

高分子材料配施木醋液对滨海盐渍土壤团聚体及酶活性的影响^①

杨采怡^{1,2}, 汪帆³, 曹巍巍³, 刘广明^{2*}, 陈金林^{1*}, 姚荣江², 王秀萍⁴

(1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 3 江苏沿海生态科技发展有限公司, 南京 210000; 4 河北省农林科学院滨海农业研究所, 河北唐山 063299)

摘要: 为了研发改良粉砂土壤团粒结构的新型方法, 应用室内培养试验, 研究了2种高分子材料(γ -聚谷氨酸、壳寡糖))与木醋液配施对盐渍土壤团聚体和酶活性的改良效应。结果表明: ①高分子材料配施木醋液能够显著降低土壤 pH、电导率, 对土壤有机质有不同程度的促进作用; ②0.2% 和 0.4%(土壤质量百分比, 下同))的壳寡糖与木醋液配施能显著提高粒径 >0.25 mm 大团聚体含量, 促进平均重量粒径(MWD)提升; 0.4% 的 γ -聚谷氨酸与木醋液配施能显著增加粒径为 0.053 ~ 0.25 mm 微团聚体含量, 降低粒径 <0.053 mm 黏粉粒含量; ③土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性在高分子材料配施木醋液条件下较对照分别提升 4.07% ~ 25.80%、68.24% ~ 189.76%、0.46% ~ 47.56% 和 84.86% ~ 350.16%。高分子材料与木醋液配施能够促进盐渍土壤团聚体形成、改善土壤团粒结构和增强土壤团聚体稳定性, 同时提升土壤酶活性。本研究对于盐渍土壤结构改良和地力提升具有重要的理论与实际应用价值。

关键词: 高分子材料; 木醋液; 团聚体; 土壤酶活性; 盐渍土壤

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Combined Application of Polymer Materials and Wood Vinegar on Aggregates and Enzyme Activities in Coastal Saline Soil

YANG Caiyi^{1,2}, WANG Fan³, CAO Weiwei³, LIU Guangming^{2*}, CHEN Jinlin^{1*}, YAO Rongjiang², WANG Xiuping⁴

(1 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 Jiangsu Coastal Ecological Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 4 Institutes of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Tangshan, Hebei 063299, China)

Abstract: In order to develop a new method for improving the aggregate structure of sandy soil, an indoor cultivation experiment was conducted to study the improvement effects of two polymer materials (PM) of poly γ -glutamic acid (PGA) and chitosan oligosaccharide (CO) combined with wood vinegar (WV) on the soil aggregates and enzyme activities of coastal saline soil. The results showed that, 1) The application of PM combined with WV significantly reduced soil pH and EC, and had varying degrees of promotion on soil organic matter. 2) The combination of 0.2% or 0.4% (soil mass percentage, the same below) CO and WV significantly increased the content of >0.25 mm macroaggregates and promoted the increase of mean weight diameter (MWD), while the combination of 0.4% PGA and WV significantly increased the content of 0.053–0.25 mm microaggregates and reduced the content of <0.053 mm clay particles. 3) The activities of soil catalase, urease, phosphatase, and sucrase increased by 4.07%–25.80%, 68.24%–189.76%, 0.46%–47.56% and 84.86%–350.16%, respectively, compared to the control under the condition of PM combined with WV. In conclusion, the combination of PM and WV could promote the formation of saline soil aggregates, improve soil aggregate structure, enhance soil aggregate stability and soil enzyme activity. This study has important theoretical and practical application values for the improvement of saline soil structure and the enhancement of soil fertility.

Key words: Polymer material (PM); Wood vinegar (WV); Aggregate; Soil enzyme activity; Saline soil

^①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440101)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助。

* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn; jlchen@njfu.edu.cn)

作者简介: 杨采怡(1999—), 女, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良方面的研究。E-mail: yangcaiyi1999@163.com

土壤团聚体由土壤颗粒与有机、无机物质胶结形成,能够储存土壤中的各类养分,为微生物活动提供生境,而水稳定性团聚体的数量及分布则能够反映土壤结构的好坏,因此水稳定性团聚体组成及其稳定性成为评价土壤质量的重要指标之一^[1]。盐渍土壤中高浓度的 Na^+ 能够让土壤颗粒分散,破坏土壤团粒结构,阻碍土壤团聚化并降低团聚体稳定性,进而导致土壤板结和通透性变差^[2-3]。土壤酶作为生物催化剂,在土壤中各类生化反应中具有极为重要的作用,其活性反映了土壤中物质代谢的旺盛程度,是评价土壤肥力的重要指标^[4]。盐渍土壤的高盐分含量使得微生物活性受到抑制导致其分泌酶能力降低,而酶活性降低将显著抑制土壤养分循环过程从而破坏土壤微环境和降低土壤肥力^[5]。

