

秸秆生物炭和鸡粪对铅胁迫下玉米生长和生理特性的影响

刘 领, 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 通过盆栽模拟铅(Pb)胁迫试验,研究了不同秸秆生物炭添加量(20, 40 g/kg 土壤)、不同鸡粪添加量(20, 40 g/kg 土壤)、秸秆生物炭和鸡粪等量复配(各 20 g/kg 土壤)处理对 Pb 胁迫下玉米生长和生理特性的影响。结果表明:施用生物炭和鸡粪不同处理均显著增加铅胁迫下玉米的株高、鲜重、光合色素含量、光合性能和抗氧化酶活性。生物炭和鸡粪等量复配处理较对照提高鲜重 69.9%、株高 50.0%、叶绿素 b 含量 50.0%、净光合速率(P_n)97.9%、蒸腾速率(T_r)126.5%、气孔导度(G_s)132.6%、超氧化物歧化酶活性(Superoxide dismutase, SOD)68.4%、过氧化物酶活性(Peroxidase, POD)69.4%、过氧化氢酶活性(Catalase, CAT)115.3%、脯氨酸含量 88.6%、可溶性糖含量 48.6%。生物炭和鸡粪等量复配处理对促进铅胁迫下玉米的生长,提高叶片的光合能力和抗氧化能力效果最佳,为改善重金属铅污染的土壤质量和作物生长提供了经济有效的途径。

关键词: 秸秆生物炭; 鸡粪; 玉米生长; 光合性能; 抗氧化酶活性

中图分类号: S513; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0262-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.041

Effects of Stalk-derived Biochar and Chicken Manure on the Growth and Physiological Characters of Maize Under Lead Stress

LIU Ling, YUE Feixue, LI Jiwei, WANG Yanfang

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

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of different stalk-derived biochar added (20, 40 g/kg soil), different chicken manure added (20, 40 g/kg soil), combination of stalk-derived biochar and chicken manure (20 g/kg soil, respectively) applications on the growth and physiological characters of maize under lead stress. Results showed that all treatments with stalk-derived biochar or/and chicken manure addition significantly increased plant height and fresh weight of maize, photosynthetic pigment contents, photosynthesis characteristics and antioxidant enzyme activities. Amending soil with stalk-derived biochar and chicken manure together produced the largest increment in maize growth and physiological characteristics. This effect was additive, with 69.9%, 50.0% greater fresh weight and plant height, 50.0%, 97.9%, 126.5%, 132.6% higher chlorophyll b content, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s), 68.4%, 69.4%, 115.3% higher activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), 88.6%, 48.6% higher proline and soluble sugar, respectively. The combination of stalk-derived biochar and chicken manure treatment played the best effective role on promoting the growth of maize, improving leaf photosynthetic and antioxidant capacity under lead stress. This study provides a cost-effective way for improving the soil quality of Pb-contamination and crop growth.

Keywords: stalk-derived biochar; chicken manure; maize growth; photosynthetic performance; antioxidant enzyme activity

随着城市化、工业化的发展,化肥与农药的大量施用、矿床的不断开采,工业“三废”、生活污水灌溉和汽车尾气的大量排放等,我国耕地污染状况日趋严

重^[1]。土壤有害重金属积累到一定程度,不仅会导致土壤退化,而且可通过地表径流、淋失和粉尘沉降作用恶化水体环境和大气质量,从而直接毒害植物或

收稿日期: 2018-03-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(31700367); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2016GGJS-062); 河南科技大学学科提升振兴 A 计划项目(13660002)

第一作者: 刘领(1978—),男,河南项城人,博士,主要从事土壤污染生态与作物生理研究。E-mail: liulinghenan@126.com

通信作者: 王艳芳(1977—),女,河南焦作人,副教授,主要从事农业生态研究。E-mail: wyflll977@126.com

通过食物链途径危害人体健康^[2]。针对农田土壤重金属污染问题,将有机物料施入受污染的土壤中,一方面可以吸附、络合重金属离子,改变重金属在土壤中的赋存形态;另一方面可以提高土壤肥力,直接或间接地改变土壤的理化性质,降低土壤容重,提高土壤持水量,影响土壤微生物的数量和活性,从而增强植物叶片的光合性能和抗氧化能力,缓解重金属对植物的毒害作用,提高植物的生产力和安全性^[3]。因此,通过有机物料还田修复重金属污染土壤常被认为是一种环境友好和经济有效的修复方法。

