

木醋液对 Cd 污染石灰性土壤理化性质及 Cd 形态转化的影响

吴苗苗, 叶佳润, 刘 慧, 周孟棕, 刘世亮, 赵 颖, 刘 芳

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 为寻找可行的强化 Cd 污染土壤植物修复的方法, 通过室内培养试验, 设置 7 个不同稀释梯度木醋液添加处理, 研究木醋液对石灰性重金属污染土壤的理化性质、酶活性和 Cd 形态的影响。结果表明: 随木醋液浓度升高, 土壤 pH 逐渐降低, EC (除原液外) 无明显变化。土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量较 CK 分别增加 0.35%~66.64%, 9.74%~96.10%, 31.71%~56.64%, 8.34%~30.87%。稀释 10~100 倍土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性明显增加, 而稀释 5 倍和木醋液原液处理土壤酶活性显著被抑制 ($P<0.05$)。土壤可交换态 Cd 含量除稀释 5 倍处理外较 CK 均显著升高 ($P<0.05$), 增加 24.69%~72.40%。各处理 Cd 的碳酸盐结合态、铁锰氧化物态及有机物结合态含量较 CK 均升高, 分别为 6.67%~196.70%, 16.24%~80.09%, 31.51%~70.32%。Cd 残渣态含量与 CK 相比均显著降低, 降幅为 45.88%~59.93% ($P<0.05$)。综上所述, 添加适宜浓度的木醋液可提高土壤养分含量和酶活性, 促进残渣态 Cd 向其他形态转化。

关键词: 木醋液; 土壤有效态 Cd; 土壤 Cd 形态分布; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)03-0327-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.046

Effects of Wood Vinegar on Soil Physical and Chemical Properties and Cd Speciation Transformation of Cd Contaminated Calcareous Soil

WU Miaomiao, YE Jiarun, LIU Hui, ZHOU Mengliang, LIU Shiliang, ZHAO Ying, LIU Fang

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)

Abstract: In order to find a feasible method to strengthen the phytoremediation of Cd contaminated soil, indoor culture experiments were conducted to study the effect of wood vinegar on the physical and chemical properties, enzyme activities, and Cd forms of calcareous heavy metal contaminated soils. Seven different dilution concentration treatments of wood vinegar were set up, and the soil physical and chemical properties, enzyme activities, Cd forms, and other indicators were measured and analyzed after adding wood vinegar and cultivation. The results showed that soil pH decreased gradually, and EC (except undiluted treatment) did not change significantly with increasing the concentration of wood vinegar. Comparing with CK, the content of soil organic matter, alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium were increased by 0.35%~66.64%, 9.74%~96.10%, 31.71%~56.64% and 8.34%~30.87%. The soil enzyme activities (urease, invertase, and catalase activities) were increased significantly in 10–100 times dilution treatments, while soil enzyme activities were significantly inhibited in 5 times dilution and undiluted treatments ($P<0.05$). Except for the 5 times dilution treatment, the exchangeable Cd content in soil of other treatments was significantly higher than that of CK ($P<0.05$), increased by 24.69%~72.40%. Comparing with CK, the content of Cd in the carbonate-bound state, iron-manganese oxide state, and organic matter-bound state in all treatments were significantly increased by 6.67%~196.70%, 16.24%~80.09%, 31.51%~70.32%, and the residual Cd content was significantly reduced by 45.88~59.93% ($P<0.05$). In conclusion, adding appropriate concentration of wood vinegar to soil could increase soil nutrient content and enzyme activity, and promote the transformation of residual Cd in soil to other forms.

Keywords: wood vinegar; soil available Cd; distribution of chemical forms of Cd in soil; soil nutrient; soil enzyme activity

收稿日期: 2021-11-03

资助项目: 河南省农业农村厅重点项目 (30801910)

第一作者: 吴苗苗 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: 18738518582@163.com

通信作者: 赵颖 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: zhaoyingspring@163.com

刘芳 (1973—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事土壤化学与植物营养研究。E-mail: f-liu113@163.com