高分子材料正逐渐被应用于盐渍土壤改良中。高分子材料能够改善盐渍土壤物理性状,如聚丙烯酰胺(PAM)、羟乙基纤维素(HEC)、聚合硫酸铝铁(PAFS)等能够改良盐渍土壤结构,通过絮凝和团聚作用促进土壤颗粒团聚化,增强土壤团聚体稳定性,降低土壤容重并提升土壤饱和导水率^[6-7]。高分子材料还可降低盐渍土中可溶性盐分,主要是通过吸附离子或提高土壤渗透率来实现。已有研究发现苯乙烯系交换树脂对 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 有较好的物理吸附和静电吸附钝化作用^[8],而壳聚糖(CTS)、乙基纤维素(HEC)可作为地膜降低土壤水分蒸发,提高土壤保水性能并抑制土壤盐分在地表聚集^[9]。盐渍土壤中酶和微生物对土壤环境变化敏感,是评价土壤质量的重要指标,高分子材料的施用能够有效促进土壤中酶和微生物活性提升。如 γ -聚谷氨酸能够显著提升轻度盐渍土壤中脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性^[10];施用聚丙烯酸盐类(PAAS)或纤维素类(HEC)能丰富盐渍土壤微生物群落结构、增强微生物利用碳源能力,从而增加土壤微生物生物量碳含量^[11]。

研究发现,木醋液作为盐渍土改良剂,能够降低盐渍土壤 pH 及盐分,同时调节土壤养分条件、改善盐渍土壤微环境^[12]。木醋液与其他物料配施则能够进一步提升对盐渍土壤的改良效果,改善土壤结构,降低土壤钠吸附比和土壤可溶性阳离子浓度,降低土壤盐害,提升土壤养分含量^[13-14]。而已有的盐渍土改良研究基本围绕高分子材料的单一应用或木醋液与生物质材料配施,对不同高分子材料与木醋液配施的盐渍土壤团粒结构改善和土壤酶活性提升效应研究鲜有涉及。本研究以滨海盐渍土壤为研究对象,选用

壳寡糖、 γ -聚谷氨酸和木醋液作为供试材料,通过室内培养试验探究高分子材料配施木醋液对盐渍土壤水稳定性团聚体及酶活性的改善效应,以期为盐渍土壤改良和农业高效利用提供理论及技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自江苏省东台市弶港镇沿海开发区条子泥垦区($32^{\circ}38'42.01''\text{N}$, $120^{\circ}54'8.04''\text{E}$),该地区位于亚热带和暖温带季风气候的过渡地区,雨热同期,降水具有明显季节波动性,6—9月的降水量可达到年降水量的 70%,年均降水量为 1 058.4 mm,蒸发量为 929.9 mm,年均气温为 14.6 ℃,无霜期 213 d。供试土壤采集深度为 0~20 cm,土壤经风干、过 2 mm 筛后备用。土壤质地为粉砂壤土,粒径 >0.25 mm、 $0.053\sim0.25$ mm 和 <0.053 mm 团聚体的含量分别为 92.9、341.0 和 566.1 g/kg。土壤容重为 1.45 g/cm^3 , pH 为 8.50,全盐含量 5.05 g/kg, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量分别为 6.22、0.30、0.70、0.68、6.16、0.80、0.48 cmol/kg。供试物料包括木醋液及 2 种高分子材料: γ -聚谷氨酸(P)和壳寡糖(C)。木醋液有效成分含量 99%,由河北绿川吉活性炭有限公司提供; γ -聚谷氨酸含量 $\geq 25\%$,由南京轩凯生物科技股份有限公司提供;壳寡糖有效含量 $\geq 85\%$,水分 $\leq 10\%$,灰分 $\leq 2\%$,由大连中科格莱克生物科技有限公司提供。

1.2 试验处理

培养试验于 2023 年 4 月开展,2023 年 9 月结束,试验共 7 组处理,每组处理重复 3 次,各处理均在常规施肥($\text{N} 225\text{ kg}/\text{hm}^2$, $\text{P}_2\text{O}_5 120\text{ kg}/\text{hm}^2$, $\text{K}_2\text{O} 80\text{ kg}/\text{hm}^2$)条件下进行培养。将 150 g 供试土壤与高分子材料(γ -聚谷氨酸、壳寡糖)根据表 1 设计用量进行混合均匀后装入塑料盒($8.7\text{ cm}\times8.7\text{ cm}\times6.7\text{ cm}$)。将木醋液原液按 1:500 比例稀释后在土壤中加入 22.5 mL 木醋液稀释液,使土壤含水量达到土壤田间持水量的 70%,并实现木醋液与土壤混合均匀,对照组喷洒等量去离子水(22.5 mL)。试验采用相同控制条件,置于温度为 25 ℃ 的人工气候箱中进行培养。开始培养前,所有处理均在培养箱中预培养 7 d,激活土壤微生物,确保水分扩散均匀。为了保证微生物活性,每 7 d 用去离子水调整所有处理的土壤水分至田间持水量的 70%。分别在培养第 40、80、120、160 天进行破坏性取样。

