

木醋液对不同品种小麦富集转运 Cd 以及 根际土壤 Cd 形态转化的影响

叶佳润, 吴苗苗, 周新元, 孙彬浩, 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: 为探讨木醋液在重金属污染农田土壤修复应用的可行性, 采用田间小区试验, 研究木醋液施用对 Cd 污染农田中当地 3 个普遍种植品种小麦的生长及对重金属镉(Cd)的富集、转运及根际土壤 Cd 含量和形态等指标的影响。结果表明: 施用木醋液显著提高各品种小麦籽粒和秸秆的生物量 ($p < 0.05$), 各品种小麦秸秆 Cd 分布系数提高 8.91%~20.44%, 而籽粒和根的分布系数分别降低 13.93%~35.93%, 4.76%~18.76%; 各品种小麦秸秆和根的 Cd 富集系数显著提高 ($p < 0.05$), 表现为 C 品种 > A 品种 > B 品种; 各品种小麦 Cd 在根—秸秆转运系数 ($TF_{\text{根—秸秆}}$) 显著提高 ($p < 0.05$), 而 Cd 在秸秆—籽粒转运系数 ($TF_{\text{秸秆—籽粒}}$) 除 C 品种外均显著降低 ($p < 0.05$)。各品种小麦根际土 Cd 含量比种植前分别降低 0.26, 0.23, 0.21 mg/kg, 施加木醋液处理根际土 Cd 含量比种植前降低 13.11%~16.97%。小麦种植前后土壤 Cd 的赋存形态差异显著 ($p < 0.05$), 可交换态和铁锰氧化物结合态显著提高 ($p < 0.05$), 有机物结合态、残渣态显著降低 ($p < 0.05$)。因此, 施加木醋液显著提高小麦各部位生物量 ($p < 0.05$), 对籽粒 Cd 含量影响不显著, 增加根部向秸秆的转运系数, 有助于小麦秸秆对 Cd 的积累, 但不增加小麦籽粒的超标风险, 可通过秸秆离田这一措施将 Cd 从农田土壤逐步移除。

关键词: 土壤重金属污染; 木醋液; Cd; 小麦

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0362-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.046

Effects of Wood Vinegar on Accumulation and Transport of Cd in Different Wheat Cultivars and Transformation of Cd Forms in Rhizosphere Soil

YE Jiarun, WU Miaomiao, ZHOU Xinyuan, SUN Binhao, LIU Shiliang, ZHAO Ying, LIU Fang

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

Abstract: In order to explore the feasibility of wood vinegar in remediation of heavy metal contaminated farmland soil, a field plot experiment was conducted to study the effects of wood vinegar application on the growth of three local wheat varieties in Cd contaminated farmland, the Cd accumulation and translocation in wheat, and the content and form of Cd in rhizosphere soil. The results showed that the application of wood vinegar significantly increased the biomass of wheat grains and straw ($p < 0.05$), and the Cd distribution coefficients of straw increased from 8.91% to 20.44%, while that of grains and roots decreased from 13.93% to 35.93% and 4.76% to 18.76%, respectively. The bioaccumulation factor of Cd in straw and roots of different wheat varieties all significantly increased, showing that variety C > variety A > variety B. The translocation factor of Cd in root-straw ($TF_{\text{root-straw}}$) was significantly increased in all wheat varieties, while the translocation coefficients of Cd in straw-grain ($TF_{\text{straw-grain}}$) was significantly decreased except variety C. Compared with before planting, the Cd content in rhizosphere soil of each variety of wheat decreased by 0.26, 0.23 and 0.21 mg/kg, respectively, and the Cd content in rhizosphere soil treated with wood vinegar decreased by 13.11%~16.97%. The forms of Cd in soil were significantly different before and after wheat planting, the exchangeable state and Fe-Mn oxide bound state were significantly increased ($p < 0.05$), while

收稿日期: 2022-09-22

资助项目: 河南省农业农村厅重点项目(30801910)

第一作者: 叶佳润(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: yejr17303810286@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

the organic matter bound state and residual state were significantly decreased ($p < 0.05$). Therefore, the application of wood vinegar significantly increased the biomass of each part of wheat, and had no significant impact on the content of Cd in grains, and increased the translocation factor of root to straw, which contributed to the accumulation of Cd in wheat straw, but did not increase the risk of wheat grain exceeding the standard, the Cd could be gradually removed from farmland soil through straw leaving.

Keywords: heavy metal pollution in soil; wood vinegar; Cd; wheat

随着人类对土壤环境的利用强度越来越大,向土壤中排放的污染物成倍增加。针对目前的土壤污染问题,国务院先后发布“土十条”和《土壤污染防治法》,对污染土壤贯彻“预防为主,防治结合”方针^[1]。随着我国社会经济的发展和生态文明建设,土壤重金属污染治理势在必行。

