文章编号:1000-7601(2025)05-0069-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.07

木醋液及其配施螯合钙对盐碱土土壤性质和棉花幼苗生长的影响

陈茂新[1,2],丁 雪[2,3],刘 娇[2],张云舒[2],
韩贝贝[1],唐光木[2],徐万里[2]

(1. 新疆农业大学资源与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830092;2. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830091;
3. 新疆大学生态与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830017)

摘 要:为了探究木醋液及其配施螯合钙对新疆盐碱土土壤性质和棉花幼苗生长的影响,采用室内盆栽试验,共设 7 个处理,即施加蒸馏水(CK)、施加木醋液 150(M1)、300 (M2)、600 kg · hm^{-2}(M3),施加木醋液+螯合钙 150 (T1)、300(T2)、600 kg · hm^{-2}(T3)。结果表明:(1)与对照相比,施加木醋液、木醋液配施螯合钙处理均可以显著降低土壤水溶性总盐的含量,降低了 8.75%~54.10%;土壤速效磷(Available-P)含量显著增加了 32.25%~86.95%,土壤速效钾(Available-K)含量显著增加了 8.80%~14.96%,土壤多酚氧化酶(S-PPO)和土壤碱性磷酸酶(S-AKP)的含量分别显著增加 5.16%~16.65%和 3.08%~45.90%,棉花幼苗的株高、茎粗以及鲜质量分别增加了 5.66%~53.81%、9.80%~45.61%以及 3.21%~124.78%。(2)与单施木醋液相比,木醋液配施螯合钙处理能够有效促进土壤水溶性总盐的降低,最低为 3.54 g · kg^{-1},较 CK 降低了 54.10%;土壤速效磷和土壤速效钾含量均在 T2 处理下最高,分别为 65.30 g · kg^{-1}和 174.00 g · kg^{-1},与 CK 相比分别增加了 88.10%、19.70%;S-AKP 活性在 T3 处理时最强,较 CK 增加了 45.90%;棉花幼苗的株高、茎粗以及鲜质量均在 T2 处理最高,分别为 8.60 cm、11.80 mm 以及 3.27 g。(3)通过熵权法分析得出,木醋液配施螯合钙比单施木醋液改良盐碱土效果好,T2 处理优于其他处理,综合排名第一。其最佳施用量是 300 kg · hm^{-2}。

关键字:木醋液;螯合钙;棉花幼苗;盐碱土;土壤性质
中图分类号:S156.4; S562 **文献标志码**:A

Effects of wood vinegar and chelated Ca combined application on soil properties and growth of cotton seedlings in saline-alkali soil

CHEN Maoxin[1,2], DING Xue[2,3], LIU Jiao[2], ZHANG Yunshu[2],
HAN Beibei[1], TANG Guangmu[2], XU Wanli[2]

(1. *College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830092, *China*;
2. *Institute of Agricultural Resources and Environment, Xinjiang Uygur Autonomous Region Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Saline-alkali Land in Arid and Semi-Arid Regions), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi, Xinjiang* 830091, *China*;
3. *College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang* 830017, *China*)

Abstract: In order to investigate the impacts of wood vinegar liquid and its combined application with chelated calcium on the properties of saline-alkali soil in Xinjiang and the growth of cotton seedlings, an indoor pot experiment was carried out. A total of seven treatments were set up, namely the application of distilled water (CK), the application of wood vinegar liquid at 150 (M1), 300 (M2), and 600 kg · hm^{-2}(M3), and the application of a combination of wood vinegar liquid and chelated calcium at 150 (T1), 300 (T2), and 600 kg · hm^{-2}(T3). The

收稿日期:2024-03-18 **修回日期**:2025-04-02
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900802)
作者简介:陈茂新(1999-),男,甘肃平凉人,硕士研究生,研究方向为盐碱地改良与利用研究。E-mail:mx1821536@163.com
通信作者:张云舒(1975-),女,甘肃通渭人,研究员,主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:zhangxl1994@sina.com

results showed that, (1) Compared with the control group, both the application of wood vinegar liquid and the combined application of wood vinegar liquid and chelated calcium could significantly reduce the content of water-soluble total salt in the soil, with a reduction range of 8.75%~54.10%. The content of soil available phosphorus (Available-P) increased significantly by 32.25%~86.95%, and the content of soil available potassium (Available-K) increased significantly by 8.80%~14.96%. The contents of soil polyphenol oxidase (S-PPO) and soil alkaline phosphatase (S-AKP) increased significantly by 5.16%~16.65% and 3.08%~45.90%, respectively. The plant height, stem diameter, and fresh weight of cotton seedlings increased by 5.66%~53.81%, 9.80%~45.61%, and 3.21%~124.78%, respectively. (2) In comparison with the sole application of wood vinegar liquid, the combined application of wood vinegar liquid and chelated calcium could effectively promote the reduction of water-soluble total salt in the soil. The lowest content was 3.54 g·kg^{-1}, which was 54.10% lower than that of CK. The contents of soil available phosphorus and soil available potassium were the highest under the T2 treatment, reaching 65.30 g·kg^{-1} and 174.00 g·kg^{-1}, respectively, showing an increase of 88.10% and 19.70% compared with CK. The activity of S-AKP was the highest under the T3 treatment, increasing by 45.90% compared with CK. The plant height, stem diameter, and fresh weight of cotton seedlings were the highest under the T2 treatment, measuring 8.60 cm, 11.80 mm, and 3.27 g, respectively. (3) Through the entropy weight method analysis, it was found that the combined application of wood vinegar liquid and chelated calcium had a better effect on improving saline-alkali soil than the sole application of wood vinegar liquid. The T2 treatment was superior to other treatments, ranking first in the comprehensive evaluation. The optimal application rate was 300 kg·hm^{-2}.