生物炭作为一种新型的土壤重金属改良剂已有广泛研究^[4]。生物炭是指生物质在缺氧、低温($<700^{\circ}\text{C}$)条件下热解而成的固态有机质产物,其羧酸酯化和芳香化结构具有较强的生物惰性,不易被微生物分解,施入土壤后可提高土壤有机碳含量^[5]。生物炭表面的大量负电荷,含氧功能基团,多孔性和高比表面积,不仅能够增加土壤保水力和通气性,减少土壤养分流失,还能够吸附、钝化重金属离子^[6]。另外生物炭的多孔结构还能够成为微生物良好的栖所,提高土壤微生物的多样性及群落结构,维持土壤生态结构的平衡^[7]。生物炭虽有固持养分的作用,但自身养分含量对维持植物生长的能力有限,而有机肥含有大量植物生长所需的营养元素能够满足植物生长的需要,施用有机肥是维持农业生态系统平衡的重要途径^[8]。研究表明,有机肥不仅自身含有丰富的养分,还能活化土壤中潜在养分,为植物的生长提供营养保障^[9]。有机肥含有大量的胶黏物质使土壤颗粒凝聚成稳定的土壤团聚体,增加土壤水稳性和通气性,进而使土壤微生物的多样性和生物量大大提高^[10]。有机肥中的有机酸可与土壤中的重金属形成络合物减少植物对重金属的吸收^[11]。因此,有机肥为植物的生长提供了良好的土壤环境,促进植物的生长和发育,减少植物对重金属的吸收。

目前,大量研究^[12-13]表明,生物炭和有机肥在改良土壤重金属污染、提高土壤持水增肥能力及改善植物生理特性方面有较好的效果,但两者混合施用鲜有报道。铅是污染土壤中广泛存在且对植物生长毒性很强的重金属元素之一,本研究采用盆栽模拟铅污染试验,探讨了生物炭、鸡粪及其复配处理对铅胁迫下玉米生长、光合特性和抗氧化酶活性的影响,为进一步探明在重金属胁迫下生物炭和鸡粪对植物的解毒机制和重金属污染土壤上农业生产的有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2016年5—8月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,基本理化性质为:pH 7.8,有机质含量12.62 g/kg,总氮含量0.84 g/kg,碱解氮含量46.66 mg/kg,速效磷含量17.13 mg/kg,速效钾含量106.5 mg/kg。供试生物炭材料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°C 条件下小麦秸秆限氧热解制成),基本理化性质为:pH 10.4,比表面积 $8.92\text{ m}^2/\text{g}$,有机碳含量52.2%,全氮含量5.9 g/kg,全磷含量0.89 g/kg,全钾含量23.2 g/kg。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,基本理化性质为:pH 6.8,有机碳含量为41.6%,全氮含量24.3 g/kg,全磷含量20.5 g/kg,全钾含量34.3 g/kg。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)对照(CK);(2)生物炭添加量为20 g/kg土壤(LB);(3)生物炭添加量为40 g/kg土壤(HB);(4)鸡粪添加量为20 g/kg土壤(LM);(5)鸡粪添加量为40 g/kg土壤(HM);(6)添加量为鸡粪和生物炭各20 g/kg土壤(BM)。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。每处理重复8次,共计48盆,随机排列于隔雨棚中。

通过向盆中添加醋酸铅 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 溶液的方法模拟土壤铅污染,水平为800 mg/kg。土壤经吸附沉淀2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,每隔2天用称重法加入去离子水补充水分,控制土壤含水量为田间最大持水量的70%,期间不进行肥料投入。玉米播种后45天选择各处理中的4个重复,测定铅胁迫下玉米叶片的叶绿素含量、光合特性、抗氧化酶活性和渗透调节物质,80天后测定各处理玉米的株高和叶片数,并整株收获测定鲜重。

1.3 测定方法

株高和生物量测定:玉米株高于收获前用刻度尺测定。植物样品地上部和根系洗净后用滤纸吸干,称取整株鲜重。

光合色素含量的测定:采用80%丙酮浸提法^[14]测定叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量。

光合指标测定:于晴天上午9:00—11:00采用LI-6400XT便携式光合测定系统(LI-COR,美国),选取功能盛期叶片测定光合指标,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。每张叶片测定10次,取其平均值。测定光照强度为 $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

