

胡静姝,周新萍. 生物炭和鸡粪改良剂对铅胁迫下番茄生理生化、铅吸收及土壤性质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(9):181-188.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.09.025

生物炭和鸡粪改良剂对铅胁迫下番茄生理生化、铅吸收及土壤性质的影响

胡静姝,周新萍

(东莞城市学院环境工程系,广东东莞 523419)

摘要:以铅(Pb)污染土壤(526.51 mg/kg)为基质进行盆栽试验,设置 Pb 胁迫下施用生物炭(30、60 g/kg, B1、B2)、鸡粪(30、60 g/kg, M1、M2)及其组合(B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2)处理,以不添加改良剂为对照处理(CK),探索生物炭和鸡粪改良剂对 Pb 胁迫下番茄生理生化、Pb 吸收及相关土壤性质的影响。结果表明,生物炭、鸡粪相关处理均可提高番茄干物质、株高、SPAD 值、根系性状指标、根际土壤酶活性以及叶片抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性,降低丙二醛含量,从而减轻 Pb 胁迫对番茄产生的氧化应激。生物炭、鸡粪相关处理可显著降低番茄根系、地上部的 Pb 含量,介导土壤 Pb 形态转变,降低有效 Pb 含量。单施鸡粪改良剂对于促进番茄生长和提高叶片抗氧化酶活性更有效;单施生物炭处理在诱导土壤碱化和固定 Pb 方面更有效。生物炭和鸡粪的组合使用具有叠加效应,对番茄生长发育、叶片抗氧化酶活性和土壤酶活性的影响更大。与 B1 + M1 处理相比,其他处理的番茄组织中的 Pb 含量和土壤有效 Pb 含量显著提高,番茄 Pb 生物富集系数、转移系数分别提高 1.23%~58.28%、7.83%~40.89%。综上,生物炭和鸡粪组合使用在降低土壤 Pb 生物有效性、减少番茄 Pb 吸收、改良土壤性质以及促进番茄生长方面具有良好效果,以 30 g/kg 生物炭配施 30 g/kg 鸡粪改良剂效果最佳。

关键词:生物炭;鸡粪;铅吸收;番茄生长;抗氧化系统;土壤酶活性

中图分类号:S641.206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)09-0181-08

农田土壤重金属污染已成为全球性的严重问题

收稿日期:2024-01-03

基金项目:东莞城市学院基金(编号:2020QJY006Z)。

作者简介:胡静姝(1983—),女,湖北武汉人,硕士,讲师,主要从事农作物安全生产与化学工程研究。E-mail:Hjingsu2023@163.com。

通信作者:周新萍,硕士,讲师,主要从事环境工程、环境微生物研究。E-mail:Zhouxp2020@163.com。

题,大量研究表明,重金属对植物有毒,会抑制植物生长发育,降低作物产量^[1]。铅(Pb)是一种典型的有害重金属,主要通过矿产开采、废水灌溉以及化学肥料、农药等人类行为在土壤中富集,进而威胁农田生态系统的可持续性发展^[2]。Pb 极易被植物吸收富集,对植物具有极强的破坏性,可显著抑制

[15]白新祥. 菊花花色形成的表型分析[D]. 北京:北京林业大学,2007:2-27.

[16]王莉飞,徐佳洁,黄晓霞,等. 57 份现代月季种质资源表型性状及综合评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2022,42(1):83-90.

[17]黎裕,李英慧,杨庆文,等. 基于基因组学的作物种质资源研究:现状与展望[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3333-3353.

[18]向贵生,王其刚,蹇洪英,等. 云南滇蔷薇天然居群表型多样性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2018,40(4):786-794.

[19]吴根松,孙丽丹,郝瑞杰,等. 梅花种质资源表型多样性研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(20):12008-12009,12012.

[20]罗丹. 72 个月季品种数量分类及耐热性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013:28-35.

[21]白史且,苟文龙,张新全,等. 假俭草种群变异与生态特性的研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):97-101.

[22]柳江群,尹明宇,左丝雨,等. 长柄扁桃天然种群表型变异[J]. 植物生态学报,2017,41(10):1091-1102.

[23]过聪,关伟,曾祥国,等. 现代月季品种表型性状分析与评价[J]. 中国农业科学,2019,52(24):4632-4646.

[24]梁永书,占小登,高志强,等. 超级稻协优 9308 衍生群体根系与地上部重要农艺性状的相关性[J]. 作物学报,2011,37(10):1711-1723.

[25]孙佩,刘佳琴,杨媛,等. 119 份月季品种表型性状多样性及评价[J]. 分子植物育种,2022,42(4):1-24.

[26]张向前,刘景辉,齐冰洁,等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(2):168-174.

[27]李晓曼,段蒙蒙,王鹏,等. 栽培萝卜植株地上部表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(4):668-675.

[28]张会芳,齐红志,孙岩,等. 黄淮冬麦区不同来源地新育成小麦品种性状多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(3):719-731.

