DOI: 10. 11686/cyxb2025466
http://cyxb. magtech. com. cn
李怡, 多晶, 刘宇昊, 等. 木醋液对土壤镉形态转化及黑麦草镉转运富集的影响. 草业学报, 2026, 35(11): 170－183.
LI Yi, DUO Jing, LIU Yu-hao, *et al*. Effects of wood vinegar on soil cadmium morphological transformation and cadmium transport and bioaccumulation in ryegrass. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 170－183.

木醋液对土壤镉形态转化及黑麦草镉转运富集的影响

李怡[1,2], 多晶[1], 刘宇昊[1], 刘芳[1], 刘世亮[1], 介晓磊[1], 赵颖[1*]
(1. 河南农业大学资源与环境学院, 农业农村部黄淮海平原耕地质量保育重点实验室, 河南 郑州 450002; 2. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 211135)

摘要: 针对石灰性镉(Cd)污染土壤修复效率偏低的问题, 通过田间试验探究了木醋液对土壤 Cd 形态转化及黑麦草 Cd 转运富集的影响。试验设置 4 个木醋液浓度处理: 不添加(T_0)、稀释 400 倍(T_1)、稀释 200 倍(T_2)和稀释 100 倍(T_3), 分析了两茬黑麦草的生长状况、Cd 富集与转运特性, 以及根际土壤的理化性质和 Cd 形态变化。结果显示, 施加木醋液后黑麦草两茬地上部生物量分别提高 48. 98%～93. 74% 和 8. 81%～210. 61%($P<0.05$), 黑麦草地上部富集系数和转运系数显著增加($P<0.05$), 两茬黑麦草地上部 Cd 积累量较对照处理显著提高, 第 1 茬黑麦草地上部 Cd 积累量最高为 45. 53 g·hm^{-2}, 第 2 茬仅为 16. 68 g·hm^{-2}。两茬收割后施加木醋液处理土壤 pH 分别下降 0. 07～0. 13、0. 15～0. 20 个单位, 土壤脲酶和蔗糖酶活性较 T_0 处理(清水对照)分别提高 72. 73%～136. 36% 和 23. 19%～68. 73%, 土壤 Cd 含量较种植前分别下降 0. 01～0. 34 mg·kg^{-1}(第 1 茬)和 0. 20～0. 49 mg·kg^{-1}(第 2 茬), 第 2 茬 T_3 处理(木醋液稀释 100 倍)土壤 Cd 含量最低, 为 1. 36 mg·kg^{-1}, 与第 1 茬 T_0 处理相比降低 31. 31%。因此, 木醋液通过活化土壤环境、促进黑麦草生长并强化 Cd 吸收转运, 能有效提升黑麦草对重金属 Cd 污染农田土壤的修复效率。

关键词: 木醋液; 黑麦草; 镉污染土壤; 化学形态; 转运富集

Effects of wood vinegar on soil cadmium morphological transformation and cadmium transport and bioaccumulation in ryegrass

LI Yi[1,2], DUO Jing[1], LIU Yu-hao[1], LIU Fang[1], LIU Shi-liang[1], JIE Xiao-lei[1], ZHAO Ying[1*]
1. *College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Key Laboratory of Cultivated Land Quality Conservation in the Huanghuaihai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou* 450002, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*

Abstract: To address the low remediation efficiency of lime-based Cd-contaminated soils, this study investigated the effects of wood vinegar solution on Cd soil transformation and translocation in ryegrass in a field experiment. The experiment was designed with 4 concentrations of wood vinegar solution as treatments: no addition (T_0), diluted 400 times (T_1), diluted 200 times (T_2) and diluted 100 times (T_3), with analyses conducted on the growth status and Cd accumulation and translocation characteristics of two harvests of ryegrass, as well as the physicochemical properties and Cd morphological transformation of rhizosphere soil were monitored. The results showed that after applying wood vinegar, the aboveground biomass of the first and second harvests increased by 48. 98%－93. 74% and 8. 81%－210. 61%, respectively ($P<0.05$). The enrichment and transport coefficients of ryegrass aboveground biomass also showed significant increases ($P<0.05$). The Cd accumulation in the aboveground

收稿日期: 2025-11-17; 改回日期: 2025-12-25
基金项目: 河南省科技攻关项目(252102110220)资助。
作者简介: 李怡(2003－), 女, 河南鹤壁人, 在读硕士。E-mail: liyiy030902@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyingspring@163. com

biomass of both harvests was significantly higher than that in the control treatment. The highest Cd accumulation in the first harvest was 45.53 g·hm^{-2}, while the second harvest recorded only 16.68 g·hm^{-2}. After the first and second harvests, applying wood vinegar as a soil treatment reduced pH levels by 0.07－0.13 and 0.15－0.20 units, respectively. Soil urease and sucrose enzyme activity increased by 72.73%－136.36% and 23.19%－68.73% compared to the T_0 treatment. The Cd content in the soil decreased by 0.01－0.34 mg·kg^{-1} (first harvest) and 0.20－0.49 mg·kg^{-1} (second harvest). The lowest soil Cd content (1.36 mg·kg^{-1}) was observed in the second harvest T_3 treatment and this was 31.31% lower than that in the first harvest T_0 treatment. In conclusion, the application of wood vinegar significantly enhances the bioavailability of Cd in soil and promotes the accumulation and transport of Cd by ryegrass, effectively reducing the soil Cd content.

Key words: wood vinegar; ryegrass; cadmium-contaminated soil; chemical speciation; translocation and accumulation

土壤是保障农业可持续发展的自然资源，也是生态环境保护的主要对象之一[1]。随着社会经济的快速发展，在工业“三废”排放（即工业废气、废水和固体废物）、农药和化肥的广泛使用以及大气沉降的影响下，土壤重金属污染已对粮食安全、人居环境与经济社会可持续发展构成严峻挑战[2-3]。当前，全国近两成的耕地土壤点位超标，重金属污染尤为严重，受到镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积约2000万 hm^2，镉（cadmium，Cd）污染问题比较突出[4]。因此，如何治理重金属污染土壤，恢复土壤生态健康，对我国农业可持续发展有着重大意义。

我国土壤分布具有显著的地带性与空间异质性，南方夏季高温，北方冬季寒冷。农田土壤污染也呈现出鲜明的区域差异，重金属污染分布在我国重要的粮食产区，南方重于北方，东部重于西部[5-7]。南北方农田因耕作制度与土壤性质差异，其重金属的环境行为迥异：南方水田的酸性土壤更易活化重金属，导致其有效态含量高、移动性强；而北方旱地的碱性土壤则对重金属有固定作用，背景总量较高，但其生物有效性与迁移性均较弱。治理重金属污染土壤的技术主要可归为三大类：物理、化学和生物修复[8-9]。其中，生物修复中的植物修复技术因其环境友好特性，在农田重金属污染治理中展现出良好的应用潜力。植物修复技术具有周期长与效率偏低的缺点，在北方碱性土壤中，其修复效率会进一步降低，导致成本收益难以平衡，经济矛盾尤为突出[10]。因此，在北方治理农田土壤重金属污染时，如何提高修复效率成为亟待解决的问题。

基于上述问题，有研究学者认为可以利用植物的生物量和对重金属较高的富集作用提高修复效率[11]。牧草类植物具有适应性强、易于栽培、生物量大、生长周期短并且可以多次刈割等优点，是植物修复重金属污染土壤的理想材料[12]。杨金山等[13]研究发现在污染农田生长的水苋菜（*Ammannia baccifera*）对Cd的移除量较大，具有较高的农田Cd污染修复应用潜力；周志强[14]研究结果表明象草（*Pennisetum purpureum*）多次刈割的收获方式有助于提高Cd污染土壤的修复效率，且其根部对Cd具有较强的富集和耐受能力，存在潜在的植物固定作用；李希铭等[15]通过比较35种草本植物，发现黑麦草（*Lolium perenne*）地上部Cd积累量和总Cd积累量均为最大。近年来研究表明，通过调控土壤化学环境以活化重金属是强化植物修复的有效途径。有研究证实，外源添加改良剂可显著改变Cd的化学形态与溶解性，从而提升其生物有效性及植物提取效率[16]。李加驹[17]通过盆栽试验探究9种螯合剂对高丹草（*Sorghum bicolor×sudanense*）生长及吸收富集Cd的影响，发现螯合剂的施加促进了高丹草的生长和对重金属Cd的积累转运。Wu等[18]发现土壤中施加柠檬酸等有机酸均能提高龙葵（*Solanum nigrum*）对Cd的富集转运能力。因此，外源添加剂联合植物修复重金属土壤有着较强的应用潜力。

