

悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2118–2126.

YUE Fei-xue, LI Ji-wei, WANG Yan-fang, et al. Effects of soil amendments with stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2118–2126.

施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响

悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 刘 领*

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:为探讨秸秆生物炭与鸡粪单独及其联合施用对镉(Cadmium, Cd)污染土壤的修复效应,采用模拟Cd胁迫盆栽试验,研究了施用秸秆生物炭(20、40 g·kg⁻¹土壤)、鸡粪(20、40 g·kg⁻¹土壤)、秸秆生物炭和鸡粪混合(各20 g·kg⁻¹土壤)对Cd胁迫下玉米生长及Cd吸收的影响。结果表明:(1)与对照相比,施用生物炭和鸡粪不同处理均显著增加Cd胁迫下玉米的株高和生物量,提高玉米叶片中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性,降低丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量。(2)与对照相比,施用生物炭和鸡粪不同处理均显著降低玉米根、茎、叶中Cd含量、富集系数、转运系数及土壤有效态Cd含量。(3)与鸡粪相比,秸秆生物炭降低土壤中有效态Cd含量和玉米组织中Cd含量效果优于鸡粪,而鸡粪促进玉米生长效果优于生物炭。(4)相比而言,施用40 g·kg⁻¹鸡粪处理促进Cd胁迫下玉米生长和抗氧化酶活性效果最佳,玉米株高和生物量分别较对照增加59.7%和72.5%,SOD、POD和CAT活性分别较对照提高48.4%、69.4%、81.9%,而生物炭和鸡粪等量复配处理对降低玉米根、茎、叶Cd含量和土壤有效态Cd含量效果最优,根、茎、叶Cd含量分别较对照降低46.9%、49.3%、63.9%,土壤有效态Cd含量降低61.1%。总之,采用生物炭和鸡粪进行Cd污染土壤修复均可通过增强玉米的抗氧化性能,从而促进Cd胁迫下玉米生长;而且二者联合应用更有利于降低土壤Cd的生物有效性,减少玉米对Cd吸收和积累。

关键词: 秸秆生物炭; 鸡粪; 玉米生长; 抗氧化酶活性; 镉吸收; 土壤有效态Cd含量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2118-09 doi:10.11654/jaes.2018-0242

Effects of soil amendments with stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress

YUE Fei-xue, LI Ji-wei, WANG Yan-fang, LIU Ling*

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: To explore the effects of the stalk-derived biochar and chicken manure, individually or in combination, on the remediation of Cd-contaminated soil, we conducted a pot experiment to investigate the influences of soil amendments with biochar (20, 40 g·kg⁻¹ soil), chicken manure (20, 40 g·kg⁻¹ soil), or a combination of biochar and chicken manure (each at 20 g·kg⁻¹ soil) on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress. Results showed that all treatments with stalk-derived biochar and chicken manure addition significantly increased the maize plant height and biomass and the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) but decreased the malondialdehyde (MDA) contents when compared to those of the control treatment, this indicated soil amendment with stalk-derived biochar and/or chicken manure could alleviate the phytotoxicity of Cd and its negative effects on maize. Stalk-derived biochar and chicken

收稿日期: 2018-02-26 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 悦飞雪(1990—), 女, 河南滑县人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复与利用方面的研究。E-mail: yuefeixue1935@126.com

*通信作者: 刘 领 E-mail: liulinghenan@126.com

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(31700367); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2016GGJS-062)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (31700367); Funding Program for University Key Young Teachers from the Education Bureau of Henan Province, China(2016GGJS-062)

manure treatments also remarkably decreased the Cd concentration in the root, stem, and leaf of the maize, bioconcentration factor (BCF), translocation factor (TF), and soil-available Cd content. Amendment with chicken manure alone more fully facilitated maize growth whereas biochar only amendment was more effective at inducing soil alkalization and contributing to Cd immobilization. Compared to the control, the addition of $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ chicken manure produced the largest effects on promoting maize growth and antioxidant enzyme activities, with 59.7% and 72.5% higher plant height and biomass, respectively, and 48.4%, 69.4%, and 81.9% higher activities of SOD, POD, and CAT, respectively. The combined treatment with biochar and chicken manure was more efficient at reducing Cd uptake in the root, stem, and leaf of maize and soil-available Cd content, with 46.9%, 49.3%, and 63.9% lower Cd contents in the root, stem, and leaf of maize, respectively, and 61.1% lower soil-available Cd content. In general, soil amendment with stalk-derived biochar and/or chicken manure can enhance the activities of antioxidant enzymes, thus promoting the growth of maize under Cd stress. Moreover, a combination of biochar and chicken manure is more effective at reducing soil Cd bioavailability and decreasing Cd uptake by maize tissues.