表 1 试验设计处理
Table 1 Experimental treatments

处理	物料及施用量
CK	-
P1	0.1% γ -聚谷氨酸+0.3 mL/kg 木醋液
P2	0.2% γ -聚谷氨酸+0.3 mL/kg 木醋液
P3	0.4% γ -聚谷氨酸+0.3 mL/kg 木醋液
C1	0.1% 壳寡糖+0.3 mL/kg 木醋液
C2	0.2% 壳寡糖+0.3 mL/kg 木醋液
C3	0.4% 壳寡糖+0.3 mL/kg 木醋液

注: γ -聚谷氨酸和壳寡糖的添加量是按照土壤质量百分比。

1.3 测定指标与方法

土壤基本性质测定参考《土壤农化分析》^[15], 土壤 pH、电导率(EC)采用电位法测定, 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定。土壤水稳定性团聚体采用湿筛法进行测定^[16]。根据粒径大小, 土壤团聚体共分为 3 级: >0.25 mm 大团聚体、0.053~0.25 mm 微团聚体和<0.053 mm 黏粉粒。土壤团聚体平均重量直径(MWD)是表征土壤团聚体稳定性的特征指标, 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

式中: X_i 为 i 粒级团聚体的平均直径(mm), W_i 为 i 粒级团聚体占总团聚体的百分含量(%), $n=3$ 。

在试验第 160 天, 采集土壤样品进行土壤酶活性的测定, 酶活性测定方法参考《土壤酶及其研究法》^[17], 土壤过氧化氢酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性和蔗糖酶活性分别采用紫外分光光度法、苯酚钠-次氯酸钠比色法、磷酸苯二钠比色法和 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 分别以 20 min 内 1 g 土壤分解的 H_2O_2 的毫克数、24 h 后 1 g 土壤中 NH_3-N 的微克数、24 h 后 1 g 土壤中释放出酚的微克数和 24 h 后 1 g 土壤生成葡萄糖的微克数表示酶活性。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2016 软件进行数据基本处理, 利用 SPSS 25 统计软件进行数据的统计分析, 使用 Origin 2022 进行制图。

2 结果与分析

2.1 高分子材料配施木醋液对土壤基本性质的影响

表 2 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤基本性质。7 种处理的土壤 pH 和电导率由大到小的顺序为: CK>P1>P2>C1>C2>P3>C3, 物料使用后均能显著($P<0.05$)降低土壤 pH, 较 CK 显著降低 1.17%~

1.75%, 但各处理间无显著差异。同样, 物料使用后均能显著($P<0.05$)降低土壤电导率, 较 CK 显著降低 16.49%~49.65%。随着与木醋液配施的壳寡糖或 γ -聚谷氨酸用量的增加, 对电导率降低效果增强, 壳寡糖与木醋液配施对电导率的降低效果优于 γ -聚谷氨酸与木醋液配施。7 种处理的土壤有机质由大到小的顺序为: C3>C2>P3>C1>P2>P1>CK, 处理 C3、C2、P3 有机质含量较 CK 分别显著($P<0.05$)提升 15.44%、8.88%、8.30%, 其他处理有机质含量较 CK 提升 4.63%~7.53%, 但尚未达到显著差异。

表 2 高分子材料配施木醋液条件下的土壤基本性质

Table 2 Basic soil properties under the condition of polymer materials mixed with wood vinegar

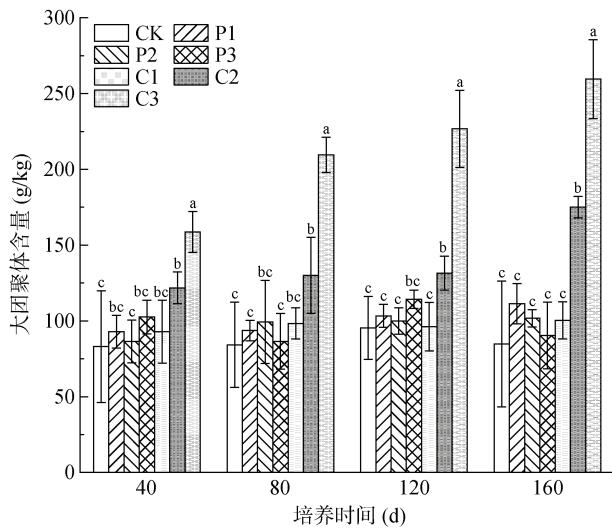
处理	pH	电导率($\mu S/cm$)	有机质(g/kg)
CK	8.55 ± 0.05 a	$2\ 044.00 \pm 9.85$ a	5.18 ± 0.15 c
P1	8.45 ± 0.04 b	$1\ 707.00 \pm 26.06$ b	5.42 ± 0.23 bc
P2	8.45 ± 0.03 b	$1\ 386.67 \pm 73.28$ c	5.51 ± 0.31 bc
P3	8.41 ± 0.06 b	$1\ 121.33 \pm 35.36$ e	5.61 ± 0.16 ab
C1	8.45 ± 0.05 b	$1\ 306.67 \pm 68.16$ cd	5.57 ± 0.17 bc
C2	8.45 ± 0.35 b	$1\ 265.33 \pm 75.65$ d	5.64 ± 0.11 ab
C3	8.40 ± 0.05 b	$1\ 029.10 \pm 63.49$ e	5.98 ± 0.33 a