木醋液是一种由生物质热解产生的酸性液体混合物，因其独特的理化特性，已被证实可作为高效的土壤改良剂与植物生长调节剂，广泛应用于农业生产领域[19-20]。研究表明，木醋液中富含的有机酸成分，可通过降低土壤pH、竞争吸附位点及络合作用等方式，影响重金属的化学形态与生物有效性[21]。与传统酸性调节剂相比，木醋液不仅具有酸化调节功能，其含有的丰富有机组分有助于改善土壤微环境、促进植物生长与根系分泌，且环境风险较低[22]。土壤酶活性（如脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶）是评价土壤微生态健康与重金属胁迫响应的重要生物学指

标[23],而木醋液可通过调节土壤酶活性间接影响重金属的生物有效性及植物对重金属的吸收过程。木醋液中的有机酸主要通过活化土壤Cd(降低pH、络合增溶)、强化植物吸收(促进根系分泌、诱导体内螯合)及改善根际环境(调节酶活性与微生物)等多重机制,协同增强植物对Cd的富集与转运能力[24]。Benzon等[25]研究发现,施用0.2%的木醋液能通过促进重金属在水稻(*Oryza sativa*)根部固定并降低其向籽粒的转运,从而有效减少水稻对铜、铅、锌的吸收,保障农产品安全。Li等[26]通过土柱淋溶和盆栽试验发现在多种添加剂中,木醋液能显著提高狼尾草(*Pennisetum sinese*)生物量,并通过活化土壤中稳定形态的Cd,使生物富集系数提高到3.2以上,其综合强化效果优于柠檬酸与氯化铁,展现出强化植物提取修复Cd污染土壤的良好潜力。因此本研究选取木醋液作为外源添加剂,种植黑麦草对Cd污染农田进行修复,通过田间试验研究其对石灰性Cd污染土壤中Cd形态转化及黑麦草Cd富集与转运的影响,旨在探究木醋液强化植物修复的可行性与作用机制,为Cd污染农田的绿色修复提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在河南开封祥符区Cd污染农田进行,土壤为砂质潮土。供试木醋液购自石家庄宏森有限公司,其主要成分为46.06%的有机酸等。供试植物为一年生品种冬牧70黑麦草,购于河南秋乐种业科技股份有限公司。土壤与木醋液的基本理化性质详见表1与表2。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

项目 Item	pH	全镉 Total cadmium ($mg\cdot kg^{-1}$)	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)
土壤 Soil	7.79	2.06	9.96	9.75	23.45	354.67

表2 木醋液基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of wood vinegar

项目 Item	pH	电导率 Electrical conductivity ($mS\cdot cm^{-1}$)	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$)
木醋液 Wood vinegar	4.18	3.50	57.75	2.69	0.81	0.09

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,以木醋液施加浓度为主控因子,以清水(T_0)为对照,设置0.25%(T_1,稀释400倍)、0.5%(T_2,稀释200倍)和1%(T_3,稀释100倍)3个木醋液处理浓度。每个处理设3次重复,共布设12个面积为20 m^2(4 m×5 m)的小区。供试黑麦草于2021年11月初采用条播方式统一播种,播种量为105 $kg\cdot hm^{-2}$,深度4 cm,行间距20 cm。播种后30 d,采用均匀撒施的方法施450 $kg\cdot hm^{-2}$的氮肥,生长期追施300 $kg\cdot hm^{-2}$的氮磷钾复合肥($N:P_2O_5:K_2O=3:1:2$)。于第2年(2022年)3月黑麦草生长至30 cm喷施木醋液,按照行列尽量贴近地面喷施,用量为6.75 $L\cdot m^{-2}$,每间隔5 d施用一次,共3次。黑麦草第1茬(the first harvest, A)长至约90 cm时进行第1次刈割,刈割时留茬10 cm,待第2茬(the second harvest, B)黑麦草长至30 cm时按上述方法再次施用木醋液,并于黑麦草长至90 cm时进行第2茬收割。

1.3 样品采集和测定

1.3.1 样品采集与处理 土壤样品分别于种植前和植物收获时进行采集。在各小区采用5点混合采样法[27]

采集土壤样品，采样深度 0～20 cm。样品通风阴干后拣去植物的残体和石块，磨碎后过筛，装入袋中备用。植株样品采集两次，在两茬黑麦草均长至约 90 cm 时，采集 1 m×1 m 样方内所有黑麦草植株。称重后依次清洗烘干并粉碎，装入袋中备用。

1.3.2　样品测定和计算方法　　pH 用 pH 计（PHS-3C，中国上海）测定[27]；土壤全 Cd 含量：称取 0.5000 g 土壤样品，依次加入 10 mL 硝酸、5 mL 氢氟酸和 2 mL 高氯酸，在石墨消解仪（SXJ-48，中国上海）上加热消解至溶液澄清、白烟冒尽；冷却后用稀硝酸溶解残渣、定容、过滤，所得溶液采用石墨炉原子吸收分光光度计（Perkin Elmer AA600，美国）测定其中 Cd 浓度[28]。土壤有效态 Cd 的测定：称取 5.00 g 过 2 mm 筛风干土样，加入 25 mL pH 7.30 的二乙烯三胺五乙酸（DTPA）提取液，于室温[（25±2）℃]下以 180 r·min^{-1}振荡 2 h，过滤后取滤液，用原子吸收分析仪（ZEEnit 700，德国）测定 DTPA 提取态 Cd 含量[28]。土壤 Cd 化学形态分布采用 Tessier 5 步提取法测定：将土壤中的 Cd 分为可交换态（exchangeable，EX）、碳酸盐结合态（carbonate-bound，CA）、铁锰氧化物结合态（iron-manganese oxide-bound，OX）、有机结合态（organic-bound，OM）和残渣态（residual，RE），用原子吸收分析仪（ZEEnit 700，德国）测定各形态 Cd 含量[29]。土壤脲酶活性采用苯酚钠－次氯酸钠比色法测定，过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法测定，蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定[30]。酶活性测定用于评估对土壤质量、微生物活动及重金属的影响。

植株样品中 Cd 含量测定：称取 0.2000 g 烘干粉碎后的植株样品于三角瓶中，加入 10 mL 硝酸－高氯酸混合酸（体积比 3∶1），经电热板加热消解至溶液澄清透明。消解液冷却后转移至容量瓶定容，过滤，采用原子吸收光谱仪（ZEEnit 700，德国）测定其中 Cd 含量[28]。

计算公式如下：

$$BCF = C_{shoot}/C_{soil}$$
$$TF = C_{shoot}/C_{root}$$
$$A_{Cd} = (B_{shoot} \times C_{shoot})$$

式中：BCF（bioaccumulation factor）为 Cd 富集系数；C_{shoot} 为植株地上部 Cd 含量，单位为 mg·kg^{-1}；C_{soil} 为土壤 Cd 含量，单位为 mg·kg^{-1}；TF（translocation factor）为 Cd 转移系数；C_{root} 为植株地下部 Cd 含量；A_{Cd} 为植株地上部 Cd 积累量，单位 g·hm^{-2}；B_{shoot} 为植株地上部生物量，单位 kg·hm^{-2}。

1.4　数据处理

利用 Excel 和 SPSS 软件开展数据的统计与方差分析，采用 Origin 2024、AI 2024 和 R 4.4.1 语言软件对相关数据制图。

2　结果与分析

2.1　木醋液对黑麦草地上部生物量的影响

如图 1 所示，木醋液可显著提高黑麦草地上部生物量。第 1 茬黑麦草各处理地上部生物量与 T_0 处理相比提高 34.25%～49.77%，其中 T_3 处理生物量最高，为 109333 kg·hm^{-2}。黑麦草第 2 茬的生长能力减弱，生物量明显下降，但施用木醋液处理仍较 T_0 显著提高 17.99%～60.89%。第 1 茬黑麦草各处理地上部生物量在相同处理下是第 2 茬的 141.62%～195.33%。

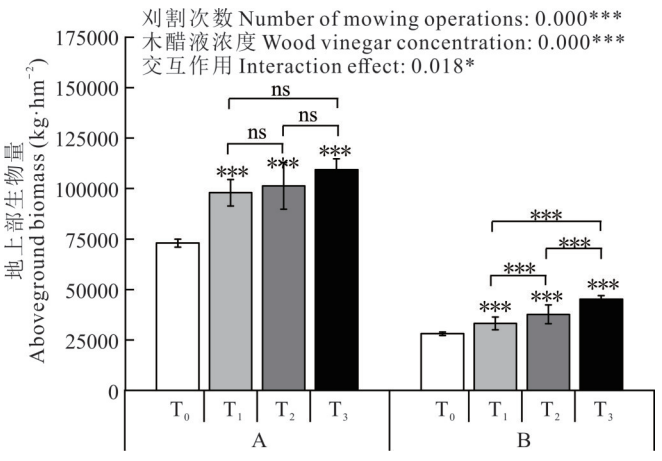


图 1　不同木醋液浓度处理对黑麦草地上部生物量的影响

Fig. 1　Effects of different wood vinegar concentrations on aboveground biomass of ryegrass

*：0.01<P<0.05；**：0.001<P<0.01；***：P<0.001；ns：差异不显著 No significant difference；A：第 1 茬 First harvest；B：第 2 茬 Second harvest. 下同 The same below.