随着我国工业化和农业化的快速发展,土壤重金属污染问题日益严重,根据国家自然资源部报告^[1],2020 年我国重金属土壤污染面积约为 2 000 万 hm^2 。宋伟等^[2] 对全国 138 个典型区域耕地重金属污染案例进行数据分析发现,Cd 污染发生概率超过 25%,涉及 11 个省的 25 个地区。由于 Cd 污染问题突出,Cd 污染土壤的修复研究也得到了广泛关注。石灰性土壤重金属的有效性较低,可以通过外源添加其他物质以改变土壤的化学性质或土壤中重金属的形态,提高土壤中 Cd 的溶解性和迁移性^[3]。许伟伟等^[4] 研究表明,添加柠檬酸、木醋液等可不同程度提高土壤 Cd 的生物有效性;韩洋等^[5] 研究表明,草酸可活化土壤固相 Cd,提高土壤液相 Cd 离子浓度,促进了土壤中铁锰氧化物结合态和有机物结合态 Cd 向可交换态 Cd 转化;陈卫平等^[6] 研究表明,添加有机酸调节土壤 pH,可使土壤中 Cd 形态发生改变,从而改变 Cd 的生物有效性和毒性。

木醋液是废弃木材或秸秆等通过热解、碳化或干馏的过程中产生的烟气经过冷凝回流得到的有机副产品^[7],成分以乙酸为主,并由醇、酚、酮、醛及其衍生物混合而成的红褐色有机混合物。日本早在 1960 年就研究出了多种用途的专用木醋液^[8],我国于 20 世纪 80 年代开始对木醋液的加工、成分分析、抑菌效果以及在农业生产的应用进行研究。已有研究^[9] 表明,木醋液既可作为植物生长调节剂、土壤消毒剂、预防种子立枯病;又可作为土壤改良剂、微肥、药肥,增加土壤肥力。曾婕等^[10] 研究表明,不同浓度的木醋液能改善土壤理化性质,增加土壤养分含量,提高土壤酶活性,促进植物生长和改善农产品品质。目前,我国对木醋液的研究^[11] 主要集中在促进植物生长和影响土壤理化性质上,将其用于重金属污染土壤修复方面的研究鲜有报道。本研究旨在向石灰性 Cd 污染土壤中添加不同稀释倍数的木醋液,探索木醋液对土壤 Cd 形态的影响以及对土壤理化性质和酶活性的影响,以期为石灰性重金属污染土壤修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自河南省某污灌农田耕层 0—20 cm 土壤,类型为砂质潮土。土壤 pH 为 7.79,EC 为 0.11 mS/cm ,有机质为 9.96 g/kg ,碱解氮、有效磷、速效钾、Cd 总量、Cd 有效态含量分别为 9.75,23.45,354.67,2.98,1.39 mg/kg 。

木醋液购自石家庄宏森有限公司成品,由优质果壳提炼而成,有机酸、酮类、酯类、苯酚及衍生物相对含量分别为 46.06%,3.10%,7.34%,32.70%。pH 为 4.18,EC 为 3.50 mS/cm ,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 57.75,2.69,0.81,0.09 g/kg 。

1.2 试验设计

将供试土样含水量调节至田间持水量的 50%,于 25 $^{\circ}\text{C}$,60%湿度条件下恒温预培养 7 天,消除干湿效应。称取预培养土壤 210 g 于带盖有孔塑料盒中。试验按照体积分数设置 7 个不同稀释倍数木醋液处理,分别为 Wv100(稀释 100 倍)、Wv50(稀释 50 倍)、Wv20(稀释 20 倍)、Wv10(稀释 10 倍)、Wv5(稀释 5 倍)、Wv0(木醋液原液),对照 CK 以去离子水代替,每个处理重复 3 次。每次加入木醋液溶液 20 mL,连续 3 天等量加入,共 60 mL。培养过程中保持 60%田间持水量。各处理在 25 $^{\circ}\text{C}$,60%湿度的恒温箱中进行培养,每隔 1 天用称重法补充水分。在培养的第 1,3,5,7,10,20 天进行破坏性取样,测定土壤 Cd 有效态含量,待培养结束后(第 20 天)测定土壤基础理化性质、酶活性及 Cd 化学形态。

1.3 测定方法

pH 用 pH 计测定;土壤电导率(EC)测定用电导率仪测定;有机质、碱解氮、速效磷、速效钾分别采用重铬酸钾外加热法、碱解扩散法、0.5 mol/L NaHCO_3 浸提—钼锑抗分光光度法、 NH_4OAc 浸提—火焰光度法^[12] 测定。

脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性分别采用苯酚钠—次氯酸钠比色法、3,5—二硝基水杨酸比色法、紫外分光光度法^[13] 测定。土壤有效态 Cd 采用 DTPA 浸提—原子吸收光谱仪测定。土壤 Cd 化学形态分布采用 Tessier 五步提取法^[14]。

1.4 数据处理

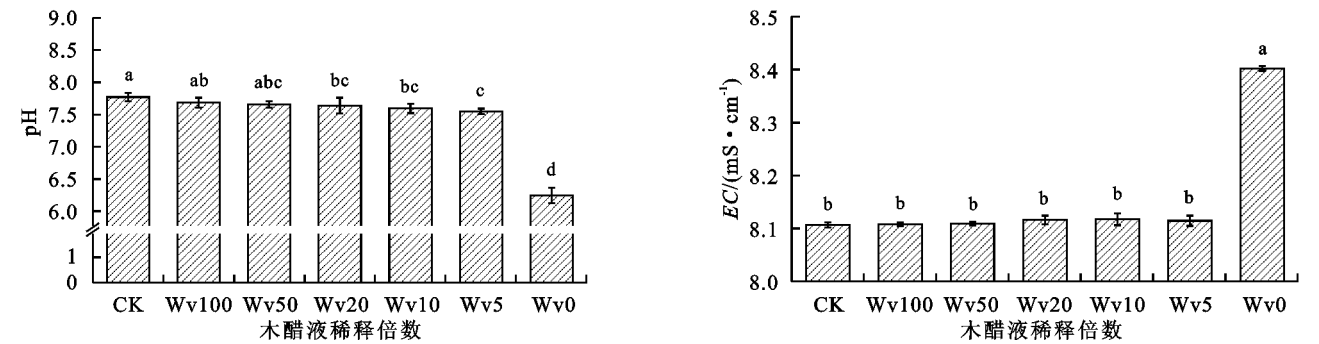
数据使用 SPSS 20 软件的 LSD 法进行差异比较;采用 Origin Pro 8.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 木醋液对土壤 pH、EC 的影响

由图 1 可知,随着木醋液浓度的增加,除 Wv100、Wv50 处理外,其余处理 pH 显著下降($P<0.05$),分别下降了 0.13,0.18,0.22,1.53 个单位,其中 Wv0 处理 pH 最低,降至 6.25。除 Wv0 处理土壤呈现弱酸性,其他处理培养后土壤仍为弱碱性。木醋液的 pH 为 4.18,主要成分为乙酸等弱有机酸,本试验所用土壤为石灰性土壤,pH 为 7.79,其盐基高度饱和,呈中性至碱性反应,有一定的缓冲能力,可见添加适量浓度的木醋液不会导致土壤 pH 的急剧下降。

与 CK(EC 为 0.11 mS/cm)相比,Wv100~Wv5 处理 EC 均无显著差异,不会对土壤造成盐害;Wv0 处理其 pH 最低,且木醋液 EC(3.5 mS/cm)较高,施入土壤后会导致土壤溶解的盐类增多,使 EC 显著上升($P<0.05$),达到 0.42 mS/cm 。因此,向石灰性土壤添加适当浓度的木醋液,不会导致盐害。



注:图柱上方不同小写字母表示不同培养处理间显著差异性($P<0.05$)。下同。

图 1 不同处理对土壤 pH 和 EC 的影响

2.2 木醋液对土壤养分的影响

由表 1 可知,Wv100~Wv20 处理土壤有机质含量较 CK 略有增加但差异不显著,Wv10~Wv0 处理有机质含量显著增加,分别增加了 26.90%,25.80%,66.64%,Wv0 处理达到最高,为 18.83 g/kg。木醋液本身含有有机酸、醇类、酯类等有机物质,随着施入土壤木醋液浓度的增加,有机质含量随之增加。