土壤污染具有隐蔽性,从开始污染到导致农作物吸收、进入食物链都有一个长时间、逐步积累的过程。目前,污染土壤修复方法按其原理可主要分为2种类型:一是改变污染物与土壤结合的方式或在土壤中的赋存形态,以降低污染物在土壤中的迁移性和生物可利用性,以降低污染风险;二是将污染物从土壤中去除,降低污染物总浓度的方式达到消减污染总量的目的。利用植物修复重金属污染土壤是一种能够降低土壤中污染物的绿色可持续发展的生物修复技术。有研究^[2]表明,通过在土壤上种植镍的超累积植物实现土壤修复,再运用“植物冶炼”技术创造经济价值。种植镉(Cd)、砷等超累积植物可以带来较好的环境效益,但对于大面积中轻度受污染农田的经济效益和社会效益无法兼顾,并且目前发现的超富集植物在北方地区存在生物量小、植株矮小或易受地域影响等缺点,不利于大面积种植,甚至可能导致外来生物入侵等损失。

小麦在北方具有种植面积广、生物量大,以及对重金属有很强的富集性等特征。华北地区 Cd 污染土壤大部分属于弱碱性土壤,适应该地区土壤高效稳定的钝化材料少,加上小麦对土壤 Cd 积累能力较强,很难通过调节 pH 及水分管理等农艺措施和筛选低积累品种等来降低小麦籽粒 Cd 含量实现安全生产。另外,华北地区冬季偏冷,超富集植物生长困难,移除土壤 Cd 能力低,维护成本较高,均给华北农田镉污染防治带来极大困难和挑战。木醋液是一种将植物原料干馏或炭化过程中产生的气体混合物再通过冷凝回收、分离的方式获得的有机产品^[3-4],通过加工之后,能够应用于农业、环境保护、工业、食品加工保鲜及医疗卫生等方面,目前在日本、美国和韩国等国家广泛应用。程虎等^[5]、高妍等^[6]研究表明,木醋液不仅可用以改变土壤理化性质,还有防治植物病虫害、提高作物产量及品质的作用;吴苗苗等^[7]研究表

明,施用木醋液可提高土壤酶活性,调节土壤 pH,使土壤 Cd 形态及有效态含量发生改变。因此,本试验主要研究在中轻度 Cd 污染农田施加木醋液对不同小麦品种富集转运 Cd 的影响,以及土壤 Cd 含量、Cd 的赋存形态变化等,探究木醋液在农田土壤重金属污染修复中的应用技术,为华北地区 Cd 污染农田的“边生产、边修复”提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

本试验为田间小区试验,试验地位于河南省某 Cd 污染农田,土壤类型为砂质潮土。土壤电导率 0.11 mS/cm, pH 为 7.52,全 Cd、有效态 Cd、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 2.33, 1.50, 9.75, 23.45, 254.67 mg/kg,有机质含量 9.96 g/kg。

选取当地广泛种植的“泛育麦 20”(A 品种)、“丰德存 21”(B 品种)、“百农 207”(C 品种)3 个小麦品种(购自河南秋乐种业公司)进行田间种植。供试木醋液(购自石家庄宏森活性炭有限公司)为果壳提炼, pH 为 4.18,电导率为 3.50 mS/cm,有机质含量为 57.75 g/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为 2 690, 810.00, 90.00 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计,小麦品种为主处理,木醋液施用浓度(清水为 T0、稀释 400 倍木醋液为 T1、稀释 200 倍木醋液为 T2)为副处理,小区面积 4 m×5 m=20 m²,每个处理 3 个重复,共 9 个处理,27 个小区。小麦于 2020 年 10 月 15 日播种,播种量为 14 kg/667 m²,耕作方式为旋耕,施肥量为 50~60 kg/667 m²,追肥(返青期)量为 25 kg/667 m²,肥料为 N:P₂O₅:K₂O=15:15:15 复合肥。于拔节期在小麦行间土壤表层施用不同稀释倍数木醋液,随后每 5 天施用 1 次,共施用 3 次,施用尽量贴近地面,施用总量为 6.75 L/m²,以清水为对照。小麦生产过程中,其他松土、除草、浇水等按当地田间管理进行。小区排列分布见图 1。

1.3 样品采集与测定

土壤样品采集:分别于小麦种植前(2020 年 10 月)在每个小区按“S”形五点混合采集 0—20 cm 土壤样品,土壤样品风干除去石砾、作物残枝后过 1 mm 尼龙筛,用于测定土壤 pH 和土壤电导率(EC),

以及碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、全量 Cd、各形态 Cd 及有效态 Cd 含量。于小麦成熟期(2021 年 6

月)在每小区使用抖根法收集根际土壤样品,用于测定全 Cd 与各形态 Cd 含量。

A—T2	A—T0	A—T1	B—T2	B—T0	B—T1	C—T2	C—T0	C—T1
A—T1	A—T2	A—T0	B—T1	B—T2	B—T0	C—T1	C—T2	C—T0
A—T0	A—T1	A—T2	B—T0	B—T1	B—T2	C—T0	C—T1	C—T2

注:A、B、C 分别为“泛育麦 20”品种,“丰德存 21”品种,“百农 207”品种;T0、T1、T2 分别为清水处理、稀释 400 倍木醋液处理、稀释 200 倍木醋液处理。

图 1 小区排列分布

植株样品采集:于小麦成熟期(2021 年 6 月),每小区内选取 1 m² 样方,按植株的根、秸秆、籽粒等部位进行采集植株样品,105 ℃ 杀青 30 min 后于 75 ℃ 烘干至恒重,测定干重,粉碎后用于测定小麦各部位 Cd 的含量。