Keywords: stalk-derived biochar; chicken manure; maize growth; antioxidant enzymatic activities; Cd uptake; soil-available Cd content

随着工业化、农业化的集约发展,大量有毒重金属通过各种方式被排放到土壤、水体、大气中,严重污染了人类和动植物赖以生存的环境,土壤重金属污染尤为突出^[1-2]。镉(Cd)是土壤重金属污染的重要元素,也是对动、植物毒性较大的一种元素^[3]。土壤中的Cd过量不仅导致植物深受Cd污染的毒害,而且通过食物链途径给人类健康带来巨大的危害^[4]。因此,为了保证土壤质量和农业的可持续发展,修复土壤重金属Cd污染变得尤为重要。

生物炭应用于土壤重金属修复已成为当前研究的热点。生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧条件下高温裂解形成的富碳产物,其具有孔隙结构丰富、比表面积大、理化性质稳定的特点^[5]。生物炭的特殊结构、高的表面负电荷密度、大量的含氧功能基团,能够吸附固定重金属离子^[6-7]。李力等^[8]研究表明生物炭表面具有含氧官能团和 π 共轭芳香结构,提供了较多的重金属离子吸附和交换位点,具有较强的重金属Cd吸附能力。高瑞丽等^[9]研究表明水稻秸秆生物炭施入Cd复合污染的土壤中室内培养,促进了有效态Cd向氧化态Cd转化。因此,生物炭对土壤中的重金属有很高的吸附容量。研究表明生物炭由于其含有营养成分较少导致促进植物生长能力有限,但能够固持养分,减少水溶性营养离子的迁移和淋失^[10]。

有机肥料中含有大量植物生长所需的营养元素和有机胶体,并产生许多胶黏物质,使土壤颗粒胶结起来变成稳定的团粒结构,极大增加土壤吸附表面,提高土壤保水、保肥和透气性^[11-12],还能够降低重金属的有效性^[13]。周利强等^[14]研究表明施用菜籽饼和猪粪均能缓解重金属对水稻的毒害作用,促进水稻生长,显著增加地上部生物量和籽粒产量,降低糙米中重金属浓度。乔莎莎等^[15]研究表明施用牛粪可以不

同程度地缓解Cd胁迫对小麦生长的影响,延缓小麦根系衰老,最终使小麦产量增加,籽粒中的Cd含量降低。因此,选取有机肥作为土壤改良剂不仅可以提高土壤养分,促进作物的生长和发育,还可以通过改变重金属在土壤中的形态分布从而降低其生物有效性,减少作物对重金属的吸收。

尽管许多研究表明生物炭和有机肥单独作为土壤改良剂应用对土壤重金属修复具有良好效应,然而二者联合应用的报道较少。研究表明生物炭和有机肥结合能够有效降低土壤中水溶性重金属Cd、Zn含量^[16],但生物炭与有机肥联合施用对植物吸收重金属的影响机制仍不十分清楚。鸡粪是我国常用的有机肥料之一,因此,探讨生物炭和鸡粪混合来改良土壤对修复重金属污染具有很大潜力。本研究采用盆栽Cd模拟试验,探究秸秆生物炭和鸡粪对Cd胁迫下玉米生长、抗氧化酶活性及其对Cd吸收的影响,旨在为重金属污染的土壤修复和农业安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2016年在河南科技大学农场隔雨棚中进行($34^{\circ}61'N$, $112^{\circ}42'E$)。供试土壤采自河南科技大学农场小麦田0~20 cm耕层,质地为黏壤土;土壤过2 mm筛后风干备用,基本理化性质见表1。供试生物炭材料为购买于河南商丘三利新能源有限公司的小麦秸秆生物炭(于 $450^{\circ}C$ 条件下小麦秸秆限氧热解制成),基本理化性质:pH为10.4,比表面积为 $8.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,有机碳为52.2%,全氮为 $5.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷为 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾为 $23.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试腐熟干鸡粪购买于洛阳启禾生态农业科技有限责任公司,基本理化性质:pH

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	总氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	土壤机械组成 Mechanical composition/%		
						黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
7.8	12.62	0.84	46.66	17.13	106.5	18.81	32.24	48.95

为6.8,有机碳含量为41.6%,全氮为24.3 g·kg⁻¹,全磷20.5 g·kg⁻¹,全钾为34.3 g·kg⁻¹。供试玉米(*Zea mays* L.)品种为“科大16”。

1.2 试验设计

试验共设6个处理:(1)CK:对照(不施用添加剂);(2)LB:生物炭添加量为20 g·kg⁻¹土壤;(3)HB:生物炭添加量为40 g·kg⁻¹土壤;(4)LM:鸡粪添加量为20 g·kg⁻¹土壤;(5)HM:鸡粪添加量为40 g·kg⁻¹土壤;(6)BM:鸡粪和生物炭添加量各20 g·kg⁻¹土壤。将各处理土壤与改良剂混合均匀装入塑料盆中(盆口直径20 cm,高25 cm),每盆净重4 kg。每个处理8个重复,共计48盆,随机排列于隔雨棚中。

为了模拟中度Cd污染胁迫水平(依据我国土壤环境质量标准GB 15618—1995),通过向盆中添加Cd(CH₃COO)₂溶液的方法使土壤Cd污染水平为8 mg·kg⁻¹。土壤经吸附沉淀两个月后,于2016年5月10日播种,每盆预先播种2粒,待出苗后每盆定苗1株,植株定期定量浇水,期间不进行肥料投入。玉米播种后45 d选择各处理中的4个重复,测定Cd胁迫下玉米叶片的生理指标。80 d后测定各处理剩余4个重复玉米的株高,并整株收获。植株按根、茎、叶三部分分离,认真清洗干净后放入烘箱中,先在105℃杀青30 min,再在70℃烘干48 h至样品恒质量,称取各部分干质量,并计算干物质生物量。烘干的植物组织用粉碎机粉碎后过筛装于塑料封口袋中保存,用于测定各部位的Cd含量。采集植物根际的土壤样品0.5 kg,自然风干、过筛,用于测定土壤中有有效态Cd含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植物生理指标