丙二醛 (malondiadehyde, MDA) 和抗氧化酶活性的测定: 取 0.5 g 新鲜叶片组织, 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/mL 磷酸缓冲液 (pH 5.5~8.8), 于 4 °C 下 13 000 r/min 离心 20 min, 所得上清液即为酶粗提液^[15]。MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定, 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 采用氮蓝四唑还原法测定, 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 采用愈创木酚法测定, 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 采用紫外吸收法测定^[14]。

渗透调节物质测定: 脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定, 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[14]。

1.4 数据处理

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

2 结果与分析

2.1 施用生物炭和鸡粪不同处理对铅胁迫下玉米生物学性状的影响

由表 1 可知, 生物炭和鸡粪不同处理均显著增加铅胁迫下玉米的鲜重、株高和叶片数, 表现为: BM > HM > LM > HB > LB > CK, 以 BM 处理对玉米生长的促进效应最佳, HM 处理次之。与对照相比, 在 BM、HM 处理下玉米鲜重分别增加 69.9% 和 68.4%, 株高分别增加 50.0% 和 38.9%, 叶片数分别增加 43.5% 和 26.1%。从生物炭和鸡粪的施用量对玉米生长的促进效应来看, 表现为高施用量处理大于低施用量处理; 从鸡粪和生物炭两种添加类型对玉米生长的促进效应来看, 表现为施用鸡粪处理大于生物炭处理, 说明鸡粪促进铅胁迫下玉米生长的效果更好。

表 1 施用生物炭和鸡粪不同处理对 Pb 胁迫下玉米生物学性状的影响

处理	鲜重/g	株高/cm	叶片数
CK	53.69±1.271e	33.38±0.250e	5.75±0.048e
LB	62.41±1.172d	41.28±0.278d	6.38±0.038d
HB	67.67±1.186c	42.08±0.266d	6.88±0.029c
LM	79.94±1.362b	45.33±0.270c	7.13±0.048b
HM	90.42±1.260a	46.38±0.236b	7.25±0.025b
BM	91.23±1.353a	50.08±0.214a	8.25±0.025a

注: 表中同一列不同的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 施用生物炭和鸡粪不同处理对铅胁迫下玉米叶片光合色素含量的影响

由表 2 可知, 生物炭和鸡粪不同处理均显著增加铅胁迫下玉米叶片中的光合色素含量 ($P < 0.05$), 说明施用生物炭和鸡粪均能提高植物的光合色素含量。BM 处理下对提高叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量效果最佳, 分别较对照增加 16.7%, 50.0%, 14.5%; HM

和 LM 处理次之, 且两处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 叶绿素 a 分别较对照增加 13.8%, 12.5%, 叶绿素 b 分别较对照增加 32.3%, 26.0%; BM 处理下叶片中的类胡萝卜素含量最高, 但 BM、HM、LM、HB 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 施加鸡粪比施加生物炭对提高光合色素含量的效果好。

表 2 施用生物炭和鸡粪不同处理对 Pb 胁迫下玉米叶片中光合色素含量的影响

处理	单位: mg/g		
	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素
CK	4.07±0.016e	0.96±0.011e	0.76±0.014c
LB	4.27±0.016d	1.03±0.014d	0.78±0.012b
HB	4.40±0.013c	1.10±0.016c	0.82±0.013a
LM	4.58±0.018b	1.21±0.014b	0.84±0.011a
HM	4.63±0.011b	1.27±0.012b	0.85±0.012a
BM	4.75±0.015a	1.44±0.015a	0.87±0.014a

2.3 施用生物炭和鸡粪不同处理对铅胁迫下玉米叶片光合特性的影响

从图 1 可以看出, 与对照相比, 不同生物炭和鸡粪处理均显著增加铅胁迫下玉米叶片的净光合速率 (P_n) (图 1a)、蒸腾速率 (T_r) (图 1b)、气孔导度 (G_s) (图 1c) ($P < 0.05$), 表现为: BM > HM > LM > HB > LB > CK, 其中以 BM 处理对提高玉米叶片光合能力效果最好, 玉米叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 分别较对照提高 97.9%, 126.5%, 132.6%; 提高玉米叶片光合能力效果较好的是 HM 处理, 其使玉米叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 分别较对照提高 80.7%, 114.5%, 132.4%; HM 和 BM 两处理之间对提高净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 达到显著水平 ($P < 0.05$), LM 和 HB 两处理之间对提高净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 未达到显著水平 ($P > 0.05$)。BM 和 HM 两处理之间、LB 和 HB 两处理之间对提高气孔导度 (G_s) 均未达到显著水平 ($P > 0.05$), 说明鸡粪处理对提高玉米的光合能力效果优于生物炭处理。