植物样品 Cd 含量采用 HNO₃—HClO₄ 消解,并用石墨炉原子吸收分光光度计(Perkin Elmer AA600)测定消解液中 Cd 浓度。土壤 pH 用 pH 计测定,土壤 EC 用电导率仪测定,土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量分别采用碱解扩散法、0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗分光光度法、NH₄OAc 浸提—火焰光度法、重铬酸钾外加热法^[8] 测定,土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 浸提—原子吸收光谱仪测定。土壤全 Cd 含量采用 HF—HClO₄—HNO₃ 三酸法—石墨炉原子吸收分光光度计(Perkin Elmer AA600)测定。土壤 Cd 形态分析采用 Tessier 等^[9] 连续提取法提取并测定,分别为可交换态(EX)、碳酸盐结合态(CA)、铁锰氧化物结合态(OX)、有机物结合态(OM)、残渣态(RE)。

计算公式为:

(1)各部位 Cd 积累量(成熟期)=各部位 Cd 含量×各部位生物量

(2)各部位 Cd 分布系数(成熟期)=各部位 Cd 积累量折算成百分比

(3)各部位 Cd 富集系数=各部位 Cd 含量/土壤 Cd 含量

(4)根—秸秆转运系数($TF_{\text{根—秸秆}}$)=秸秆 Cd 含量/根 Cd 含量

(5)秸秆—籽粒转运系数($TF_{\text{秸秆—籽粒}}$)=籽粒 Cd 含量/秸秆 Cd 含量

1.4 数据处理

文中数据由 SPSS 20 软件处理,并使用 LSD 法进行差异比较,采用 Origin 8.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 施加木醋液对小麦生物量的影响

由图 2 可知,小麦籽粒和秸秆生物量品种间差异显著($p<0.05$),其中,未施加木醋液处理中 C 品种籽粒和秸秆生物量最高,施加木醋液显著增加各品种

小麦籽粒和秸秆的生物量($p<0.05$),A 品种增加量最显著($p<0.05$),C 品种效果不明显。未施加木醋液处理 A 品种籽粒生物量显著低于 B、C 品种($p<0.05$),施加木醋液处理小麦籽粒生物量均显著提高($p<0.05$),在未施加木醋液处理中 A 品种籽粒生物量低于 B、C 品种,且随木醋液的施加,A 品种小麦籽粒生物量显著高于 B、C 品种($p<0.05$)。同一小麦品种不同木醋液处理表现为 A 品种 A—T1 处理小麦籽粒生物量最高为 10 094.88 kg/hm²,较 A—T0 处理增重 35.03%,A—T2 处理较 A—T0 处理增重 29.94%;B 品种 B—T1、B—T2 处理小麦籽粒生物量比 B—T0 处理小麦籽粒生物量分别提高 16.52%,23.60%;C 品种 C—T2 处理小麦籽粒生物量最大,较 C—T0 处理提高 45.32%。未施加木醋液处理中 C 品种秸秆生物量显著高于 A、B 品种($p<0.05$),施加木醋液处理 A、B 品种小麦秸秆生物量显著提高($p<0.05$),C 品种与施加处理差异不显著,施加稀释 200 倍木醋液处理中,各品种小麦秸秆生物量无显著差异。同一小麦品种不同木醋液处理表现为:A—T1 处理小麦秸秆生物量最大为 11 699.70 kg/hm²,与 A—T0 处理相比增加 41.17%;B 品种 B—T2 处理小麦秸秆生物量最高,较 B—T0 处理增加 35.06%;C 品种各施加木醋液处理无差异。

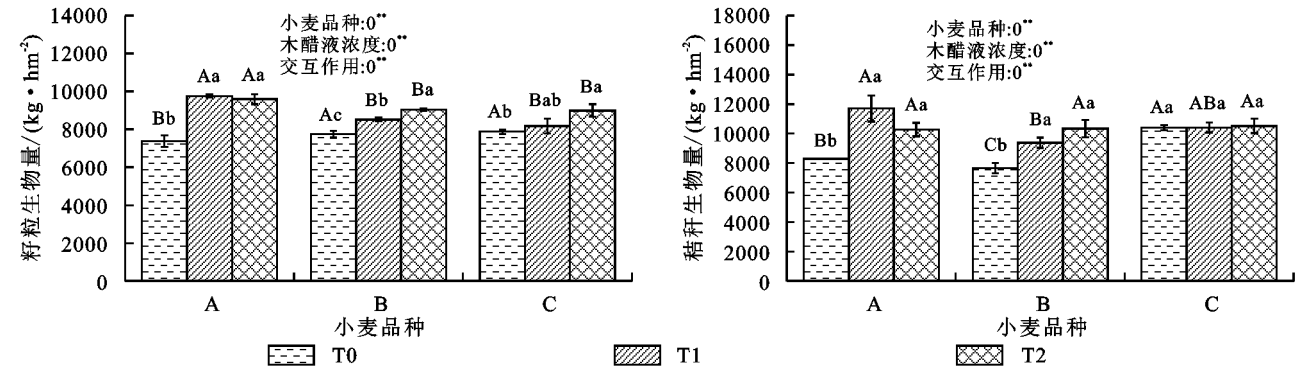
2.2 施加木醋液对小麦各部位 Cd 含量的影响

由图 3 可知,小麦籽粒的 Cd 含量品种间差异显著($p<0.05$),但小麦秸秆和根 Cd 含量品种间无显著差异。施加木醋液对各品种小麦籽粒 Cd 含量无显著影响,但可显著提高各品种小麦秸秆和根的 Cd 含量($p<0.05$)。施加木醋液处理同一品种不同浓度木醋液处理小麦籽粒 Cd 含量差异不显著,但小麦品种间存在显著差异($p<0.05$),籽粒 Cd 含量为 C 品种>A 品种>B 品种。