Keywords: wood vinegar liquid; chelated Ca; cotton seedlings; saline-alkali soil; soil properties

盐碱地作为一种可开发利用的特殊耕地资源,其改良的成效直接关系到农业生产的可持续发展与粮食安全[1-2]。新疆地区作为我国重要的农业生产区域,不仅盐碱地广泛存在,还有30%的耕地正在发生次生盐渍化问题[3],这严重制约着新疆地区耕地资源的有效利用和棉花生长。因此,改善盐碱土的土壤结构、降低土壤水溶性总盐、防控土壤次生盐渍化的发生、开发耕地资源是目前该地区迫切需要解决的问题。

木醋液是生物质热解过程中产生的烟气经过冷却分离后产生的有机副产物[4],属于强酸,其主要成分包含80%~90%的水分和10%~20%的有机酸类化合物(醇类、酚类、酯类以及微量元素)[5],用于农业生产中可以促进植物生长,改善作物品质和土壤环境[6]。化学改良作为一种有效的盐碱地改良方法,具有针对性强、见效较快、操作简单等优势;化学改良方法主要利用酸碱中和、离子置换和离子均衡的原理,置换出土壤胶体上的Na^+[1],以达到缓解盐胁迫对植物生长抑制的作用。已有研究表明,木醋液和含钙类的外源物质可以降低土壤水溶性总盐的含量,调节土壤pH值,增加土壤养分含量和土壤酶活性,促进植物生长以及增加作物产量[7-11]。He等[12]通过盆栽试验研究表明,木醋液可以改善土壤的理化性质,从而提高小白菜地上部分的生物量,改善小白菜产量和品质;周红娟等[13]通过土壤培养试验发现,木醋液施于土壤中可以显著降低土壤的电导率(*EC*)和pH值,有利于提高土壤中铵态氮、水溶性有机碳氮和硝态氮含量;努尔比耶柯孜·麦麦提[14]研究表明,喷施木醋液可以促进棉花的株高、根系生长。研究证明,盐碱土中施用外源钙和含钙类的物质可以达到降低水溶性总盐含量和pH值的目的[15],此外,外源钙有助于其他改良效果的发挥[16]。

总之,目前针对木醋液和外源钙或含钙类物质单独施用于土壤的研究较常见,而对多元化、复合型的外源物质改良盐碱地的研究较少,尤其是木醋液与含钙类的物质复配改良盐碱地的报道更少。因此本研究通过盆栽试验,研究木醋液、木醋液+螯合钙不同施用量对新疆盐碱土理化性质及棉花幼苗生长的影响,筛选出适宜的施用量,旨在为新疆盐碱土的开发利用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验所用盐渍土采自新疆生产建设兵团农八师121团6连(85°35′8.52″E,44°48′46.44″N)。取0~20 cm土层土壤,去除杂质过筛后在室内自然风干备用。土壤类型为灰漠土,基本理化性质为:pH值7.26,水溶性总盐7.72 g·kg^{-1},有机质7.87 g·kg^{-1},碱解氮58.10 mg·kg^{-1},速效磷12.80 mg·

kg^{-1},速效钾 331.00 mg · kg^{-1}。根据国际土壤质地分级标准,该土壤质地为黏壤土,其中黏粒占 16.20%,粉粒占 33.40%,砂粒占 50.40%。盐分类型依据 $Cl^-/(2SO_4^{2-})$ 比值,划分为氯化物-硫酸型[17],该土壤为中度盐渍土[18]。

1.2　供试材料

(1)供试棉花品种为'新陆早 52 号';(2)木醋液购自石家庄宏森活性炭有限公司,以桃壳为原料,炭化温度为 550 ℃。木醋液 pH 值 3.46,有机质含量 29.20 g · L^{-1},总氮含量 1.00 g · L^{-1},总磷含量 3.50 g · L^{-1},总钾含量 2.0 g · L^{-1}。木醋液+螯合钙为笔者所在团队共同研发的产品,pH 值 4.75,有机质含量 104.00 g · L^{-1},总氮含量18.00 g · L^{-1},总磷含量 6.60 g · L^{-1},总钾含量 2.0 g · L^{-1},钙含量 ≥20.7 g · L^{-1}。

1.3　试验设计

试验采用盆栽试验,于 2023 年 8—11 月在新疆农业科学院农业机械化研究所温室大棚内进行,盆直径 30 cm、高 60 cm,单盆质量 500 g。试验共设 7 个处理,每个处理重复 5 次,以施蒸馏水为对照(CK)。木醋液处理浓度分别为:150(M1)、300(M2)、600 kg · hm^{-2}(M3);木醋液+螯合钙处理浓度分别为:150(T1)、300(T2)、600 kg · hm^{-2}(T3)。每盆装去除杂质(秸秆、地膜、石头)的自然风干土 7 kg(土壤容重 1.45g · cm^{-3}),底部垫 2 层滤纸防止漏土,为了增加土壤的透气性,待第二次浇水后从盆底将滤纸捅破。每个处理施加等量的氮磷钾肥,播种后将木醋液、木醋液+螯合钙两种外源物质按施用量与氮磷钾肥和 1 400 ml 蒸馏水(土壤饱和含水量)混匀后一次性全部施入盆钵中。8 月 26 日播种,每盆播种 15 粒,9 月 26 日间苗,每盆定植 5 株,进行常规管理(待盆土表面干燥后,按称重法浇蒸馏水至 8.90 kg)。11 月 8 日测量棉花幼苗生长指标,11 月 9 日试验结束的当天,采集盆内表层(0~20 cm)、中部(20~40 cm)、底部(40~60 cm)土壤混合均匀后,将土样分为两部分,一部分经风干磨细后测定土壤总盐、pH 值和养分;另一部分储存于液氮中,用于土壤酶活性的测定。

1.4　测定指标与方法

测定水溶性盐、pH 值和养分的土壤样品自然风干后,去除杂物、研磨、过筛,再进行相关指标的测定。土壤理化性质测定参照鲍士旦《土壤农化分析》中的相关分析方法[19],土壤水溶性总盐采用残渣烘干质量法、pH 值测定采用电导法(土 ∶ 水 = 1 ∶ 5)。

土壤养分测定:有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法、碱解氮含量(Available-N)采用碱解扩散法、速效磷含量(Available-P)采用 0.5 mol · L^{-1} $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法、速效钾含量(Available-K)采用 1 mol · L^{-1} NH_4OAc 浸提-火焰光度法。

土壤酶活性测定(鲜土):土壤多酚氧化酶活性(S-PPO)采用土壤多酚氧化酶试剂盒测定,试剂盒型号为 BC0115,结果以每天每克土样中产生紫色没食子素的微摩尔数表示;土壤碱性磷酸酶活性(S-AKP)测定采用土壤碱性磷酸酶试剂盒测定,其型号为 SH0358,结果以 37 ℃中每克土壤每天释放 1 μmol 酚为 1 个酶活单位表示。

棉花幼苗生长指标测定:株高以植株茎生长点最高部位距土面的高度为准;茎粗以植株与土面交界处地上茎的直径代表,用游标卡尺测量;鲜质量用分析天平称量(JY2001-200g/0.01g)。