由图 1d 可知, 与对照相比, 不同生物炭和鸡粪处理均显著降低铅胁迫下玉米叶片的胞间 CO_2 浓度 (C_i) ($P < 0.05$), 表现为: BM < HM < LM < HB < LB < CK, 以 BM 处理对降低玉米叶片的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 效果最佳, HM 处理次之。BM 和 HM 处理使玉米叶片的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 分别较对照降低 32.3% 和 29.0%。从鸡粪和生物炭的施用量对玉米叶片的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 降低效应来看, 表现为施量高的效果好; 从鸡粪和生物炭两种添加类型对玉米叶片中的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 降低效应来看, 表现为施用鸡粪处理效果好于生物炭处理。

2.4 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米叶片 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铅胁迫下玉米叶片中的 MDA 含量($P < 0.05$),表现为: $BM < HM < LM < HB < LB < CK$ 。BM 和 HM 两处理之间无显著差异($P > 0.05$),但 BM 处理效果较好,两处理使玉米叶片中的 MDA 含量分别较对照降低 39.0%,34.8%。LB、HB、LM 处理之间无显著差异($P > 0.05$)。

从图 2 可以看出,与对照相比,不同生物炭和鸡粪处理均显著提高铅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: $BM > HM > LM > HB > LB > CK$,其中以 BM 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 68.4%,69.4%,115.3%。

从鸡粪和生物炭的施用量对提高玉米的 SOD、POD 和 CAT 活性来看,表现为高施用量处理大于低施用量处理;从鸡粪和生物炭两种添加类型对提高玉米的 SOD、POD 和 CAT 活性来看,表现为施用鸡粪处理效果好于生物炭处理,说明鸡粪对提高玉米的抗氧化能力效果优于生物炭。