各品种秸秆 Cd 含量差异不显著,施加木醋液后各品种小麦秸秆 Cd 含量显著提高($p<0.05$),施加稀释 200 倍木醋液处理中 A 品种秸秆 Cd 含量显著高于 B、C 品种($p<0.05$)。同品种各不同处理表现为 A 品种 A—T2 处理秸秆 Cd 含量最高,为 1.27 mg/kg,比 A—T0 处理增加 49.01%,A—T1 处理较

A—T0 秸秆 Cd 含量增加 41.19%;B 品种的 B—T1、B—T2 处理小麦秸秆 Cd 含量比 B—T0 处理分别增加 31.82%,18.11%,其中,B—T1 最高,为 1.05 mg/kg;C 品

种的 C—T1 处理秸秆 Cd 含量最高,为 1.25 mg/kg,C—T2 处理 Cd 含量为 0.96 mg/kg,分别较 C—T0 处理增加 45.74%,18.11%。



注:图柱上方不同小写字母表示同一小麦品种处理间的显著差异性($p<0.05$),不同大写字母表示不同小麦品种相同施用浓度间显著差异性($p<0.05$)。下同。

图 2 不同处理对小麦籽粒和秸秆生物量的影响

稀释 400 倍木醋液处理下,A 品种小麦根部 Cd 含量最高,B 品种小麦根部 Cd 含量次之,C 品种小麦根部 Cd 含量最低。稀释 200 倍木醋液处理下,A 品种小麦根部 Cd 含量最高,B 品种小麦根部 Cd 含量次之,C 品种小麦根部 Cd 最低。同品种各处理表现为:A 品种 A—T1 与 A—T2 处理根部 Cd 含量均显著高于 A—T0 处

理($p<0.05$),分别增加 23.64%,17.91%,其中,A—T1 处理根部 Cd 含量最高,为 4.21 mg/kg;B 品种 B—T1 与 B—T2 处理根部 Cd 含量比 B—T0 处理分别增加 17.27%,14.40%,其中 B—T1 处理根部 Cd 含量最高,为 3.81 mg/kg;C 品种 C—T2 处理根部 Cd 含量最高,为 4.20 mg/kg,较 C—T0 增加 20.73%。

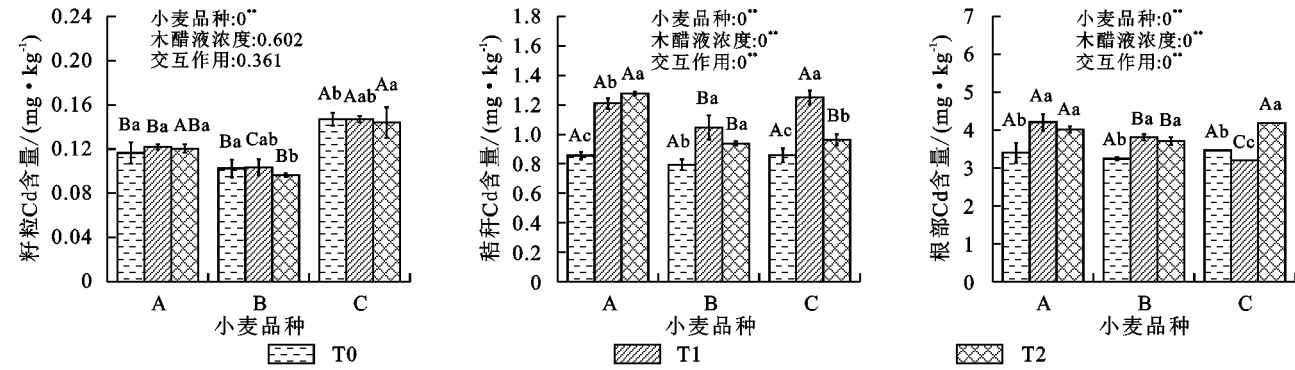


图 3 不同处理对小麦不同部位 Cd 含量的影响

2.3 施加木醋液对小麦体内 Cd 分布的影响

由图 4 可知,各处理小麦体内 Cd 的分布系数即 Cd 在小麦体内积累占比。Cd 在小麦体内分布的规律为秸秆>籽粒>根,小麦籽粒分布系数为 C 品种>A 品种>B 品种,秸秆分布系数为 A、B 品种显著高于 C 品种($p<0.05$),施加木醋液后能显著增加小麦秸秆的分布系数,降低籽粒与根的分布系数($p<0.05$)。同品种各处理表现为 A 品种 A—T2 处理相较于 A—T0 处理秸秆 Cd 的分布系数由 58.56% 提升至 68.79%,根部和籽粒的 Cd 分布系数分别由 20.05%,21.40% 下降至 13.83%,17.38%。B 品种 B—T1 处理小麦秸秆 Cd 分布占比最大,为 65.15%,籽粒和秸秆占比分别较 B—T0 处理下降至 17.51%,17.33%。而 C 品种的 C—T1 处理小麦秸秆的 Cd 分布系数最高,为 66.89%,相较于 C—T0 处理籽粒 Cd 分布系数由 24.90% 降至 20.57%,根部由 19.56% 降至 12.54%。未