注: 同列小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 高分子材料配施木醋液对土壤团聚体的影响

2.2.1 粒径>0.25 mm 大团聚体 图 1 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤大团聚体含量。由图 1 可见, 各培养时期 C3 处理的大团聚体含量均为最高且均与同期其他处理差异显著, 在各时期较 CK 分别显著($P<0.05$)提高 91.20%、148.81%、137.88% 和 206.01%。C2 处理的大团聚体含量仅低于 C3 处理且在各时期均与 CK 差异显著, 在 40、80、120 和 160 d 较 CK 分别显著($P<0.05$)提高 46.75%、54.39%、37.88% 和 106.49%。随着培养时间延长, C3 和 C2 处理的大团聚体含量均逐渐增大。其他处理各时期的土壤大团聚体含量较 CK 也有一定程度的提高, 40、80、120 和 160 d 时较 CK 分别提升 4.10%~23.49%、2.73%~17.93%、0.94%~19.83% 和 6.60%~31.25%。由此可见, 壳寡糖配施木醋液对土壤大团聚体含量有明显的提升效果且随着壳寡糖用量的增加而增强。

2.2.2 粒径 0.053~0.25 mm 微团聚体 图 2 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤微团聚体含量。从培养 80 d 开始, P3 处理的土壤微团聚体含量均在各处理中最大, 培养 80、120、160 d 时其微团聚体含量分别为 510.10、458.23 和 434.90 g/kg, 分别较 CK 提



(柱图上方小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下同)

图1 高分子材料配施木醋液条件下的土壤大团聚体含量
Fig. 1 Soil macroaggregate contents under condition of polymer materials combined with wood vinegar

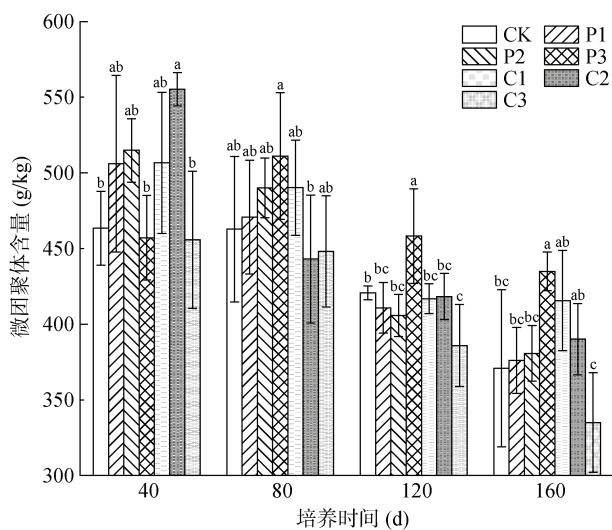


图2 高分子材料配施木醋液条件下的土壤微团聚体含量
Fig. 2 Soil microaggregate contents under condition of polymer materials combined with wood vinegar

高 10.44%、8.91% 和 17.26%，在培养 120 d 和 160 d 时与 CK 差异显著($P<0.05$)。在 40 d 时，C2 处理的微团聚体含量最大，较 CK 显著($P<0.05$)提高 19.81%。各培养时期 C3 处理的微团聚体含量均低于 CK，分别为 455.87、448.17、385.93 和 335.00 g/kg，较 CK 分别降低 1.64%、3.15%、8.27% 和 9.68%，其中在培养 120 d 时与 CK 差异显著($P<0.05$)。由此可知，0.4% 的 γ -聚谷氨酸配施木醋液对土壤微团聚体含量总体有显著提升作用。

2.2.3 粒径<0.053 mm 黏粉粒 图3为高分子材料配施木醋液条件下的土壤黏粉粒含量。由图3可见，

各培养时期 C3 处理的黏粉粒含量均显著低于 CK，分别为 385.40、342.30、387.40 和 405.47 g/kg，较 CK 分别显著($P<0.05$)降低 15.02%、24.44%、19.96% 和 25.51%。各时期 C2 处理的黏粉粒含量也均低于 CK，分别为 322.83、426.87、450.27 和 434.80 g/kg，较 CK 分别降低 28.82%、5.76%、6.96% 和 20.13%，并且在 40 d 和 160 d 时与 CK 差异显著($P<0.05$)。各时期 P3 处理的黏粉粒含量也均低于 CK，分别为 440.33、402.40、427.53 和 474.73 g/kg，较 CK 分别降低 2.91%、11.17%、11.67% 和 12.80%，在 120 d 和 160 d 时与 CK 差异显著($P<0.05$)。说明适宜用量的高分子材料与木醋液配施能够显著降低土壤中黏粉粒含量，促进土壤团粒结构形成。