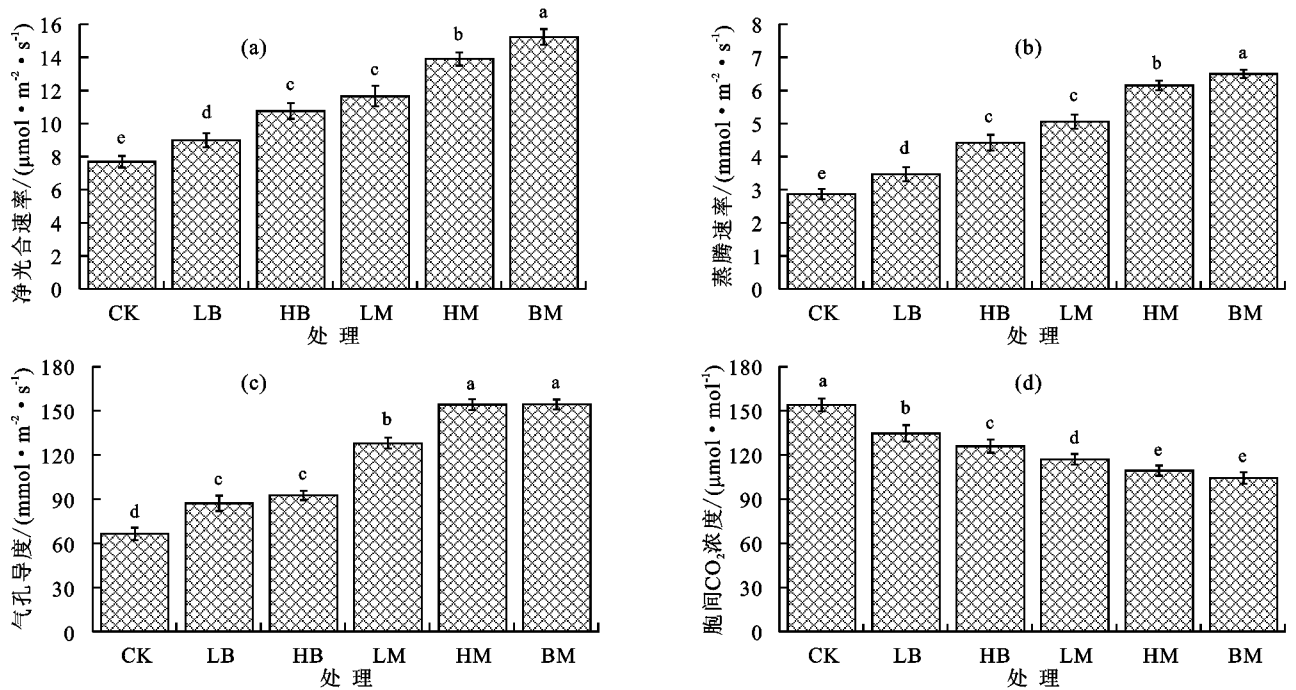


图 1 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米叶片光合特性的影响

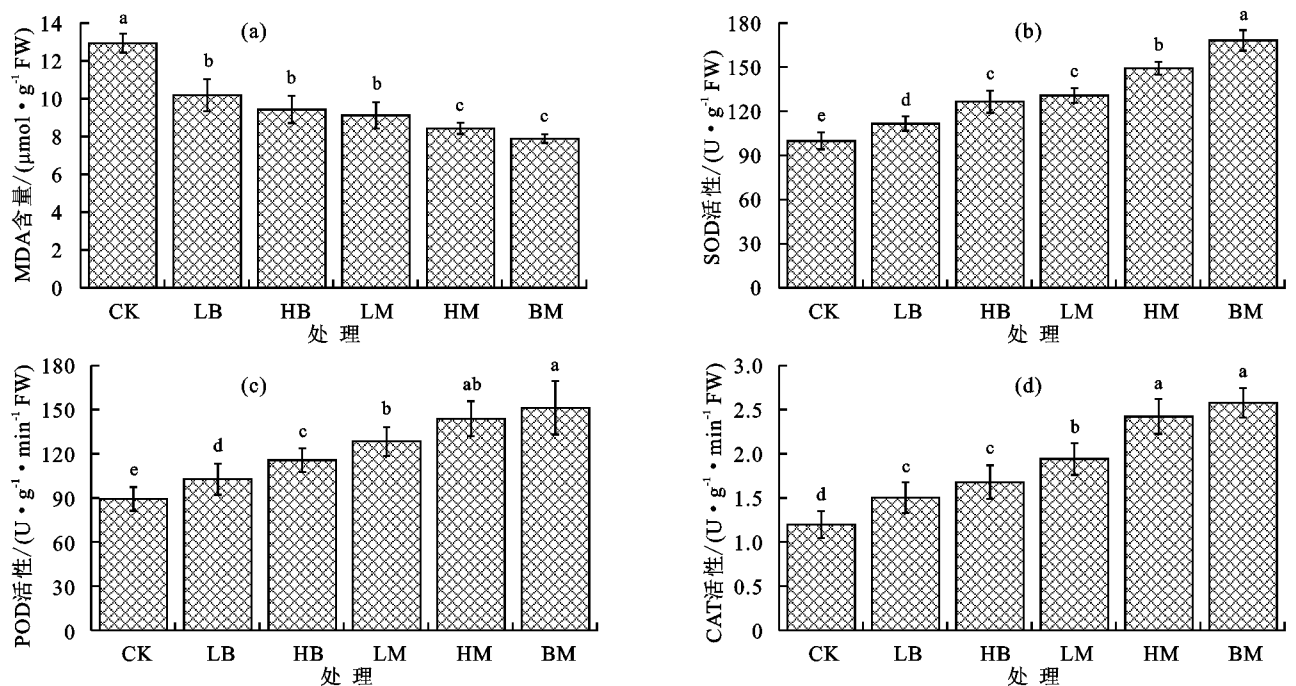
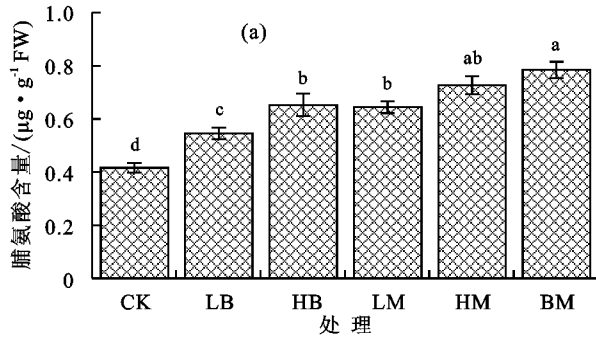