施加木醋液各品种小麦的秸秆 Cd 的分布系数为 B 品种>A 品种>C 品种,施加稀释 400 倍木醋液处理各品种小麦秸秆 Cd 分布系数变为 A 品种>C 品种>B 品种,施加稀释 200 倍木醋液处理各品种小麦秸秆分布系数为 A 品种>B 品种>C 品种。

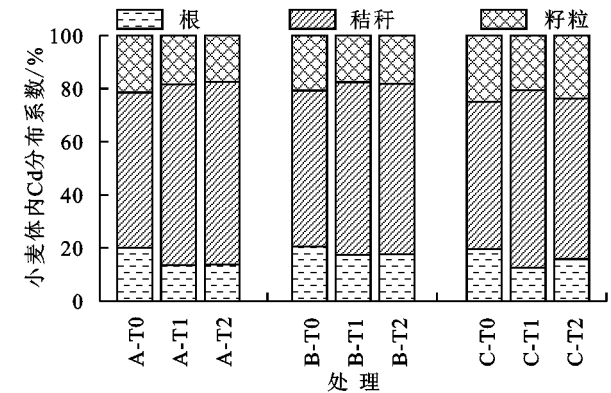


图 4 不同处理对小麦各部位 Cd 分布系数的影响

2.4 施加木醋液对小麦各部位 Cd 富集转运的影响

2.4.1 对小麦各部位 Cd 富集系数的影响 由图 5 可知,未施加木醋液处理小麦籽粒的 Cd 富集系数品种间差异显著($p < 0.05$),但小麦秸秆和根 Cd 富集系数品种间无显著差异,施加木醋液可以提高各品种小麦秸秆和根的 Cd 富集系数。未施加木醋液处理 C 品种小麦籽粒 Cd 富集系数显著高于 A、B 品种($p < 0.05$),施加木醋液条件下 A 品种各处理籽粒 Cd 富集系数差异不显著,B、C 品种籽粒 Cd 富集系数均为木醋液稀释 200 倍处理最高,其他处理差异不显著。同品种各处理表现为 A 品种各处理籽粒 Cd 富集系数差异不显著,B—T1 处理较 B—T0 处理小麦籽粒 Cd 富集系数降低 5.06%,C—T1 处理较 C—T0 处理小麦籽粒 Cd 富集系数增加 7.64%。

未施加木醋液处理各品种小麦秸秆 Cd 富集系数差异不显著,各品种施加木醋液处理小麦秸秆 Cd 富集系数显著提高($p < 0.05$),施加 200 倍木醋液处

理 A 品种小麦秸秆 Cd 富集系数显著高于 B、C 品种($p < 0.05$)。同品种各处理表现为 A 品种 A—T1 与 A—T2 处理小麦秸秆 Cd 富集系数较 A—T0 分别增加 45.48% 和 52.53%;B 品种 B—T1 与 B—T2 处理与 B—T0 处理相比分别增加 22.09% 和 17.19%;C 品种 C—T1 处理小麦秸秆 Cd 富集系数较 C—T0 增加 32.17%,C—T2 处理与 C—T0 处理差异不显著。

各品种间小麦根 Cd 富集系数差异不显著,施加稀释 400 倍木醋液处理 A 品种小麦根 Cd 富集系数最高,C 品种最低,施加稀释 200 倍木醋液处理 C 品种小麦根 Cd 富集系数最高,B 品种最低。同品种各处理表现为 A 品种 A—T1 与 A—T2 处理小麦根 Cd 富集系数较 A—T0 分别增加 27.36%,20.70%;B 品种 B—T1 与 B—T2 处理小麦根 Cd 富集系数分别增加 8.62%,13.51%;C 品种 C—T1 处理小麦根的 Cd 富集系数较 C—T0 减少 16.37%,C—T2 处理小麦根部 Cd 富集系数较 C—T0 增加 12.45%。