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	11.30±0.57c	9.75±0.89d	24.63±0.22c	311.00±8.26d
Wv100	11.66±0.31c	13.04±0.57bc	34.18±0.70ab	367.13±9.31b
Wv50	11.34±0.76c	13.64±0.51b	32.44±0.19b	362.44±4.30b
Wv20	12.41±0.57bc	12.24±0.80c	34.24±0.69ab	349.00±5.00c
Wv10	14.34±0.72b	10.70±0.11d	35.39±0.72ab	336.95±4.94c
Wv5	14.22±0.88b	10.77±0.98d	33.07±0.94b	348.63±3.07c
Wv0	18.83±0.60a	19.12±0.79a	38.58±0.93a	407.01±4.98a

注:表中数据均为平均数±标准差;同列不同小写字母表示不同培养处理间的显著差异性($P<0.05$)。

与 CK 相比,除 Wv10、Wv5 处理,各处理碱解氮含量显著升高($P<0.05$),增幅为 9.74%~96.10%。其中 Wv0 处理含量最高,为 19.12 mg/kg。由于木醋液对氮有固持作用且本身含有氮元素,施入土壤会

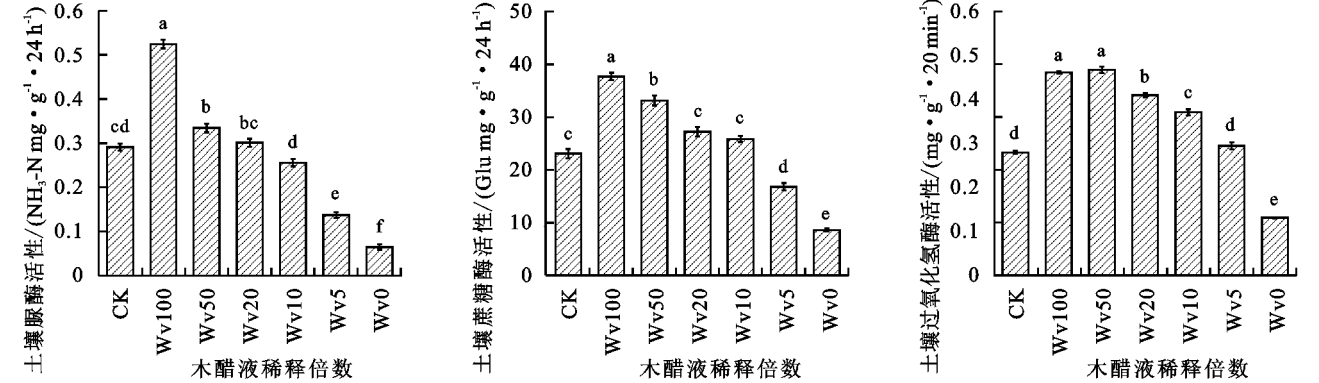
提高碱解氮含量。

添加木醋液各处理有效磷和速效钾含量较 CK 均显著提高($P<0.05$),分别提高 31.71%~56.64%,8.34%~30.87%。其中 Wv0 处理含量均为最高,分别为 38.58,407.01 mg/kg。本试验所用土壤为石灰性土壤,对磷有较强的固定作用,且石灰性土壤中钾的贮量比较多,其移动性也比较弱,向土壤中施加木醋液,可以达到解磷解钾的作用。

综上所述,木醋液的施加,可促进养分活化,提高土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量,不同处理间的养分含量均以 Wv0 处理最高。

2.3 木醋液对土壤酶活性的影响

由图 2 可知,脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性随木醋液浓度的增加均呈先升高后降低趋势。与 CK 相比,Wv100 和 Wv50 处理显著提高了土壤脲酶活性,能够加快氮素的循环,其中,Wv100 处理脲酶活性最高为 0.52 mg/(g·24 h),显著增加 79.30% ($P<0.05$)。随着木醋液浓度的升高,脲酶活性逐渐下降,Wv20、Wv10 处理较 CK 差异不显著,从 Wv5 处理开始显著抑制土壤脲酶活性($P<0.05$),Wv0 处理脲酶活性最低为 0.06 mg/(g·24 h),降低 77.60%。



注:土壤脲酶活性单位表示 24 h 后 1 g 土壤中 NH₄⁺-N 的质量(mg);土壤蔗糖酶活性单位表示 24 h 后 1 g 干土生成葡萄糖质量(mg);土壤过氧化氢酶活性单位表示 20 min 内 1 g 土壤分解的 H₂O₂ 的质量(mg)。