2.2　木醋液对黑麦草地上与地下部 Cd 含量以及积累量的影响

由图 2 可知，木醋液对黑麦草吸收与积累 Cd 具有显著的正向促进效应，黑麦草地上与地下部 Cd 含

量及积累量均随木醋液浓度增加呈上升趋势。两茬黑麦草地上和地下部Cd含量与T_0处理相比差异显著($P<0.05$),且第1茬黑麦草地上部Cd含量高于第2茬。第1茬与第2茬黑麦草各处理地上部ω(Cd)较T_0处理分别提高16.77%~31.06%和22.82%~90.91%,均以T_3处理最大,分别为2.11和1.54 mg·kg^{-1}["ω(Cd)"表示Cd含量,单位为mg·kg^{-1}]。两茬黑麦草地下部ω(Cd)较T_0处理分别增加9.67%~17.23%和16.74%~34.18%,其中第2茬T_3处理地下部ω(Cd)最高,为12.43 mg·kg^{-1}。如图2c所示,第1茬黑麦草各处理地上部Cd积累量较T_0处理增加11.50~22.02 g·hm^{-2},T_3处理最高;第2茬各个处理地上部Cd积累量小于第1茬,相同处理下降18.13~28.17 g·hm^{-2}。

2.3 木醋液对黑麦草地上部Cd富集和转运的影响

图3结果显示,施加木醋液可显著提高黑麦草地上部Cd富集系数和转运系数($P<0.05$)。由图3a可知,两茬黑麦草地上部Cd富集系数随木醋液浓度的提高呈上升趋势,提高幅度分别为36.51%~74.60%、24.37%~108.57%,均以T_3处理最大。相同处理第2茬地上部Cd富集系数较第1茬下降22.34%~42.53%。图3b中,第1茬T_2处理黑麦草Cd转运系数较T_0处理显著提高了0.018($P<0.05$),其他处理均不显著。与T_0处理相比,除T_1

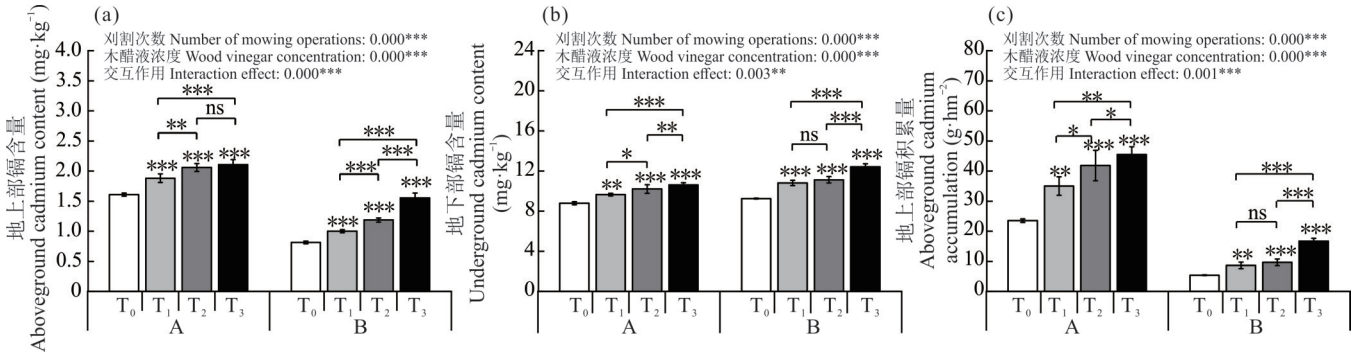


图2 不同木醋液浓度对黑麦草地上与地下部Cd含量以及积累量的影响

Fig. 2 Effects of different wood vinegar concentrations on Cd content and accumulation in the aboveground and underground parts of ryegrass

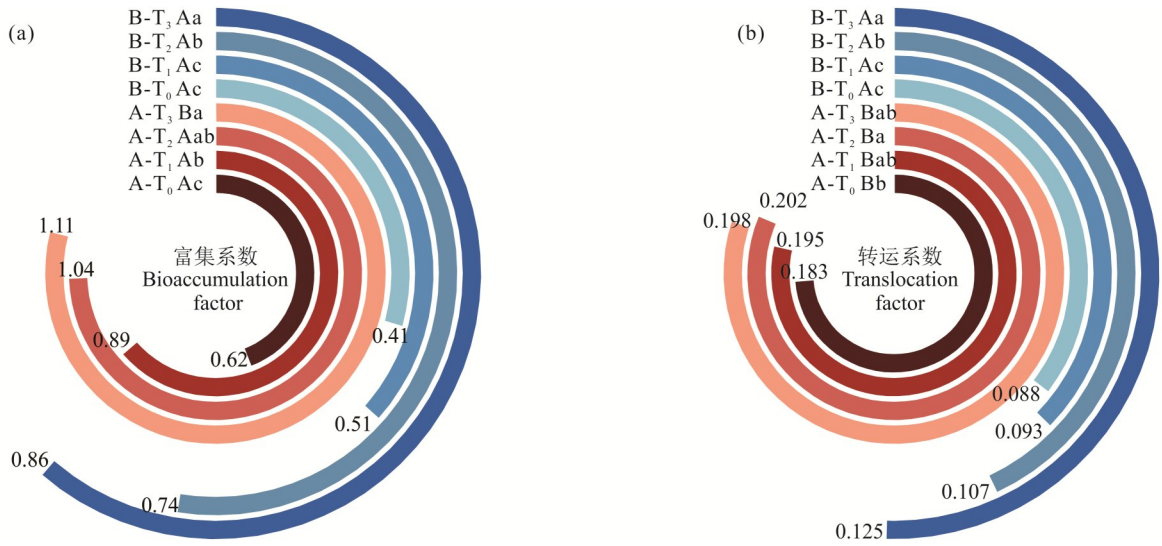


图3 不同木醋液浓度对黑麦草地上部Cd富集系数和转运系数的影响

Fig. 3 Effects of different wood vinegar concentrations on Cd bioaccumulation factor and translocation factor in the aboveground part of ryegrass

不同大写字母表示不同茬次相同施用浓度间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一茬次处理间差异显著($P<0.05$)。Different capital letters indicate significant differences between different growth stages with the same application concentrations ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same growth stage ($P<0.05$).