丙二醛(Malondialdehyde, MDA)和抗氧化酶活性的测定:取0.5 g新鲜叶片,加液氮充分研磨后,用2 mL 10%三氯乙酸溶液提取丙二醛。加入2 mL含1%PVP的0.1 mol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH 5.5~8.8),于4℃下13 000 r·min⁻¹离心20 min,所得上清液即为酶粗提液^[17]。

MDA含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法:取提

取液2 mL,加2 mL 0.6%的TBA溶液,放入具塞试管混匀,将混合液于沸水浴上反应15 min,迅速冷却后再离心,取上清液测定450、532、600 nm波长下的吸光度,同时测定空白。按以下公式计算:

$$V_{MDA}(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})=6.45(OD_{532}-OD_{600})-0.56OD_{450}$$

超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)测定采用氮蓝四唑还原法^[18]:以每单位时间内抑制光化还原50%的氮蓝四唑(NBT)为1个酶活单位(U),以样品蛋白质含量计算酶活性。

过氧化物酶(Peroxidase, POD)测定采用愈创木酚法^[19]:以每分钟A₄₇₀增加0.01为1个酶活单位(U),以样品蛋白质含量计算酶活性。

过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性采用紫外吸收法测定^[20]:酶活性用每分钟A₂₄₀减少0.01的酶量为1个酶活单位(U),以样品蛋白质含量计算酶活性。

1.3.2 植物中Cd含量

准确称取0.5 g各部位植物样品置于消煮管中,优级纯HNO₃-HClO₄(4:1)消煮后,采用原子吸收分光光度法(VARIAN AA240)测定。

1.3.3 土壤指标

土壤有效态Cd含量的测定:有效态Cd采用DTPA溶液(DTPA-CaCl₂-TEA体系,6 mol·L⁻¹ HCl调节pH为7.3)提取,称取5.00 g土样,过2 mm筛,置于150 mL离心管中,用移液管取DTPA 20 mL,在250次·min⁻¹的水平振荡器上恒温25℃振荡2 h,过滤,取上清液,采用原子吸收分光光度计(VARIAN AA240)测定土壤有效态Cd含量^[21]。

pH值测定:采用pH计(上海精密科学仪器有限公司,雷磁pHS-3C)进行测定,水土比为2.5:1。

1.3.4 富集系数和转运系数计算

玉米Cd的生物富集系数(Bio-concentration factor, BCF)和生物转运系数(Translocation factor, TF)计算如下^[22]:

$$BCF=C_{\text{地上部分}}/C_{\text{土壤}}$$

式中, $C_{\text{地上部分}}$ 是玉米地上部分所有组织Cd的总积累量与地上部组织总生物量的比值,mg·kg⁻¹; $C_{\text{土壤}}$ 是土壤中的Cd含量,mg·kg⁻¹。富集系数越大,表示玉米积

累重金属能力越强。

$$TF = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{根}}$$

式中, $C_{\text{地上部分}}$ 是玉米地上部分所有组织 Cd 的总积累量与地上部组织总生物量的比值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $C_{\text{根}}$ 是玉米根中的 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。转运系数越高,表示重金属从根部转运到地上的能力越强。

1.4 数据处理和分析

试验数据基础分析采用 Excel 2007, 处理间多重比较采用 SPSS 17.0, 作图采用 Origin 9.0。

2 结果与分析

2.1 对玉米株高和生物量的影响

由图 1 可知,与对照相比,添加生物炭和鸡粪均显著增加 Cd 胁迫下玉米的株高和生物量,表现为: $\text{HM} > \text{BM} > \text{LM} > \text{HB} > \text{LB} > \text{CK}$, 以 HM 处理对玉米生长的促进效应最佳, BM 处理次之。与对照相比,在 HM、BM 处理下玉米的株高分别增加 59.7% 和 43.6%, 生物量分别增加 72.5% 和 58.3%。就生物炭和鸡粪的施用量对玉米生长的促进效应而言,表现为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理大于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理。就生物炭和鸡粪两种添加类型对玉米生长的促进效应而言,表现为施用鸡粪处理大于生物炭处理。

2.2 对玉米叶片 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

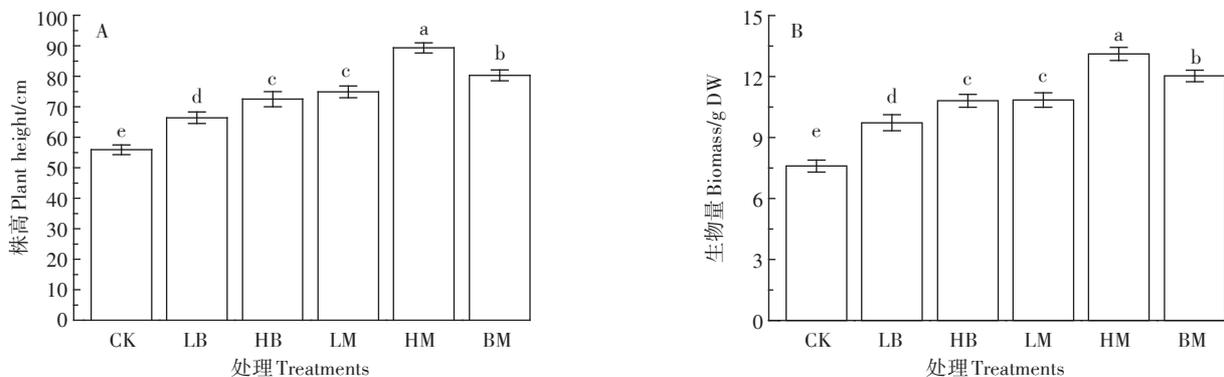
由图 2A 可知,与对照相比,不同生物炭和鸡粪处理均显著降低 Cd 胁迫下玉米叶片中 MDA 含量 ($P < 0.05$), 表现为: $\text{HM} < \text{BM} < \text{LM} < \text{HB} < \text{LB} < \text{CK}$, 以 HM 处理