1.5　数据统计与分析方法

数据采用 Microsoft Excel 2021 进行处理,采用 SPSS 26.0(IBM Inc.)软件进行统计分析;不同处理间的差异显著性水平用 LSD 法($P<0.05$)进行多重比较,采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　木醋液、木醋液+螯合钙处理对土壤理化性质的影响

2.1.1　对土壤水溶性总盐和 pH 值的影响　施加木醋液、木醋液+螯合钙均对土壤水溶性总盐和 pH 值产生影响。如图 1 所示,施用木醋液、木醋液+螯合钙后,土壤中水溶性总盐的含量均显著低于 CK,其中 T3 处理最低,为 3.54 g · kg^{-1},与 CK 相比降低了 54.10%;从施用量来看,盐碱土土壤水溶性总盐的含量均随着木醋液、木醋液+螯合钙的施用量呈下降趋势,处理间土壤水溶性总盐差异达到显著水平;在相同施用量情况下,除 T3 和 M3 处理外,木醋液配施螯合钙处理(T1、T2)水溶性总盐均显著低于单施木醋液处理(M1、M2);由此可知,施用木醋液+螯合钙降低土壤水溶性总盐的效果比单施木醋液效果好。

从图 1 可以看出,木醋液配施螯合钙处理(T1、T2、T3)的土壤 pH 值低于单施木醋液处理(M1、M2、M3),均未达到显著水平,可见施用木醋液配施螯合钙降低土壤 pH 值比单施木醋液效果好,但两者降低效果均不显著;与 CK 相比,施用木醋液、木醋液配施螯合钙后,土壤 pH 值随施用量的增加而

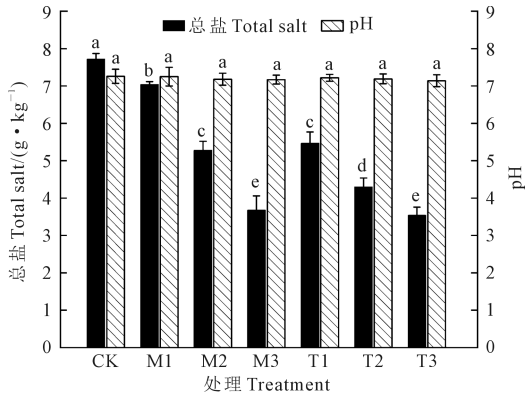
降低。

2.1.2 对土壤养分含量的影响 表1显示了不同处理下土壤养分含量的变化。由表1可知,与CK相比,施用木醋液、木醋液+螯合钙后可显著增加盐碱土Available-P的含量;其中以施用300 kg·hm^{-2}的木醋液、木醋液+螯合钙处理(M2、T2)后土壤中的Available-P含量增加较明显,分别是52.50 mg·kg^{-1}和65.30 mg·kg^{-1},与CK相比分别增加了51.10%和88.10%;相同施用量下,木醋液+螯合钙处理盐碱土中Available-P的含量显著高于单施木醋液处理。由表1可知,与CK相比,施用木醋液、木醋液+螯合钙可显著增加盐碱土土壤Available-K的含量,其中以施用300 kg·hm^{-2}(M2、T2)的木醋液、木醋液+螯合钙后土壤中Available-K含量增加最明显,分别是166.00 mg·kg^{-1}和174.00 mg·kg^{-1},与CK相比分别增加了8.80%和19.70%;施用300 kg·hm^{-2}的木醋液+螯合钙处理土壤Available-K含量显著高于单施木醋液处理。

从表1可以看出,与CK相比,施用木醋液、木醋液+螯合钙后盐碱土土壤中有机质、Available-N的含量变化不明显。

2.1.3 对土壤酶活性的影响 土壤酶活性是评价盐碱土改良效果的重要指标之一,图2反映了木醋液和木醋液+螯合钙对土壤酶活性的影响。从图2可以看出,盐碱土施用木醋液+螯合钙后,S-PPO的活性均显著高于CK;木醋液、木醋液+螯合钙处理均在M2和T2处理下S-PPO的活性较高,分别为68.70 mg·d^{-1}·g^{-1}和63.87 mg·d^{-1}·g^{-1},与CK相比分别增加了16.65%和8.42%;与其他施用量(150、300 kg·hm^{-2})相比,施用600 kg·hm^{-2}的木醋液、木醋液+螯合钙后均会抑制S-PPO活性;相同施用量的木醋液、木醋液+螯合钙对S-PPO活性的影响不同,施用量为150、300 kg·hm^{-2}时,单施木醋液处理S-PPO的活性高于木醋液+螯合钙处理,600 kg·hm^{-2}时,木醋液+螯合钙的活性显著高于单施木醋液的处理。

由图2可知,较CK相比,施用木醋液+螯合钙后S-AKP的活性显著增加;S-AKP的活性与木醋液、木醋液+螯合钙的施用量成正比,均在M3、T3处理时最高,分别为1.924 umol·d^{-1}·g^{-1}和2.38 umol·d^{-1}·g^{-1},比CK分别增加17.80%和45.90%。相同施用量下,木醋液+螯合钙配施S-AKP的活性显著高于单施木醋液处理组。



注:不同小写字母表示处理间差异显著((P<0.05),下同。

Note: The different lowercase letters indicate significant difference between treatments (P<0.05). The same below.

图1 木醋液和木醋液+螯合钙对盐碱土中水溶性总盐含量和pH值的影响

Fig.1 Effects of wood vinegar and wood vinegar + chelated calcium on total water soluble salt content and pH in saline-alkali soil

表1 木醋液和木醋液+螯合钙对盐碱土土壤养分的影响

Table 1 Effects of wood vinegar solution and wood vinegar + chelated calcium on soil nutrients in saline-alkali soil

处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	碱解氮 Available-N /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available-P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available-K /(mg·kg^{-1})
CK	7.76±0.72a	96.30±4.70ab	34.70±2.70d	145.00±4.31d
M1	7.83±0.57a	98.20±3.30ab	45.90±3.40c	158.00±2.12c
M2	7.93±0.23a	92.40±3.70b	52.50±0.40b	166.00±1.13b
M3	8.10±0.38a	93.30±6.30b	51.70±0.10b	162.00±1.21bc
T1	7.99±0.67a	95.00±0.80ab	55.70±4.60b	159.00±0.89c
T2	8.11±0.19a	101.70±5.70a	65.30±3.00a	174.00±4.10a
T3	8.30±0.31a	93.80±2.40ab	64.90±2.30a	167.00±4.21b

注:不同小写字母表示处理间的差异显著(P<0.05),下同。

Note: The different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P<0.05). The same below.