处理，第 2 茬其他处理 Cd 转运系数均显著提高（$P<0.05$），其中 T_3 处理转运系数最大，为 0.13，较 T_0 处理提高 42.05%。相同处理下，第 2 茬黑麦草地上部 Cd 转运系数较第 1 茬降低 0.073～0.102。

2.4 木醋液联合黑麦草对土壤 pH 和酶活性的影响

图 4a 显示，土壤 pH 随施加木醋液浓度的增加而略有下降。两茬收割后土壤 pH 分别下降 0.07～0.13、0.15～0.20，第 2 茬 T_3 处理土壤 pH 最低，为 7.62。施加木醋液可显著提高土壤脲酶和蔗糖酶活性，对土壤过氧化氢酶活性无显著影响（除第 2 茬 T_3 处理）（图 4b～d）。第 1 茬土壤脲酶和蔗糖酶活性随木醋液浓度的增加呈上升趋势，较 T_0 处理分别提高 72.73%～136.36% 和 23.19%～68.73%，土壤过氧化氢酶活性与 T_0 处理均无显著差异。第 2 茬各处理土壤脲酶活性与 T_0 处理相比差异显著（$P<0.05$），分别提高 72.73%～136.36%，T_2、T_3 处理土壤蔗糖酶活性较 T_0 处理分别提高 18.98%、18.09%，T_3 处理土壤过氧化氢酶活性较 T_0 处理提高 19.38%，第 2 茬 T_1、T_2 处理与 T_0 处理差异不显著。

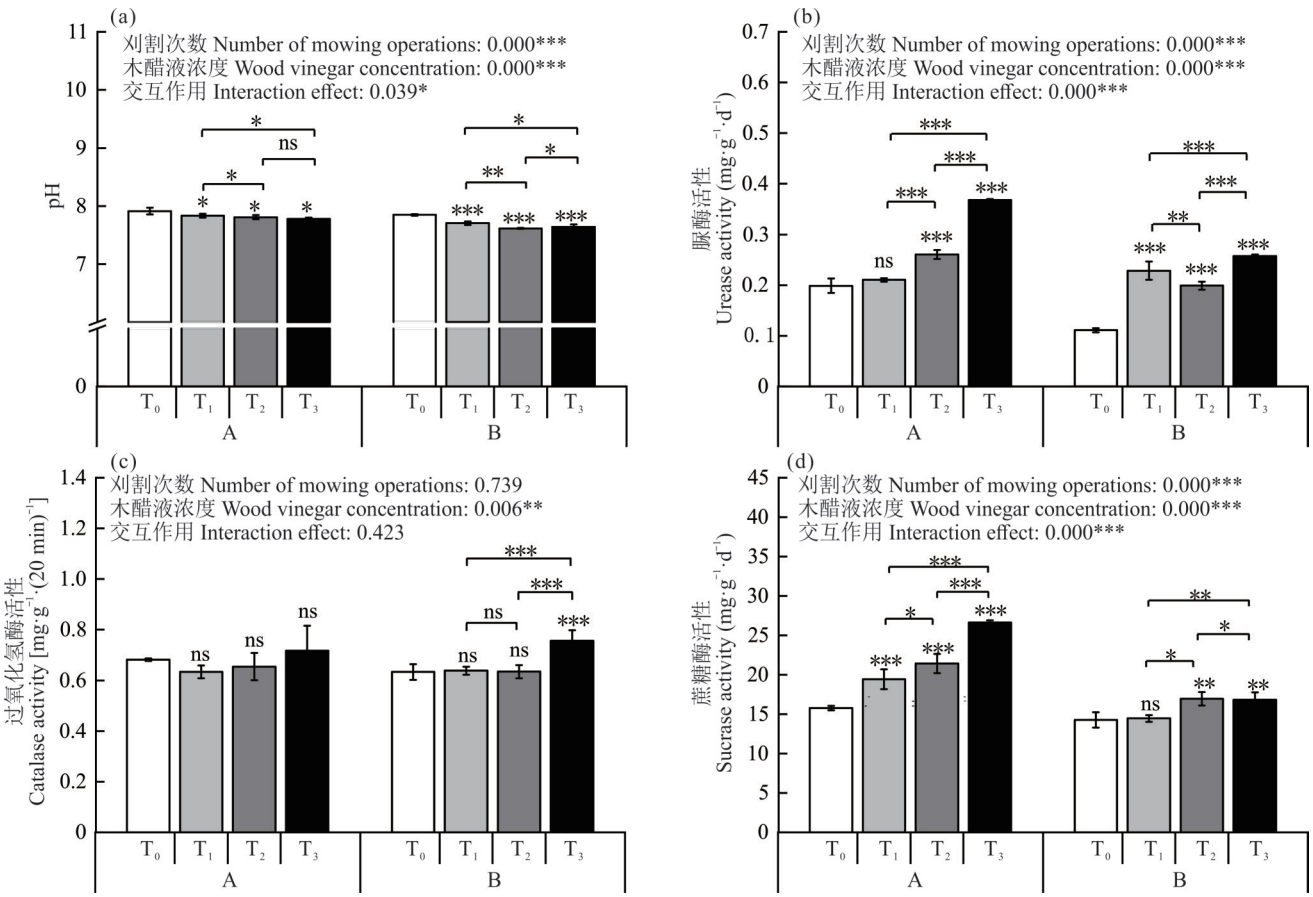


图 4　不同木醋液浓度联合黑麦草对土壤 pH 和脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性的影响

Fig. 4　Effects of different wood vinegar concentrations combined with ryegrass on soil pH, urease, catalase, and sucrase activities

2.5 木醋液联合黑麦草对土壤 Cd 含量及赋存形态的影响

黑麦草刈割和施加木醋液可显著降低收获期土壤 Cd 和有效态 Cd 含量（$P<0.05$）。图 5a 表明，两茬收割后各处理土壤有效态 ω(Cd) 与 T_0 处理相比分别降低 12.26%～12.90%、10.19%～34.97%，均以 T_3 处理最低，分别为 0.81 和 0.47 mg·kg^{-1}。相同处理下，第 2 茬土壤有效态 ω(Cd) 较第 1 茬降低 0.17～0.21 mg·kg^{-1}。如图 5b 所示，两次刈割后总 Cd 含量各处理较 T_0 处理分别下降 0.01～0.34 mg·kg^{-1} 和 0.20～0.49 mg·kg^{-1}。第 1 茬 T_2 和 T_3

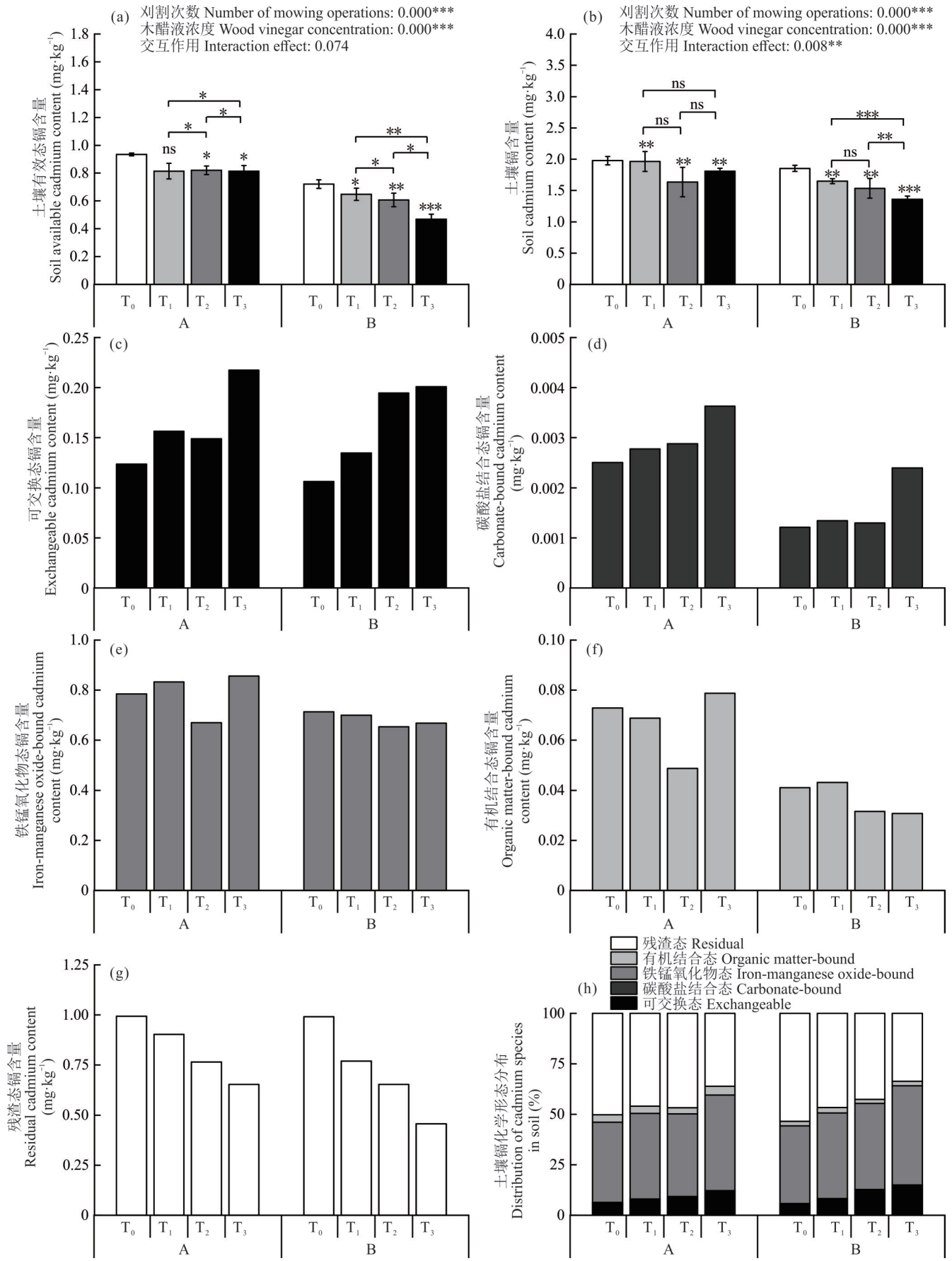


图5 不同木醋液浓度联合黑麦草对土壤Cd含量及赋存形态的影响

Fig. 5 Effects of different wood vinegar concentrations combined with ryegrass on soil Cd content and speciation