图 2 施用生物炭和鸡粪不同处理对铅胁迫下玉米叶片 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

2.5 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响

由图 3a、图 3b 可知,相比于对照,不同生物炭和鸡粪处理均显著增加铅胁迫下玉米叶片中的脯氨酸和可溶性糖含量($P < 0.05$),表现为:BM>HM>LM>HB>LB>CK。其中 BM 和 HM 处理对增加铅胁迫下玉米叶片中的脯氨酸和可溶性糖含量效果较好,但 BM 和 HM 两处理之间无显著差异($P > 0.05$)。BM 和 HM 处



理相比于对照脯氨酸含量分别提高 88.6% 和 74.8%,可溶性糖含量分别提高 48.6% 和 41.2%。从鸡粪和生物炭的施用量对提高玉米叶片中的脯氨酸和可溶性糖含量来看,均表现为高施用量处理大于低施用量处理;从鸡粪和生物炭两种添加类型对提高玉米叶片中的脯氨酸和可溶性糖含量来看,表现为施用鸡粪处理大于生物炭处理,说明鸡粪对铅胁迫下玉米生长及抗胁迫能力的效果更好。

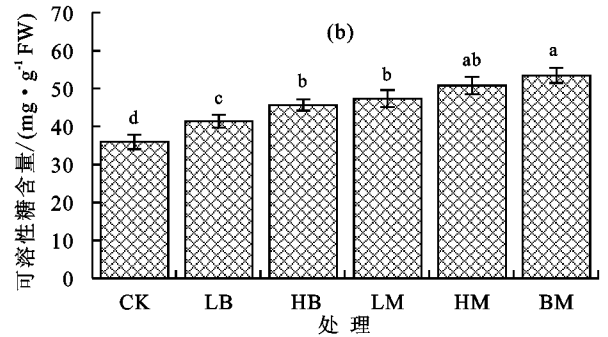


图 3 施用生物炭和鸡粪不同处理对玉米叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响

3 讨论

有研究^[16]表明,施用生物炭和鸡粪能够减轻重金属对植物的毒害作用,促进植物生长。本研究表明,施用生物炭和鸡粪不同处理均显著增加铅胁迫下玉米的鲜重、株高、叶片数。重金属胁迫下叶绿体中的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 被重金属离子取代导致植株体内的活性氧(Reactive oxygen species, ROS)增多,使叶绿体的结构和功能受到破坏,阻碍电子传递,降低玉米叶片的光合能力,减少植物生物量的积累^[17]。本研究表明,施用生物炭和鸡粪均显著增加 Pb 胁迫下玉米叶片的光合色素含量,提高玉米叶片光合能力,其中施用鸡粪处理对提高玉米叶片光合特性的效果优于生物炭处理,这可能是因为鸡粪中的有效氮含量较高,适量的氮素有助于叶绿素的形成,提高固定 CO_2 有关酶的活性,从而增强光合速率。另外,鸡粪能够相对增加土壤中 CO_2 的排放,较高的 CO_2 浓度有利于促进光合速率的增加^[18]。

Pb 胁迫会导致植物体内超氧自由基增多,细胞膜结构遭到破坏,细胞内的物质转运,蛋白质、DNA 的合成受阻,减缓细胞分裂进程,进而抑制植物生长^[19]。MDA 是植物细胞膜脂氧化的最终产物,是衡量细胞损伤程度的重要指标^[15]。SOD、POD 和 CAT 是清除 H_2O_2 、 O_2^- 的细胞保护酶,它们协同作用可以减轻膜脂过氧化程度,降低 Pb 胁迫对植物造成的伤害^[20]。脯氨酸和可溶性糖是植物细胞重要的渗透调节物质,具有调节细胞渗透平衡,抑制活性氧自由基产生的作用^[21]。本研究表明,施用生物炭和鸡粪均

显著降低 MDA 含量,提高 SOD、POD、CAT 活性以及脯氨酸、可溶性糖含量。这与尤方芳等^[22] 研究得出的施用生物炭和有机肥对 Cd 胁迫下烟株生长和抗氧化酶活性的影响结果一致。但与王晓维等^[23] 研究的 Cu 胁迫下施加生物炭降低油菜叶片抗氧化酶活性和可溶性蛋白含量的结果不同,这可能与施用生物炭的类型和用量有关,也可能与不同的植物品种和重金属污染元素有关。