对降低玉米叶片中的 MDA 含量效果最佳, BM 处理次之。HM、BM 处理使玉米叶片中的 MDA 含量分别较对照降低 47.0% 和 44.4%。就生物炭和鸡粪的施用量对玉米的 MDA 含量降低效应而言,表现为施用量高的效果好。就生物炭和鸡粪两种添加类型对玉米叶片中的 MDA 含量降低效应而言,表现为施用鸡粪处理效果好于生物炭处理。

如图 2 所示,与对照相比,不同生物炭和鸡粪处理均显著增加 Cd 胁迫下玉米叶片中的 SOD (图 2B)、POD (图 2C)、CAT 活性 (图 2D) ($P < 0.05$), 均表现为: $\text{HM} > \text{BM} > \text{LM} > \text{HB} > \text{LB} > \text{CK}$, 其中以 HM 处理对提高玉米叶片抗氧化酶活性效果最好, 玉米叶片 SOD、POD、CAT 活性分别较对照提高 48.4%、69.4%、81.9%; 提高玉米叶片抗氧化酶活性效果较好的是 BM 处理, 玉米叶片 SOD、POD、CAT 活性分别较对照提高 39.4%、61.1%、68.4%; HM 和 BM 处理之间对提高 POD 活性和 CAT 活性未达到显著水平 ($P > 0.05$), LM 和 HB 处理之间对提高 SOD 活性未达到显著水平 ($P > 0.05$)。这表明施用 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 鸡粪处理对提高玉米的抗氧化能力效果最佳。

2.3 对玉米根、茎、叶 Cd 吸收的影响

由图 3 可知,玉米根、茎、叶重金属 Cd 含量总体表现为: 根 > 茎 > 叶, 说明 Cd 进入玉米植株体内后主要富集在根部。不同生物炭和鸡粪处理均显著降低玉米根、茎、叶重金属 Cd 含量 ($P < 0.05$), 表现为: $\text{BM} < \text{HM} < \text{LB} < \text{LM} < \text{CK}$ 。对根而言, HB、HM 处理之间差异



CK 表示对照; LB 表示生物炭添加量 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; HB 表示生物炭添加量 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; LM 表示鸡粪添加量 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; HM 表示鸡粪添加量 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; BM 表示鸡粪和生物炭添加量各 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图中不同的小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

CK, LB, HB, LM, HM, BM represent the control, biochar application of $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, biochar application of $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, chick manure application of $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, chick manure application of $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, combination of $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar and $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ chicken manure, respectively.

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments according to the LSD at $P < 0.05$. The same below

图 1 施用生物炭和鸡粪不同处理对镉胁迫下玉米株高(A)和生物量(B)的影响

Figure 1 Effects of different treatments with biochar and chicken manure addition on plant height(A) and biomass(B) of maize under Cd stress