处理相较 T_0 处理土壤 Cd 含量下降 0.72% 和 17.32%；第 2 茬各处理土壤 Cd 含量较 T_0 处理下降 11.06%～26.71%，其中 T_3 处理土壤 ω(Cd)最低，为 1.36 mg·kg^{-1}。

由图 5c～g 可知，木醋液的施加总体上提高了活性较高的可交换态和碳酸盐结合态 Cd 含量，同时降低了性质稳定的残渣态 Cd 含量。与 T_0 处理相比，两茬木醋液各个处理 EX 和 CA 分别增加 27.16%～91.85%、42.51%～157.67% 和 10.84%～44.93%、7.12%～97.40%，RE 分别降低 6.95%～28.14%、12.74%～37.16%，T_3 处理下 EX-Cd 含量和 CA-Cd 含量分别为 0.22、0.21 mg·kg^{-1} 和 0.0036、0.0023 mg·kg^{-1}，RE-Cd 含量最低，分别为 0.65 和 0.49 mg·kg^{-1}。OX-Cd 含量仅第 1 茬 T_3 处理呈现提升效果，较 T_0 上升 0.08 mg·kg^{-1}。第 1 茬 OM-Cd 含量随木醋液添加呈先降后升趋势，但在第 2 茬继续施加木醋液后，各处理 OM-Cd 含量趋于一致，并未呈现随浓度而变化的规律。刈割后，两茬各处理土壤 Cd 形态分布趋势一致(图 5h)，随着木醋液浓度的增加土壤中 EX-Cd 占比逐渐增加，RE-Cd 的占比逐渐减少。在 T_0、T_1 和 T_2 处理中，各形态 Cd 占比由高到低依次为 RE-Cd＞OX-Cd＞EX-Cd＞OM-Cd＞CA-Cd，而两茬 T_3 处理中土壤的 OX-Cd 占比(47.32%、49.17%)均超过 RE-Cd 占比(36.11%、33.60%)，成为最主要形态，各形态 Cd 占比由高到低依次为 OX-Cd＞RE-Cd＞EX-Cd＞OM-Cd＞CA-Cd。

2.6　不同木醋液浓度处理黑麦草各指标之间的相关分析

如图 6 所示，两茬黑麦草各项指标之间的相关性存在显著差异，影响土壤有效态 Cd 的关键因子不同。图 6a 和图 6c 中，两茬黑麦草收获后，土壤中有效态和总 Cd 含量均与黑麦草的生物量、Cd 吸收及转运能力等多数指标呈负相关。两茬之间存在的差异性主要体现在物种因子各指标之间的显著性及物种因子与环境因子之间的相关性不一致。黑麦草生物量与其 Cd 含量、积累量及富集系数在两茬中均呈稳定正相关。第 1 茬中，富集系数与 Cd 含量、积累量及转运系数广泛正相关，而此关联在第 2 茬大幅减弱。尤为关键的是，Cd 积累量与转运系数的关系从第 1 茬的负相关逆转为第 2 茬的正相关。土壤总 Cd 含量与关键酶活性的关系也由第 1 茬的负相关转为第 2 茬的正相关。第 2 茬各物种因子与各环境因子之间呈正相关，而第 1 茬土壤 pH 与黑麦草生物量、Cd 积累量、地上部 Cd 含量、地下部 Cd 含量及对 Cd 的富集转运系数呈显著正相关，土壤过氧化氢酶与各物种因子指标呈负相关。图 6b 和 d 中，随机森林模型进一步发现，两茬影响土壤有效态 Cd 的关键土壤因子分别是黑麦草对 Cd 的富集系数和地下部 Cd 含量以及黑麦草地上部 Cd 积累量和生物量。

3　讨论

3.1　木醋液对黑麦草地上部生物量以及富集转运 Cd 的作用

近年来，通过外源添加剂联合植物修复 Cd 污染土壤受到广泛研究。本研究结果表明，木醋液的添加对黑麦草地上部生物量具有显著的增产作用，尤其对第 1 茬草的促进效果极为突出。尽管一年生黑麦草第 2 茬长势减弱，但木醋液仍能维持显著的促生效果，且 T_3 处理在第 1 茬时生物量最高。这与多晶等[31]、耿坤等[32]研究结果一致。与施用单一有机酸(如柠檬酸、草酸)不同，木醋液是一种成分复杂的混合物，除含乙酸、丙酸等小分子有机酸外，还包含酚类、酮类及多种芳香族化合物[19]。木醋液中含有的微量酚类与醛类物质，可显著提高土壤 Cd 的生物有效性，促进植物的生长发育，可以通过促进含磷难溶化合物溶解，与吸附剂(铁铝氧化物等)发生络合反应等方式活化磷、铁、锰和锌等营养元素，来提高植物生长环境中营养物质的活性，产生增加作物产量和改善作物品质的作用[33]。并且可以刺激生长激素的合成和增强各种酶活性，提高植物地上部生物量，从而降低重金属对植物的胁迫作用，增强植物对重金属的富集效果，促进植物的生长和发育[34]。

本研究中木醋液显著增强了黑麦草对 Cd 的提取与转运效率，这可能与木醋液中的有机酸组分对 Cd 的活化及体内运输的促进有关。一方面，木醋液输入的外源有机酸在根际可与 Cd^{2+} 形成可溶性络合物，增加 Cd 的生物有效性并促进其跨膜吸收[35-36]。另一方面，这些外源有机酸或其代谢产物可能进入植物体内。相关研究表明，重金属离子在植物体内可与内源性有机酸或氨基酸(如组氨酸)等配体结合，形成稳定络合物[37]。这类络合物因其电荷或分子构型，能够有效减少与木质部细胞壁负电基团的静电吸附，从而更易通过木质部流向上运输至地上部[38]。木醋液中的某些有机酸组分在结构或功能上可能与 Cd^{2+} 这些内源性配体相似，从而可能模拟或协同了植