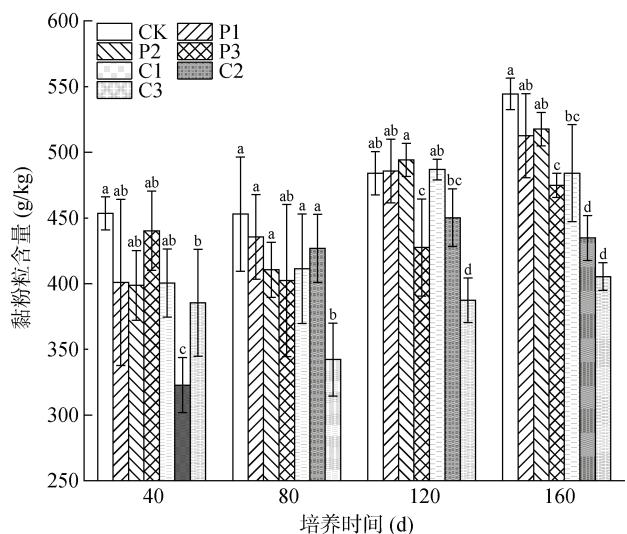


图3 高分子材料配施木醋液条件下的土壤黏粉粒含量
Fig. 3 Soil clay particle contents under condition of polymer materials combined with wood vinegar

2.2.4 平均重量直径 图4为高分子材料配施木醋液条件下的土壤团聚体平均重量直径(MWD)。各培养时期各处理均能提升土壤 MWD。由图4可知，各时期 C3 处理的 MWD 均为最大，分别为 0.51、0.64、0.67 和 0.75 mm，较 CK 分别显著($P<0.05$)提高 64.52%、100.00%、97.06% 和 141.94%。各时期 C2 处理的 MWD 均高于除 C3 外的其他处理，分别为 0.42、0.43、0.43 和 0.54 mm，较 CK 分别显著($P<0.05$)提高 35.48%、34.38%、26.47% 和 74.19%。各时期其他处理的土壤 MWD 较 CK 也有一定程度的提高，在 40、80、120 和 160 d 时较 CK 分别提高 6.45% ~ 16.13%、3.12% ~ 12.50%、0.58% ~ 14.71% 和 6.45% ~ 22.58%。可见，壳寡糖配施木醋液对土壤团聚体稳定性有显著提升效应，且随壳寡糖用量的增加而增强。

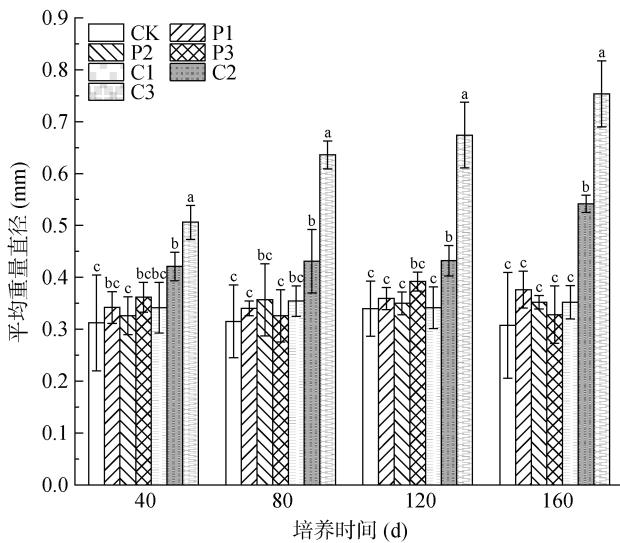


图 4 高分子材料配施木醋液条件下的土壤团聚体平均重量直径(MWD)

Fig. 4 Soil aggregate MWD under condition of polymer materials combined with wood vinegar

2.3 高分子材料配施木醋液对土壤酶活性的影响

2.3.1 过氧化氢酶活性 图 5 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤过氧化氢酶活性。各处理均能提升土壤过氧化氢酶活性，7 种处理的土壤过氧化氢酶活性由大到小的顺序为：P3>P2>C1>P1>C2>C3>CK。除处理 C2 和 C3 外，其他处理的土壤过氧化氢酶活性较 CK 显著($P<0.05$)提升 16.28%~25.80%。可见，随着 γ -聚谷氨酸用量的增加，过氧化氢酶活性逐渐增强；而随着壳寡糖用量的增加，过氧化氢酶活性逐渐减弱。

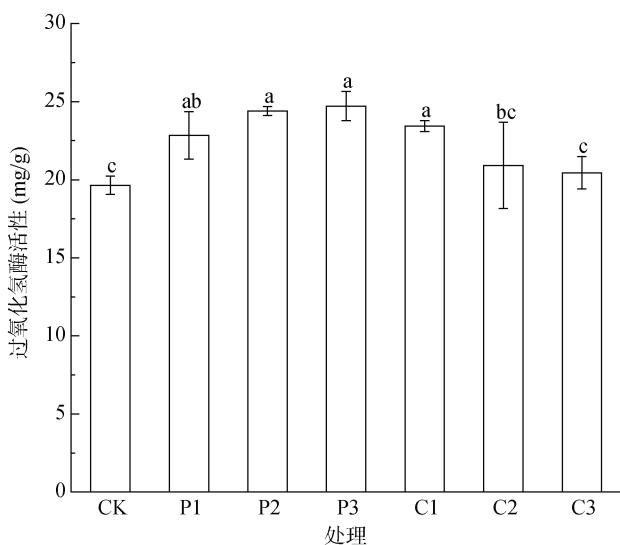


图 5 高分子材料配施木醋液条件下的土壤过氧化氢酶活性

Fig. 5 Soil catalase activities under condition of polymer materials combined with wood vinegar