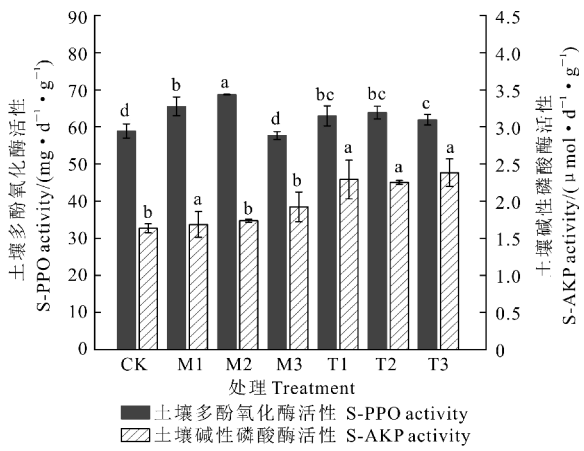


图2 木醋液和木醋液+螯合钙对盐碱土土壤酶活性的影响

Fig.2 Effects of wood vinegar and wood vinegar + chelated calcium on soil enzyme activity in saline-alkali soil

综上所述,在盐碱土中施用木醋液、木醋液+螯合钙后可以显著增加 S-PPO 的活性,单施 150 kg·hm^{-2}和 300 kg·hm^{-2}的木醋液 S-PPO 的活性高于木醋液+螯合钙处理,施用 600 kg·hm^{-2}的木醋液、木醋液+螯合钙处理会抑制 S-PPO 的活性;盐碱土施用木醋液、木醋液+螯合钙后可以显著增加 S-AKP 的活性,并且随着施用量的增加而增加。

2.2　木醋液和木醋液+螯合钙对棉花幼苗生长的影响

图 3 显示了木醋液和木醋液+螯合钙对棉花生长指标的影响。如图 3A 所示,较 CK 相比,各处理可以增加棉花幼苗的株高和茎粗;M2、T1、T2、T3 处理可以显著增加棉花幼苗的株高,T2、T3 处理则可以显著增加棉花幼苗的茎粗。从木醋液、木醋液+螯合钙的施用量来看,施用 300 kg·hm^{-2}的木醋液、木醋液+螯合钙后,棉花幼苗的株高、茎粗均是处理中最高的,分别为 8.60 cm 和 11.80 cm、3.12 mm 和 3.65 mm,较 CK 分别增加了 11.80%和 53.80%、24.62%和 45.61%;施用 600 kg·hm^{-2}的木醋液、木醋液+螯合钙后,棉花幼苗的株高、茎粗均低于 150、300 kg·hm^{-2}的施用量,这表明 600 kg·hm^{-2}的施用量会抑制棉花幼苗的株高、茎粗的生长。相同施用量下,木醋液+螯合钙处理后棉花幼苗的株高均高于单施木醋液处理,这表明木醋液+螯合钙会促进棉花幼苗株高、茎粗的生长,但施用量要适宜,否则会抑制其生长。

由图 3B 可知,与 CK 相比,施用木醋液、木醋液+螯合钙后可以增加棉花幼苗的鲜质量,T2 处理棉花幼苗的鲜质量最大,为 3.27 g;从显著性分析,施用中高量的木醋液、木醋液+螯合钙后可以显著提高棉花幼苗的鲜质量。150、300 kg·hm^{-2}时,木醋液配施螯合钙处理的鲜质量均显著高于单施木醋液处理。与 CK 相比,施用木醋液、木醋液+螯合钙均在 300 kg·hm^{-2}处理下鲜质量最高,在 600 kg·hm^{-2}处理时棉花幼苗的鲜质量再次下降。

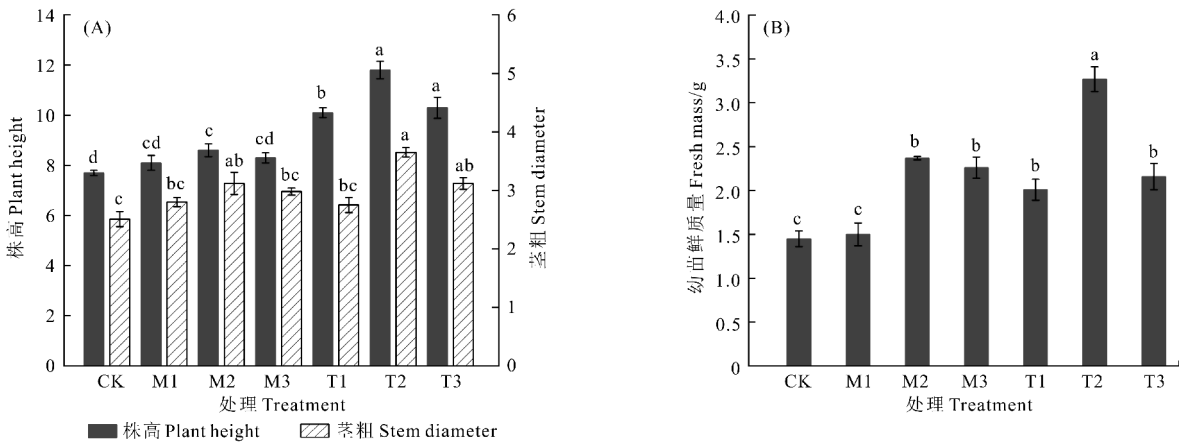


图 3　木醋液和木醋液+螯合钙对棉花幼苗生长指标的影响

Fig.3　Effects of wood vinegar and wood vinegar + chelated calcium on growth indexes of cotton seedlings

2.3　改良后的土壤综合效应评价

2.3.1　*逐步回归分析*　为进一步探究改良后的土壤对棉花生长的影响,将不同处理的土壤理化性质与棉花生长指标(株高、茎粗和鲜质量)进行逐步回归分析。本研究中把棉花生长指标作为被解释变量,改良后土壤的理化性质指标作为解释变量。在解释变量与被解释变量相关性较强的情况下,将 $P \leqslant 0.05$ 的解释变量引入,$P>0.1$ 多余的变量通过逐步回归方法从完整的回归模型中去除。用决定系数 R^2 表示提取的公共因子对被解释变量的解释程度。

由棉花生长指标与土壤理化性质的多元逐步回归分析(表 2)可知:株高主要受 Available-P 含量的影响($R^2=0.75$,$P<0.001$),茎粗、鲜质量均受土壤水溶性盐的影响,其可以分别解释变异的 36.10%和 54.60%。

表 2　棉花生长指标与改良后土壤理化性质的多元逐步线性回归分析

Table 2　Multivariate stepwise linear regression analysis of cotton growth index and modified soil physical and chemical properties

逐步回归方程 Stepwise linear regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	P 值 P value
$y_1=1.259+0.153x_1$	0.751	<0.001
$y_2=4.149-0.223x_2$	0.361	0.002
$y_3=0.861-0.084x_2$	0.546	<0.001

注:y_1 表示株高,y_2 表示茎粗,y_3 表示鲜质量,x_1 表示速效磷,x_2 表示水溶性盐。

Note: y_1 stands for plant height, y_2 stands for stem size, y_3 stands for fresh mass, x_1 stands for available phosphorus, x_2 stands for water-soluble total salt.