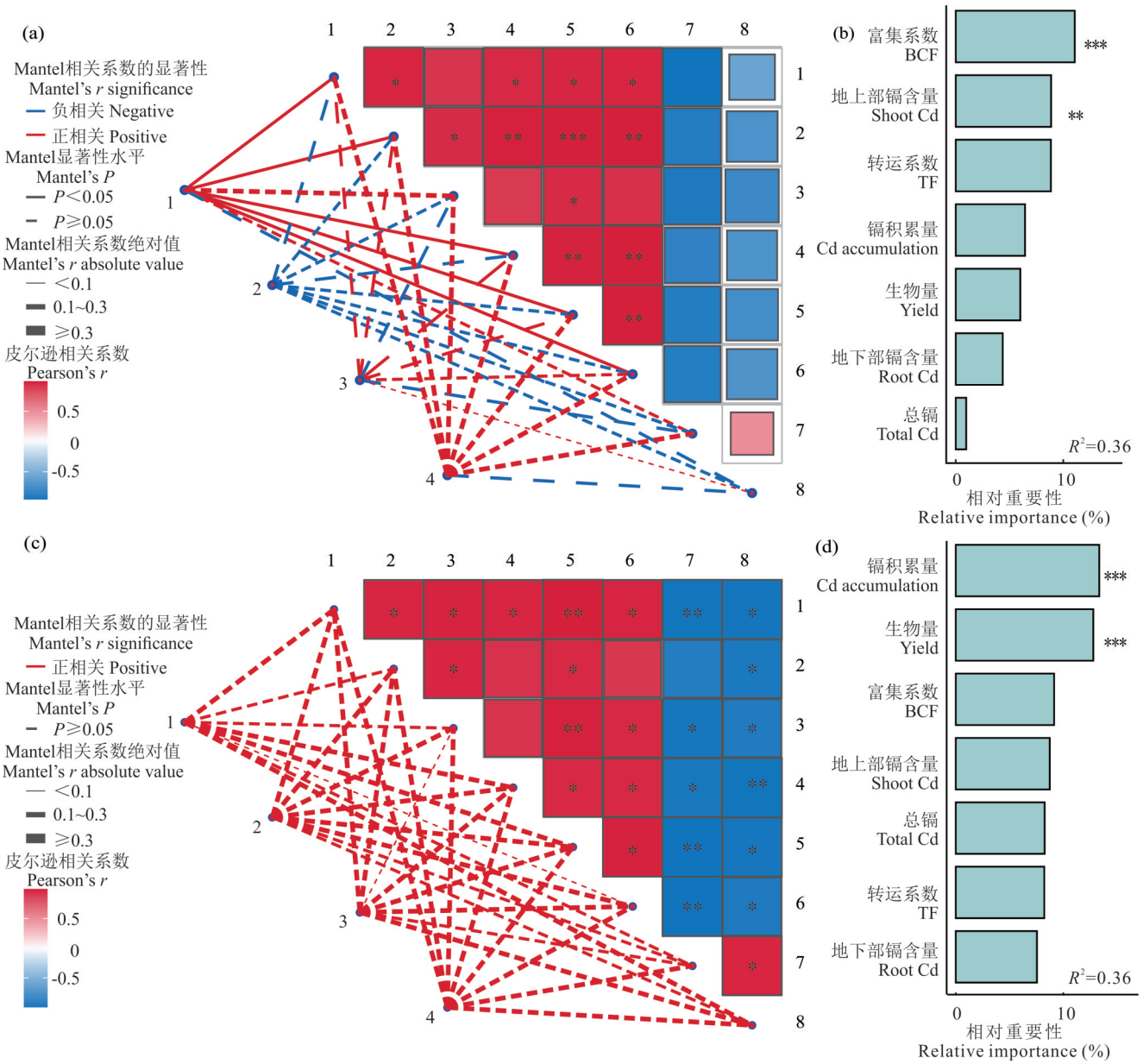


图6 不同木醋液浓度处理下两茬黑麦草各指标之间的Mantel试验分析以及随机森林模型预测影响土壤有效态Cd的关键因子

Fig. 6 Mantel test analysis of various indicators in two harvests of ryegrass under different wood vinegar concentrations, along with key factors affecting soil available Cd identified by the random forest model

(a)和(c)为第1和第2茬黑麦草各指标之间的Mantel试验分析,(b)和(d)为第1和第2茬随机森林模型预测影响黑麦草有效态镉的关键因子。(a)和(c)图中,环境因子1:pH;2:过氧化氢酶;3:脲酶;4:蔗糖酶;物种因子1:生物量;2:富集系数;3:转运系数;4:地下部Cd含量;5:地上部Cd含量;6:Cd积累量;7:有效态Cd;8:总Cd。(a) and (c) present Mantel test analyses of indicators between the first and second ryegrass crops, while (b) and (d) demonstrate key factors predicted by the random forest model for effective Cd in ryegrass. In figure (a) and (c), environmental factors are: 1: pH; 2: Catalase (Soil CAT); 3: Urease (Soil UE); 4: Sucrase (Soil SC); Species factors are: 1: Biomass (Yield); 2: Bioaccumulation factor (BCF); 3: Translocation factor (TF); 4: Root Cd content (Root Cd); 5: Shoot Cd content (Shoot Cd); 6: Cd accumulation amount (Cd accumulation); 7: Effective Cd (DTPA Cd); 8: Total Cd content (Total Cd).

物自身的重金属螯合与转运机制,使黑麦草地上部Cd富集与转运系数显著提升。一年生黑麦草第2茬的生物量及Cd提取能力较第1茬显著下降,这可能与植物刈割后再生过程中养分分配改变、Cd耐受性下降,以及第1茬修复后土壤中易提取Cd含量下降有关[39]。本研究还发现,Cd积累量与转运系数的关系从第1茬的负相关逆转为第2茬的正相关,表明当生长受抑且土壤中可利用Cd含量降低时,黑麦草可能通过优先调控Cd向地上部的转运效率,而非单纯依赖生物量积累来完成Cd的吸收与积累。同时需要说明的是,试验中收获的黑麦草(除第2茬T_0和

T_1处理)地上部Cd含量均大于1.0 mg·kg^{-1},超过了我国《饲料卫生标准》[40]中对于植物性饲料原料Cd的限量要求(≤1.0 mg·kg^{-1}),因此不宜作为饲草使用。针对这部分Cd超标黑麦草,可采用热化学处置(焚烧、热解及气化)、重金属回收(化学/微生物浸出)及生物质转化(厌氧消化)等安全处置技术,实现资源化利用与风险管控。

3.2 木醋液强化黑麦草对土壤酶活性的作用

本研究中,两茬T_2和T_3浓度的木醋液处理促进了土壤蔗糖酶和脲酶活性的增加。这与韩红杰等[41]的研究一致。这可能是因为木醋液提高了土壤中微生物数量,并促进了碳氮循环,为黑麦草生长提供了更多的营养元素。土壤酶活性是评估土壤质量的关键生物指标,它综合反映了植被、土壤理化性质等环境因素的状况[42-43]。脲酶与蔗糖酶是关键的土壤胞外水解酶。脲酶通过催化尿素分解为植物供氮,而蔗糖酶则通过水解蔗糖来提供碳源,二者共同调控土壤的氮、碳营养循环与供应[44-45]。木醋液作为外源添加剂的主要成分为酚类和有机酸类化合物,同时木醋液施入土壤后作为外源刺激,其携带的易溶性有机酸直接提升了根际碳水平,黑麦草根系响应性地释放出更多根系分泌物,使以根系分泌物为主要养分的微生物分泌更多的有机酸[46]。研究表明,有机酸作为土壤微生态系统中的关键调节物质,其重要作用之一体现在能够影响酶与土壤组分的相互作用。土壤胶体及矿物表面对酶的吸附与固定,通常会导致酶活性受到抑制,而有机酸能通过阴离子竞争吸附或质子化等途径,有效干预这一过程,从而对酶活性起到重要的调节作用[38]。木醋液中的有机酸可以与重金属络合形成有机酸-金属络合物,阻止土壤酶的硫醇基团与重金属结合,从而减少土壤酶受到的毒害,同时能够促进微生物生长和繁殖,从而提高土壤中酶的活性[43,47-48]。

研究发现土壤总Cd与关键酶活性(如脲酶、蔗糖酶)的相关性由第1茬的负相关转变为第2茬的正相关。这可能是因为第1茬的收获使土壤中Cd含量下降,木醋液引入的外源有机碳激发了土壤中的微生物活性,从而对土壤酶活性产生促进作用。这表明木醋液不仅能通过化学途径活化土壤中Cd增加其生物可利用性,还可通过调控土壤微生物群落结构与功能,增强其代谢活性与养分转化能力,进而改善植物生长条件强化植物修复过程[49]。后续研究可结合微生物群落测序,进一步明确木醋液对根际细菌、真菌群落组成的影响,从而在微生物层面探究对重金属的作用机制。

3.3 木醋液强化黑麦草对土壤Cd形态及含量的作用

本研究发现,木醋液强化黑麦草修复能显著降低土壤总Cd和有效态Cd含量,修复效果随刈割次数和木醋液浓度的增加而增强,其中T_3处理(1% 浓度)效果最为显著。随着木醋液浓度的增加土壤中EX-Cd占比逐渐增加,RE-Cd的占比逐渐减少,高浓度处理(T_3)中土壤两茬EX-Cd占比由T_0处理的6.26%、5.74% 分别升高至12.01%、14.79%,土壤中RE-Cd占比T_3处理较T_0处理两茬分别降低14.13%、19.88%。其原因可能是木醋液中小分子有机酸通过释放H^+降低根际pH,残渣态Cd的晶格结构易被H^+破坏,金属离子溶出,增加土壤中阳离子的浓度,Cd在黏土矿物或有机质表面上的吸附力为静电吸附,吸附力较弱,与Cd^{2+}竞争土壤上的吸附点位,促进CA-Cd的溶解,并通过离子交换置换出土壤胶体吸附的Cd^{2+},从而显著提升可交换态Cd含量[50]。同时,木醋液中富含的羧基、羟基等活性官能团,可与Cd^{2+}形成稳定的水溶性络合物,这一螯合作用使RE等稳定形态向活性更高的形态转化[51-52]。另外,木醋液中的小分子有机物糖类、醇类等可为土壤微生物提供碳源,促进微生物繁殖与代谢。微生物分泌的胞外酶、有机酸(如草酸、柠檬酸)会进一步加速残渣态Cd载体矿物的分解,同时微生物对矿物的风化作用也会增强Cd的释放效率[53]。