植物的增殖、发育代谢以及养分吸收,引起植物生理系统紊乱^[3-4]。被植物吸收的 Pb 可通过食物链对人畜健康造成威胁,导致动物体血压升高、神经功能减退、肾脏损伤及严重的脑损伤^[5]。Pb 污染土壤的修复对于确保土壤安全和农业可持续发展至关重要^[2-4]。目前使用的重金属修复手段主要包括物理、化学以及生物修复,其中物理修复是使用频率最高、最简便的措施^[6],生物质炭类、有机物类是应用最广泛、常规的物理型修复技术。

生物炭是基于生物残体在无氧环境中热解产生的一种富碳产品^[7]。生物炭具有弱碱性、比表面积广、孔隙率大、稳定性高、富含多种氧官能团等特点^[8],且含有一定量的大量和微量营养元素,可在一定程度上促进植物的生长发育^[9]。大量研究表明,生物炭可通过沉淀、吸附、离子交换反应、提高土壤微生物活性以及改变微生物群落结构等途径影响重金属形态,并降低重金属的植物有效性^[10]。黄连喜等以农作物壳(花生、水稻)与椰壳制备的生物炭作为土壤调理剂,研究发现,不同生物炭均可显著降低土壤有效态 Pb、镉(Cd)含量及油麦菜可食用部位 Pb、Cd 积累量,并对油麦菜有明显的促生长效果^[11]。毛欣宇等研究表明,生物炭可将土壤中的有效态 Pb 向其潜在活化形态和残渣态转化,其转化、钝化稳定程度与改性生物炭用量密切相关^[12]。然而,目前关于多种有机型改良剂组合使用对重金属的固定效果尚不清楚。

一般而言,生物炭由于环境差异与炭老化等因素,对重金属的固定能力表现出较大差异^[13],且养分含量较少,无法深刻影响土壤肥力和植物生长^[14]。农家肥是常用的有机物料,因具备较高的肥力水平而受到广泛关注^[15]。其中鸡粪是稳定的土壤改良剂,可以提高土壤有机质含量,改善保水性和土壤结构,并可提供大、中、微量有效养分元素,进而促进植物生长^[16]。已有研究表明,鸡粪改良剂对有机络合位点具有亲和力,可减少土壤可交换性重金属组分含量,且可通过降低土壤容重来稀释金属浓度^[17]。然而,目前关于生物炭、鸡粪对重金属污染土壤修复效果的探索主要集中在镉、砷方面,对 Pb 的固定效果知之甚少,且对设施园艺的研究更鲜有涉及。基于此,本研究探索生物炭、鸡粪单施或混合施用对 Pb 污染土壤中番茄生长、叶片抗氧化酶活性、Pb 吸收和土壤性质的影响,以期对 Pb 污染土壤的治理及番茄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 2022 年 5—8 月在东莞城市学院大棚试验区进行。供试番茄品种为中杂 9 号,种子来自广东省农业科学院环境园艺研究所。供试土壤取自广东省东莞市某电子拆卸区原番茄种植区,pH 值为 5.88,有机质含量为 19.26 g/kg,有效氮、磷、钾含量分别为 65.52、14.15、123.73 mg/kg,土壤有效铅含量为 526.51 mg/kg,根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[18],当土壤 pH 值为 5.5~6.5 时,农田土壤铅(Pb)污染的临界值为 90 mg/kg,供试土壤 Pb 严重超标,为中轻度污染水平。生物炭原料为花生壳,购自广东炭都生物科技控股有限公司;鸡粪为腐熟干鸡粪,购自东莞市圣茵生物有机肥有限公司,2 个供试改良剂基本信息见表 1。

表 1 生物炭、鸡粪的元素含量信息表

改良剂	pH 值	有机碳含量 (%)	全氮含量 (%)	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)	总铅含量 (mg/kg)
生物炭	9.40	45.04	0.90	0.67	0.38	3.93
鸡粪	8.25	18.46	2.04	2.11	1.05	11.25

1.2 试验设计

试验采用 2 因素 2 水平随机设计,2 因素分别为生物炭(B)、鸡粪(M),2 水平分别为施用量 30、60 g/kg,相应单施和组合施用处理分别为 B1、B2、M1、M2、B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2;以不施生物炭与不施鸡粪改良剂为对照(CK),其中施用量 30、60 g/kg 为生物炭或鸡粪用量与盆栽用土比(以干基计),试验共设 9 个处理,每处理 3 次重复。盆栽所用器具为广口圆桶,上半径、下半径分别为 13.5、11.0 cm,每盆装土 5 kg。相应处理按上述施用量与土壤混合均匀后,每盆播撒种子 3 粒,1 周后间苗至 1 株,培育周期为 50 d,期间保持 60%~75% 的土壤持水量。

1.3 样品采集及测定分析

1.3.1 番茄植株生长参数及抗氧化系统参数测定

盆栽结束后,采用卷尺测量株高,根系形状(体积、总根长、直径、表面积)采用 EPSON V700 扫描、WinRHizo 2021 软件分析测定。

在培养第 35 天时,采用手持叶绿素计(YLS-A1,石家庄泛胜有限公司)对番茄功能叶(由下往上数第 4 张叶片)的相对叶绿素含量(SPAD 值)进行

测定。番茄叶片的抗氧化系统参数包括丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性以及过氧化氢酶 (CAT) 活性,均采用北京索莱宝科技有限公司生产的 Elisa 试剂盒进行测定,试剂盒型号分别为 BC0020、BC5250、BC0090 及 BC0200。

1.3.2 番茄生物量及 Pb 含量测定 在培养第 50 天时,将番茄根、茎、叶进行分离,并用自来水和蒸馏水仔细清洗后,放入烘箱中烘干至恒重,记录干燥根、茎、叶的生物量。将干燥的植物样品剪碎,在实验室用小型球磨机 (Retsch MM 400, 德国莱驰公司) 研磨至 < 0.25 mm 并储存,用于铅含量分析。将磨细后的样品采用 $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 2 : 1$ (体积比) 溶液进行酸解,在原子吸收分光光度计 (TAS-986, 北京普析通用仪器有限责任公司) 中采用原子吸收法^[19]进行 Pb 含量测定。