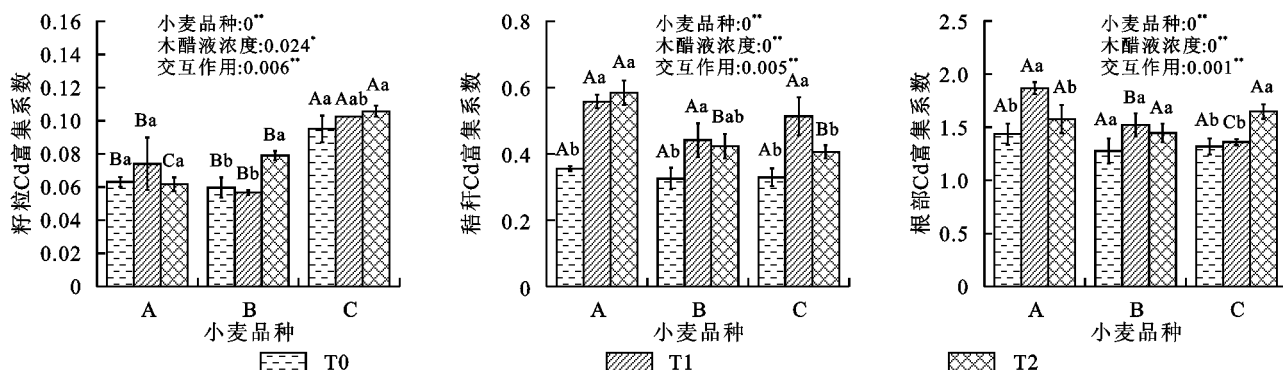


图 5 不同处理对小麦各部位 Cd 富集系数的影响

2.4.2 对小麦各部位之间的 Cd 转运系数的影响

由表 1 可知,各品种小麦 $TF_{根-秸秆}$ 无显著差异,A、B 品种 $TF_{秸秆-籽粒}$ 显著低于 C 品种($p < 0.05$),施加木醋液可提高各品种小麦 $TF_{根-秸秆}$,降低 $TF_{秸秆-籽粒}$ 。施加稀释 400 倍木醋液处理 C 品种 $TF_{根-秸秆}$ 显著高于 A、B 品种($p < 0.05$),施加稀释 200 倍木醋液处理 A 品种 $TF_{秸秆-籽粒}$ 最高,C 品种最低,不同木醋液处理 C 品种 $TF_{秸秆-籽粒}$ 均显著高于 A、B 品种($p < 0.05$)。同品种各处理表现为 A 品种施加木醋液处理较 A—T0 处理 $TF_{根-秸秆}$ 增加 13.8%~25.69%,而 $TF_{秸秆-籽粒}$ 下降 25.92%~29.62%;对于 B 品种, $TF_{根-秸秆}$ 较 B—T0 处理提高 59.59%, $TF_{秸秆-籽粒}$ 较 B—T0 处理降低 21.37%,B—T2 处理的 $TF_{根-秸秆}$ 与 B—T0 差异不显著,B—T2 处理的 $TF_{秸秆-籽粒}$ 较 B—T0 处理降低 25.96%;C 品种 C—T1 处理 $TF_{根-秸秆}$ 最高,为 0.391,较 C—T0 处理提高 58.30%,C—T1 处理 $TF_{秸秆-籽粒}$ 最小为 0.117,较 C—T0 处理降低 38.42%,C—T2 处理 $TF_{根-秸秆}$ 与 C—T0 处理差异不显著,C—T2 处理 $TF_{秸秆-籽粒}$ 较 C—T0 处理降低 20.53%。

表 1 不同处理对小麦各部位 Cd 转运系数的影响

处理	$TF_{根-秸秆}$	$TF_{秸秆-籽粒}$
A—T0	0.253±0.023Ab	0.135±0.010Ba
A—T1	0.288±0.023Ba	0.100±0.004Bb
A—T2	0.318±0.007Aa	0.095±0.003Bb
B—T0	0.245±0.013Aa	0.131±0.010Ba
B—T1	0.275±0.016Ba	0.103±0.003Bb
B—T2	0.252±0.003Ba	0.097±0.004Bb
C—T0	0.247±0.013Ab	0.190±0.020Aa
C—T1	0.391±0.014Aa	0.117±0.003Ab
C—T2	0.230±0.009Cb	0.151±0.011Ab
小麦品种	0**	0**
木醋液浓度	0**	0**
交互作用	0**	0.002**

注:表中数据均为平均数±标准差;同列不同小写字母表示同一小麦品种处理间的显著差异性($p < 0.05$),同列不同大写字母表示不同小麦品种相同施用浓度间显著差异性($p < 0.05$)。下同。

2.5 不同处理对根际土壤 Cd 含量及 Cd 的赋存形态的影响

2.5.1 不同处理对根际土壤 Cd 含量的影响 由图 6 可知,小麦种植后各处理根际土 Cd 含量比种植前均

显著下降($p < 0.05$),未施加木醋液各品种处理根际土 Cd 含量比种植前降低 8.88%~10.96%,施加木醋液各品种处理根际土 Cd 含量比种植前降低 13.11%~16.97%。同品种各处理表现为 A 品种各处理与 A—T0 相比差异显著($p < 0.05$),其中 A—T1 处理根际土壤 Cd 含量最低,为 1.96 mg/kg;B 品种 B—T0 各处理与 B—T0 相比差异显著($p < 0.05$),B—T2 处理根际土壤 Cd 含量最低,为 1.94 mg/kg;C 品种 C—T1 和 C—T2 处理与 C—T0 相比差异显著($p < 0.05$),分别为 1.97,2.00 mg/kg。