随着施加木醋液浓度的增高,土壤OX-Cd占比超过RE-Cd(T_3处理),两茬黑麦草收获时分别达到47.32%、49.17%。这一结果表明,高浓度木醋液不仅能活化土壤中Cd,更可能通过其含有的还原性物质(如酚类、醛类)降低土壤氧化还原电位,进而促使土壤中铁锰氧化物、硫化物等发生还原溶解。由于残渣态Cd常吸附或包埋在铁锰氧化物晶格中,上述过程可将原本被包裹或共沉淀于氧化物矿物中的Cd释放出来,并部分转化为活性更高的可交换态与碳酸盐结合态[54-55]。因此,木醋液可通过酸化和络合双重作用,推动Cd由惰性形态向活性形态的转化,这一过程有利于重金属Cd向黑麦草根系扩散,增强黑麦草对有效态Cd的提取效率,是提升植物修复效率的关键化学机制。通过将黑麦草收割移除,可显著降低土壤全Cd及有效态Cd含量[56]。本研究为木醋液作为调

控Cd形态分布以强化植物修复效率的外源添加剂提供了坚实的理论依据，同时为科学施加木醋液以实现土壤重金属Cd高效活化的技术路径提供了重要参考。

4 结论

1)本研究结果表明，施加木醋液可显著提高黑麦草地上部生物量、富集系数及Cd积累量，其中T_3处理效果最为显著。由于供试冬牧70为一年生黑麦草，其第2茬再生能力较弱，导致该茬生物量、Cd积累量以及富集转运能力均较第1茬显著下降，但木醋液的施加仍能不同程度提高上述指标，体现出强化修复作用。

2)木醋液中含有的酚类化合物、有机酸及活性官能团等成分，可通过降低土壤pH值、提高土壤酶活性，调控土壤中Cd的化学形态与生物有效性，促进土壤中可还原态Cd(RE-Cd)和氧化态Cd(OX-Cd)向活性更高的可交换态Cd(EX-Cd)和碳酸盐结合态Cd(CA-Cd)转化，提升黑麦草修复效率，降低土壤Cd含量。经两次刈割后，木醋液处理组土壤Cd含量分别较初始值下降0.01～0.34 mg·kg^{-1}(第1茬)和0.20～0.49 mg·kg^{-1}(第2茬)，其中以T_3处理的土壤Cd去除效果最佳。

3)本研究中黑麦草地上部Cd含量已超出《饲料卫生标准》(GB 13078－2017)中规定的Cd限制要求，不可直接用作饲料，以免导致重金属通过食物链迁移累积，引发二次污染风险。针对该修复后黑麦草，可采用热化学处置、生物质转化等安全处置技术处理后实现资源化利用，兼顾环境安全与资源回收。

参考文献 References:

[1] Yu Q Y, Li W Y, Zhang N, *et al*. Present pollution status and safe utilization technologies of heavy metal-polluted farmland soil: a review. Soils, 2024, 56(2): 229－241.
余琼阳, 李婉怡, 张宁, 等. 农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展. 土壤, 2024, 56(2): 229－241.

[2] Setia R, Dhaliwal S S, Singh R, *et al*. Ecological and human health risk assessment of metals in soils and wheat along Sutlej river (India). Chemosphere, 2023, 312(Part 1): 137331.

[3] Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, *et al*. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop Province, Turkey. Chemosphere, 2020, 241(3/4): 125015.

[4] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination. China Environmental Protection Industry, 2014, 20(5): 10－11.
环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 中国环保产业, 2014, 20(5): 10－11.

[5] Chen S B, Wang M, Li S S, *et al*. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 35－41.
陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考. 地学前缘, 2019, 26(6): 35－41.

[6] Zheng S N, Wang Q, Yuan Y Z, *et al*. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. Food Chemistry, 2020, 316: 126213.

[7] Gong B, Wang X P, Ying R R, *et al*. Impact of soil moisture on the bioavailability and ecotoxicity of heavy metals. Asian Journal of Ecotoxicology, 2025, 20(1): 48－61.
龚冰, 王徐鹏, 应蓉蓉, 等. 土壤湿度对重金属污染物的生物有效性和生态毒性影响. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 48－61.

[8] Song P P, Xu D, Yue J Y, *et al*. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: A critical review. Science of the Total Environment, 2022, 838(11): 156417.

[9] Ghuge S A, Nikalje G C, Kadam U S, *et al*. Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants, detoxify cation, and remediation. Journal of Hazardous Materials, 2023, 450(9): 131039.

[10] Zhang L H, Bai J J, Tian R Y, *et al*. Cadmium remediation strategies in alkaline arable soils in Northern China: current status and challenges. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 348－360.
张力浩, 白姣杰, 田瑞云, 等. 中国北方碱性农田土壤镉污染修复:现状与挑战. 土壤学报, 2024, 61(2): 348－360.

[11] Zhao X F, Lei M, Chen T B. Species, habitat characteristics, and screening suggestions of cadmium hyperaccumulators in China. Environmental Science, 2023, 44(5): 2786－2798.
赵晓峰, 雷梅, 陈同斌. 中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议. 环境科学, 2023, 44(5): 2786－2798.

[12] Liu Y W, Zhou J J, Sun D L, *et al*. Polyaspartic acid assisted-phytoremediation of cadmium-contaminated farmland: phytoextraction efficiency, soil quality, and rhizosphere microbial community. Science of the Total Environment, 2023, 862: 160736.

[13] Yang J S, Luo X S, Zhang X Y, *et al*. Investigation of Cd enrichment capacity and remediation potential of wild plants including *Ammannia baccifera* L. in Cd-contaminated farmland soil. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(8): 1739－1747.
杨金山, 罗小三, 张欣悦, 等. 污染农田水苋菜等野生植物镉富集能力和修复潜力调查. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1739－1747.

[14] Zhou Z Q. Phytoextraction of cadmium in napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumach) under field conditions. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
周志强. 象草对镉污染土壤的田间植物提取修复效果研究. 福州: 福建农林大学, 2020.

[15] Li X M, Li J B, Song G L, *et al*. Cadmium tolerance and absorption characteristic of herbaceous plants. Pratacultural Science, 2018, 35(4): 760－770.
李希铭, 李金波, 宋桂龙, 等. 35份草本植物镉吸收与富集特征比较. 草业科学, 2018, 35(4): 760－770.

[16] Chen X Y. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils with mobilizing amendments. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
陈小亚. 活化剂结合植物修复重金属污染土壤的研究. 郑州: 河南工业大学, 2021.

[17] Li J J. Screening of cadmium hyper-enriched plants and their combination with chelating agents for remediation of cadmium-contaminated soil. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.
李加驹. 镉超富集植物的筛选及其与螯合剂联合修复镉污染土壤的研究. 绵阳: 西南科技大学, 2024.

[18] Wu D M, Yu X L, Lai M L, *et al*. Diversified effects of coplanting landscape plants on heavy metals pollution remediation in urban soil amended with sewage sludge. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123855.

[19] Zhou H Y, Shen Y, Zhang N M, *et al*. Wood fiber biomass pyrolysis solution as a potential tool for plant disease management: A review. Heliyon, 2024, 10(3): e25509.

[20] Shen S W, Zhang D D, Wang M G, *et al*. Effects of combined application of wood vinegar-acidified biochar and nitrogen on active nitrogen and ammonia volatilization in saline soil. Environmental Science, 2022, 43(5): 2779－2787.
申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 等. 木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响. 环境科学, 2022, 43(5): 2779－2787.

[21] Wu M M. Study on the remediation effect of wood vinegar/ryegrass combination on soil heavy metal cadmium. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
吴苗苗. 木醋液/黑麦草联合对土壤重金属Cd的修复效果研究. 郑州: 河南农业大学, 2023.

[22] Kumar S, Rahman M, Bouket A C, *et al*. Unravelling the multifarious role of wood vinegar made from waste biomass in plant growth promotion, biotic stress tolerance, and sustainable agriculture. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2025, 185(1): 106851.