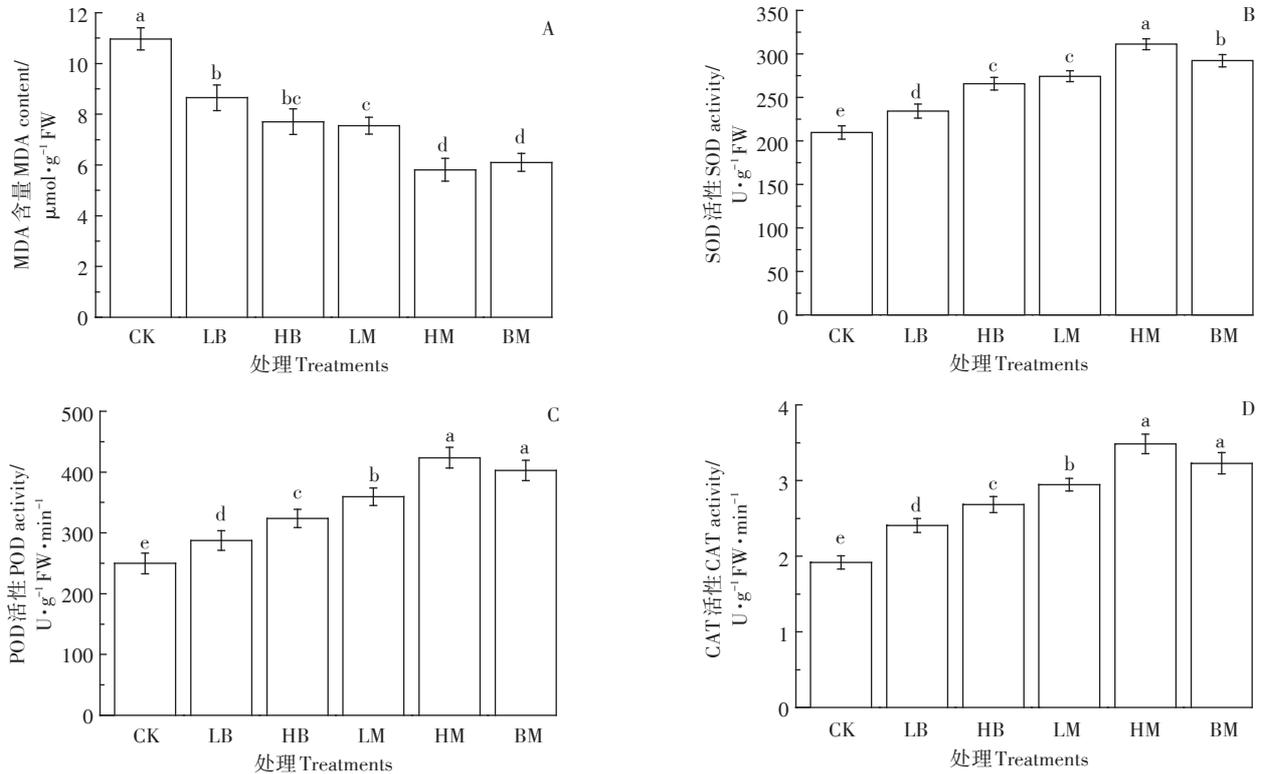


图2 施用生物炭和鸡粪不同处理对镉胁迫下玉米叶片MDA含量(A)、SOD活性(B)、POD活性(C)和CAT活性(D)的影响
Figure 2 Effects of different treatments with biochar and chicken manure addition on MDA content (A) and the activities of SOD (B), POD (C), CAT (D) under Cd stress

显著 ($P < 0.05$), LB、LM 处理之间则无显著差异 ($P > 0.05$); 对茎而言, LB、LM 处理之间差异显著 ($P < 0.05$), HB、HM 处理之间则无显著差异 ($P > 0.05$); 对叶而言, 叶中不同处理之间差异均显著 ($P < 0.05$)。其中, 降低重金属 Cd 含量效果最好的是 BM 处理, 根、茎、叶 Cd 含量分别较对照降低 46.9%、49.3%、63.9%。就生物炭和鸡粪的施用量对降低玉米组织中 Cd 含量的效应而言, 表现为 $40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理大于 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理。就生物炭和鸡粪两种添加类型对降低玉米组织中重金属 Cd 含量的效应而言, 表现为施用生物炭处理大于鸡粪处理。说明生物炭降低根、茎、叶 Cd 含量效果优于鸡粪, 而生物炭和鸡粪等量复配处理降低根、茎、叶 Cd 含量效果最佳。

2.4 对土壤 pH 值和有效态 Cd 含量的影响

由图 4A 可知, 施加生物炭可显著升高土壤 pH, 与对照相比增幅分别为 0.33 和 0.54。施加鸡粪可显著降低土壤 pH, 与对照相比降幅分别为 0.12 和 0.23。由于添加的生物炭 pH 为 10.4 呈碱性, 与土壤混合后会升高土壤 pH, 添加的鸡粪 pH 为 6.7 呈酸性, 与土壤混合后会降低土壤 pH, 而生物炭与鸡粪等量混合施用生物炭起主导作用, 与对照相比提高了土壤 pH, 但

未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

图 4B 表明, 相比于对照, 不同生物炭和鸡粪处理均显著降低土壤有效态 Cd 含量 ($P < 0.05$), 其中, LB、HM 处理之间无显著差异 ($P > 0.05$), BM 处理降低土壤 Cd 活性的效果最好, HB 处理次之。与对照相比, BM、HB 处理分别降低土壤有效态 Cd 含量 61.1% 和 51.7%。就生物炭和鸡粪的施用量对降低土壤有效态 Cd 含量的效应而言, 表现为 $40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理大于 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理。就生物炭和鸡粪两种添加类型对降低玉米组织中重金属 Cd 含量的效应而言, 表现为施用生物炭处理大于鸡粪处理。说明生物炭降低土壤中的有效态 Cd 含量效果优于鸡粪, 而生物炭和鸡粪等量复配处理降低土壤中的有效态 Cd 含量效果最佳。

2.5 对玉米 Cd 富集系数和转运系数的影响

由图 5A 可知, 相比于对照, 不同生物炭和鸡粪处理均显著降低玉米 Cd 的富集系数, 表现为: $\text{BM} < \text{HB} < \text{HM} < \text{LB} < \text{LM} < \text{CK}$ 。其中, HB 和 HM 处理之间对降低玉米 Cd 的富集系数无显著差异 ($P > 0.05$)。BM 处理对降低玉米 Cd 的富集系数效果最好, HB、HM 处理次之。BM、HB、HM 处理使玉米 Cd 的富集系数分别较对照降低 57.2%、47.0%、41.4%。