1.3.3 土壤养分含量及土壤酶活性测定 在培养第 50 天时,用手摇动番茄根,去除松散黏附的土壤,以收集根际土壤,将根际土壤样品干燥、研磨并过筛 (2 mm 筛孔)。采用 pH 计测定土壤 pH 值 (水 : 土 = 5 : 1); 采用电导率仪 (AR8211, 东莞万创电子制品有限公司) 测定土壤电导率; 土壤有机碳 (SOC) 含量采用重铬酸钾-硫酸比色法测定; 土壤有效氮 (AN)、有效磷 (AP)、速效钾 (AK) 含量分别采用碱解扩散法、钼蓝比色法、火焰光度法^[20]测定。土壤酶包括脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及几丁质酶的活性均采用北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒进行测定,试剂盒型号分别为 BC0120、BC0240、BC0100 及 BC1930。

1.3.4 土壤铅分级测定 将土壤中的铅分为离子交换态铅 (EPb)、碳酸盐结合态铅 (CPb)、铁锰氧化态铅 (FPb)、有机结合态铅 (OPb) 以及残渣态铅 (DPb), 其中 EPb 采用 $\text{CH}_3\text{COO}(\text{NH}_4)_2$ 溶液提取, 其他铅形态 (CPb、FPb、OPb、DPb) 采用二乙炔三胺五乙酸 (DTPA)、Tessier 连续提取法^[21]浸提, 所有形态铅含量采用原子吸收法测定。

1.4 数据处理与统计分析

铅的生物富集系数 (BCF)、转移系数 (TF) 按照以下公式^[22]计算:

$$BCF = \text{番茄植株 Pb 含量} / \text{土壤 Pb 含量};$$

$$TF = \text{植株地上部 Pb 含量} / \text{根系 Pb 含量};$$

试验数据采用 SPSS 27.0 软件进行统计分析, 采用 Origin 12 绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄生长发育的影响

由表 2 可知, 生物炭处理 (B1、B2)、鸡粪钝化剂处理 (M1、M2)、生物炭与鸡粪组合处理 (B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2) 与对照处理 (CK) 在干物质质量、株高、SPAD 值、根系性状 (表面积、直径、总长度、体积) 等 7 个生长指标上均存在一定差异, 其中根系直径表现为 $\text{CK} < \text{B1} < \text{B2} < \text{M1} < \text{M2} < \text{B1} + \text{M1} < \text{B1} + \text{M2} < \text{B2} + \text{M1} < \text{B2} + \text{M2}$, 与 CK 相比, B1 处理提高 8.77%, 但二者无显著差异, 其他处理则较 CK 显著提高 10.53% ~ 38.60%。与 CK 相比, 生物炭、鸡粪钝化剂及其组合处理 (B1、B2、M1、M2、B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2) 的干物质质量、株高、SPAD 值、根系表面积、根系总长度及根系体积分别提高 30.21% ~ 100.81%、35.28% ~ 92.75%、15.69% ~ 61.04%、16.09% ~ 98.60%、6.26% ~ 46.17% 及 42.52% ~ 110.99%; 且各指标的极大值均出现在生物炭与鸡粪钝化剂组合施用处理 (B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2) 中。说明生物炭、鸡粪钝化剂对番茄植株生长发育有显著影响, 二者结合处理效果更佳。

2.2 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄叶片抗氧化系统参数的影响

由图 1 可知, 番茄叶片的丙二醛 (MDA) 含量表现为 CK 高于生物炭、鸡粪钝化剂及其组合处理 (B1、B2、M1、M2、B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2), 而在超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性上的表现则相反。与 CK 相比, 生物炭、鸡粪钝化剂处理下的 SOD、POD、CAT 活性分别提高 4.56% ~ 54.28%、36.54% ~ 112.68%、30.74% ~ 71.73%, 且酶活性较大值主要集中出现在 30 g/kg 生物炭处理 (B1 + M1、B1 + M2) 上。丙二醛 (MDA) 含量表现为 $\text{B2} + \text{M2} \text{ 处理} < \text{M1} \text{ 处理} < \text{BC2} \text{ 处理} < \text{B2} + \text{M1} \text{ 处理} < \text{B1} \text{ 处理} < \text{B1} + \text{M2} \text{ 处理} < \text{B1} + \text{M1} \text{ 处理} < \text{B2} + \text{M2} \text{ 处理} < \text{CK}$, 与 CK 相比, 生物炭、鸡粪钝化剂相关处理显著下降 11.83% ~ 31.76%。

