

王 钊, 张小莉, 杨 杰, 等. 不同改良剂对富硒高镉耕地土壤理化性质和玉米对硒、镉吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 517-525.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.011

不同改良剂对富硒高镉耕地土壤理化性质和玉米对硒、镉吸收的影响

王 钊¹, 张小莉², 杨 杰³, 陈继平⁴, 张浩楠¹, 吕家琰¹, 贾汉忠¹, 代允超¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.汉阴县林业技术推广站, 陕西 安康 725000; 3.兴平市农业技术推广中心, 陕西 兴平 712000; 4.陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710000)

摘要: 为改良富硒高镉耕地土壤, 本研究选取凹凸棒土、叶面硅肥、生物炭、微生物菌剂作为改良剂, 通过单独或联合施用的方式, 探究其对土壤理化性质及玉米对硒、镉吸收的影响。结果表明, 施用生物炭, 土壤 pH 值、土壤阳离子交换量、土壤有机质含量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤中性磷酸酶活性、土壤荧光素二乙酸酯 (FDA) 水解酶活性、土壤脲酶活性均显著高于对照, 且土壤有效硒含量、有效镉含量均显著低于对照。与单独施用生物炭或微生物菌剂处理相比, 施用生物炭+微生物菌剂使土壤有效磷含量、荧光素二乙酸酯 (FDA) 水解酶活性、中性磷酸酶活性、脲酶活性均显著提高, 土壤有效镉含量显著降低。与对照相比, 施用凹凸棒土+叶面硅肥, 土壤 pH 值、阳离子交换量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤有效硒含量、玉米籽粒硒含量显著升高, 同时土壤有效镉含量显著降低。综上, 施用生物炭+微生物菌剂、凹凸棒土+叶面硅肥对土壤的改良效果较好。本研究结果为富硒高镉耕地的土壤改良提供了理论依据。

关键词: 土壤改良剂; 富硒高镉耕地; 镉污染; 玉米

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0517-09

Effects of different amendments on the physicochemical properties of selenium-rich and high-cadmium cultivated soils and the absorption of selenium and cadmium by maize

WANG Zhao¹, ZHANG Xiaoli², YANG Jie³, CHEN Jiping⁴, ZHANG Haonan¹, LYU Jialong¹, JIA Hanzhong¹, DAI Yunchao¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 2. Hanyin County Forestry Technology Extension Station, Ankang 725000, China; 3. Xingping Agricultural Technology Extension Center, Xingping 712000, China; 4. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710000, China)

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2024NC-ZDCYL-02-14); 国家重点研发计划项目 (2023YFD1700102); 陕西省农业关键核心技术攻关项目 (2024NYGG011); 陕西省公益性地质调查项目 (201908)

作者简介: 王 钊 (1999-), 男, 甘肃渭源人, 硕士研究生, 主要研究方向为受污染耕地的安全利用与提质增效。(E-mail) 502071403@qq.com

通讯作者: 代允超, (E-mail) daiyc2018@163.com

Abstract: In order to improve selenium-rich and high-cadmium cultivated soils, this study selected atapulgite, foliar silicon fertilizer, biochar, and microbial inoculant as amendments. Through single or combined application methods, the effects on the physical and chemical properties of soil and the absorption of selenium and cadmium by maize were explored. The results showed that the soil pH, soil cation exchange capacity, soil organic matter

content, soil available phosphorus content, soil available potassium content, soil neutral phosphatase activity, soil fluorescein diacetate (FDA) hydrolase activity, and soil urease activity in the biochar-applied treatment were significantly higher than those in the control, and the soil available selenium content and soil available cadmium content were significantly lower than those in the control. Compared with the treatments of applying biochar or microbial inoculant alone, the soil available phosphorus content, fluorescein diacetate (FDA) hydrolase activity, neutral phosphatase activity, and urease activity in the treatment of applying biochar + microbial inoculant were significantly increased, and the soil available cadmium content was significantly decreased. Compared with the control, the soil pH, cation exchange capacity, soil available phosphorus content, soil available potassium content, soil available selenium content, and selenium content in maize grains in the treatment of applying attapulgite + foliar silicon fertilizer were significantly increased, and the soil available cadmium content was significantly decreased. In conclusion, the application of biochar + microbial inoculant and attapulgite + foliar silicon fertilizer had better effects on soil improvement. This study provides a theoretical basis for the soil improvement of selenium-rich and high-cadmium cultivated lands.

Key words: soil amendment; selenium-rich and high-cadmium cultivated land; cadmium pollution; maize

硒(Se)是人体必需的微量元素之一,在抗氧化反应、免疫调节及硒蛋白合成等多种生物过程中发挥重要作用^[1-2]。然而,硒在地壳中的分布并不均匀,导致中国耕地同时存在硒缺乏与过量的现象。调查结果显示,中国约 45% 的耕地 Se 含量 ≤ 0.1 mg/kg,富硒耕地仅占 10%^[3-4],约 7×10^8 人面临不同程度的硒摄入不足的问题^[5]。然而富硒土壤中,硒和镉(Cd)等有害重金属伴生,造成这一现象的主要原因是土壤中的硒、镉风化自相同母岩,如黑色碳质硅岩或黄铁矿^[6-7]。