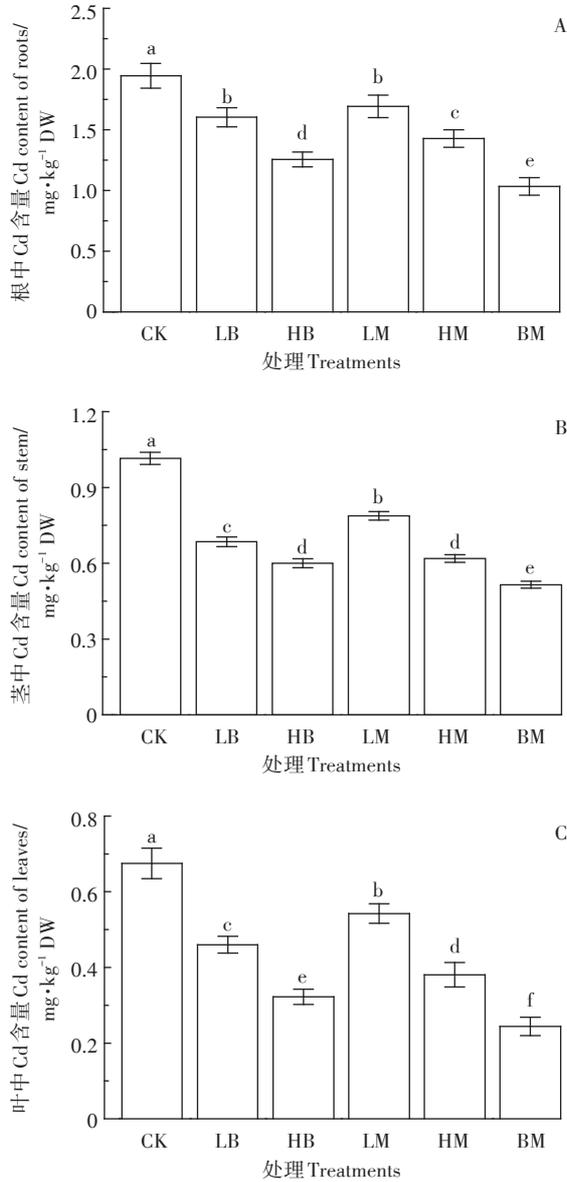


图3 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米根(A)、茎(B)、叶(C)中Cd含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments with biochar and chicken manure addition on Cd contents of root (A), stem (B) and leaf (C) in maize

由图5B可知,相比于对照,不同生物炭和鸡粪处理均显著降低玉米Cd的转运系数($P < 0.05$),表现为: $HM < BM < HB < LB < LM < CK$ 。其中,LM处理对降低玉米Cd的转运系数效果最差,其余处理之间对降低玉米Cd的转运系数无显著差异($P > 0.05$)。

3 讨论

重金属胁迫下植物的生长和生理特性会受到明显影响,施用土壤改良剂能够减轻重金属对植物的毒

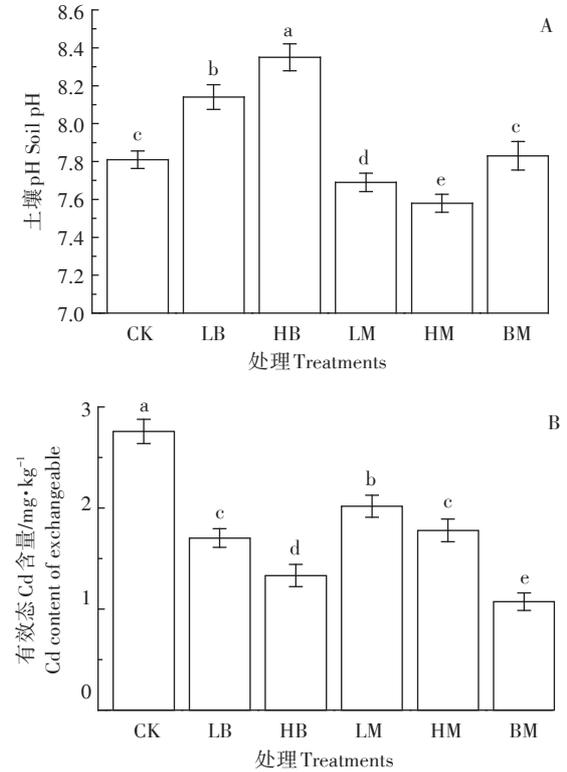


图4 施用生物炭和鸡粪不同处理对土壤pH(A)和有效态Cd含量(B)的影响

Figure 4 Effects of different treatments with biochar and chicken manure addition on soil pH value (A) and available Cd contents (B)

害作用,促进植物生长^[23]。本研究表明施用秸秆生物炭和鸡粪不同处理均显著增加玉米的株高和生物量。这与刘阿梅等^[24]Cd胁迫下施用不同粒径生物炭降低蔬菜中重金属积累、促进蔬菜生长和代允超等^[25]施入鸡粪增加小白菜生物量的研究结果一致。Cd胁迫下植物体内自由基增多,损伤细胞膜系统而造成氧化胁迫,MDA是膜脂过氧化作用的重要产物,被用作细胞膜损伤程度的指标^[17]。SOD、POD和CAT是植物体内ROS清除系统的保护酶,它们的协同作用可以防御活性氧自由基对细胞膜的伤害,减轻膜脂过氧化程度,降低Cd胁迫对植物细胞造成的伤害^[17,26]。本研究表明,施用生物炭和鸡粪不同处理均能降低MDA含量,提高SOD、POD和CAT活性。生物炭能够促进植物生长、提高抗氧化能力的原因可能是其本身特有的多孔结构,含有矿质养分能够保水保肥,改善土壤理化性质,增加土壤微生物活性^[27]。鸡粪可以促进植物生长、提高抗氧化能力的原因可能是鸡粪含有大量营养成分,可以提高土壤的团聚体结构和稳定性,改善土壤理化性状,能够明显增加土壤养分、增强土壤微

