均显著低于 CK2,并且镉含量未超标。播种后第 48 d,D2 处理下小白菜可食用部位镉含量为 0.195 mg/kg,即将超标,D1、D2、D3 处理下小白菜可食用部位镉含量与 CK2 相比,分别降低了 27.6%、45.1%和 49.0%。

表 2 玉米秸秆生物炭对小白菜可食用部位镉含量的影响

Table 2 Effects of corn-stalk biochar on the content of cadmium in edible parts of Chinese cabbage

处理	小白菜可食用部位镉含量(mg/kg)				
	播种后 20 d	播种后 27 d	播种后 34 d	播种后 41 d	播种后 48 d
CK1	0.003±0.001c	0.004±0.001d	0.004±0.001d	0.004±0.001d	0.006±0.002d
T1	0.003±0.001c	0.003±0.001ef	0.004±0.001d	0.004±0.001d	0.006±0.001d
T2	0.002±0.001c	0.003±0.001ef	0.003±0.001de	0.003±0.001de	0.004±0.002e
T3	0.002±0.001c	0.002±0.001f	0.003±0.001de	0.002±0.001e	0.004±0.001e
CK2	0.021±0.001a	0.112±0.010a	0.239±0.019a	0.247±0.021a	0.355±0.011a
D1	0.019±0.001a	0.074±0.005b	0.201±0.011b	0.209±0.009b	0.257±0.020b
D2	0.018±0.001a	0.050±0.002c	0.161±0.016c	0.186±0.019bc	0.195±0.022c
D3	0.012±0.001b	0.048±0.005c	0.146±0.007c	0.164±0.012c	0.181±0.015c

CK1:不添加镉且不添加玉米秸秆生物炭;CK2:添加镉但不添加玉米秸秆生物炭;D1:镉污染土壤中施入 10 g/kg 玉米秸秆生物炭;D2:镉污染土壤中施入 20 g/kg 玉米秸秆生物炭;D3:镉污染土壤中施入 30 g/kg 玉米秸秆生物炭;T1:常规土壤中施入 10 g/kg 玉米秸秆生物炭;T2:常规土壤中施入 20 g/kg 玉米秸秆生物炭;T3:常规土壤中施入 30 g/kg 玉米秸秆生物炭。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 土壤镉含量 表 3 显示,常规土壤中虽然存在镉,但其含量很低。在镉污染土壤中,随着小白菜的生长,土壤中的镉含量逐渐降低。施用玉米秸秆生物炭可以有效降低镉污染土壤中镉的含量,在测定的各个时间段,镉污染土壤中镉含量均随着玉米秸秆生物炭施用量的增加而降低。对同一测定时间下的土壤镉含量进行方差分析,发现

在镉污染土壤条件下种植的小白菜不管施不施用玉米秸秆生物炭,其土壤镉含量均高于常规土壤。D3 处理下土壤镉含量低于 D2 处理,两者在小白菜播种后第 27 d 表现出显著差异,而在其他时期的差异均不显著。在小白菜播种后第 48 d,D1、D2、D3 处理的土壤镉含量与 CK2 相比,分别降低 9.6%、21.1%和 25.4%。

表3 玉米秸秆生物炭对小白菜土壤中镉含量的影响

Table 3 Effects of corn-stalk biochar on soil cadmium content in Chinese cabbage

处理	土壤镉含量 (mg/kg)				
	播种后 20 d	播种后 27 d	播种后 34 d	播种后 41 d	播种后 48 d
CK1	0.08±0.01c	0.08±0.01c	0.07±0.01c	0.06±0.01c	0.06±0c
T1	0.07±0.01cd	0.07±0.01cd	0.06±0.01cd	0.05±0.01cd	0.04±0.01cd
T2	0.07±0.01cd	0.06±0.01d	0.05±0.01d	0.04±0.01de	0.03±0.02de
T3	0.06±0.01d	0.05±0.01e	0.05±0.01d	0.03±0.01e	0.02±0.01e
CK2	1.62±0.11a	1.59±0.07a	1.34±0.08a	1.18±0.05a	1.14±0.09a
D1	1.53±0.05a	1.40±0.11ab	1.31±0.05a	1.17±0.07a	1.03±0.05a
D2	1.45±0.05ab	1.36±0.05b	1.25±0.10ab	1.05±0.07ab	0.90±0.06b
D3	1.32±0.09b	1.15±0.06c	1.14±0.09b	0.97±0.06b	0.85±0.08b

CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 玉米秸秆生物炭对小白菜生长的影响

表 4 显示,常规土壤中小白菜处于正常生长状态,随着玉米秸秆炭生物炭的施用量逐渐增加,小白菜的自然伸展高度、叶片开展度、单株鲜质量先增加后降低,T2 处理下小白菜生长状态最好,自然伸展高度、叶片开展度、单株鲜质量显著高于 CK1。在镉污染土壤中种植的小白菜生长受到抑制,表现为自然伸展高度低、叶片开展度低、单株鲜质量低,施入玉米秸秆生物炭在一定程度上缓解了镉的危害。CK1 处理下小白菜的自然伸展高度、叶片开展度、单株鲜质量均显著高于 CK2。D2 处理下小白菜的自然伸展高度和叶片开展度均略低于 CK1,均高于 D3 和 CK2。D2 处理下小白菜的单株鲜质量略低于 CK1,两者之间差异不显著。

表4 玉米秸秆生物炭对小白菜生长的影响

Table 4 Effects of corn-stalk biochar on the growth of Chinese cabbage

处理	自然伸展高度 (cm)	叶片开展度 (cm)	单株鲜质量 (g)
CK1	20.27±0.58c	18.30±0.83b	84.97±2.52bc
T1	21.13±0.48b	18.73±0.49b	86.47±1.93b
T2	23.87±0.76a	20.80±0.83a	92.80±0.94a
T3	21.80±0.94b	19.87±0.37a	88.80±1.50b
CK2	18.17±0.25e	15.10±0.59d	56.17±3.58d
D1	18.73±0.42d	16.50±0.62c	65.73±6.05d
D2	20.20±0.62c	18.27±0.33ab	79.63±2.87cd
D3	19.13±0.87d	17.57±0.68bc	71.67±2.45d

CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 玉米秸秆生物炭对小白菜可食用部位可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量的影响

图 1 和图 2 显示,随着小白菜植株的生长,小白

菜可食用部位可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量总体呈先升高后降低的趋势。在常规土壤中种植小白菜,T1、T2、T3 处理下小白菜可食用部位可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量均高于 CK1,T1 与 CK1 之间差异不显著,T2 处理下的可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量均最高。在镉污染土壤中种植小白菜,其可食用部位的可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量明显低于常规土壤中的小白菜,施用玉米秸秆生物炭可以提高小白菜的可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量。

2.4 玉米秸秆生物炭对小白菜叶片叶绿素含量的影响

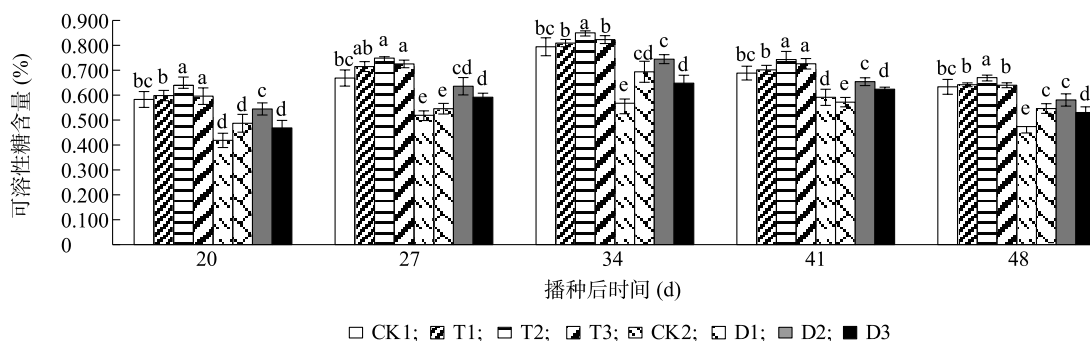
图 3 显示,在常规土壤中种植小白菜,T1、T2、T3 处理下小白菜叶片的叶绿素含量高于 CK1,其中 T2 处理下小白菜叶片的叶绿素含量最高。在镉污染土壤中种植小白菜,其叶片的叶绿素合成受到抑制,使叶绿素含量不同程度地下降,施用玉米秸秆生物炭可以促进叶绿素的合成,使叶绿素含量有不同程度提升。随着小白菜的生长,各个处理中小白菜叶片叶绿素含量总体呈先升高后降低的趋势。D1、D2、D3 处理的小白菜叶片叶绿素含量在播种后第 34 d 时达到最大值。在同一测定时间,D2 处理下小白菜叶片叶绿素的含量显著高于 CK2。

2.5 玉米秸秆生物炭对小白菜叶片相关酶活性的影响

图 4 显示,在镉污染土壤中生长的小白菜体内 SOD、POD、CAT 活性在测定的各个时间内均高于 CK1,T1、T2、T3 处理下小白菜体内 SOD、POD、CAT 活性整体高于 CK1。CK2 处理下小白菜体内的 SOD、POD、CAT 活性最高,施用玉米秸秆生物炭后,