镉是一种迁移性较强的重金属,易通过土壤-农产品-人类的食物链在人体内富集。镉在人体内主要累积于肝、肾等器官,会对细胞、组织、骨骼造成不可逆的损伤^[8-9]。研究表明,施用含硒肥料可减少作物对土壤中镉的吸收量,减轻镉对植物生长的胁迫^[10-11]。Yang 等^[12]研究发现,在自然条件下,土壤镉的有效性不会因为硒-镉拮抗作用而显著降低。调查发现,在湖北恩施富硒高镉耕地种植玉米、水稻、辣椒等农作物,农作物体内镉含量超标^[13]。硒、镉伴生现象不仅降低了农田的利用率,还对农产品的质量安全产生影响。

目前对镉污染土壤修复的研究已较为成熟,常用的修复方法为添加土壤钝化剂和喷施叶面阻控剂。土壤钝化剂包括炭、生物质肥料、黏土矿物等,叶面阻控剂包括叶面硅肥、叶面硒肥及复配叶面肥^[14-16]。此外,微生物修复技术近年来受到广泛关注。具有镉钝化能力的细菌或真菌可通过直接吸附、重金属代谢、胞外分泌物吸附以及改变土壤理化性质等方式降低土壤中镉的有效性,减轻重金属对植物的胁迫^[17-19]。

但微生物活性会受到土壤环境的影响,其修复效果可能低于预期。近期研究表明,生物炭能够为微生物提供碳源和生存环境,微生物定殖于生物炭后,其对重金属的钝化效果显著增强^[20-21]。

在富硒高镉土壤中,有效态硒元素主要以硒酸盐、亚硒酸盐形态存在,以阴离子形态进行迁移。土壤中有有效态镉则以二价阳离子形成的盐或络合物的形式存在,以阳离子形态在土壤中迁移。此外,土壤镉有效性受黏土矿物含量和土壤阳离子交换量影响,硒元素有效性则受到有机胶体和铁锰氧化物含量的影响^[22]。镉钝化剂的添加可能会对土壤硒的有效性产生影响。因此本研究拟选取凹凸棒土、叶面硅肥、生物炭、微生物菌剂作为改良剂,通过单独或联合施用的方式,探究其对土壤理化性质及玉米对硒、镉吸收量的影响,以期富硒高镉土壤的改良和利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

凹凸棒土购自鑫铖矿业有限公司,产自内蒙古乌兰察布,属土状坡缕石,粒径为 200 目,其 pH 值为 8.59,阳离子交换量(CEC)为 35.79 cmol/kg。叶面硅肥购自英皇生物科技有限公司,其有效成分含量为 $\text{SiO}_2 \geq 27\%$ 、 $\text{Si} \geq 12\%$ 。生物炭由玉米秸秆在 450 °C 热裂解 4 h 制得,其 pH 值为 8.23,阳离子交换量为 21.58 cmol/kg,有机碳含量为 472.50 g/kg。巨大芽孢杆菌、侧孢芽孢杆菌购自广西康绿生物有限公司,每 1 g 包含 1×10^{10} 个活菌。上述试验材料中均未检测出硒、镉元素。

固定化微生物生物炭的制备方法如下:首先将

巨大芽孢杆菌和侧孢芽孢杆菌的混合菌剂以1:10(质量体积比)的比例溶于牛肉蛋白胨培养基中,置于200 r/min的恒温振荡器中培养2 h。随后,将生物炭与菌液以1:8(质量体积比)的比例混合,孵育24 h^[21]。供试玉米品种为正大12号。

1.2 试验区域

试验地位于陕西省安康市汉滨区恒口镇,该区

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil

pH值	CEC (cmol/kg)	SOM (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	TCd (mg/kg)	ACd (mg/kg)	TSe (mg/kg)	ASe (mg/kg)
6.26	38.76	35.74	0.29	12	0.906	0.246	0.933	0.112

CEC:阳离子交换量;SOM:有机质含量;TP:全磷含量;TK:全钾含量;TCd:全量镉含量;ACd:有效镉含量;TSe:全硒含量;ASe:有效硒含量。

1.3 试验设计

试验于2023年4-10月进行,每种改良剂的施用量参照前人的研究方法^[23-24]。如表2所示,共设置7个处理,分别为对照(CK)、施用凹凸棒土10 t/hm²处理(A)、施用叶面硅肥15 kg/hm²处理(B)、施用凹凸棒土10 t/hm²+叶面硅肥15 kg/hm²处理(C)、施用生物炭10 t/hm²处理(D)、施用微生物菌剂处理120 kg/hm²(E)、施用生物炭10 t/hm²+微生物菌剂处理120 kg/hm²(F)。其中巨大芽孢杆菌和侧孢芽孢杆菌以1:1(质量比)混合。叶面硅肥稀释500倍后,使用喷雾器均匀喷施于玉米叶片表面,分别在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期各喷施1次,喷施时间为晴天16:00。玉米于2023年4月种植,种植前7 d将所用试验材料施入土壤,用旋耕机混匀。种植时按照农户习惯施用基肥,氮肥和磷肥分别以尿素和磷酸二铵施加,施肥量约为氮肥144 kg/hm²(以氮计),磷肥15 kg/hm²(以磷计)。每个试验小区面积12 m²(3 m×4 m),每个处理重复3次,各处理随机排列。本研究的肥料施用以及水肥管理都参照试验区的农户玉米种植标准进行。