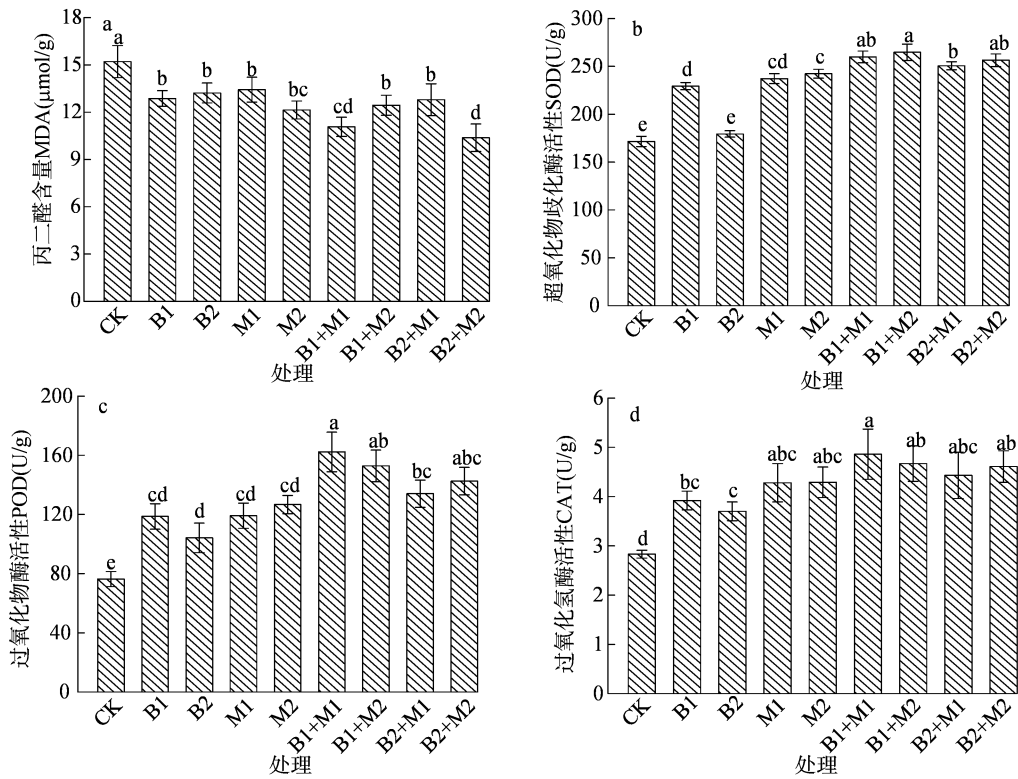
2.3 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄土壤性质的影响

由表 3 可知, 各处理番茄土壤 pH 值在 5.55 ~ 6.75 范围内, 其中以 B2 + M2 处理最高, 其他处理较其降低 4.00% ~ 17.78%。土壤有机碳含量以单施鸡粪处理 (M1、M2) 高于单施生物炭处理 (B1、

表2 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄生长发育的影响

处理	干物质量 (g/株)	株高 (cm)	SPAD 值	根系表面积 (cm ²)	根系直径 (cm)	根系总长度 (cm)	根系体积 (cm ³)
CK	6.19 ± 0.12e	32.68 ± 1.37e	33.52 ± 2.23d	104.63 ± 5.02d	0.57 ± 0.02c	703.13 ± 15.21f	23.21 ± 1.23f
B1	8.06 ± 0.18d	46.55 ± 1.95cd	42.57 ± 1.95b	135.85 ± 8.46c	0.62 ± 0.03bc	747.12 ± 23.46e	33.08 ± 2.31e
B2	8.35 ± 0.13d	44.21 ± 2.54d	38.78 ± 1.24c	121.47 ± 7.37c	0.63 ± 0.03b	780.55 ± 8.97d	36.12 ± 1.94d
M1	10.10 ± 0.20c	47.29 ± 1.24c	42.96 ± 1.06b	164.92 ± 9.92b	0.70 ± 0.04ab	823.47 ± 11.01c	48.64 ± 1.61a
M2	10.26 ± 0.17c	48.03 ± 1.53c	45.35 ± 2.17b	189.94 ± 11.35ab	0.74 ± 0.03a	844.96 ± 24.35c	41.75 ± 2.28c
B1 + M1	12.43 ± 0.24a	61.04 ± 1.68a	51.68 ± 3.38a	197.50 ± 6.08a	0.75 ± 0.05a	949.50 ± 12.87b	42.06 ± 1.57c
B1 + M2	11.29 ± 0.35b	62.99 ± 2.68a	51.99 ± 2.08a	207.79 ± 13.94a	0.75 ± 0.07a	986.37 ± 6.88ab	44.99 ± 2.46b
B2 + M1	11.73 ± 0.19b	55.68 ± 2.95b	51.28 ± 2.17a	194.37 ± 9.58a	0.75 ± 0.04a	1 027.79 ± 31.94a	41.43 ± 1.78c
B2 + M2	11.37 ± 0.14b	58.98 ± 1.97ab	53.98 ± 2.35a	201.68 ± 9.27a	0.79 ± 0.05a	970.91 ± 17.97ab	48.97 ± 2.27a

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。



柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄叶片抗氧化系统参数的影响

B2), 而与 CK 相比, 生物炭、鸡粪钝化剂处理提高 4.76% ~ 37.67%, 其中 M2、B1 + M1、B2 + M2 处理显著高于 CK。单施生物炭处理与单施鸡粪钝化剂处理的电导率均无显著差异, 且皆显著大于 CK; 在生物炭与鸡粪钝化剂组合处理中, 以 B2 + M2 处理电导率最高, 其次为 B1 + M2, 二者均显著大于单施生物炭、单施鸡粪处理。各处理碱解氮含量由低到高表现为 CK < B1 处理 < B2 处理 < M1 处理 < M2 处理 < B2 + M1 处理 < B1 + M2 处理 < B1 + M1 处

理 < B2 + M2 处理, 与 CK 相比, 生物炭、鸡粪钝化剂处理提高 6.08% ~ 30.29%, 其中 M2、生物炭与鸡粪钝化剂组合处理 (B1 + M1、B1 + M2、B2 + M1、B2 + M2) 均显著大于 CK。各处理有效磷含量差异规律与碱解氮含量基本一致。速效钾含量仍以 CK 最低, 生物炭、鸡粪钝化剂处理较其显著提高 6.77% ~ 55.83%; 而在生物炭、鸡粪钝化剂处理中, 以单施鸡粪钝化剂处理高于单施生物炭处理, 且在组合处理中, 以 M2 处理高于 M1 处理。