镉污染土壤中生长的小白菜体内 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性所有下降,其中 D2 处理下的 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性

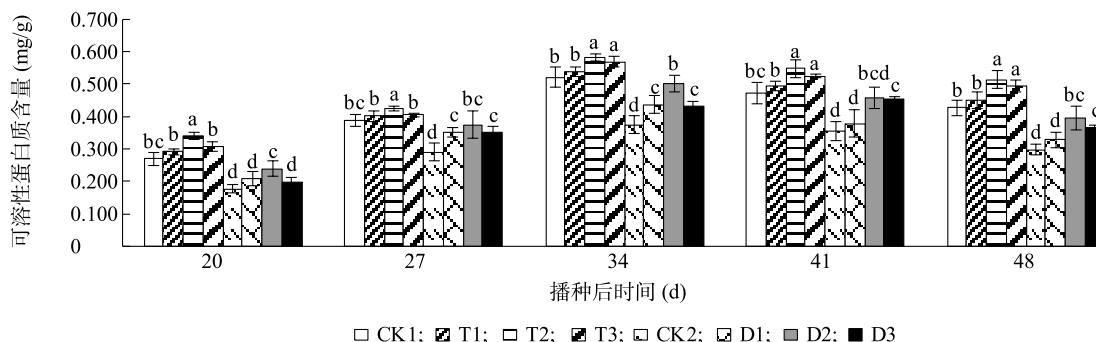
最低,表明在镉污染土壤中施用玉米秸秆生物炭可以缓解镉胁迫。



CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。图中同一播种后时间不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 玉米秸秆生物炭对小白菜可溶性糖含量的影响

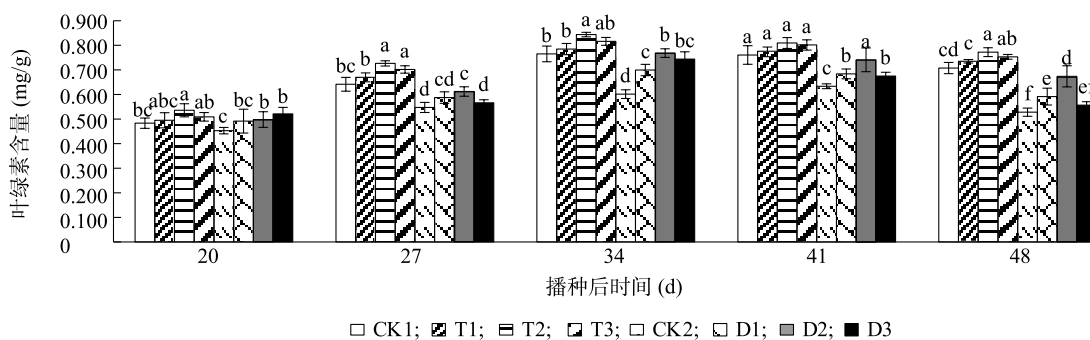
Fig.1 Effects of corn-stalk biochar on soluble sugar content of Chinese cabbage



CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。图中同一播种后时间不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 玉米秸秆生物炭对小白菜可溶性蛋白质含量的影响

Fig.2 Effects of corn-stalk biochar on soluble protein content of Chinese cabbage



CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。图中同一播种后时间不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

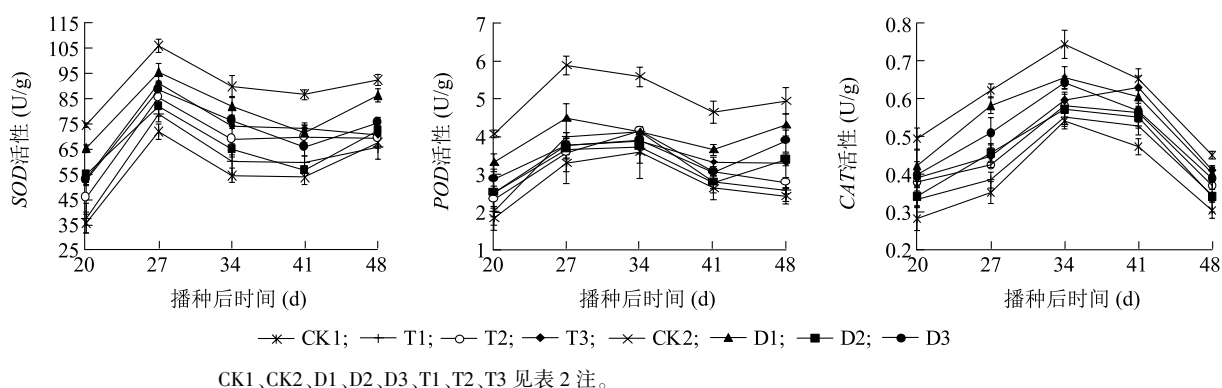
图 3 玉米秸秆生物炭对小白菜叶片叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of corn-stalk biochar on chlorophyll content in leaves of Chinese cabbage