1.4 样品采集与处理

待玉米生长成熟后,采集土壤与植物样品。每个处理随机采集6株玉米整株,用于测定玉米中硒、镉的累积量。每小区选取中间3行,随机收获连续30株玉米的果穗,并调查小区玉米有效穗数用于计算产量。将采集的玉米植株样品分为根系、茎叶、籽粒3部分,分别用自来水和去离子水洗涤,沥干水分后,于105℃烘箱烘30 min杀青,随后在65℃下烘干至重量恒定。烘干后的样品经粉碎机粉碎,过

100目尼龙筛。以五点取样法采集0~20 cm耕层土壤,经四分法缩减样品量后带回实验室。收集到的土壤样品自然风干,研磨并依次过20目和100目尼龙网筛。

域地处秦巴天然富硒区,土壤中硒镉伴生现象普遍。试验地土壤硒含量高于国家富硒耕地标准(0.4 mg/kg,pH值≤7.5),镉含量高于国家耕地土壤重金属污染风险筛选值(0.3 mg/kg,pH值≤7.5),属于典型的天然富硒区镉污染土壤。该地区土壤基本理化性质如表1所示。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	试验设计
CK	不施用任何改良剂
A	施用凹凸棒土10 t/hm ²
B	施用叶面硅肥15 kg/hm ²
C	施用凹凸棒土10 t/hm ² +叶面硅肥15 kg/hm ²
D	施用生物炭10 t/hm ²
E	施用微生物菌剂120 kg/hm ²
F	施用生物炭10 t/hm ² +微生物菌剂120 kg/hm ²

1.5 理化性质测定

1.5.1 生物炭表征 生物炭表征:将制备得到的微生物固定化生物炭用无菌水冲洗,冷冻干燥。用扫描电子显微镜(型号S-4800,日本日立公司产品)对生物炭进行表征。另设置未固定微生物的生物炭为对照,用扫描电镜观察。

1.5.2 土壤理化性质的测定 以水土比2.5:1.0(体积质量比)制备悬浊液,使用pH计测定pH值。阳离子交换量使用乙酸铵离心交换法测定。有机质含量使用重铬酸钾外加热法测定。有效磷含量使用钼酸铵比色法测定。速效钾含量使用乙酸铵浸提-火焰发射光谱法测定^[25]。

1.5.3 土壤和玉米植株中镉、硒含量的测定 采用

HCl-HNO₃-HClO₄ 消解土壤,使用石墨炉原子吸收光谱仪(型号 PinAAcle 900T,PerkinElmer 公司产品)测定土壤全量镉含量。使用 DTPA 浸提-石墨炉原子吸收光谱法测定土壤有效镉含量。使用 HNO₃-HClO₄ 消解植株,使用消煮液原子吸收光谱仪(型号为 PinAAcle 900T,PerkinElmer 公司产品)石墨炉法测定植株镉含量。使用 HCl-HNO₃-HClO₄ 消解土壤,使用液相色谱-原子荧光联用仪(型号:LC-AFS-8530,北京海光仪器有限公司产品)测定土壤全量硒含量。使用 K₂HPO₄ 浸提-液相色谱原子荧光法测定土壤有效硒含量。使用 HNO₃-HClO₄ 消解植株,使用原子荧光光谱法测定植株硒含量^[26]。采用国家标准物质(土壤:GBW07554;玉米:GBW10012)进行质量控制,土壤样品和玉米样品回收率分别为 94%~106% 和 96%~104%。

1.5.4 土壤酶活性测定 使用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性。以荧光素二乙酸酯为底物,使用分光光度法测定荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性。使用磷酸苯二钠比色法测定中性磷酸酶活性^[27-28]。

1.6 数据处理与分析

利用 Excel 2013 软件进行试验数据统计,利用 SPSS 26 软件进行方差分析及相关性分析,利用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 微生物的生物炭定殖情况

图 1a 为生物炭的扫描电镜图像,玉米秸秆生物炭表面呈多颗粒层状结构,颗粒之间存在大量间隙,这些间隙为微生物在生物炭表面的定殖提供了有利条件。如图 1b 所示,巨大芽孢杆菌、侧孢芽孢杆菌微生物在生物炭定殖后,生物炭内部有大量杆状微生物,表明微生物与生物炭结合紧密。

2.2 不同处理对玉米产量的影响

如图 2 所示,各处理玉米产量为 4 888.5~5 197.5 kg/hm²。与对照相比,施用凹凸棒土、叶用硅肥、凹凸棒土+叶用硅肥、生物炭、微生物菌剂、生物炭+微生物菌剂对玉米产量均无显著影响($P>0.05$)。

2.3 不同处理对土壤理化性质的影响

如图 3 所示,A 处理、C 处理、D 处理、E 处理和 F 处理土壤 pH 值均显著高于对照($P<0.05$),B 处理土壤 pH 值和对照相比无显著差异($P>0.05$)。A