表3 生物炭和鸡粪对Pb胁迫下番茄土壤性质的影响

处理	pH值	电导率 (mS/cm)	有机碳含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
CK	5.55 ± 0.02e	0.54 ± 0.02d	11.76 ± 1.37c	60.34 ± 2.34d	10.88 ± 0.87c	103.19 ± 2.41f
B1	6.28 ± 0.05c	0.72 ± 0.05c	12.32 ± 1.36c	64.01 ± 3.16cd	11.57 ± 0.59bc	110.18 ± 2.52e
B2	6.42 ± 0.04b	0.72 ± 0.03c	14.28 ± 1.7abc	65.02 ± 2.70cd	12.93 ± 0.60abc	117.93 ± 2.07d
M1	6.16 ± 0.04d	0.73 ± 0.06c	14.75 ± 2.11abc	66.58 ± 5.12bcd	12.64 ± 1.28abc	120.24 ± 3.12d
M2	6.27 ± 0.03c	0.77 ± 0.04c	15.56 ± 1.21ab	68.58 ± 3.08bc	13.37 ± 0.49ab	132.30 ± 2.23c
B1 + M1	6.35 ± 0.04c	0.86 ± 0.10abc	15.59 ± 1.40ab	75.31 ± 2.51ab	12.94 ± 0.64ab	151.92 ± 3.85b
B1 + M2	6.39 ± 0.02c	0.93 ± 0.07ab	13.08 ± 0.82bc	74.31 ± 2.54ab	13.72 ± 0.62ab	160.80 ± 4.36a
B2 + M1	6.48 ± 0.04b	0.81 ± 0.09bc	14.31 ± 2.01abc	70.31 ± 2.68bc	13.30 ± 1.01ab	154.56 ± 2.29ab
B2 + M2	6.75 ± 0.03a	0.98 ± 0.06a	16.19 ± 1.29a	78.62 ± 3.05a	14.21 ± 1.08a	159.99 ± 3.26a

2.4 生物炭和鸡粪对Pb胁迫下番茄土壤酶活性的影响

由图2可知,番茄土壤脲酶(URE)活性以B2 + M2处理最高,CK、B1、B2、M1、M2较其分别显著降低53.42%、34.12%、35.87%、25.87%、20.79%,其他处理与B2 + M2处理无显著差异。各处理土壤蔗糖酶(SUC)活性表现为CK < B1处理 < B2处理 < M1处理 < M2处理 < B2 + M1处理 < B1 + M2处理 < B1 + M1处理 < B2 + M2处理,其中与CK相比,生物炭、鸡粪钝化剂相关处理提高33.81% ~ 96.94%。土壤过氧化氢酶(CAT)活性以CK最低,生物炭、鸡粪钝化剂相关处理较其显著提高

14.43% ~ 97.56%,其中生物炭与鸡粪组合处理整体大于单施生物炭或单施鸡粪处理,且以B1 + M2处理最高。几丁质酶(CHI)活性以CK最低,生物炭、鸡粪钝化剂相关处理较其显著提高117.91% ~ 202.99%;就生物炭、鸡粪钝化剂相关处理而言,以B1 + M1处理最高,且显著大于CK、B1、B2、M1处理。

2.5 生物炭和鸡粪对Pb胁迫下番茄Pb含量及土壤Pb形态的影响

由图3可知,在Pb胁迫下,对照处理(CK)番茄根系及地上部的Pb含量均明显高于施用生物炭、鸡粪钝化剂相关处理,与CK相比,生物炭、鸡粪钝化剂相关处理根系、地上部的Pb含量及植株的Pb