图 2 不同处理对土壤酶活性的影响

蔗糖酶与脲酶活性随木醋液浓度提高变化趋势基本一致,除 Wv20 和 Wv10 处理外,其他处理较 CK 均差异显著($P<0.05$)。Wv100 和 Wv50 显著提高

了蔗糖酶活性($P<0.05$),且 Wv100 处理蔗糖酶活性最高,为 37.72 mg/(g·24 h),较 CK 增加 63.29%;Wv5 和 Wv0 处理与 CK 相比显著降低 27.23%,62.86% ($P<$

0.05), 仅为 16.81, 8.58 mg/(g · 24 h), 显著抑制了蔗糖酶活性。

过氧化氢酶活性也随木醋液浓度的增加呈先升高后降低趋势, Wv100~Wv10 处理较 CK 均显著提高了过氧化氢酶活性($P<0.05$), 上升幅度为 31.91%~65.96%, Wv50 处理最高, 为 0.78 mg/(g · 20 min), Wv100 仅次于 Wv50 处理, 为 0.77 mg/(g · 20 min)。而 Wv0 处理由于木醋液浓度过高, 抑制了微生物活性, 与 CK 相比降低 53.19%, 其酶活性最低。

综上所述, 木醋液对土壤酶活性具有双重性, 低浓度的木醋液 Wv100~Wv50 处理提高了土壤脲酶和蔗糖酶活性, 高浓度的木醋液 Wv5、Wv0 处理抑制了土壤脲酶和蔗糖酶活性, 并且随着浓度增大, 其酶活性逐渐下降, 可见脲酶、蔗糖酶耐酸性较差。中低浓度的木醋液 Wv100~Wv10 处理对过氧化氢酶活性有明显的促进作用, 其耐酸性较好, 木醋液原液对过氧化氢酶活性显著抑制($P<0.05$)。

2.4 木醋液对土壤有效态 Cd 含量和 Cd 化学形态分

2.4.1 木醋液对土壤有效态 Cd 含量变化 由图 3 可知, 木醋液的添加显著提高了土壤有效态 Cd 含量

($P<0.05$)。第 1 天时, 各处理有效态 Cd 含量较 CK 均显著增加($P<0.05$), 增幅为 9.86%~25.35%。Wv100~Wv10 处理间差异不显著, Wv5、Wv0 处理较其他处理差异显著($P<0.05$), Wv0 处理含量最高, 为 1.78 mg/kg。第 3 天与第 1 天基本一致, 与 CK 相比, 各处理有效态 Cd 含量均显著增加($P<0.05$), 增幅为 4.73%~26.35%。Wv100~Wv5 各处理间差异不显著, 但与 Wv0 处理差异显著($P<0.05$), Wv0 处理含量最高, 为 1.87 mg/kg。可见木醋液加入初期, 能显著增加土壤有效态 Cd 含量($P<0.05$)。

第 5~20 天土壤有效态 Cd 含量变化与之前不同。除 Wv5 处理外, 其余处理较 CK 均呈现显著差异($P<0.05$), Wv100~Wv5 处理有效态 Cd 含量先升高后降低, 与土壤酶活性趋势一致, 低浓度木醋液促进微生物活性, 有效态 Cd 含量随之升高, 高浓度木醋液抑制微生物活性, 有效态 Cd 含量随之下降。Wv0 处理为木醋液原液, 使土壤由弱碱性变为弱酸性, 短时间无法回升, 造成有效态 Cd 含量仍为最高。