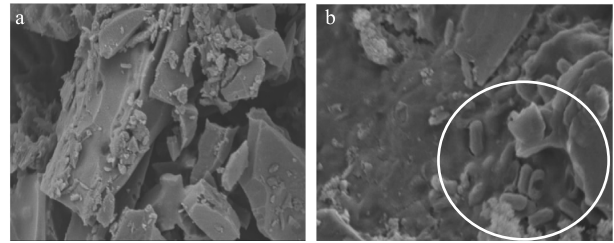
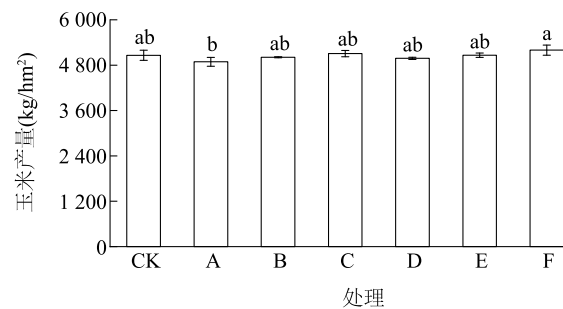


图 1 生物炭(a)及微生物固定化生物炭(b)扫描电镜图像
Fig.1 Scanning electron microscope images of biochar (a) and microbe-immobilized biochar (b)



CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

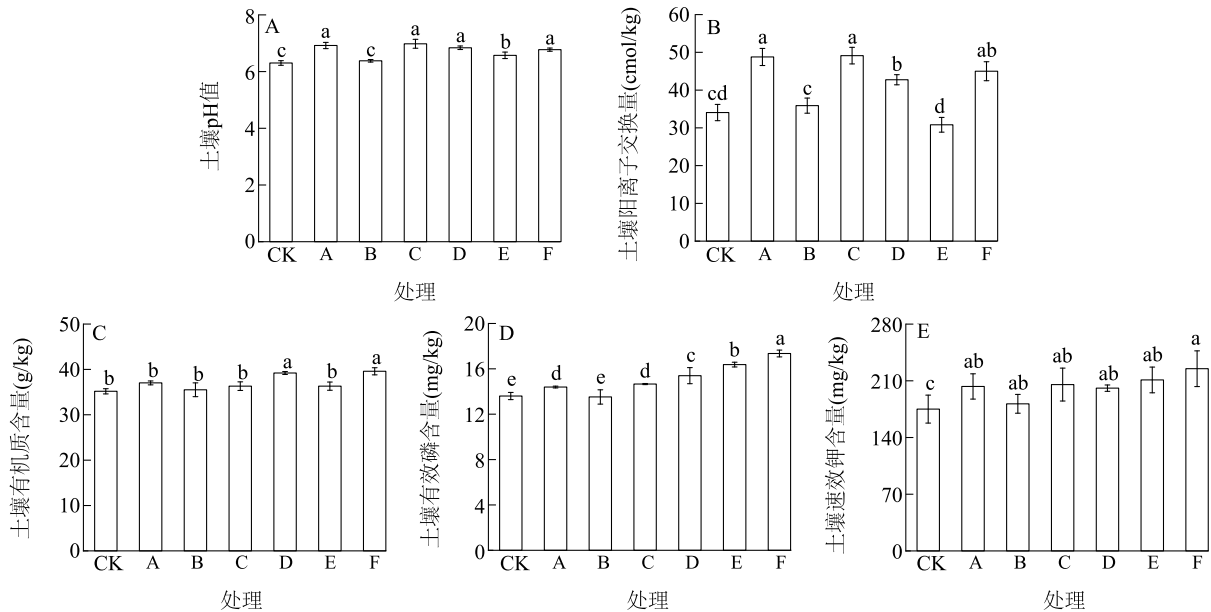
图 2 不同处理对玉米产量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on maize yield

处理、C 处理、D 处理和 F 处理土壤阳离子交换量均显著高于对照($P<0.05$),B 处理、E 处理土壤阳离子交换量与对照相比无显著差异($P>0.05$)。D 处理、F 处理土壤有机质含量均显著高于对照($P<0.05$),A 处理、B 处理、C 处理、E 处理土壤有机质含量与对照相比无显著差异($P>0.05$)。综上,施用凹凸棒土、凹凸棒土+叶面硅肥、生物炭+微生物菌剂对土壤 pH 值和阳离子交换量有明显提升效果,施用生物炭、生物炭+微生物菌剂对土壤有机质含量有明显提升效果。

A 处理、C 处理、D 处理、E 处理和 F 处理土壤有效磷含量均显著高于对照($P<0.05$),F 处理土壤有效磷含量显著高于对照和其他处理($P<0.05$),B 处理土壤有效磷含量与对照相比无显著差异($P>0.05$)。A 处理、B 处理、C 处理、D 处理、E 处理和 F 处理土壤速效钾含量均显著高于对照($P<0.05$)。综上,施用凹凸棒土、凹凸棒土+叶面硅肥、生物炭、