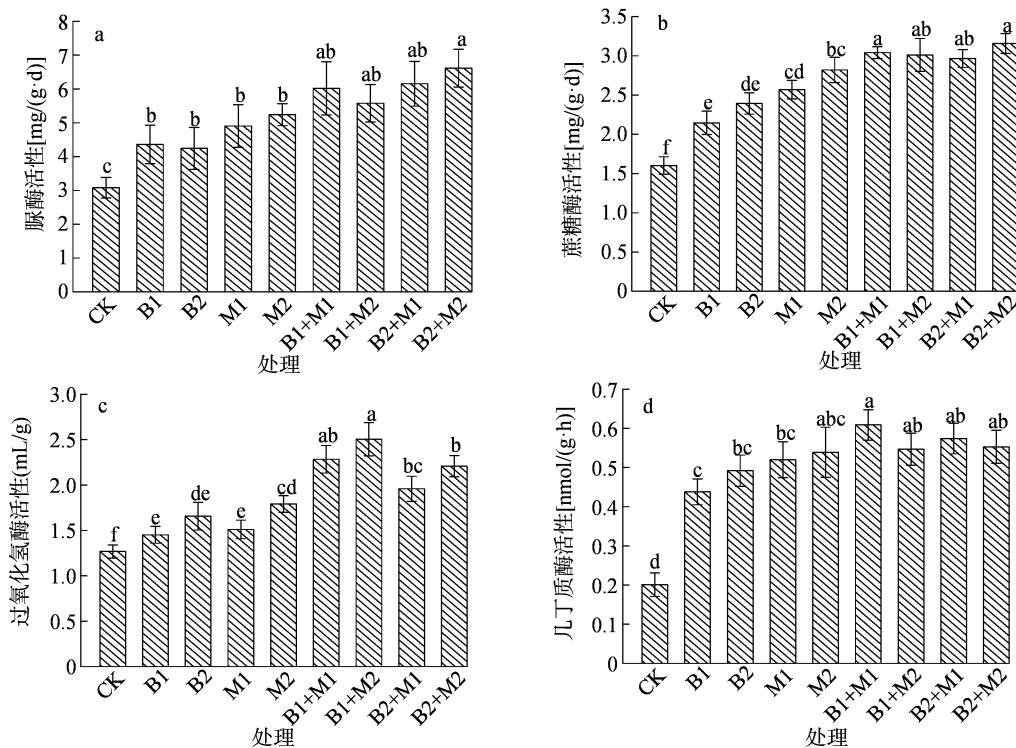


图2 生物炭和鸡粪对Pb胁迫下番茄土壤酶活性的影响

总含量分别显著降低 27.48% ~ 57.10%、37.97% ~ 69.55% 及 32.49% ~ 63.06%，其中均以 B1 + M1 处理存在最低值。在番茄根系土壤不同形态 Pb 含量中，不同形态 Pb 含量均表现为残渣态 < 有机结合态 < 可交换态 < 碳酸盐结合态 < 铁锰氧化态，其中可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、

有机结合态及残渣态分别占总生物活性物质含量的 13.98% ~ 28.43%、16.68% ~ 27.25%、27.22% ~ 40.67%、10.92% ~ 21.36% 及 6.19% ~ 11.47%。可交换态、碳酸盐结合态 Pb 含量整体以 B1 + M1、B2 + M2 处理较高，CK 较低，而铁锰氧化态、有机结合态、残渣态 Pb 含量则与之相反。

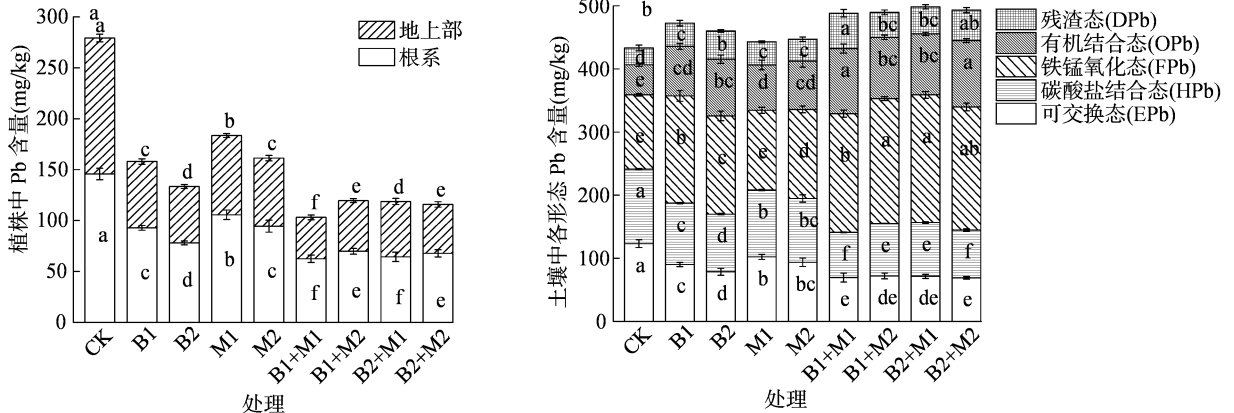


图3 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄植株中 Pb 含量及土壤中各形态 Pb 的影响

2.6 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄 Pb 生物富集及转运的影响

由图 4 可知，在 Pb 胁迫下，铅 (Pb) 的生物富集系数 (BCF) 以对照处理 (CK) 最高，为 1.157，施用生物炭、鸡粪钝化剂相关处理较其显著降低 21.69% ~ 36.82%；就生物炭、鸡粪钝化剂相关处理而言，以 B1 + M1 处理最低，其他处理较其提高 1.23% ~ 58.28%，其中与 B1 + M2、B2 + M1、B2 +

M2 处理无显著差异，而显著小于其他单施生物炭或单施鸡粪钝化剂处理。各处理转移系数 (TF) 差异规律与 BCF 总体一致，即各处理表现为 B1 + M1 处理 < B1 处理 < B2 + M2 处理 < B2 处理 < B1 + M2 处理 < M2 处理 < B2 + M1 处理 < M1 处理 < CK，也以 CK 最高，B1 + M1 处理最低，其中与 B1 + M1 处理相比，其他处理提高 7.83% ~ 40.89%。

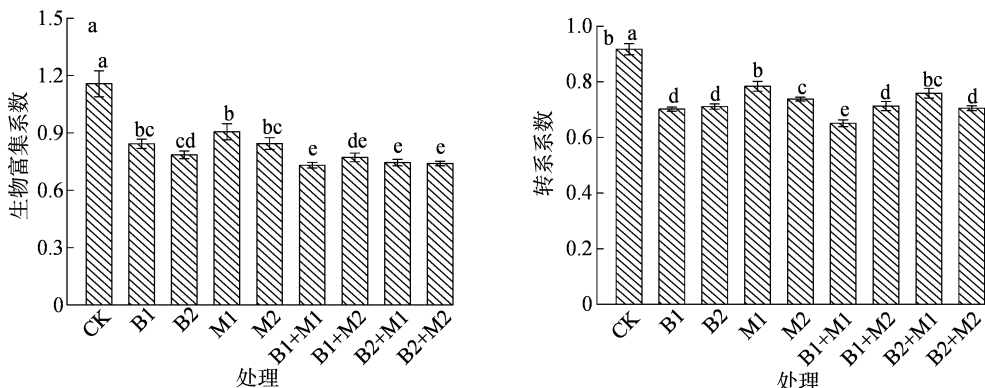


图4 生物炭和鸡粪对 Pb 胁迫下番茄 Pb 生物富集及转运的影响

3 讨论

生物炭、鸡粪均是目前常用的重金属钝化剂，有研究表明，施用生物炭和鸡粪可有效减轻重金属对植物的毒害作用^[8,23]。本研究结果表明，所有生物炭、鸡粪钝化剂处理均可在一定程度上提高 Pb