2.3.2 脲酶活性 图 6 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤脲酶活性。各处理均能显著提升土壤脲酶活性，7 种处理的土壤脲酶活性由大到小的顺序为：C3>P3>P2>C2>C1>P1>CK。C3 处理的脲酶活性为 $433.738 \mu\text{g/g}$ ，显著($P<0.05$)高于其他各处理，较 CK 提升 189.76%。其余 6 组处理的土壤脲酶活性较 CK 显著($P<0.05$)提升 68.24%~81.41%。随着壳寡糖用量的增加，土壤脲酶活性逐渐增强。

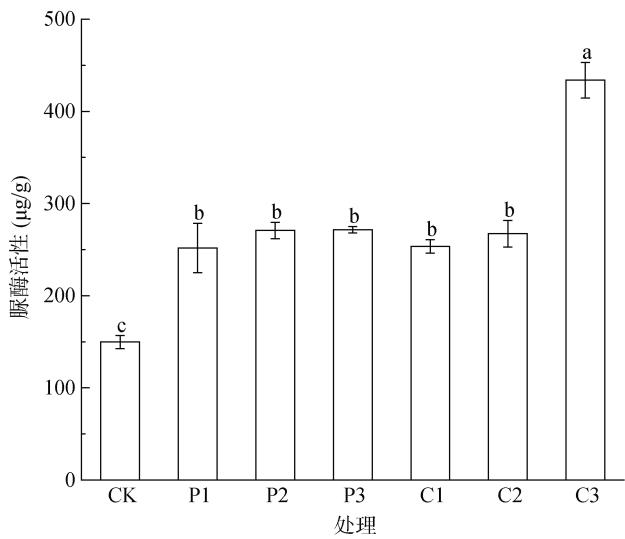


图 6 高分子材料配施木醋液条件下的土壤脲酶活性

Fig. 6 Soil urease activities under condition of polymer materials combined with wood vinegar

2.3.3 碱性磷酸酶活性 图 7 为高分子材料配施木醋液条件下的土壤碱性磷酸酶活性。7 种处理的土壤碱性磷酸酶活性由大到小的顺序为：C3>C2>C1>P3>

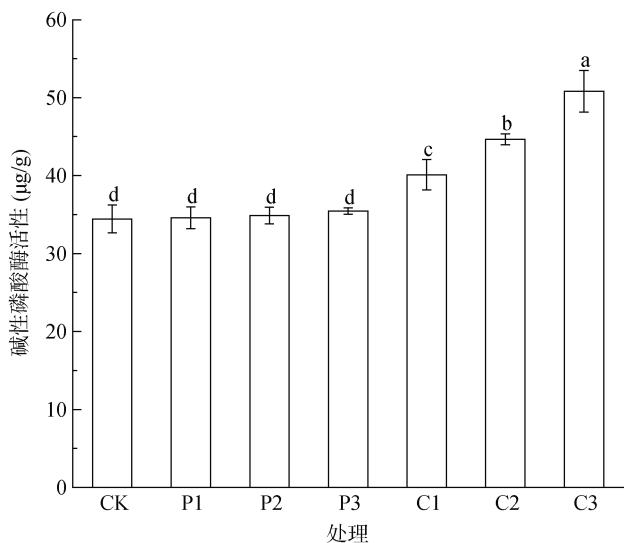


图 7 高分子材料配施木醋液条件下的土壤碱性磷酸酶活性

Fig. 7 Soil alkaline phosphatase activities under condition of polymer alkaline materials combined with wood vinegar

P2>P1>CK。不同用量的壳寡糖与木醋液配施均能够显著($P<0.05$)提升碱性磷酸酶活性,且碱性磷酸酶活性随着壳寡糖用量的增大逐渐增强,分别为40.11、44.64和50.82 $\mu\text{g/g}$,较CK分别提升16.46%、29.62%和47.56%。

2.3.4 蔗糖酶活性 图8为高分子材料配施木醋液条件下土壤蔗糖酶活性。各处理均能显著提升土壤蔗糖酶活性,7种处理的土壤蔗糖酶活性由大到小的顺序为:P3>P2>C3>C2>P1>C1>CK。随着与木醋液配施的 γ -聚谷氨酸用量的增加,土壤蔗糖酶活性逐渐增强,较CK显著($P<0.05$)提高109.46%、216.09%和350.16%;同样随壳寡糖用量增加,蔗糖酶活性增强,分别较CK显著($P<0.05$)提高84.86%、186.12%和200.00%。