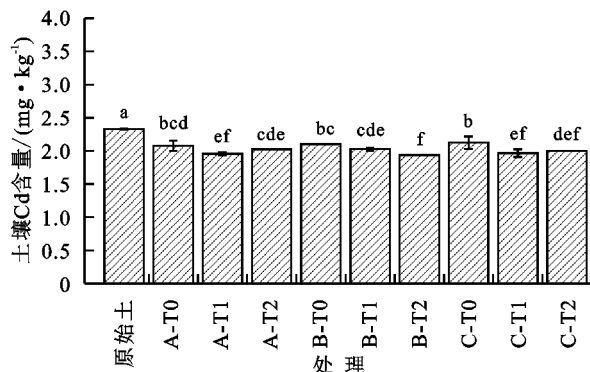


图6 不同处理对根际土壤 Cd 含量的影响

2.5.2 不同处理对根际土壤 Cd 赋存形态的影响

由图7可知,小麦种植前后土壤中 Cd 的赋存形态差异显著($p < 0.05$),与种植前土壤 Cd 形态相比,施加木醋液可提高土壤可交换态 Cd(EX)含量占比,降低土壤残渣态 Cd(RE)含量占比,其中,EX 分别增加 10.17%,16.74%,12.26%,RE 分别降低 27.90%,27.72%,26.45%。施加稀释 400 倍木醋液处理中,C—T1 处理 EX 最高,为 39.97%,各品种 RE 差异不显著;施加稀释 200 倍木醋液处理中,B—T2 处理 EX 最高,为 39.64%,A 品种 RE 最低,为 13.63%。同品种各处理表现为:A 品种 A—T1 处理与 A—T0 处理相比,RE 提高 6.10%;B 品种 B—T1 处理与 B—T0 处理相比,EX 降低 9.00%,土壤有机物结合态 Cd 含量(OM)提高 10.38%,RE 提高 13.21%,B—T2 处理与 B—T0 处理相比,OM 提高 9.45%,RE 提高 24.10%;C 品种 C—T1 处理与 C—T0 处理相比,EX 提高 9.17%。

3 讨论

3.1 施加木醋液对不同品种小麦生物量的影响

本研究表明,施加木醋液对小麦的生长有促进作用,这与胡世龙等^[10]、查金花^[11]、谷思成等^[12]、张倩等^[13]研究结果一致。石灰性 Cd 污染土壤由于 Cd 胁迫能够抑制小麦生物量,外源木醋液的施加在不同程度上缓解 Cd 对植物生长的抑制^[14-16]。王海英^[17]的研究结果表明,木醋液含有氮、磷、钾与有机质等物质,木醋液的加入提高土壤养分含量,且木醋液 pH 较低,该试验土壤为石灰性土壤,土壤 pH 较高,稀释

后施用可促进土壤中营养元素的释放,增加小麦的氮素利用率。程虎等^[18]研究表明,向土壤中添加一定浓度木醋液增加微生物的数量,并增加土壤酶活性(蔗糖酶、脲酶、脱氢酶和碱性磷酸酶)。由此看来,向土壤中添加木醋液可提高土壤微生物对氮、磷及有机物质的矿化和分解,为植物生长提供充足的养分。

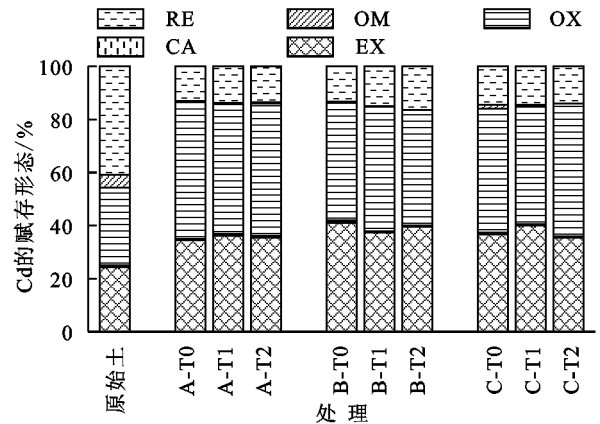


图7 不同处理对根际土壤 Cd 形态的影响

3.2 不同处理对不同品种小麦积累及转运 Cd 的影响

本研究表明,小麦籽粒 Cd 含量和富集系数品种间差异显著($p < 0.05$),但小麦秸秆和根 Cd 含量和富集系数品种间无显著差异,施加木醋液可以提高各品种小麦秸秆和根的 Cd 含量和富集系数。木醋液可通过提高小麦生物量增加对 Cd 的积累,木醋液中有有机酸与土壤重金属 Cd 形成的络合物也可促进小麦根部对 Cd 吸收,增强小麦根部富集能力,这与李丹洋等^[19]、刘坤^[20]、陈晶^[21]研究结果相似。另外,Cd 从根部向上运输过程中产生阻隔,一方面 Cd 向茎叶转运过程中在细胞壁上残留;另一方面,在木质部运输过程中与有机物和无机配体结合,使向可食部位运输的 Cd 含量逐步减少,籽粒 Cd 富集最低,影响最小。

转运系数指植物地上部 Cd 含量与地下部 Cd 含量之比,用来评价植物将重金属从地下部转移到地上部的能力。本研究表明,品种间小麦 $TF_{根-秸秆}$ 无显著差异,A、B 品种 $TF_{秸秆-籽粒}$ 显著低于 C 品种($p < 0.05$),施加木醋液可提高各品种小麦 $TF_{根-秸秆}$,降低 $TF_{秸秆-籽粒}$ 。段桂兰等^[22]研究表明,作物对重金属的吸收及转运主要是由外界环境与自身遗传 2 个因素决定,品种特性大多决定根部特性,根部特性是决定植株吸收 Cd 的关键。常建宁等^[23]研究表明,炭基与木醋液于玉米生育期配施,提高玉米蒸腾作用,从而使重金属由玉米根向地上各部位转运,对玉米茎与叶部对 Cr 的转移系数均有不同程度的增加,与本试验研究结果相似。