3 讨论

镉是植物和人体中非必需的金属元素之一,被吸收后会产生一系列毒害作用。本研究结果表明,将小白菜播种于常规土壤中,土壤及小白菜可食用

部位均检测出微量镉,原因可能是农田中多年施用肥料,即使施用了玉米秸秆生物炭也存在微量镉。将小白菜播种于镉污染土壤中,随着小白菜的不断生长,其可食用部位的镉含量逐渐增加,而土壤镉含量随着小白菜的生长而逐渐减小。施用玉米秸秆生



CK1、CK2、D1、D2、D3、T1、T2、T3 见表 2 注。

图 4 玉米秸秆生物炭对小白菜叶片相关酶活性的影响

Fig.4 Effects of corn-stalk biochar on activities of related enzymes in Chinese cabbage

物炭的处理与不施用玉米秸秆生物炭的处理相比,小白菜可食用部位的镉含量较低,说明玉米秸秆生物炭可有效减少小白菜可食用部位的镉含量,这与毛懿德等^[19]的研究结果一致。生物炭缓解镉污染的原因主要有 3 个:一是生物炭属于碱性钝化材料,可提高土壤 pH,在碱性条件下镉离子可形成沉淀,降低镉的活性,减少植物对镉的利用,降低其吸收量;二是生物炭的比表面积大,含有羟基、羧基等多种含氧官能团,能够吸附镉离子,阻碍镉迁移;三是土壤中添加生物炭,会提高土壤中有机质的含量,有机质含量的升高可促进土壤有机酸和腐殖酸的生成,有机酸和腐殖酸与镉离子发生反应,降低镉的有效性^[20-21]。

镉对植物的影响不仅表现在镉积累上,在植物的生长中也起到作用,如会导致植株矮小、叶片卷曲泛黄以及减产等^[22]。本研究结果表明,在常规土壤中,施用 20 g/kg 玉米秸秆生物炭的小白菜长势最佳。在镉污染土壤中,小白菜生长受到抑制,其自然伸展高度、叶片开展度、单株鲜质量均有所降低,而施入玉米秸秆生物炭后小白菜的生长加快,说明玉米秸秆生物炭可以缓解镉对小白菜生长的抑制,这与王晋等^[23]的结果一致。在镉污染土壤中施用 20 g/kg 玉米秸秆生物炭时,小白菜的自然伸展高度、叶片开展度、单株鲜质量均达到了最大值,说明在镉污染土壤中施入 20 g/kg 生物炭,土壤孔隙中吸附的生物炭基本趋于饱和,继续增加玉米秸秆生物炭施用量,会影响根系对矿质营养元素的吸收,这也是本试验中 30 g/kg 玉米秸秆生物炭处理下的小白菜生长指标低于 20 g/kg 玉米秸秆生物炭处理的原因。夏红霞等^[24]发现木梨生物炭和酒糟生物炭均与小白

菜的生长发育呈正相关,马丽等^[25]认为过量的小麦秸秆生物炭与草莓生长呈负相关,产生这种不一致的结果可能是因为生物炭的制作条件、制作材料、作物品种、种植环境等不同。

叶绿素是一类与光合作用有关的色素,其含量高低决定光合作用的强弱^[26]。光合作用强,植物的生长代谢旺盛,可溶性蛋白质、可溶性糖含量增加,维持植物的正常代谢^[27-28]。同时,SOD、POD、CAT 是植物酶系统中的三大保护酶,其协同作用可抵抗活性氧自由基对细胞膜的毒害,抵抗逆境环境^[29]。本试验研究结果表明,在常规土壤中,施用玉米秸秆生物炭可不同程度地提高小白菜可溶性糖、可溶性蛋白质、叶绿素含量及叶片相关酶活性。在镉污染土壤中,随着玉米秸秆生物炭施用量的增加,小白菜的可溶性糖、可溶性蛋白质含量表现为先升高后降低,而叶片相关酶活性整体表现为先降低后升高,这与冀倩^[30]和金睿等^[31]的结果一致,说明玉米秸秆生物炭的施用可有效缓解镉对小白菜的毒害。当重金属镉进入小白菜体内后,产生大量的活性氧,引发氧化胁迫和膜损伤,并且镉离子与其他物质结合形成络合物,能抑制可溶性蛋白质的合成,而玉米秸秆生物炭的施用,激活了小白菜对镉污染的应对机制,减轻了小白菜的脂质过氧化程度。当小白菜所受镉胁迫降低时,小白菜叶片中叶绿素含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量增加^[32]。施用适量玉米秸秆生物炭有助于激活小白菜的抗逆性,但过量时会对小白菜的生理代谢产生不利影响。镉的形态有可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机结合态及残渣态,其中对植物直接造成危害的主要是可交换态的镉,各种形态镉之间相互转化主要受 pH、有机