微生物菌剂、生物炭+微生物菌剂均对土壤有效磷含量、速效钾含量有明显提升效果。



CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

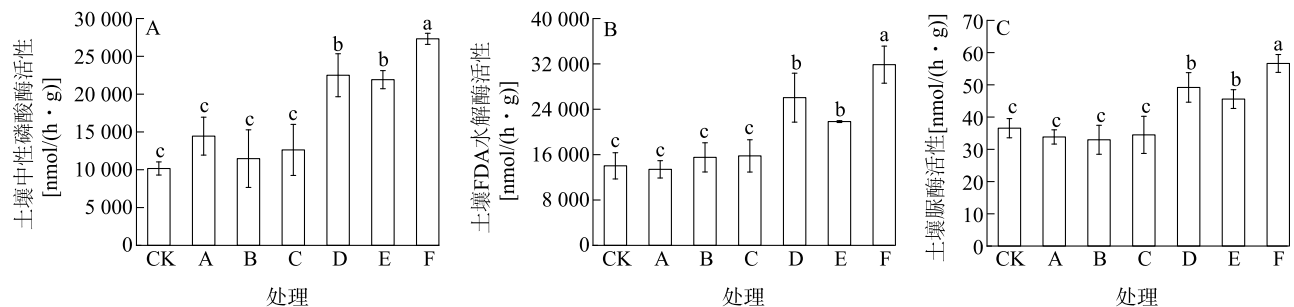
图3 不同处理对土壤理化性质的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties

2.4 不同处理对土壤酶活性的影响

如图4所示,与对照相比,D处理、E处理、F处理土壤中性磷酸酶活性显著提高了121.28%、115.51%、168.65% ($P < 0.05$),A处理、B处理、C处理土壤中性磷酸酶活性与对照相比无显著差异 ($P > 0.05$),F处理土壤中性磷酸酶活性显著高于对照和其他处理 ($P < 0.05$)。与对照相比,D理、E理、F处理土壤FDA水解酶活性分别显著提高了85.74%、

55.67%、127.25% ($P < 0.05$),A处理、B处理、C处理土壤FDA水解酶活性和对照相比无显著差异 ($P > 0.05$),F处理土壤FDA水解酶活性显著高于对照和其他处理 ($P < 0.05$)。与对照相比,D理、E理、F处理土壤脲酶活性分别显著提高了38.36%、28.23%、54.92% ($P < 0.05$),A处理、B处理、C处理土壤脲酶活性与对照相比无显著差异 ($P > 0.05$),F处理土壤脲酶活性显著高于对照和其他处理 ($P < 0.05$)。



CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。FDA:荧光素二乙酸钠。

图4 不同处理对土壤酶活性的影响

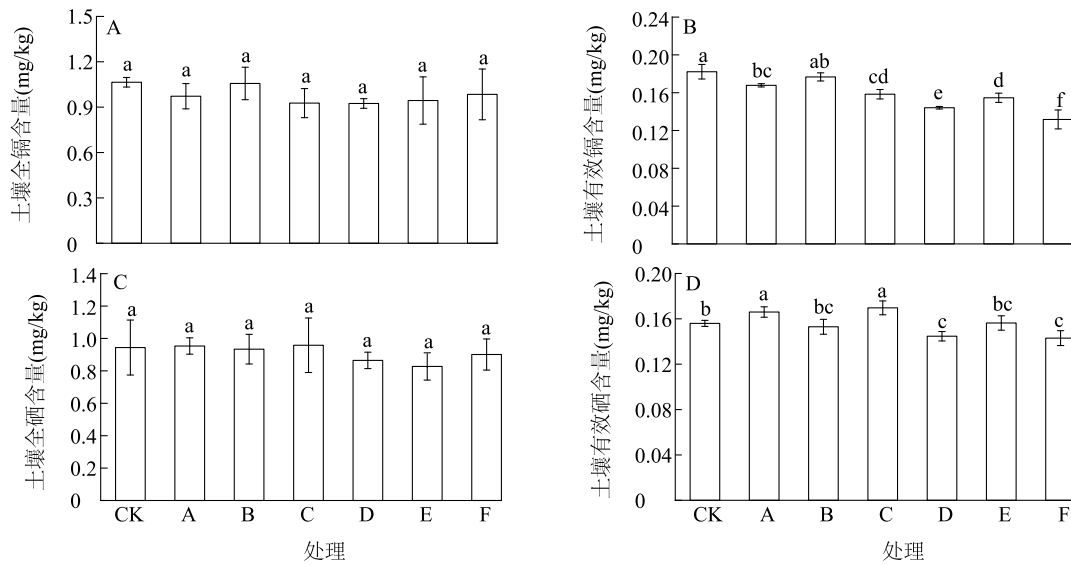
Fig.4 Effects of different treatments on soil enzyme activity

综上,D 处理、E 处理、F 处理土壤中磷酸酶活性、荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性、脲酶活性显著高于对照,且 F 处理土壤中磷酸酶活性、FDA 水解酶活性、脲酶活性显著高于对照和其他处理,表明施用生物炭+微生物菌剂对土壤酶活性的提升效果最好。

2.5 不同处理对土壤镉、硒含量的影响

如图 5 所示,各处理土壤全量镉含量和对照相比均无显著差异($P>0.05$),A 处理、C 处理、D 处理、E 处理、F 处理土壤有效镉含量均显著低于对照

($P<0.05$),F 处理土壤有效镉含量显著低于对照和其他处理($P<0.05$)。各处理土壤全硒含量和对照相比均无显著差异($P>0.05$)。与对照相比,D 处理、F 处理土壤有效硒含量显著降低了 7.05%、8.33%($P<0.05$),A 处理、C 处理土壤有效硒含量显著提高了 6.41%、8.97%($P<0.05$)。B 处理、E 处理土壤有效硒含量与对照相比无显著差异($P>0.05$)。综上,施用凹凸棒土、凹凸棒土+叶面硅肥能够显著降低土壤有效镉含量,同时显著提高土壤有效硒含量。



CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 5 不同处理对土壤镉、硒含量的影响

Fig.5 Effects of different treatments on the contents of cadmium and selenium in soil

2.6 不同处理对玉米的镉、硒吸收量的影响

如表 3 所示,玉米各部位硒含量表现为根系>茎叶>籽粒。D 处理、F 处理玉米根系、茎叶硒含量显著低于对照($P<0.05$)。与对照相比,C 处理玉米籽粒硒含量显著增加了 16.18%($P<0.05$),D 处理、

F 处理玉米籽粒硒含量显著降低了 15.44%($P<0.05$)。各处理硒从根系向籽粒的转运系数和对照相比无显著差异($P>0.05$),表明各处理均未对硒在玉米体内的迁移产生显著影响。综上,施用凹凸棒土+叶面硅肥施能够显著增加玉米籽粒硒含量。

表 3 不同处理对玉米硒含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on selenium content in maize

类别	CK	A	B	C	D	E	F
玉米根系硒含量(mg/kg)	0.672±0.032ab	0.719±0.021a	0.667±0.019b	0.723±0.009a	0.607±0.016c	0.661±0.041ab	0.601±0.025c
玉米茎叶硒含量(mg/kg)	0.217±0.019ab	0.237±0.021a	0.209±0.013b	0.246±0.017a	0.209±0.020c	0.227±0.012ab	0.020±0.005c
玉米籽粒硒含量(mg/kg)	0.136±0.004b	0.153±0.006ab	0.141±0.003b	0.158±0.008a	0.115±0.011c	0.142±0.005ab	0.115±0.005c
转运系数	0.20a	0.21a	0.21a	0.22a	0.19a	0.21a	0.19a

CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

如表4所示,玉米各部位镉含量表现为根系>茎叶>籽粒。A处理、C处理、D处理、F处理玉米根系、茎叶镉含量显著低于对照($P<0.05$)。B处理玉米根系、茎叶镉含量与对照相比无显著差异($P>0.05$)。与对照相比,C处理、D处理、F处理玉米籽粒镉含量分别显著降低了24.59%、19.67%、

32.79%($P<0.05$)。B处理、C处理镉从根系向籽粒的转运系数显著低于对照($P<0.05$),A处理、D处理、E处理、F处理镉从根系向籽粒的转运系数与对照相比无显著差异($P>0.05$)。综上,施用凹凸棒土+叶面硅肥施能够显著增加玉米籽粒硒含量,同时显著降低玉米籽粒镉含量。

表4 不同处理对玉米镉含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on cadmium content in maize

类别	CK	A	B	C	D	E	F
玉米根系镉含量(mg/kg)	0.87±0.09a	0.78±0.07b	0.87±0.04a	0.78±0.09b	0.70±0.07b	0.79±0.04b	0.66±0.01c
玉米茎叶镉含量(mg/kg)	0.32±0.01a	0.26±0.02b	0.34±0.01a	0.29±0.03b	0.27±0.02b	0.30±0.04ab	0.22±0.01c
玉米籽粒镉含量(mg/kg)	0.061±0.001a	0.053±0.004ab	0.054±0.001ab	0.046±0.002c	0.049±0.002b	0.055±0.001ab	0.041±0.002d
转运系数	0.070a	0.068a	0.062b	0.059b	0.070a	0.070a	0.066ab

CK:不施用任何改良剂对照;A:施用凹凸棒土 10 t/hm²;B:施用叶面硅肥 15 kg/hm²;C:施用凹凸棒土 10 t/hm²+叶面硅肥 15 kg/hm²;D:施用生物炭 10 t/hm²;E:施用微生物菌剂 120 kg/hm²;F:施用生物炭 10 t/hm²+微生物菌剂 120 kg/hm²。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

施用黏土矿物是一种常用的重金属钝化技术,已有研究表明其对镉有良好的钝化效果^[29-30]。本研究中,与对照相比,施用凹凸棒土+叶面硅肥,土壤有效镉含量、玉米籽粒镉含量显著降低,同时土壤有效硒含量、玉米籽粒硒含量显著提高。黏土矿物施入土壤后,其自身较高的pH值与阳离子交换能力能够提升土壤pH值与CEC^[31],从而增强土壤胶体对镉的吸附和交换能力,降低镉在土壤中的迁移性,阻断或滞缓土壤镉离子向植物体内的迁移,进而减少玉米籽粒中镉的积累量。任珺等^[32]发现,施用凹凸棒土能够显著降低玉米茎叶中镉含量,与本研究结果一致。此外,土壤pH值的升高会增强土壤中硒的活性以及有效性。赵妍等^[33]发现,土壤pH值与土壤中硒的有效性呈显著正相关,与本研究结果一致。

施用叶面硅肥、施用凹凸棒土+叶面硅肥,镉从玉米根系向籽粒的转运系数显著低于对照,施用凹凸棒土+叶面硅肥,玉米籽粒镉含量显著低于对照,硒含量显著高于对照。硅肥通过叶面喷施进入植物体后,与镉离子发生拮抗作用,使镉离子在植物体内的转运系数降低。同时硅还能与镉形成共沉淀效应,使镉固定在细胞壁和维管组织中,从而进一步降低玉米籽粒中镉的积累量^[34]。硒和硅均为植物所需的有益微量元素,两者之间存在协同吸收作用,离