3.3 不同处理对土壤 Cd 含量及 Cd 赋存形态的影响

本研究表明,小麦种植前后土壤中 Cd 的赋存形态差异显著,土壤可交换态 Cd 含量显著增加,残渣

态 Cd 含量显著降低。根际土 Cd 含量比种植前显著下降,施加木醋液后,各品种处理根际土 Cd 含量比未施加处理显著降低。土壤重金属的形态与作物生长关系密切,植物在吸收重金属时根际分泌有机酸增加重金属的溶解性,另外,木醋液本身含有的官能团,与土壤 Cd 的配合改变土壤中的赋存形态^[24-25],并且木醋液中含有的大量有机酸可以通过被土壤吸附后,再与 Cd 络合形成的三元配合物或者与土壤中重金属形成的配合物使土壤表面重金属的吸附增加,促进植物对 Cd 的吸收^[26-27]。

4 结论

Cd 污染农田施加木醋液可显著增加各品种小麦籽粒和秸秆的生物量,提高各品种小麦秸秆和根的 Cd 含量、分布系数和富集转运能力,但对各品种小麦籽粒 Cd 含量没有显著影响,小麦籽粒 Cd 含量的差异主要为品种。各品种小麦根际土 Cd 含量比种植前显著降低,施加木醋液处理效果显著,其中,B—T2 处理根际土 Cd 含量下降最多。小麦种植前后土壤 Cd 的赋存形态差异显著,可交换态和铁锰氧化物结合态显著提高,有机物结合态、残渣态显著降低。因此,施加木醋液有助于污染农田 Cd 从土壤向小麦秸秆转运,但不增加小麦籽粒风险,可通过秸秆离田措施将 Cd 从农田土壤逐步移除,为华北地区弱碱性 Cd 污染农田的“边生产、边修复”提供理论依据。

参考文献:

- [1] 黄慧,陈宏.植物修复重金属汞、镉、铬污染土壤的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(24):326-329.
- [2] Nkrumah P N, Baker A J M, Chaney R L, et al. Current status and challenges in developing nickel phytomining: An agronomic perspective[J]. Plant Soil, 2016, 40(6):55-69.
- [3] Sindhu M, Zainul A Z. Pyrolygneous acid-the smoky acidic liquid from plant biomass[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 99(2):611-622.
- [4] Marumoto S, Yamamoto S P, Nishimura H, et al. Identification of a germicidal compound against picornavirus in bamboo pyrolygneous acid[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(36):9106-9111.
- [5] 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.
- [6] 高妍,马鑫宇,董旋,等.化肥配施木醋液对玉米产量及品质的影响[J].土壤通报,2022,53(4):866-873.
- [7] 吴苗苗,叶佳润,刘慧,等.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[J].水土保持学报,2022,36(3):327-332.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:25-282.
- [9] 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.
- [10] 胡世龙,程博,曹凑贵,等.不同氮肥水平下喷施木醋液对水稻产量和食味品质的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(1):133-140.
- [11] 查金花.生物质醋液和生物炭对土壤性质和植物生长的影响[D].浙江 临安:浙江农林大学,2019.
- [12] 谷思成,朱坤森,耿默琳,等.叶面喷施木醋液对油菜苗期生长发育的影响[J].中国油料作物学报,2020,42(3):453-460.
- [13] 张倩,陈为峰,董元杰.外源硝普钠与 EDTA 强化黑麦草耐镉性及镉积累[J].植物营养与肥料学报,2019,25(9):1560-1568.
- [14] 陈红纯,吴科君,李瑞,等.外源有机酸对镉胁迫下秋华柳镉积累特征的影响[J].生态学报,2019,39(12):4510-4518.
- [15] 张玉凤,刘兆辉,田慎重,等.含木醋液水溶肥对干热风胁迫下小麦生长的影响[J].土壤,2021,53(3):499-504.
- [16] 薛博晗,李娜,宋桂龙,等.外源柠檬酸苹果酸和草酸对披碱草镉耐受及富集的影响[J].草业学报,2018,27(6):128-136.
- [17] 王海英.木醋液对植物生长调节机理研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2005.
- [18] 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.
- [19] 李丹洋,程红艳,王効举,等.菌糠木醋液对铜铬污染土壤玉米生理生化指标及重金属富集转运的影响[J].河南农业科学,2019,48(4):65-72.
- [20] 刘坤.有机酸对土壤重金属 Pb、Cd 的活化及蚯蚓诱导植物修复作用的研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2008.
- [21] 陈晶.生长素类物质对镉胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[D].重庆:西南大学,2016.
- [22] 段桂兰,张红梅,刘云霞,等.水稻基因类型与生长环境对精米中砷积累的影响[J].生态毒理学报,2013,8(2):156-162.
- [23] 常建宁,李丹洋,王効举,等.炭基有机肥配施菌糠木醋液对污灌区土壤铬形态及玉米吸收的影响[J].河南农业科学,2019,48(1):57-65.
- [24] 范洪黎,王旭,周卫.添加有机酸对土壤镉形态转化及苋菜镉积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(1):132-138.
- [25] 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,2019,1(4):54-62.
- [26] 綦远才,周翠,何欣芮,等.两种外源有机酸对土壤 Cd 形态及秋华柳 Cd 积累的影响[J].环境科学研究,2021,34(9):2220-2227.
- [27] 周东美,郑春荣,陈怀满.镉与柠檬酸、EDTA 在几种典型土壤中交互作用的研究[J].土壤学报,2002,39(1):29-36.