综上所述, 添加适当浓度木醋液能够增加土壤有效态 Cd 含量, 提高其生物有效性和迁移能力。

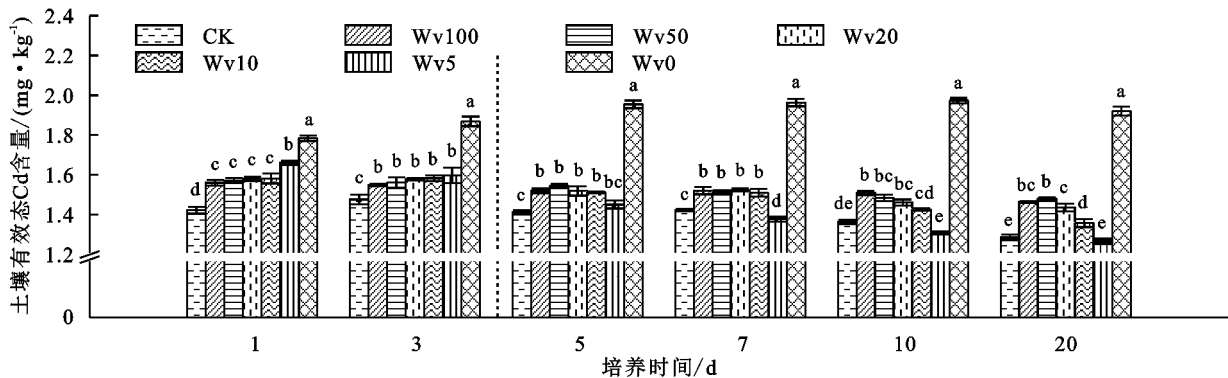


图 3 不同处理对土壤有效态 Cd 的影响

2.4.2 木醋液对土壤 Cd 化学形态的影响 由图 4 可知, 培养 20 天后, 土壤 Cd 形态含量变化明显。与 CK 相比, 土壤可交换态 Cd(EX) 含量呈现先升高后降低趋势, 其中, Wv0 处理最高, 为 1.41 mg/kg, 较 CK 显著提高 72.40% ($P<0.05$), Wv50 处理次之, 为 1.28 mg/kg, 较 CK 显著增加 48.30% ($P<0.05$)。碳酸盐结合态 Cd(CA)、铁锰氧化物态 Cd(OX) 及有机物结合态 Cd(OM) 含量较 CK 均显著增加($P<0.05$), 分别为 6.67%~196.70%, 16.24%~80.09%, 31.51%~70.32%。CA 态 Cd 含量和 OX 态 Cd 含量分别以 Wv0 和 Wv5 处理含量最高; OM 态 Cd 含量以 Wv0 处理含量最高, Wv100 处理次之。残渣态 Cd(RE) 含量与 CK 相比均显著降低($P<0.05$), 其中, Wv0 处理降幅最大, 降幅为 59.93%, Wv50 处理次之。综上所述, 施加木醋液能够活化土壤 Cd, 可使残渣态 Cd 向有效态 Cd 迁移转化, 提高土壤 Cd 活性。

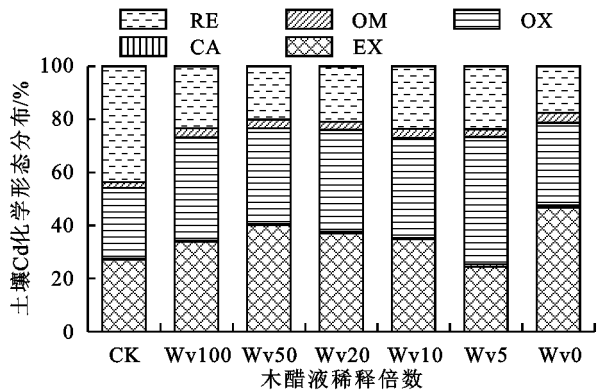


图 4 不同处理对土壤 Cd 化学形态的影响

3 讨论

3.1 不同浓度的木醋液对土壤理化性质的影响 本试验表明, 木醋液施入石灰性土壤后能降低土壤 pH, 各处理 EC(除原液外)均无显著变化。木醋液中含有 46.06% 有机酸, 加入土壤中降低了土壤 pH, 这与李

忠徽等^[15]研究结果一致。常青等^[16]研究表明,向土壤中添加木醋液原液使土壤 pH 和 EC 变化显著,造成使土壤内部性质不均匀,不适宜作物根系的生长,与本研究结果一致。本试验中不同浓度木醋液的施加,可以活化养分,提高土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量,不同处理间的养分含量均以 Wv0 处理含量最高。一方面可能是木醋液本身含有有机质、氮磷钾等养分,随加入木醋液量的提高,带入养分量也就越多,因此土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等含量均有上升,这与覃青青等^[17]研究结果一致;另一方面,因为木醋液施入土壤后,也与养分活化、刺激微生物活动密切相关,添加木醋液能够为土壤中的微生物提供碳源,增加溶磷溶钾等功能性细菌的数量,促进解磷解钾,从而提高有效磷和速效钾的含量,这与 Kaur 等^[18]、龚芳芳等^[19]研究结果一致。