2.3.2 权重分析(熵权法)综合排名 对本试验中获得的土壤理化性质和棉花幼苗生长发育各项指标进行熵权法分析,得出的权重进行综合排名,根据排名得分作为改良效果优劣的判断指标。

由表3权重分析结果可知:熵权法的权重计算结果显示,有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、鲜质量、S-PPO、茎粗、S-AKP、株高、盐、pH值的权重分别为9.19%、12.42%、6.38%、5.86%、11.82%、9.01%、8.66%、6.28%、12.81%、7.98%、9.59%,其中指标权重最大值为株高(12.81%),最小值为指标速效钾(5.86%)。

根据熵权法分析后得到权重值与此时数据相乘,并且进行累加,最终得到一列数据即为"综合得分",把综合得分进行排名,结果如表4所示。T2处理下综合评价得分最高,说明该处理的综合改良效果最优。

表3 各项指标权重分析计算结果

Table 3 Weight analysis results of each index

项目 Item	信息熵值 e Information entropy analysis e	信息效用值 d Information utility value d	权重/% Weight
有机质 Organic matter	0.845	0.155	9.192
碱解氮 Available-N	0.790	0.210	12.418
速效磷 Available-P	0.892	0.108	6.382
速效钾 Available-K	0.901	0.099	5.863
鲜质量 Fresh mass	0.800	0.200	11.819
S-PPO	0.848	0.152	9.008
茎粗 Stem diameter	0.854	0.146	8.658
S-AKP	0.894	0.106	6.283
株高 Plant heigh	0.784	0.216	12.809
水溶性总盐 Water-soluble total salt	0.865	0.135	7.979
pH	0.838	0.162	9.589

表4 熵权法分析综合得分和排名

Table 4 Comprehensive scores and rankings analyzed by entropy weight method

处理 Treatment	综合得分 Synthesis score	排名 Mathematic
CK	0.11	7
M1	0.32	6
M2	0.44	4
M3	0.42	5
T1	0.46	3
T2	0.85	1
T3	0.63	2

3 讨 论

3.1 木醋液对盐碱土理化性质的影响

诸多学者研究表明,在盐碱土土壤中施用木醋液可以调节土壤pH值;于雷等[20]研究表明,在盐碱土中施加木醋液可以降低pH值;周红娟等[13]研究也表明施用木醋液后可以降低土壤pH值,这与本研究盐碱土pH值的变化有所差异;在本研究中的施用量下(150、300、600 kg·hm^{-2}),施用木醋液和木醋液配施螯合钙后,土壤pH值的变化不显著,可能与木醋液、木醋液+螯合钙中酸类物质发生酸碱中和反应的速度比较慢[21]有关。Yu等[22]研究表明,在盐碱土中施用木醋液可以降低土壤的水溶性总盐含量,与本研究结果一致。其原因一方面可能是试验过程中产生了淋溶,使盐分向下运移,压盐效果增加,从而导致土壤中水溶性总盐下降[21],另一方面木醋液中含有多个羟基(OH^-)官能团(包括酚羟基),可以与土壤中的钠离子产生络合-解离作用,形成水分子(H_2O)并释放出氢气(H_2)[23],并且木醋液能与土壤发生反应形成络合物,从而降低土壤的水溶性盐含量[24]。在相同施用量下,木醋液和螯合钙配施比单施木醋液水溶性总盐含量低,其原因是:为了保持离子平衡,木醋液+螯合钙中的Ca^{2+}置换出了土壤胶体中更多的Na^+[1],从而导致土壤水溶性总盐含量比单施木醋液低。

诸多研究表明,在盐碱土中施用木醋液对其改良具有一定作用,可以提高土壤中有机质、速效磷、速效钾的含量。杨肖飞等[25]研究发现,木醋液配施生物炭可以提高当季土壤碱解氮、有机质的含量;Zhang等[26]研究表明木醋液改善有机质含量,这与本研究的结果有所不同。本研究中土壤有机质和碱解氮的含量与CK无显著差异,其原因是:一方面盐碱土本身有机质含量偏低,另一方面是木醋液具有杀菌作用,暂时抑制了微生物对土壤碳素的消耗。张帆等[27]在研究中表明在土壤中施用木醋液可以增加速效磷和速效钾的含量,这与本研究有所不同是:低量(150 g·hm^{-1})、中量(300 kg·hm^{-2})的木醋液和木醋液+螯合钙可以增加土壤Available-P、Available-K含量,而加高量(600 kg·hm^{-2})的木醋液、木醋液+螯合钙处理的土壤Available-P、Available-K含量有所下降,造成这一现象的原因是:木醋液具有促进和抑制细菌生长的双重功效;高量的木醋液对土壤中参与磷转化的微生物产生了抑制作用,能够分解有机磷、释放速效磷的微生物活性受抑制,使有机磷向速效磷的转化减少,进而导致了速效磷含量的降低;木醋液改变了土壤微生物群落结构,使得有利于磷素活化的微生物种类和数量减少,而不利于磷素活化的微生物相对增加,从而影响速效磷的含量[28-29],可见在实际生产过程中要特别注意木醋液的适宜用量。与CK相比,施用两种外源物质后土壤Available-K含量增加的原因:

一是由于本研究的土壤质地是黏壤土,黏粒含量较高,具有较大的比表面积和较强的吸附能力,这使得土壤中的钾离子容易被吸附在黏粒表面;而木醋液和木醋液+螯合钙是酸性物质,施入土壤后土壤 pH 值有所下降,从而破坏了土壤中的黏粒对钾离子的吸附能力[30],释放出了更多的钾离子被植物吸收利用,从而影响了土壤速效钾含量的增加。二是因为木醋液中含有有机酸,可以促进土壤中矿物钾向缓效钾及速效钾的转化[31],进而增加了土壤中速效钾的含量;此外,木醋液中含有的羟基和羧基可以破坏土壤中的矿物,使矿物中更多的钾被释放出来[32],进而增加了土壤速效钾的含量。相同施用量下,木醋液+螯合钙处理下土壤 Available-K 的含量比单施木醋液的含量高,其原因是:一方面因为木醋液+螯合钙中含有大量的钙源,促进了植物根系的生长和发育,增强了根系吸附钾离子的能力[33],从而影响了土壤 Available-K 含量的增加。另一方面是因为木醋液的 pH 值(3.46)低于木醋液+螯合钙的 pH 值(4.75),酸性更强,对解钾菌的生长和活性造成了抑制,使其分解能力减弱,固态钾向速效钾转化的速率减缓,从而间接影响了土壤 Available-K 的含量。

土壤酶是土壤的重要组成部分,是催化土壤生物化学反应的一种蛋白质,主要来自于根系分泌物、土壤微生物、土壤中的动物和土壤中的动植物残体[13],而土壤微生物数量的变化是影响土壤酶活性的关键因素[34]。刘敏等[35]的研究表明,在盐碱土中添加 100%的木醋液会降低土壤酶活性,而酸性磷酸酶和多酚氧化酶的活性则会随着木醋液体积分数的增加而提高;Zhao 等[36]研究表明在盐碱土中施用木醋液可以提高碱性磷酸酶的活性;本研究的研究结果与前人研究结果一致,即在土壤中施用低量和中量(M1 和 M2 处理)的木醋液促进了 S-PPO 活性,高量(M3 处理)的木醋液则抑制了其活性,这是因为较高浓度的木醋液抑制了微生物数量导致的[13],酶活性提高与木醋液中酚类物质为其提供了充足的底物有关[37];相同施用量的木醋液、木醋液+螯合钙对 S-PPO 的影响不同,施用量为 150、300 kg · hm^{-2}时,单施木醋液处理 S-PPO 活性高于木醋液+螯合钙处理,施入高量木醋液(600 kg · hm^{-2})时,木醋液+螯合钙的活性显著高于单施木醋液处理,产生这种现象的原因是:木醋液具有促进和杀菌的双重作用,当微生物产生了促进 S-PPO 的分泌物质后,木醋液抑制了这种物质从而降低了 S-PPO 活性,加入螯合钙有助于改善土壤结构,增加了土壤孔隙和透气性,为可以分泌 S-PPO 酶活性的土壤微生物提供了良好的生长环境[38],从而间接促进了 S-PPO 活性的提高。S-APK 属于水解酶,在不同施用量(150、300、600 kg · hm^{-2})下 S-APK 活性均增加,这是因为施用了木醋液提高了土壤微生物利用碳源和代谢的能力[39]。此外,土壤碳素为微生物提供了能源与营养源,施用木醋液、木醋液+螯合钙在改善土壤理化性质的同时也会间接影响土壤微生物,从而导致土壤酶活性的变化。由于木醋液成分复杂,且目前还不能提取土壤酶而直接测定其活性的变化,因此,施用木醋液、木醋液+螯合钙后导致土壤酶活性变化的机理需要进一步研究。

3.2　木醋液对棉花幼苗生长的影响

大量研究表明,施用木醋液可以提高作物的鲜质量、株高、茎粗,改善品质、提高产量[40-41];这与本文研究结果一致,即施用木醋液、木醋液+螯合钙均促进了棉花幼苗的生长(株高、茎粗和鲜质量);通过逐步回归分析表明,棉花幼苗的株高、茎粗和鲜质量分别受土壤 Available-P 和土壤水溶性总盐的影响,在结果分析中也表明施用木醋液和木醋液+螯合钙后土壤水溶性总盐和土壤 Available-P 的含量较 CK 均有显著变化(土壤水溶性总盐显著下降、土壤 Available-P 含量显著增加)。幼苗期是棉花整个生育期中受盐害最敏感的时期,施用木醋液、木醋液+螯合钙后,改善盐碱土理化性质的同时,也为棉花幼苗生长提供了相对适宜的生长环境(水溶性总盐含量下降,在棉花幼苗根区形成了淡盐区;土壤 Available-P 含量增加),土壤 Available-P 含量的增加会促进根系的生长和发育,增加根系吸收水分和养分能力,尤其是氮、钾元素;此外,木醋液中含有的微量和营养元素也提高了棉花幼苗对养分的利用率[8],增加了棉花幼苗耐盐碱的能力,从而促进了棉花幼苗的生长。

本研究采用室内盆栽试验,通过苗期试验得到了初步结果,将在未来的大田试验中验证研究结果,并探讨干旱和室外其他因素对棉花其他生育期的农艺性状及盐碱土土壤的影响,以为盐碱土改良及棉花栽培提供一定的数据支撑。

4　结　论

通过室内盆栽试验,研究了木醋液及其配施螯合钙对盐碱土土壤和棉花幼苗期株高、茎粗及鲜质量的影响,取得了如下研究结果:

(1)盐碱土中施用木醋液、木醋液+螯合钙可以显著降低盐碱土水溶性总盐的含量,随着施用量的

增加而下降,施用量600 kg·hm^{-2}时两者均对土壤水溶性总盐含量降低效果最好,分别为3.68 g·kg^{-1}和3.54 g·kg^{-1},与CK相比分别降低了52.27%、54.10%。

(2)盐碱土中施用木醋液、木醋液+螯合钙可以显著增加土壤中速效磷、速效钾的含量,均在施用量300 kg·hm^{-2}时含量最高。两种外源物质处理下Available-P、Available-K的含量分别为52.50、166.00 mg·kg^{-1}和65.30、174.00 mg·kg^{-1};且木醋液与螯合钙配施对土壤养分的增加效果优于单施木醋液处理。

(3)盐碱土中施用木醋液、木醋液+螯合钙可以显著增加S-PPO的活性;施加量在300 kg·hm^{-2}时活性最强,分别为68.70 mg^{-1}·d^{-1}·g^{-1}和63.86 mg^{-1}·d^{-1}·g^{-1},较CK分别增加了16.70%和8.42%;S-AKP的活性与施用量成正比,均在600 kg·hm^{-2}施用量时活性最大。

(4)施用木醋液、木醋液+螯合钙后均可以促进棉花幼苗的株高、茎粗及鲜质量的提高,300 kg·hm^{-2}时效果最好,单施木醋液株高、茎粗及鲜质量分别为8.60 cm、3.12 mm及2.37 g;木醋液与螯合钙配施株高、茎粗及鲜质量分别为11.80 cm、3.65 mm及3.27 g,木醋液+螯合钙对棉花幼苗生长的促进作用优于单施木醋液处理。

在相同施用量下,土壤和棉花各指标均是木醋液+螯合钙处理效果优于单施木醋液处理。综合评价土壤改良效果和棉花幼苗的生长,以木醋液+螯合钙处理降低土壤盐分、增加土壤养分、提高土壤酶活性及促进棉花的生长效果最好,综上所述木醋液+螯合钙是适用于该地区盐碱地改良的材料之一,其推荐用量为300 kg·hm^{-2}。

参 考 文 献:

[1] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.