[23] Yang W H, Wang S S, Ni W Z, *et al*. Enhanced Cd-Zn-Pb-contaminated soil phytoextraction by *Sedum alfredii* and the rhizosphere bacterial community structure and function by applying organic amendments. Plant and Soil, 2019, 444(1/2): 101－118.

[24] Fang Z G, Xie J T, Yang Q, *et al*. Role and mechanism of low molecular-weight-organic acids in enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Environmental Science, 2022, 43(10): 4669－4678.
方治国, 谢俊婷, 杨青, 等. 低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制. 环境科学, 2022, 43(10): 4669－4678.

[25] Benzon H R L, Venecio Jr U, Lee S C. Pyroligneous acid influenced the bioavailability of heavy metals in contaminated paddy soil. Journal of Ecological Engineering, 2025, 26(9): 354－369.

[26] Li F Z, Zhang Y P, Hao S F, *et al*. Leaching behaviour and enhanced phytoextraction of additives for cadmium-contaminated soil by *Pennisetum* sp. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 104(5): 658－667.

[27] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14－168.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14－168.

[28] Zhu L N. Screening of winter wheat cultivars with low cadmium accumulation and differences in cadmium accumulation mechanism. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
朱利楠. 冬小麦镉低积累品种筛选及镉积累机制差异. 郑州: 河南农业大学, 2021.

[29] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.

[30] Guan S Y. Soil enzymes and their research methods. Beijing: Agricultural Press, 1986: 294-302.
关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 294-302.

[31] Duo J, Ye J R, Yang D X, *et al*. Effect of wood vinegar on cadmium enrichment and transport of Gramineous crops in Cd-contaminated farmland. Environmental Science, 2025, 46(4): 2571-2579.
多晶, 叶佳润, 杨东霞, 等. 木醋液对镉污染农田禾本科作物富集转运Cd效应影响. 环境科学, 2025, 46(4): 2571-2579.

[32] Geng K, Mei D Q Z, Jiang M Y, *et al*. Effects of foliar spraying of wood vinegar on yield and quality of vegetables. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 160-168.
耿坤, 梅朵曲珍, 蒋梦圆, 等. 叶面喷施木醋液对蔬菜产量及品质的影响. 中国土壤与肥料, 2023(9): 160-168.

[33] Zhang L D, Huo P J, Liang J M, *et al*. Research progress on preparation process and synergistic technology of biomass-based wood vinegar. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(5): 27-36.
张立丹, 霍鹏举, 梁嘉敏, 等. 生物质基木醋液的制备工艺和增效技术研究进展. 林业工程学报, 2023, 8(5): 27-36.

[34] Luo X X, Wang Z Y, Meki K, *et al*. Effect of co-application of wood vinegar and biochar on seed germination and seedling growth. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(12): 3934-3944.

[35] Liu Q Q, Wu Q G, Zhou J, *et al*. Effects of foliar spraying of ZnO and MnO_2 nanoparticles on uptake and translocation of Cd, Zn and Mn in wheat. Soil, 2025, 57(2): 376-386.
刘奇奇, 吴求刚, 周静, 等. 叶面喷施纳米氧化锌和二氧化锰对小麦镉锌锰吸收和转运的影响. 土壤, 2025, 57(2): 376-386.

[36] Wang P, Chen H P, Kopitke P M, *et al*. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. Environmental Pollution, 2019, 249(12): 1038-1048.

[37] Strasdeit H, Duhme A K, Kneer R, *et al*. Evidence for discrete Cd (SCys)$_4$ units in cadmium phytochelatin complexes from EXAFS spectroscopy. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1991(16): 1129-1130.

[38] Luo X M, Qian J C, Wang K, *et al*. Research progress on role of low molecular weight organic acids in phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(5): 171-180.
罗晓萌, 钱建财, 王锴, 等. 低分子量有机酸在植物修复土壤重金属污染中的作用研究进展. 山东农业科学, 2025, 57(5): 171-180.

[39] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, *et al*. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759.

[40] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Hygienical standard for feeds: GB 13078-2017. Animal Agriculture, 2018(1): 16-24.
中华人民共和国农业农村部. 饲料卫生标准: GB 13078-2017. 畜牧产业, 2018(1): 16-24.

[41] Han H J, Yu B B. Effects of biochar and wood vinegar on soil characteristics of moderate saline soil. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2026(1): 22-29.
韩红杰, 于贝贝. 生物炭与木醋液对中度盐土土壤特性的影响. 中国土壤与肥料, 2026(1): 22-29.

[42] Han Y, Qiao D M, Qi X B, *et al*. Effects of oxalic acid on oil sunflower biomass, enzyme activity, and the Cd speciation of Cd-polluted soils. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9): 1964-1973.
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. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1964-1973.

[43] Lu H F, Qiao D M, Qi X B, *et al*. Effects of exogenous organic acids on soil pH, enzyme activity, and cadmium migration and transformation. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3): 542-553.
陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤pH值、酶活性和Cd迁移转化的影响. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 542-553.

[44] Du J J, Hou F, Zhou Q X. Response of soil enzyme activity and soil bacterial community to PCB dissipation across different soils. Chemosphere, 2021, 283(12): 131229.

[45] Yan Q, Xie J T, Liu H J, *et al*. The addition of exogenous low-molecular-weight organic acids improved phytoremediation by *Bidens pilosa* L. in Cd-contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(51): 76766-76781.

[46] Ma H, Li X D, Hou S Y, *et al*. The activation and extraction systems using organic acids and *Lentinus edodes* to remediate cadmium contaminated soil. Environmental Pollution, 2019, 255(2): 113252.

[47] Chen Q, Zhang X Y, Huang L X, *et al*. Effects of organic acids on enzyme activities and heavy metal desorption in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Impatiens uliginosa* Franch. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 483－493.
陈倩, 张先言, 黄琳曦, 等. 有机酸对滇水金凤根际和非根际土壤酶活性及重金属解吸的影响. 土壤通报, 2024, 55(2): 483－493.

[48] Song Y J. Study on enhancement of *Hydrangea macrophylla* by exogenous organic acid for remediation of cadmium-contaminated soil. Yangling: Northwest A&F University, 2025.
宋云静. 外源有机酸强化八仙花修复镉污染土壤研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.

[49] Epelde L, Burges A, Mijangos I, *et al*. Microbial properties and attributes of ecological relevance for soil quality monitoring during a chemical stabilization field study. Applied Soil Ecology, 2014, 75(3): 1－12.

[50] Du J N, Yan C L, Li Z D. Phosphorus and cadmium interactions in *Kandelia obovate* (S. L.) in relation to cadmium tolerance. Enviromental Science and Pollution Research, 2014, 21(1): 355－365.

[51] Dresler S, Hanaka A, Bednarek W, *et al*. Accumulation of low-molecular-weight organic acids in roots and leaf segments of *Zea mays* plants treated with cadmium and copper. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(6): 1565－1575.

[52] Zhang L. Study on occurrence and morphological characteristics of Cd in reclaimed soil by low molecular weight organic acid. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
张磊. 低分子有机酸对复垦土壤中镉的赋存形态特征研究. 淮南: 安徽理工大学, 2022.

[53] Zhou X Q, Shi A, Rensing C, *et al*. Wood vinegar facilitated growth and Cd/Zn phytoextraction of *Sedum alfredii* Hance by improving rhizosphere chemical properties and regulating bacterial community. Environmental Pollution, 2022, 305: 119266.

[54] Ma H, Li X D, Wei M Y, *et al*. Elucidation of the mechanisms into effects of organic acids on soil fertility, cadmium speciation and ecotoxicity in contaminated soil. Chemosphere, 2020, 239: 124706.

[55] Zhou L T, Chu W, Huang X Y, *et al*. Research progress on mechanism of phytoremediation for heavy metal contaminated soil. Environmental Science, (2025-06-17)[2026-03-09]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202502160.
周柳婷, 储薇, 黄小云, 等. 植物修复重金属污染土壤机制研究进展. 环境科学, (2025-06-17)[2026-03-09]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202502160.

[56] Zhou X Y, Qi L B, Duo J, *et al*. Enhanced remediation of Cd-contaminated calcareous soil with herbage by wood vinegar. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(2): 301－310.
周新元, 齐丽彬, 多晶, 等. 木醋液强化牧草修复石灰性Cd污染土壤效果研究. 农业资源与环境学报, 2025, 42(2): 301－310.