子浓度不会相互影响^[35]。王进文等^[36]发现,联合施用土壤调理剂+叶面阻控剂+重金属钝化剂的效果优于单一施用土壤调理剂、叶面阻控剂或者重金属钝化剂,与本研究结果一致。

生物炭是一种常用的有机改良材料,其施入土壤后能够改变土壤理化性质,同时自身具有较强的吸附能力。生物炭可以吸附土壤中的重金属,从而降低重金属的活性,进而减少其对农作物的毒害作用^[37-38]。在本研究中,施用生物炭,土壤pH值、土壤阳离子交换量、土壤有机质含量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤中性磷酸酶活性、土壤荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性、土壤脲酶活性均显著高于对照,且土壤有效硒含量、有效镉含量均显著低于对照。这可能与生物炭表面官能团(如羟基、羧基和羰基)对重金属离子的络合作用有关,同时生物炭可以提升土壤pH值和有机质胶体含量,从而进一步降低土壤有效镉含量,抑制其通过吸收和转运进入玉米籽粒^[39-40]。安梅等^[41]发现,施用生物炭后,土壤pH值和有机质含量显著提高,土壤有效镉含量显著降低,与本研究结果一致。此外,生物炭引入的丰富有机质会改变土壤微生物群落结构,增强土著微生物的活性。本研究中,与对照相比,反映土壤微生物活性的脲酶和FDA水解酶活性^[42-43]均显著提高。

本研究选用的巨大芽孢杆菌是一种养分分解细菌,能够通过分泌酶类物质提高土壤养分含量^[44],

而侧孢芽孢杆菌已被证实对重金属具有吸附作用^[45]。侧孢芽孢杆菌通过其吸附能力降低了土壤中镉的有效性。同时,在巨大芽孢杆菌的作用下,土壤磷酸酶活性显著增强,提高了土壤有效磷含量,进一步降低了土壤镉的有效性。钟心等^[46]的研究结果表明,土壤有效磷含量的增加能够降低土壤重金属的迁移能力。

生物炭的多孔结构为其表面定殖的微生物提供了庇护,而其丰富的有机物质则为定殖微生物和土壤土著菌群提供了营养物质(碳、氮、磷)^[47]。生物炭负载特定功能微生物后,因负载微生物的不同,功能会随负载微生物种类的不同而呈现多样化。负载微生物的生物炭可以吸附重金属,也可以通过影响土壤的其他理化性质,间接降低重金属的迁移性。^[48-49]。本研究中,与单独施用生物炭或微生物菌剂相比,施用生物炭+微生物菌剂使土壤有效磷含量、荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性、中性磷酸酶活性、脲酶活性均显著提高,土壤有效镉含量显著降低。这可能是由于负载的生物炭增强了微生物的功能。孙漱玉等^[50]的研究结果表明,细菌在定殖至生物炭后,其活性与功能都显著增强。但值得注意的是,生物炭的施用虽然引入了有机质,但并未提高土壤硒的有效性,反而使其有效性降低。这可能是由于生物炭中的有机质降解速率较为缓慢,在降解过程中会形成有机胶体。这些胶体对硒产生吸附作用,从而降低了硒的有效性。翟辉^[51]研究发现,有机质胶体含量的增加会导致土壤硒的可利用性降低。

4 结论

本研究选取凹凸棒土、叶面硅肥、生物炭、微生物菌剂作为改良剂,通过单独或联合施用的方式,探究其对土壤理化性质及玉米对硒、镉的吸收的影响。施用生物炭处理土壤 pH 值、阳离子交换量、有机质含量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤中性磷酸酶活性、荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性、脲酶活性均显著高于对照,且土壤有效硒含量、有效镉含量均显著低于对照。与单独施用生物炭或微生物菌剂处理相比,施用生物炭+微生物菌剂土壤有效磷含量、荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性、中性磷酸酶活性、脲酶活性均显著提高,土壤有效镉含量显著降低。与对照相比,施用凹凸棒土+叶面硅

肥,土壤 pH 值、阳离子交换量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤有效硒含量、玉米籽粒硒含量显著升高,同时土壤有效镉含量显著降低。综上,施用生物炭+微生物菌剂、凹凸棒土+叶面硅肥对土壤的改良效果较好。

参考文献:

- [1] CHEN J, HE W, ZHU X J, et al. Epidemiological study of kidney health in an area with high levels of soil cadmium and selenium: does selenium protect against cadmium-induced kidney injury? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134106.
- [2] 陈松灿,孙国新,陈正,等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 612-624.
- [3] 李括,彭敏,赵传冬,等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. *地学前缘*, 2019, 26(6): 128-158.
- [4] 王莹,马彦斌,王泽晶. 基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 395-404.
- [5] GAO J, LIU Y, HUANG Y, et al. Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(3): 1088-1093.
- [6] 许海钊. 广西硒镉高背景区土壤-稻米系统中硒镉相互关系及其生物有效性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [7] 张建东,王丽,雒昆利,等. 安康南部大巴山区硒过剩土壤分布及来源研究[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 847-855.
- [8] 陈朗,宋玉芳,张薇,等. 土壤镉污染毒性效应的多指标综合评价[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2606-2612.
- [9] 任继平,李德发,张丽英. 镉毒性研究进展[J]. *动物营养学报*, 2003, 15(1): 1-6.
- [10] 管文文,戴其根,张洪程,等. 硒肥对水稻生长及其重金属累积的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1165-1169.
- [11] 刘杨,齐明星,王敏,等. 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 2024-2030.
- [12] YANG B B, YANG C, SHAO Z Y, et al. Selenium (Se) does not reduce cadmium (Cd) uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) in naturally occurred Se-rich paddy fields with a high geological background of Cd [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103: 127-132.
- [13] 唐世琪,万能,曾明中,等. 恩施地区土壤与农作物硒镉地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2020, 44(3): 607-614.
- [14] KHALID S, SHAHID M, NIAZI N K, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 182: 247-268.
- [15] 曹阳,李撑娟,王辉,等. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(2): 319-326.
- [16] 丁园,敖师营,陈怡红,等. 4种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 4037-4044.