[2] ZHANG Y M, WANG H, ZHANG X H, et al. Effects of salt stress on the rhizosphere soil microbial communities of *Suaeda salsa* (L.) pall. in the yellow river delta[J]. Ecology and Evolution, 2024, 14(9): e70315.

[3] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 757-762.
WANG X P, YANG J S, ZHANG S J, et al. Effects of different amendments application on cotton growth and soil properties in arid areas[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(4): 757-762.

[4] GREWAL A, ABBEY L, GUNUPURU L R. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 135: 152-159.

[5] WEI Q, MA X H, PREPARATION D J. Preparation, chemical constituents and antimicrobial activity of pyroligneous acids from walnut tree branches[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010, 87(1): 24-28.

[6] 张亚兰, 孙金龙, 李治宇, 等. 木醋液对盐碱土改良效果研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 292-295.
ZHANG Y L, SUN J L, LI Z Y, et al. Study on the improvement effects of wood vinegar on saline-alkali soil[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(6): 292-295.

[7] PAN X, SHI M, CHEN X C, et al. An investigation into biochar, acid-modified biochar, and wood vinegar on the remediation of saline-alkali soil and the growth of strawberries[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1057384.

[8] LASHARI M S, YE Y X, JI H S, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1321-1327.

[9] ZENG L S, SUN X M, ZHOU W W, et al. Combined treatment of a pyroligneous solution and soluble calcium enhances cotton growth through improving soil quality in saline-alkali soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(1): 25-35.

[10] 田家明, 张智猛, 戴良香, 等. 外源钙对盐碱土壤花生荚果生长及籽仁品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(2): 205-210.
TIAN J M, ZHANG Z M, DAI L X, et al. Effects of exogenous calcium on peanut pod growth and kernel quality in saline - alkali soil[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2019, 41(2): 205-210.

[11] 殷小琳, 成晨, 丁国栋, 等. 含钙废弃物对盐碱土改良和胡枝子生长影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 115-122.
YIN X L, CHENG C, DING G D, et al. Improvement and effects of calcium-containing wastes on saline-alkali soil and growth oflespedeza bicolor turcz[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 115-122.

[12] HE L Z, GENG K, LI B L, et al. Enhancement of nutrient use efficiency with biochar and wood vinegar:a promising strategy for improving soil productivity[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(1): 465-472.

[13] 周红娟, 耿玉清, 丛日春, 等. 木醋液对盐碱土化学性质、酶活性及相关性的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 105-111.
ZHOU H J, GENG Y Q, CONG R C, et al. Effects of wood vinegar on chemical properties, enzyme activities and their correlation in saline alkalisoil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 105-111.

[14] 努尔比耶柯孜·麦麦提. 喷施木醋液对棉花生长与土壤理化性质的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
NU E B Y K Z-M M T. Effects of spraying wood vinegar on cotton growth and soil physicochemical properties[D]. Ala'er: Tarim Uni-

versity, 2022.

[15] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 128-132.
WANG X Y, CHEN X M, LI X L, et al. Improvement effects of combined application of different amendments and gypsum on a coastal salinesoil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 128-132.

[16] 贺海升, 王文杰, 朱虹, 等. 盐碱地土壤改良剂施用对种子萌发和生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5338-5346.
HE H S, WANG W J, ZHU H, et al. Influences on the seed germination and growth with addition of kriliums in saline-alkali soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5338-5346.

[17] 李云霞, 王国栋, 刘瑜, 等. 新疆典型绿洲灌区土壤理化性状与盐分离子分布特征[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 357-364, 414.
LI Y X, WANG G D, LIU Y, et al. Distribution characteristics of soil physicochemical properties and salt ions in typical oasis irrigation areas of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 357-364, 414.

[18] 李会志. 基于 RS/GIS 的开都河流域下游绿洲土壤盐渍化动态变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.
LI H Z. Study on dynamic changes of theoasis soil salinization in the lower reaches of Kaidu river basin, Xinjiang based on RS and GIS [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-200.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-200.

[20] 于雷, 沈威, 王敏, 等. 木醋液在盐碱地土壤改良中的应用[J]. 温带林业研究, 2022, 5(3): 60-64.
YU L, SHEN W, WANG M, et al. Application of wood vinegar insoil improvement of saline-alkali land[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2022, 5(3): 60-64.

[21] 郭亚茹. 黄腐酸施用量对盐碱土壤改良机制研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
GUO Y R. Study on the improvement mechanism of fulvic acid applicationrate on saline-alkali soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.

[22] YU Z P, WANG H Y, ZHU Y Z, et al. Biochar and wood vinegar amendments influence the potential nitrification rate and nitrifier communities in high pH sodic saline soils[J]. European Journal of soil Biology, 2024, 122: 103658.

[23] 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[J]. Environmental Pollution, 2022, 305: 119266.

[24] 唐伟, 张玉文, 钱士超. 盐碱地造林绿化机理及技术路径探析——以潍坊市滨海区为例[J]. 潍坊学院学报, 2024, 24(2): 11-16.
TANG W, ZHANG Y W, QIAN S C. Research on afforestation mechanism and technical path of saline-alkali land--taking Binhaidistrict of Weifang city as an example[J]. Journal of Weifang University, 2024, 24(2): 11-16.

[25] 杨肖飞, 李望舒, 王树峰, 等. 木醋液配施生物炭对盐碱土壤理化特性和甜菜产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024, (5): 113-119.
YANG X F, LI W S, WANG S F, et al. Effects of wood vinegar combined with biochar application on physicochemical properties of saline alkali soil of sugar beet in season[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2024, (5): 113-119.

[26] ZHANG Y C, WANG X, LIU B J, et al. Comparative study of individual and Co-application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality [J]. Chemosphere, 2020, 246: 125699.