本研究表明,施用生物炭和鸡粪对缓解玉米 Pb 胁迫均以高添加量效果较好,而施用鸡粪处理对促进植物生长改善生理特性效果优于生物炭处理,可能的原因是鸡粪改善土壤肥力效果明显优于生物炭,其含有的养分丰富,不仅能够为玉米生长提供养分来源,还可以提高土壤的团粒结构,增加微生物的活动,为玉米的生长提供了良好的土壤环境,从而促进玉米生长,对吸收的重金属产生“稀释效应”,减轻重金属 Pb 胁迫^[24]。另外,鸡粪分解后产生的有机酸、酚类以及 N、S 杂环化合物等活性基团与 Pb 形成络合物,减少玉米对 Pb 的吸收,从而缓解 Pb 对玉米的胁迫,促进玉米生长^[11]。本研究还发现,生物炭和鸡粪等量复配处理对促进玉米生长及生理特性的效果最佳,这可能是因为鸡粪能够弥补生物炭自身营养不足的缺陷,二者的结合减少了养分淋失,延长了养分的释放期,为玉米的生长源源不断提供养分,提高了肥料的有效利用率^[8]。另外,生物炭和鸡粪相互作用优化了根系生长的微生物环境,生物炭的多孔结构具有通气、保水、保肥的效果,能够为鸡粪及土壤中的微生物提供

优越的栖居繁殖场所, 鸡粪中的腐殖酸能够氧化生物炭, 提高土壤的 C/N, 改变土壤阴阳离子的交换能力, 降低 Pb 的有效性, 从而减少玉米对重金属的吸收, 缓解 Pb 胁迫对玉米生长的影响^[7-8]。

4 结论

(1) 生物炭和鸡粪用于土壤修复均能通过改善玉米叶片的光合性能增强叶片的保护酶活性和渗透调节物质, 从而缓解铅的胁迫效应, 促进玉米植株生长。

(2) 从两种改良剂的施用效果来看, 表现为施用鸡粪对玉米生长的促进效应优于生物炭; 从两种改良剂的施用量来看, 表现为单施生物炭或鸡粪 40 g/kg 对铅胁迫的缓解效应优于单施 20 g/kg。

(3) 生物炭和鸡粪混合施用能够有效缓解重金属铅对玉米的毒性, 促进铅胁迫下玉米的生长, 且在本试验中具有最佳效应, 然而其混合复配比例及根际生理生态机制仍需要进一步探讨。

参考文献:

[1] 于辉, 向言词, 邹冬生. 龙须草生长对重金属污染土壤的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 305-309.

[2] 江培龙, 方凤满, 张杰琼, 等. 淮南煤矿复垦区土壤重金属形态分布及污染评价[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 178-182.

[3] 俞巧钢, 杨艳, 邹平, 等. 有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 170-175.

[4] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, et al. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review [J]. *Solid Earth Discussions*, 2014, 5(1): 2155-2179.

[5] Fang Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80(1): 136-145.

[6] Herath I, Kumarathilaka P, Navaratne A, et al. Immobilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in serpentine soil using biochar [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 126-138.

[7] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.

[8] Wu H P, Lai C, Zeng G M, et al. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: A review [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(6): 754-764.

[9] 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 12-16.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Butnan S, Deenik J L, Toomsan B, et al. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy [J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 105-116.

[13] Ding J L, Jiang X, Guan D W, et al. Influence of inorganic fertilizer and organic manure application on fungal communities in a long-term field experiment of Chinese Mollisols [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 114-122.

[14] 张蜀秋, 李云. 植物生理学实验技术教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[15] 刘领, 李继伟, 常茜茜, 等. 芸薹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.

[16] 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.

[17] 鲁艳, 李新荣, 何明珠, 等. 重金属对盐生草光合生理生长特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(2): 370-376.

[18] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 419-425.

[19] 何洁, 高钰婷, 贺鑫, 等. 重金属 Zn 和 Cd 对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 312-320.

[20] 雷冬梅, 段昌群, 张红叶. 矿区废弃地先锋植物齿果酸模在 Pb、Zn 污染下抗氧化酶系统的变化 [J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5417-5423.

[21] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 857-860.

[22] 尤方芳, 赵铭钦, 陈发元, 等. 生物炭与不同肥料配施对镉胁迫下烟株生长的影响 [J]. 浙江农业学报, 2016, 28(3): 489-495.

[23] 王晓维, 徐健程, 孙丹平, 等. 生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 640-646.

[24] 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.