3.2 不同浓度的木醋液对土壤酶活性的影响

本试验发现,木醋液的施入可明显影响土壤相关酶活性。低浓度木醋液可使土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性显著升高,由于低浓度的木醋液为土壤提供了养分且未改变土壤本身性质,促进了微生物的生长繁殖,微生物分泌代谢物的增加是致使土壤酶活性增加的主要和直接原因,这与邹小明等^[20]研究结果相符。酶活性的增加提升了土壤环境的自净与解毒能力,可增强土壤缓冲性能、规避土壤酸化。程虎等^[21]研究表明,随着木醋液浓度的升高,土壤酶活性随之升高。本试验研究表明,在木醋液较高浓度处理下,随浓度的增加对土壤酶活性抑制增大,是由于高浓度木醋液可能瞬时改变土壤微域环境,且其含有的大量酸类和酚类等有机物质可能会对土壤微生物形成毒害作用,从而抑制土壤微生物生长与活性。

3.3 不同浓度的木醋液对土壤 Cd 化学形态的影响

土壤重金属形态及理化性质和作物生长发育等密切相关,植物对土壤重金属的去除效率在很大程度上取决于土壤重金属生物有效性^[22]。可交换态 Cd 是 Cd 活性较高的形态,能被植物直接吸收,对植物危害程度较大,且对土壤环境变化较敏感,容易被迁移和转化。本研究结果表明,施加木醋液会降低土壤 pH,在一定范围内能够增强土壤 Cd 有效性和可移动性,使残渣态 Cd 向可交换态 Cd 转化,这与韩洋等^[5]、黄敬等^[23]研究结果相符。Passatore 等^[24]研究表明,有机酸能够有效活化吸附在土壤颗粒表面的固相重金属,提高其液相离子浓度,使固相重金属转化为易被植物根系吸收的有效形态,从而提高重金属的转运效率和扩散能力,与本研究一致。随着施入木醋

液浓度的升高,残渣态 Cd 向有效态 Cd 转化的越多。钱翌等^[25]研究发现,有机酸对于土壤中 Cd 离子的解吸有促进作用,且有机酸浓度越高,解吸作用越强。木醋液能够参与土壤重金属与土壤表面、酸碱度、有机配体的相互作用,从而改变重金属的溶解性和移动性,它本身含有大量的官能团,如羧基、羟基等的电离作用与强配位能力,可通过降低土壤 pH 或与 Cd 的配合作用而改变 Cd 在土壤中的赋存形态,进而对 Cd 的环境行为产生影响^[23]。

4 结 论

石灰性 Cd 污染土壤中添加木醋液能够降低土壤 pH,影响土壤 EC,但只有添加木醋液原液才能使土壤 pH 急剧下降,呈现弱酸性,EC 明显升高。另外,木醋液还提高了土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。木醋液的施入可明显影响土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性,在一定范围内能够增强土壤 Cd 有效性和可移动性,使残渣态 Cd 向可交换态 Cd、碳酸盐结合态 Cd、铁锰氧化物结合态 Cd、有机结合态 Cd 迁移转化。而施加木醋液原液处理会导致石灰性土壤 pH 明显下降,大幅度提升土壤有效态 Cd。

参考文献:

- [1] 马永和,许瑞,王丽敏,等.植物修复重金属污染土壤研究进展[J].矿产保护与利用,2021(4):12-22.
- [2] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [3] Zhu L J, Cheng H, Ma J F, et al. Decolonization of methyl orange by MnO₂/organic acid system: The role of Mn (III) [J]. Materials Research Bulletin,2019,122:e110670.
- [4] 许伟伟,滕玉婷,任静华,等.不同活化剂对镉、铅单一及复合污染土壤的修复效果影响[J].环境污染与防治,2019,41(8):882-886,890.
- [5] 韩洋,乔冬梅,齐学斌,等.草酸对镉污染土壤油葵生物量及土壤酶活性和镉形态的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(9):1964-1973.
- [6] 陈卫平,杨阳,谢天,等.中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J].土壤学报,2018,55(2):261-272.
- [7] 斯日木极,孔涛,郑爽,等.木醋液对辽西北低、中肥力土壤小白菜产量和土壤酶活性的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):52-57.
- [8] Lu X C, Jiang J C, He J, et al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics of wood vinegar derived from Chinese fir waste: A comprehensive study on its growth regulation performance and mechanism [J].Acs Omega, 2019,4(21):19054-19062.
- [9] 周红娟,耿玉清,丛日春,等.鸡粪与木醋液配施对滨海盐碱土化学性质和酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,

2017(3):157-162.