[27] 张帆, 谢琛, 肖宝莹, 等. 木醋液对番茄根际土壤理化性质及细菌群落多样性的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 2022: 1-8 (2022-05-17). https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2022.1751.
ZHANG F, XIE C, XIAO B Y, et al. Effects of wood vinegar on physicochemical properties and bacterial community diversity of tomato rhizosphere soil [J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, 2022: 1-8 (2022-05-17). https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2022.1751.

[28] SPOHN M, WIDDIG M. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 53-59.

[29] ZEGLIN L H, STURSOVA M, SINSABAUGH R L, et al. Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems[J]. Oecologia, 2007, 154(2): 349-359.

[30] 王永东, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同尺度下低山茶园土壤钾素含量空间变异特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 309-314.
WANG Y D, LI T X, ZHANG X Z, et al. Spatial variability of the content of potassium in hilly tea plantation soils with different sampling scales[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 309-314.

[31] 程文龙, 卜容燕, 王慧, 等. 不同紫云英翻压量和施氮水平对皖南稻区土壤肥力和水稻养分吸收及产量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 669-676.
CHENG W L, BU R Y, WANG H, et al. Effects of different returned amounts of Chinese milk vetch and nitrogen application levels onsoil fertility, rice nutrient uptake and yield in the rice area of southern Anhui province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(3): 669-676.

[32] 韩苗, 朱晓艳, 陈国炜, 等. 解钾菌及其释钾微观机制的研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 334-348.
HAN M, ZHU X Y, CHEN G W, et al. Advances on potassium-solubilizing bacteria and their microscopic potassium solubilizing mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 334-348.

[33] 陈磊, 曾志红, 王国军, 等. 氰氨化钙对连作辣椒根际土壤环境及植株生长发育的影响[J]. 中国蔬菜, 2024, (10): 108-113.
CHEN L, ZENG Z H, WANG G J, et al. Effects of calcium cyanamide on rhizosphere of Soil environment and growth characteristics with continuous planting of*Capsicum annuum* L[J]. China Vegetables, 2024, (10): 108-113.

[34] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2401-2406.
WANG H, WANG G, HUANG Y Y, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2401-2406.

[35] 刘敏, 耿玉清, 丛日春, 等. 添加木醋液对盐碱土酶活性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 112-117.
LIU M, GENG Y Q, CONG R C, et al. Impacts of wood vinegar on enzyme activity in saline alkaline soil[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6): 112-117.

[36] ZHAO W, ZHAO H R, SUN X P, et al. Biochar and wood vinegar altered the composition of inorganic phosphorus bacteria community in saline-alkali soils and promoted the bioavailability of phosphorus[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122501.

[37] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(3): 391-404.

[38] 王世杰, 吴蔓莉, 徐会宁, 等. 废弃菌菇棒与牛粪共堆肥过程中 DOM 的光谱特征研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(11): 2579-2589.
WANG S J, WU M L, XU H N, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in Co-composting process of spent mushroom substrate and cow dung[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(11): 2579-2589.

[39] 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.
ZENG J, HAI M R, WANG X H, et al. Effects of pyroligneous acid application on microbial diversity in tobacco field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 93-98.

[40] SUN X M, GUO Y C, ZENG L S, et al. Combined Urea humate and wood vinegar treatment enhances wheat-maize rotation system yields and nitrogen utilization efficiency through improving the quality of saline-alkali soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2): 1759-1770.

[41] WU S, YUAN Y F, LIU Q. Effects of wood vinegar on the growth of oil sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings in a salt-affected soil of yellow river Delta, China[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022: 79-83.

(上接第 58 页)

[27] 吴委, 王作伟, 粟永英, 等. 拟南芥细胞分裂素受体 AHK3 亚细胞定位信号的研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 64-71.
WU W, WANG Z W, SU Y Y, et al. Analysis of subcellular localization signals of *Arabidopsis* cytokinin receptor protein AHK3[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(6): 64-71.

[28] LIU Z N, YUAN L, SONG X Y, et al. AHP2, AHP3, and AHP5 act downstream of CKI1 in *Arabidopsis* female gametophyte development[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(13): 3365-3373.

[29] XIE M T, CHEN H Y, HUANG L, et al. A B-ARR-mediated cytokinin transcriptional network directs hormone cross-regulation and shoot development[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1604.

[30] 王军. 拟南芥细胞分裂素 N-糖基转移酶基因功能分析[D]. 济南: 山东大学, 2011.
WANG J.Functional analysis of cytokininN-glycosyltransferase genes in *Arabidopsis thaliana*[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

[31] 于敏, 徐恒, 张华, 等. 植物激素在种子休眠与萌发中的调控机制[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 599-606.
YU M, XU H, ZHANG H, et al. Regulation of plant hormones on seed dormancy and germination[J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 2016, 52(5): 599-606.

[32] 付丽娜. 小麦发芽期种子内源激素变化与种子活力的关系研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2020.
FU L N.Study on the Relationship between the changes of endogenous hormones in wheat seed germination and the seed vigor[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2020.

[33] 刘强, 杨添博, 刘剑锋, 等. 叶面喷施 6-BA 对盐胁迫下不同种源黑果枸杞幼苗生理指标和光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(9): 30-35, 45.
LIU Q, YANG T B, LIU J F, et al. The effects of 6-BA foliar spray on physiological indicators and photosynthetic characteristics of *Lycium ruthenicum* seedlings from different origins under salt stress[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9): 30-35, 45.

[34] 张春兰, 曹帅, 满丽莉, 等. 盐碱胁迫下大豆生理特性与干物质的相关研究[J]. 种子, 2020, 39(2): 82-87.
ZHANG C L, CAO S, MAN L L, et al. Correlational study on physiological characteristics and dry matter of soybean under salinity-alkalinity stress[J]. Seed, 2020, 39(2): 82-87.

[35] 王英杰, 唐才宝, 潘素君, 等. 外源 6-BA 和 BR 对不同灌溉方式下水稻光合特性及产量的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(20): 6930-6938.
WANG Y J, TANG C B, PAN S J, et al. Effects of 6-BA and BR on photosynthetic characteristics and yield of rice under different irrigation methods[J]. Molecular plant breeding, 2022, 20(20): 6930-6938.

[36] TALLA S K, PANIGRAHY M, KAPPARA S, et al. Cytokinin delays dark-induced senescence in rice by maintaining the chlorophyll cycle and photosynthetic complexes[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(6): 1839-1851.