胁迫下的番茄干物质质量、株高、SPAD 值、根系性状 (表面积、直径、总长度、体积)，该结果与前人的研究基本一致，刘领等的研究表明，不同秸秆生物炭、鸡粪添加量均可显著增大 Pb 胁迫下玉米的株高、鲜重、光合色素含量及光合性能^[24]。这可能是因为鸡粪为有机肥，可直接为番茄提供必需的营养元

素,进而促进植株生长^[23]。本研究中,单施或联合施用生物炭、鸡粪,番茄叶片的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性有所增加,而丙二醛含量显著降低,这表明生物炭和鸡粪均可有效降低 Pb 胁迫导致的活性氧损伤。此外,研究结果进一步显示,与单施生物炭相比,单施鸡粪改良剂在促进番茄生长发育和提高叶片抗氧化酶活性方面更有效,而生物炭与鸡粪配施对提高叶片抗氧化酶活性的效果更大。

土壤有机碳、有效养分是影响作物生长的主要限制因素,其含量高低决定着当季作物的生长发育及产量的形成^[25]。在本研究中,与对照处理(CK)相比,生物炭、鸡粪钝化剂相关处理均增加土壤有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾含量,同时降低土壤有效铅含量,这可能是因为生物炭中含有大量的碳元素,且含有一定量的大量元素和中微量矿质养分,可有效提高土壤基础肥力^[9]。此外,生物炭的表面电荷、官能团、多孔结构、较大的表面积等有利于保留土壤水分、养分,增加土壤孔隙度、降低容重,为植物生长提供有利环境^[26]。而鸡粪中含有多种养分,可以增加土壤养分含量,改善土壤团聚体的结构和稳定性,增强土壤微生物活性^[27]。

土壤酶受土壤微生物群落分泌的胞内和胞外酶所介导,参与植物的养分循环和利用,其活性可作为判断土壤是否健康的指标^[28]。本研究结果表明,生物炭和鸡粪处理均可显著提高 Pb 胁迫下土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和几丁质酶的活性。这与前人的研究结果总体趋于一致,即鸡粪、生物炭是优质的土壤改良剂,可通过促进土壤微生物增殖来提高土壤酶活性^[29]。本研究中,与 CK 相比,在生物炭和鸡粪的组合施用处理下,铅污染土壤中的蔗糖、脲酶、过氧化氢酶及几丁质酶活性总体较高。土壤中酶活性的增加可能是由于铅胁迫降低、微生物活性提高造成的^[30]。本研究中,在生物炭和鸡粪处理下铁锰氧化态、有机结合态、残渣态 Pb 含量增加,说明通过将 Pb 结合在土壤中并将其转化为不可用的形态,可能是生物炭、鸡粪降低 Pb 胁迫的潜在机制之一。

前人研究发现,施用秸秆生物炭、农家肥均可显著降低玉米根系、茎及叶片中的 Pb 含量,同时减少玉米根和地上部组织中的 Pb、Zn、Cu、Cd 含量^[24]。本研究结果表明,施用生物炭和/或鸡粪钝化剂均可降低番茄 Pb 含量,其中生物炭和鸡粪组合施用最大程度地降低了番茄对 Pb 的吸收,而生物炭在降低番茄组织中 Pb 含量方面比鸡粪更有

效。施用生物炭后番茄的 Pb 含量减少,可能是由于生物炭具有较大的表面积、多孔结构和高表面电荷密度,具有吸收重金属的能力^[31]。本研究中,与单施鸡粪处理相比,生物炭在提高土壤 pH 值方面更有效。土壤 pH 值的提高有利于将重金属转变为不易移动的离子形式,降低重金属的生物利用度,从而减少重金属离子从土壤到植物组织的转移^[10]。鸡粪改良剂对番茄组织中 Pb 浓度的降低作用可能与表面电荷、金属结合化合物、腐殖质等能与重金属产生吸附、络合、沉淀反应有关^[32]。

本研究中,生物炭和鸡粪组合使用对于减少番茄对 Pb 的吸收更有效,生物炭和鸡粪之间存在附加相互作用,二者结合使用可有效减轻 Pb 毒性,并改善 Pb 胁迫下的番茄生长。生物炭和鸡粪联合施用的叠加效应应有多种机制,一方面,施用鸡粪可弥补生物炭自身的营养缺乏^[23-24],而施用生物炭可以增加养分保留,延长鸡粪中养分的释放期,有效提高有机肥的利用率^[24];生物炭与鸡粪组合使用可以提高土壤有机碳含量、电导性、pH 值以及物理吸附和沉淀能力,有利于吸附和固定重金属^[33-34]。另一方面,生物炭和鸡粪之间存在积极的相互作用,生物炭表面可被有机肥中的腐殖质和微生物氧化,且生物炭和鸡粪混合物中的腐殖质和矿物氧化物可以产生重金属络合物^[29]。此外,生物炭的孔隙结构可以提供生态位,作为鸡粪和土壤中微生物的载体,从而为微生物生长提供有利的环境来固定重金属^[35]。