- [10] 曾婕,海梅荣,王晓会,等.木醋液对植烟土壤微生物多样性的影响[J].土壤通报,2015,46(1):93-98.
- [11] 刘标,陈应泉,何涛,等.农作物秸秆热解多联产技术的应用[J].农业工程学报,2013,29(16):213-219.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J].Analytical Chemistry,1979,51(7):844-851.
- [15] 李忠徽,王旭东.灌施木醋液对土壤性质和植物生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):510-516.
- [16] 常青,王永亮,杨治平,等.木醋液对土壤 pH、EC 与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(3):322-328.
- [17] 覃青青,王丰,王晓,等.木醋液与其他改良剂配施对土壤养分及烤烟生长的影响[J].中国烟草科学,2020,41(5):15-19.
- [18] Kaur G, Reddy M S. Influence of P-solubilizing bacteria on crop yield and soil fertility at multilocational sites[J].

European Journal of Soil Biology,2014,61:35-40.

- [19] 龚芳芳,樊卫国.外源柠檬酸对石灰性黄壤养分活化及刺梨实生苗养分吸收与生长的影响[J].中国农业科学,2018,51(11):2164-2177.
- [20] 邹小明,刘强,肖春玲,等.竹醋液对土壤微生物及酶活性的影响[J].土壤通报,2010,41(1):64-67.
- [21] 程虎,王紫泉,周琨,等.木醋液对碱性土壤微生物数量及酶活性的影响[J].中国环境科学,2017,37(2):696-701.
- [22] 罗海艳,李丹阳,刘寿涛,等.铁锰改性椰壳炭对土壤镉形态及水稻吸收积累镉的影响[J].环境科学研究,2019,32(5):857-865.
- [23] 黄敬,龙坚,蒋凯,等.外源有机酸对不同土壤中 Cd 解吸行为的影响[J].环境生态学报,2019(4):54-62.
- [24] Passatore L, Rossetti S, Juwarkar A A, et al. Phytoremediation and bioremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs): State of knowledge and research perspectives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278:189-202.
- [25] 钱翌,刘莹.单一及复合有机酸对土壤中镉形态的影响研究[J].土壤通报,2012,43(1):186-189.

(上接第 326 页)

- [14] 蒋恩臣,张伟,秦丽元.粒状生物质炭基尿素肥料制备及其性能研究[J].东北农业大学学报,2014,45(11):89-94.
- [15] González M, Cea M, Medina J, et al. Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505:446-453.
- [16] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: Ammonia capture [J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2):35-42.
- [17] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand [J]. Plant and Soil, 2013, 367(1/2):301-312.
- [18] Yadav V, Karak T, Singh S, et al. Benefits of biochar over other organic amendments: Responses for plant productivity (*Pelargonium graveolens* L.) and nitrogen and phosphorus losses [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 131:96-105.
- [19] 王思源,宁建凤,王荣辉,等.黏土矿物混合生物炭包膜尿素的制备及其氮素污染减排潜力[J].水土保持研究,2019,26(5):151-157.
- [20] 周旻旻.水稻秸秆生物质炭基缓释肥的制备与应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.

- [21] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等.不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):39-43.
- [22] Manolikaki I, Mangolis A, Diamadopoulos E. The impact of biochars prepared from agricultural residues on phosphorus release and availability in two fertile soils [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181:536-543.
- [23] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. Chemosphere, 2016, 142:120-127.
- [24] Qin J H, Niu A Y, Li Q W et al. Effect of soluble calcium on enhancing nitrate retention by biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 274: e111133.
- [25] Puga A P, Grutzmacher P, Pellegrino Cerri C E, et al. Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: e135375.
- [26] 付嘉英,乔志刚,郑金伟,等.不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(34):162-165.
- [27] 张伟.水稻秸秆炭基缓释肥的制备及性能研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.