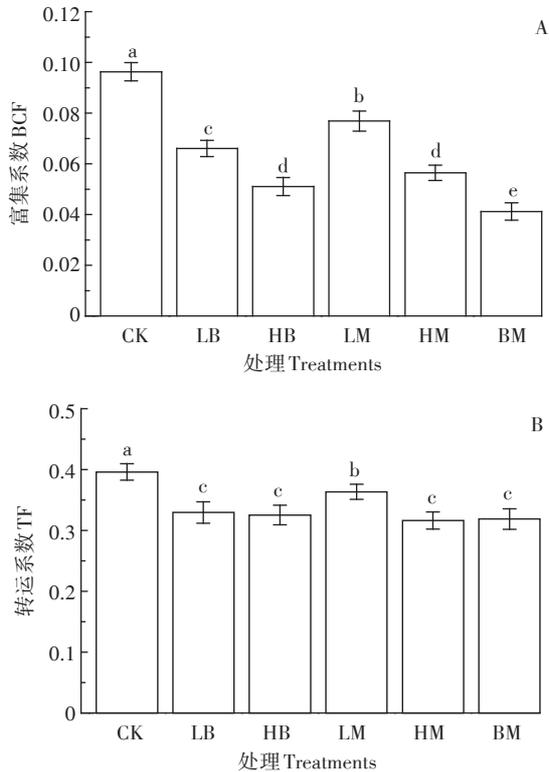


图5 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米Cd富集系数(A)和转运系数(B)的影响

Figure 5 Effects of different treatments with biochar and chicken manure addition on BCF(A) and TF(B) of Cd in maize

生物活性^[16]。本研究还发现施用鸡粪处理对促进植物生长、提高玉米的抗氧化能力效果优于施用生物炭处理,其中以 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鸡粪处理效果最优,可能的原因是鸡粪含有的矿质营养多于生物炭,改善土壤肥力效果明显优于生物炭。

施用生物炭和鸡粪对降低重金属活性具有良好效果,本研究表明施用生物炭和鸡粪不同处理均显著降低玉米根、茎、叶Cd含量,富集系数和转运系数,土壤有效态Cd含量。生物炭降低植物Cd含量的原因可能是其多孔性结构和较强的表面吸附能力能够吸附土壤中重金属,从而影响重金属的迁移,降低Cd的生物有效性^[28]。鸡粪能够降低植物Cd含量的原因可能是其富含大量有机质,施入土壤后经微生物分解会产生大量的腐植酸,这些腐植酸含有丰富的官能团,如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{NH}_2$ 以及 $-\text{SH}$ 等,对Cd离子有较强的螯合或络合作用,可以形成不溶性腐植酸Cd螯合物,进而使重金属Cd钝化,显著降低Cd的生物有效性,阻控Cd向玉米中转移^[29]。本研究还发现生物炭降低玉米组织中Cd含量和土壤有效态Cd含量效果优于鸡粪,这可能是因为鸡粪主要通

过络合重金属和增大植物生物量,产生“稀释”效应来降低植物体内重金属Cd浓度^[30],而生物炭不仅能够通过其特殊结构吸附重金属Cd改善土壤理化性质,阻控重金属Cd向植物组织中转移,还能够提高土壤pH值(图4A),通过碱化土壤来降低重金属Cd的有效性^[6-7]。

生物炭和有机肥混合施用促进作物生长和降低重金属活性已有一些研究,如王林等^[31]研究表明施用生物炭和鸡粪土壤改良剂可显著提高油菜产量,降低油菜地上部Cd含量,降低土壤有效态Cd含量,生物炭和鸡粪复配处理降低效果最佳,最大降低率为72.0%。本研究发现生物炭和鸡粪等量复配处理对降低玉米组织中Cd含量和土壤中有效态Cd含量效果优于单施鸡粪或者生物炭。这可能是由于一方面生物炭和鸡粪混合后能够改变彼此的理化性质,生物炭的表面能够被鸡粪中的腐植酸和微生物氧化,而生物炭不仅能够促进鸡粪中的腐植酸形成,还能够为鸡粪中的微生物提供良好的生存环境^[32-33];另一方面鸡粪的施加弥补了生物炭自身养分不足的缺陷,二者结合延长了肥料养分的释放期,延缓了肥料养分在土壤中的释放,有效提高肥料利用率,持续提供土壤肥力^[34],改变土壤理化性质如总有机碳、阳离子交换能力、pH等,从而降低土壤中Cd的活性,阻控Cd向玉米转移,促进植物生长,降低重金属Cd含量^[33,35]。

4 结论

(1)施用秸秆生物炭和鸡粪均能显著增加Cd胁迫下玉米的株高和生物量,显著增加玉米叶片SOD、POD、CAT活性,显著降低MDA含量,其中以施加 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鸡粪效果最佳。

(2)施用生物炭和鸡粪的不同处理均显著降低玉米根、茎、叶中Cd的含量,也显著降低土壤中的有效态Cd含量以及玉米重金属Cd的富集系数和转运系数。

(3)综合来看,生物炭和鸡粪等量复配对降低玉米组织中Cd含量和土壤中有效态Cd含量效果优于单一施用生物炭或者鸡粪,因此建议生物炭和鸡粪混合配施对玉米生长和降低玉米Cd吸收效果更好,而何种复配比例更有利于促进玉米生长和降低Cd吸收,仍需要进一步探究。

参考文献:

- [1] Kovacs H, Szemmelveisz K. Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands: A review[J]. *Chemo-*