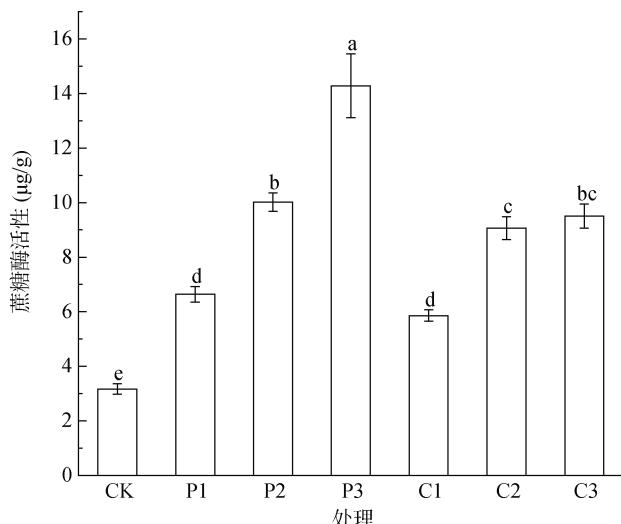


图8 高分子材料配施木醋液条件下的土壤蔗糖酶活性
Fig. 8 Soil sucrase activities under condition of polymer materials combined with wood vinegar

3 讨论

土壤pH常用来评价盐碱土壤的碱化程度,土壤盐分含量常用来评价盐碱土壤的盐化程度,而土壤电导率是常用的土壤盐分含量表征指标。壳寡糖或 γ -聚谷氨酸与木醋液配施对土壤pH和电导率有显著降低效果,并且随着物料施用量的增加,pH和电导率的降低效果逐渐增强。木醋液中50%以上的有机物质是有机酸,而乙酸是其中的主要成分,能够降低土壤pH^[18]。低浓度木醋液中的营养物质可提高微生物活性,促进微生物对元素离子利用和固定,从而降低土壤盐分浓度^[12]。 γ -聚谷氨酸通过分子链上的羟基直接与土壤碱性物质反应来降低土壤pH^[19],而壳寡糖因其自身为酸性有机物有着降低土壤pH的效果^[20]。土壤电导率与土壤中的可溶性盐分离子有着显著关

联,壳聚糖能通过络合作用降低土壤可交换阳离子总量或通过吸附低浓度游离酸降低土壤溶液中的阴离子含量^[21],从而降低土壤电导率,这可能也是作为壳聚糖衍生物的壳寡糖能够降低土壤电导率的原因。研究表明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能与 γ -聚谷氨酸中的羧基形成螯合物或与亚氨基形成分子内或者分子间的环状结构,达到去除土壤盐分的目的^[22]。这两种物料与木醋液配施能够显著降低土壤pH和电导率,可能是与木醋液优势互补。有研究表明单施木醋液对盐渍土壤中有机质含量提升并不显著,但与其他物料配施后对有机质的提升效果却高于单施的效果,说明木醋液与其他物料配施对有机质的提升效果依赖于配施物料并能够提升该物料效果^[23]。 γ -聚谷氨酸^[24]和壳寡糖^[20]均被证明能够有效提升土壤中有机质含量,本研究结果也表明在与木醋液配施的条件下,随着各物料施用量的增加,对土壤有机质的提升效应逐渐增强。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性是土壤结构和功能的重要影响因素。土壤MWD是评价土壤团聚体结构的综合指标,一般认为土壤团聚体的稳定性越强,其MWD越大。供试滨海盐渍土的团聚体主要以<0.25 mm的团聚体形式存在,表明该土壤的团聚体稳定性较差。壳寡糖与木醋液配施,能够显著提升土壤中大团聚体含量和土壤团聚体MWD。已有研究表明,施入木醋液的稀释倍数低(<10倍)时能显著提高土壤大团聚体含量,而稀释倍数增大后,对大团聚体无显著影响^[25]。而在稀酸溶液中壳聚糖分子链上大量的氨基发生质子化使其带有大量正电荷,能够借助离子键、氢键同时与多个带负电荷的土壤粒子联结形成大团粒结构^[21],这可能是稀释后的木醋液作为一种稀酸溶液和壳聚糖衍生物的壳寡糖配施后促进土壤团聚化、增强团粒结构稳定性的原因。而 γ -聚谷氨酸具有大量亲水性羟基和氨基,使其有着超强的吸附性,同时具有颗粒小、比表面积大的特点,更容易将土壤微粒胶结形成团聚体^[26]。

土壤酶是土壤新陈代谢的组成部分,是土壤生化反应活跃程度、微生物活性及养分循环状况的反映指标。木醋液含有的有机物质不仅能够为微生物提供大量碳源,通过提高微生物数量和活性进而提升营养物质需求,使其分泌与营养元素相关的酶,还能作为底物促进微生物分泌酶,最终表现出盐渍土壤的酶活性提升^[27]。施用 γ -聚谷氨酸能使盐渍土壤中蔗糖酶和脲酶活性^[10]及土壤中过氧化氢酶活性提升^[28],其与木醋液配施后对酶活性的提升与已有研究结果基本相似,而能提升土壤酶活性可能与其对微生物数量、生