质含量、土壤水分等因素影响^[33]。随着植物的生长,土壤中的镉逐渐被根系吸收,在植物体内运转积累,这个过程可能也会影响到镉的形态,这方面还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 席晋峰. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 中国金属通报, 2018(12): 271-272.
- [2] 王公卿. 重金属镉对小麦的影响[J]. 河南农业, 2017(4): 22-25.
- [3] 齐双. 土壤重金属植物修复技术研究进展[J]. 农家参谋, 2018(5): 69-70.
- [4] 王欣梅, 肖革新, 曹贤文, 等. 湖南省大米中镉污染风险监测现状分析及应对策略[J]. 环境卫生学杂志, 2019, 9(4): 396-400, 404.
- [5] LIU P, YANG Y A. Effects of molybdenum and boron on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean leaves[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(5): 461-466.
- [6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB2762-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-17.
- [7] 郭晓静. 镉污染土壤上六种种植模式蔬菜产量和镉积累的差异[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [8] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(6): 82-90.
- [9] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. Advances in Agronomy, 2010, 105(1): 47-82.
- [10] 黄涵宇. 生物炭对水稻土中镉生物有效性及稻米中镉含量影响的研究[D]. 安庆: 安庆师范大学, 2018.
- [11] 曹莹, 邸佳美, 沈丹, 等. 生物炭对土壤外源镉形态及花生籽粒富集镉的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 688-693.
- [12] 朱永琪. 生物炭对土壤外源镉形态和棉花镉吸收的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [13] 王义祥, 赖永翔, 叶菁, 等. 生物炭对不同镉污染土壤钝化效果和小白菜镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 713-718.
- [14] TESSIER A, CAMPBELL P, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [15] 国家环境保护局科技标准司. 土壤环境质量标准: GB/T17141-1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 1-3.
- [16] 闫雷, 朱园辰, 陈辰, 等. 镉在黄瓜幼苗中的化学形态及亚细胞分布[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1864-1871.
- [17] 张宪政. 植物叶绿素含量测定方法比较研究[J]. 沈阳农学院学报, 1985, 16(4): 81-84.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 毛懿德, 铁柏清, 叶长城, 等. 生物炭对重污染土壤镉形态及油菜吸收镉的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 579-582.
- [20] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 721-728.
- [21] 许妍哲, 方战强. 生物炭修复土壤重金属的研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(2): 156-159, 172.
- [22] CANNATA M G, CARVALHO R, BERTOLI A C, et al. Effects of cadmium and lead on plant growth and content of heavy metals in arugula cultivated in nutritive solution[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(5): 952-961.
- [23] 王晋, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 不同生物炭浸提液对水稻发芽及幼苗发育的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 50-55.
- [24] 夏红霞, 朱启红, 刘希东, 等. 生物炭对小白菜幼苗生长及其生理生化特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(2): 102-106.
- [25] 马丽, 齐红志, 闫明, 等. 生物炭对连作障碍条件下土壤微生物和草莓生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 142-146.
- [26] 吴飞燕, 伊力塔, 李修鹏, 等. 不同光照强度对石柞幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 88-92.
- [27] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [28] 杨红霞, 陈俊良, 刘巍. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 1-8.
- [29] BHADURI A M, FULEKAR M H. Antioxidant enzyme responses of plants to heavy metal stress[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2012, 11(1): 55-69.
- [30] 冀倩. 生物炭缓解空心菜铬污染的效果及其生态化学机制初探[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [31] 金睿, 刘可星, 艾绍英, 等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤形状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9): 1480-1487.
- [32] 李霞, 阎秀峰, 于涛. 水分胁迫对黄粟幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2353-2356.
- [33] 闫帅成, 张克峰, 刘雷, 等. 土壤中镉的形态及其影响因素研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊): 354-358.

(责任编辑: 王妮)