- sphere*, 2017, 166:8-22.
- [2] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, 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, 468:843-853.
- [3] Liang X, Strawn D G, Chen J L, et al. Variation in cadmium accumulation in spring wheat cultivars: Uptake and redistribution to grain[J]. *Plant & Soil*, 2017, 421:219-231.
- [4] Yang Y, Chen W P, Wang M E, et al. Evaluating the potential health risk of toxic trace elements in vegetables: Accounting for variations in soil factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584:942-949.
- [5] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, et al. Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 110:56-67.
- [6] Xu P, Sun C X, Ye X Z, et al. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 132:94-100.
- [7] Shen X, Huang D Y, Ren X F, et al. Phytoavailability of Cd and Pb in crop straw biochar-amended soil is related to the heavy metal content of both biochar and soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168(1):245-251.
- [8] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对Cd(II)的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2277-2283.
LI Li, LU Yu-chao, LIU Ya, et al. Adsorption mechanisms of cadmium(II) on biochars derived from corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2277-2283.
- [9] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):251-256.
GAO Rui-li, ZHU Jun, TANG Fan, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1):251-256.
- [10] Sanchez-Garcia M, Albuquerque J A, Sanchez-Monedero M A, et al. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192:272-279.
- [11] Zhou Z C, Gan Z T, Shanguan Z P, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid cropland[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45(45):20-26.
- [12] Lekfeldt J D S, Kjaergaard C, Magid J. Long-term effects of organic waste fertilizers on soil structure, tracer transport, and leaching of colloids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(4):862-870.
- [13] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):243-247.
LIU Xiu-zhen, MA Zhi-hong, ZHAO Xing-jie. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):243-247.
- [14] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 等. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):383-388.
ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effects of organic amendments on the growth and heavy metal uptake of rice on a contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):383-388.
- [15] 乔莎莎, 张永清, 杨丽雯, 等. 有机肥对铅胁迫下小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4):1094-1100.
QIAO Sha-sha, ZHANG Yong-qing, YANG Li-wen, et al. Effects of organic manure on wheat growth under lead stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):1094-1100.
- [16] Beesley L, Inneh O S, Norton G J, et al. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186:195-202.
- [17] 刘颖, 李继伟, 常茜茜, 等. 芸苔属植物提取液对烤烟黑胫病发生及烟株生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6):997-1006.
LIU Ling, LI Ji-wei, CHANG Qian-qian, et al. Effects of *Brassica* extracts on occurrence of black shank disease and physiological characteristics of flue-cured tobacco[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(6):997-1006.
- [18] Madhava Rao K V, Sresty T V S. Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanuscajan* (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses[J]. *Plant Science*, 2000, 157(1):113-128.
- [19] Ghosh M, Singh S P. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2):365-371.
- [20] 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 guide of physiology of plant[M]. Guangzhou: South China Science and Technology University Press, 2006.
- [21] 袁波, 傅瓦利, 蓝家程, 等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):130-134.
YUAN Bo, FU Wa-li, LAN Jia-cheng, et al. Study on the available and bioavailability of lead and cadmium in soil of vegetable plantation[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2011, 25(5):130-134.
- [22] Xiao R, Bai J H, Lu Q Q, et al. Fractionation, transfer, and ecological risks of heavy metals in riparian and ditch wetlands across a 100-year chronosequence of reclamation in an estuary of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 517:66-75.
- [23] 杜彩艳, 木霖, 王红华, 等. 不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收Pb、Cd、As、Zn影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1515-1522.
DU Cai-yan, MU Lin, WANG Hong-hua, et al. Effects of different amendments on growth and Pb, Cd, As, Zn uptake by *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1515-1522.
- [24] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):193-198.
LIU A-mei, XIANG Yan-ci, TIAN Dai-ke, et al. Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2013, 27(5):193-198.

- [25] 代允超, 吕家珑, 刁展, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):
80-86.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soil amend-
ments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassica a chinensis* in
different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Sci-
ence*, 2015, 34(1):80-86.
- [26] Bhaduri A M, Fulekar M H. Antioxidant enzyme responses of plants to
heavy metal stress[J]. *Reviews in Environmental Science & Biotechnol-
ogy*, 2012, 11(1):55-69.
- [27] Liu L, Wang Y F, Yan X W, et al. Biochar amendments increase the
yield advantage of legume-based intercropping systems over monocul-
ture[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 237:16-23.
- [28] Huang D L, Liu L S, Zeng G M, et al. The effects of rice straw biochar
on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy
metal-contaminated sediment[J]. *Chemosphere*, 2017, 174:545-553.
- [29] Lv B Y, Xing M Y, Yang J. Speciation and transformation of heavy
metals during vermicomposting of animal manure[J]. *Bioresource Tech-
nology*, 2016, 209:397-401.
- [30] Wang Y, Xu Y A, Li D, et al. Vermicompost and biochar as bio-condi-
tioners to immobilize heavy metal and improve soil fertility on cadmi-
um contaminated soil under acid rain stress[J]. *Science of the Total
Environment*, 2017, 621:1057-1065.
- [31] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收
镉的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2851-2858.
WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Effects of bio-
char and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars
with low cadmium accumulation[J]. *China Environmental Science*,
2014, 34(11):2851-2858.
- [32] Zeng G M, Wu H P, Liang J, et al. Efficiency of biochar and compost
(or composting) combined amendments for reducing Cd, Cu, Zn and
Pb bioavailability, mobility and ecological risk in wetland soil[J]. *Rsc
Advances*, 2015, 5(44):34541-34548.
- [33] Liang J, Yang Z X, 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.
- [34] Wu H P, Lai C, Zeng G M, et al. The interactions of composting and
biochar and their implications for soil amendment and pollution reme-
diation: A review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(6):
754-764.
- [35] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅
含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9):1846-1853.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Effectiveness of different soil amelio-
rants in reducing concentrations of Cd and Pb in Chinese cabbage[J].
Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(9):1846-1853.