- [17] SONG P P, XU D, YUE J Y, et al. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites; a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 1564-17.
- [18] 王 杏, 王革娇, 史凯祥. 微生物镉解毒机制及微生物-植物互作修复研究进展[J]. *微生物学报*, 2023, 50(4): 1666-1680.
- [19] 鲍广灵, 陶荣浩, 杨庆波, 等. 微生物修复农田土壤重金属污染技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(6): 69-74.
- [20] TU C, WEI J, GUAN F, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil [J]. *Environment International*, 2020, 137: 105576.
- [21] QI X, GOU J, CHEN X M, et al. Application of mixed bacteria-loaded biochar to enhance uranium and cadmium immobilization in a co-contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123823.
- [22] 兰 敏. 富硒区重金属及硒元素地球化学特征研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2019.
- [23] 赵廷伟, 李洪达, 周 薇, 等. 施用凹凸棒石对 Cd 污染农田土壤养分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2313-2318.
- [24] 袁 林, 赖 星, 杨 刚, 等. 钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(3): 90-97.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [26] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤中有效态硒和总硒[J]. *土壤通报*, 1998, 29(1): 47-48, 41.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [28] GREEN V S, STOTT D E, DIACK M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity; optimization for soil samples[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(4): 693-701.
- [29] 胡 涛, 钱运华, 金叶玲, 等. 凹凸棒土的应用研究[J]. *中国矿业*, 2005, 14(10): 73-76.
- [30] 李贝贝. 生物炭/凹凸棒石复合材料对重金属铅、镉污染的吸附特性与作用机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2024.
- [31] 吕焕哲, 张建新. 粘土矿物原位修复 Cd 污染土壤的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(12): 24-27.
- [32] 任 珺, 张凌云, 刘瑞珍, 等. 甘肃凹凸棒石对土壤 Cd 污染的钝化修复研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(1): 5-8.
- [33] 赵 妍, 宗良纲, 曹 丹, 等. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2467-2474.
- [34] 熊仕娟, 刘 俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 286-294.
- [35] 谭 骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(6): 981-987.
- [36] 王进文, 顾祝禹, 皮 杰, 等. 不同钝化处理与叶面阻控剂对 Cd 污染稻田的修复效果[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(3): 130-134.
- [37] 马翔邦, 赵转军, 韩亮威, 等. 腐植酸作用下生物炭对 Cd 污染土壤的修复效果[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(1): 55-64.
- [38] 何莉莉, 杨慧敏, 钟哲科, 等. 生物炭对农田土壤细菌群落多样性影响的 PCR-DGGE 分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4288-4294.
- [39] 吕 鹏, 李莲芳, 黄晓雅. 改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(7): 4077-4090.
- [40] 张 莹, 吴 萍, 孙庆业, 等. 长期施用生物炭对土壤中 Cd 吸附及生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1019-1025.
- [41] 安 梅, 董 丽, 张 磊, 等. 不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(5): 892-898.
- [42] 朱 英, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 上海市郊不同耕地类型土壤微生物活性研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(1): 15-18.
- [43] 李 越, 李 利, 张 斌, 等. 接种 AMF 提高干旱胁迫下土壤微生物活性和燕麦抗旱能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(6): 1135-1149.
- [44] 张维娜, 孙 梅, 陈秋红, 等. 巨大芽孢杆菌 JD-2 的解磷效果及对土壤有效磷化的研究[J]. *吉林农业科学*, 2012, 37(5): 38-41.
- [45] KULKARNI R M, SHETTY K V, SRINIKETHAN G. Cadmium (II) and nickel (II) biosorption by *Bacillus laterosporus* (MTCC 1628)[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(4): 1628-1635.
- [46] 钟 心, 钟 建, 黄占斌. 氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 88-93.
- [47] BANDARA T, FRANKS A, XU J M, et al. Chemical and biological immobilization mechanisms of potentially toxic elements in biochar-amended soils[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(9): 903-978.
- [48] LIN M X, LI F Y, LI X T, et al. Biochar-clay, biochar-microorganism and biochar-enzyme composites for environmental remediation; a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(3): 1837-1862.
- [49] YANG Y, WANG X, WANG Y, et al. Pesticide contamination remediation by biochar-immobilized microorganisms; a review [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024, 21(2): 2225-2238.
- [50] 孙漱玉, 黄梦鑫, 孔 强, 等. 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展[J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2185-2194.
- [51] 翟 辉. 水分和有机质对土壤硒形态转化的影响机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.

(责任编辑:成纾寒)