4 结论

本研究结果表明,生物炭、鸡粪单施或联合施用均能改善铅胁迫下的番茄生长发育、抗氧化酶活性和土壤酶活性,同时生物炭、鸡粪处理均可降低番茄植株中的铅含量,介导改变土壤铅形态,以降低有效铅含量。单施生物炭在提高土壤 pH 值、减少 Pb 从土壤到番茄的易位以及促进 Pb 固定方面更有效;单施鸡粪对促进番茄生长和提高叶片抗氧化酶活性更有效;生物炭和鸡粪联合施用具有累加效应,对于改善番茄生长、提高抗氧化酶活性和降低番茄组织、土壤中的铅含量更有效,其中以 B1 + M1 处理效果较佳,与 B1 + M1 处理相比,其他处理生物富集系数、转移系数分别提高 1.23% ~ 58.28%、7.83% ~ 40.89%。

参考文献:

[1] 曾思燕,于昊辰,马静,等. 中国耕地表层土壤重金属污染状况

- 评判及休耕空间权衡[J]. 土壤学报,2022,59(4):1036-1047.
- [2] Liu X, Ju Y W, Mandzhieva S, et al. Sporadic Pb accumulation by plants: influence of soil biogeochemistry, microbial community and physiological mechanisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 444(Pt A):130391.
- [3] Jia L L, Ma H K, Guan Y, et al. Lead absorption capacity in different parts of plants and its influencing factors: a systematic review and meta-analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022;1-12.
- [4] 朱诗苗, 宋杭霖, 张丽, 等. 铅胁迫对烟草生长及生理生化指标的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(3):465-472.
- [5] 韩云昌, 张乃明. 施用钝化剂对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10):52-56.
- [6] 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 等. 重金属污染土壤修复研究进展:原理与技术[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8):2277-2288.
- [7] 彭红宇, 聂兆君, 刘红恩, 等. 施用低温生物炭对土壤镉、铅生物有效性的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6):1524-1531.
- [8] 张红娟, 陈梦华, 何珊珊, 等. 有机肥配施生物炭对设施番茄产量、品质及土壤养分和重金属累积的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(12):1978-1986.
- [9] 王丽, 蔡景行, 邵代兴, 等. 改性生物炭对重金属污染修复研究进展及其机制分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6):232-238.
- [10] Wang Y, Wang H S, Tang C S, et al. Remediation of heavy-metal-contaminated soils by biochar: a review [J]. Environmental Geotechnics, 2020, 9(3):135-148.
- [11] 黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 等. 生物炭对土壤-植物体系中铅镉迁移累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10):2205-2216.
- [12] 毛欣宇, 翟森茂, 姜小三, 等. 不同改性生物炭对农田土壤理化性质及铅、镉钝化的影响机制研究[J]. 环境工程, 2023, 41(2):113-121, 139.
- [13] 姜晶, 邓精灵, 盛光遥. 生物炭老化及其对重金属吸附影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2022, 31(10):2089-2100.
- [14] Gao R L, Xiang L, Hu H Q, et al. High-efficiency removal capacities and quantitative sorption mechanisms of Pb by oxidized rape straw biochars[J]. Science of the Total Environment, 2020, 699:134262.
- [15] 李可, 谢厦, 孙彤, 等. 鸡粪有机肥对设施菜地土壤重金属和微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12):4827-4839.
- [16] 宋姿蓉, 俄胜哲, 袁金华, 等. 不同有机物料对灌漠土重金属累积特征及作物效应的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19):3367-3379.
- [17] Wang Q Q, Huang Q, Guo G M, et al. Reducing bioavailability of heavy metals in contaminated soil and uptake by maize using organic-inorganic mixed fertilizer[J]. Chemosphere, 2020, 261:128122.
- [18] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018.
- [19] 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 食品中铅的测定:GB 5009.12—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [21] 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 等. 腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(5):2136-2145.
- [22] 王吉秀, 李想, 李祖然, 等. 小花南芥与玉米间作对Pb化学形态及富集特征的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(12):3456-3467.
- [23] Liu L, Li J W, Wu G H, et al. Combined effects of biochar and chicken manure on maize (*Zea mays* L.) growth, lead uptake and soil enzyme activities under lead stress[J]. PeerJ, 2021, 9:e11754.
- [24] 刘领, 悦飞雪, 李继伟, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4):262-267.
- [25] 张文学, 王少先, 金伟, 等. 有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7):1300-1312.
- [26] 徐达勋, 颜振峰. 生物炭与根际促生菌对辣椒氮素利用率、产量及土壤氮转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11):133-139.
- [27] 席凯鹏, 席吉龙, 杨苏龙, 等. 长期秸秆配施鸡粪对棉田土壤重金属累积的影响及生态风险评价[J]. 棉花学报, 2022, 34(1):48-59.
- [28] 谭向平, 何金红, 郭志明, 等. 土壤酶对重金属污染的响应及指示研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(1):50-62.
- [29] Meng J, Tao M M, Wang L L, et al. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 633:300-307.
- [30] Naeem I, Masood N, Turan V, et al. Prospective usage of magnesium potassium phosphate cement combined with *Bougainvillea* alba derived biochar to reduce Pb bioavailability in soil and its uptake by *Spinacia oleracea* L [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208:111723.
- [31] 孙家婉, 张振华, 赵玉萍, 等. 生物炭改性及其在农田土壤重金属修复中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(10):9-15.
- [32] 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.
- [33] Liang J, Li X M, Yu Z G, et al. Amorphous MnO₂ modified biochar derived from aerobically composted swine manure for adsorption of Pb(II) and Cd(II) [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(6):5049-5058.
- [34] 王瑞飞, 孔盈利, 魏艺璇, 等. 菌剂对鸡粪-生物炭堆肥理化性质和微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(4):966-977.
- [35] 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.