物量和多样性的改变有关^[29]。甲壳素和壳聚糖能够改变土壤中微生物群落,使由其生产的土壤酶活性有所提升进而改善土壤酶系统,因此能够有效提升土壤中过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性^[30],这可能是作为甲壳素和壳聚糖衍生物的壳寡糖与木醋液配施后能提升土壤酶活性的原因。

4 结论

1) 高分子材料配施木醋液能显著降低土壤 pH,但不同物料间无显著差异;同时,土壤电导率也显著降低,且随物料用量增加,效果增强。0.2%、0.4%壳寡糖以及0.4% γ -聚谷氨酸与0.3 mL/kg 木醋液配施能显著提升土壤有机质含量。

2) 在物料应用后的40~160 d,0.2%、0.4%的壳寡糖与0.3 mL/kg 木醋液配施均能够显著提高土壤中大团聚体含量和土壤团聚体平均重量直径(MWD),从而显著提升土壤团聚体稳定性。壳寡糖与木醋液配施对土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均有显著提升,且随壳寡糖用量增加,酶活性增强;而对于过氧化氢酶活性,0.1%的壳寡糖与0.3 mL/kg 木醋液配施有显著提升。

3) 在物料应用后的80~160 d,0.4%的 γ -聚谷氨酸与0.3 mL/kg 木醋液配施能够显著提高土壤中微团聚体含量,降低土壤中黏粉粒含量。 γ -聚谷氨酸与木醋液配施对土壤过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性均有显著提升。

参考文献:

- [1] 张先凤, 朱安宁, 张佳宝, 等. 集约化种植下潮土养分肥力与团聚体特征相互关系研究[J]. 土壤, 2017, 49(1): 33~39.
- [2] 章征程, 林启美, 李漠志, 等. 耕作对河套黄灌区典型盐碱土水稳定性团聚体及有机碳和全氮含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(6): 1085~1092.
- [3] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 364~372.
- [4] 全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 等. 山黧豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(5): 1057~1067.
- [5] Yang D H, Tang L, Cui Y, et al. Saline-alkali stress reduces soil bacterial community diversity and soil enzyme activities[J]. Ecotoxicology, 2022, 31(9): 1356~1368.
- [6] 鄂玉联, 谭兰兰, 安梦洁, 等. 高分子化合物对盐渍化棉田土壤团聚体组成及棉花产量的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(11): 1989~1993.
- [7] Luo J Q, Wang L L, Li Q S, et al. Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS)[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 149: 12~20.
- [8] 宋纪雷, 李跃进, 王鼎, 等. 高分子吸附树脂与酸性材料配施对盐碱离子钝化效果研究[J]. 北方农业学报, 2018, 46(2): 31~36.
- [9] 高昊辰, 焦爱萍, 陈诚, 等. 高分子化学地膜对盐渍土壤物理性质与水分蒸发效应[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1057~1063.
- [10] 文利军. γ -聚谷氨酸对土壤水氮盐分布及冬小麦生长特性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [11] 谭兰兰. 高分子化合物改良盐渍化土壤效应研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [12] 于贝贝, 何莉莉, 杨生茂, 等. 木醋液改良盐碱土的研究进展[J]. 国土与自然资源研究, 2024(1): 62~67.
- [13] Lashari M S, Liu Y M, Li L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113~118.
- [14] 赵朋成. 生物炭与木醋液对盐碱土关键化学障碍因子的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Duan Y, Chen L, Zhang J B, et al. Long-term fertilisation reveals close associations between soil organic carbon composition and microbial traits at aggregate scales[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 306: 107169.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 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.
- [19] 张灵芝, 李蒙, 李洪义, 等. 脱硫石膏与聚谷氨酸配施对盐碱化土壤的改良效果[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 115~125.
- [20] 雷菲, 张冬明, 符传良, 等. 壳寡糖对辣椒产量、养分吸收和土壤理化性质的影响[J]. 湖南农业科学, 2021(5): 23~26.
- [21] 胡祥, 王瑞霞, 奥岩松. 壳聚糖对土壤理化性状的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 68~72.
- [22] 唐冬. γ -聚谷氨酸和耐盐植物联合修复设施栽培盐渍化土壤[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [23] 王凡. 生物炭与木醋液复配对盐渍化农田作物生长及水土环境影响试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [24] 何宇, 吕卫光, 李双喜, 等. γ -聚谷氨酸发酵液对小白菜生长及氮磷肥料利用率的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(2): 329~337.
- [25] 王富, 康永祥, 侯姣姣, 等. 灌施木醋液对土壤团聚体和侧柏生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 75~82.
- [26] 刘乐, 费良军, 陈琳, 等. γ -聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 277~282+287.
- [27] 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.
- [28] Xu Z, Wan C, Xu X, et al. Effect of poly (γ -glutamic acid) on wheat productivity, nitrogen use efficiency and soil microbes[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(3): 744~755.
- [29] Xu Z Q, Lei P, Feng X H, et al. Effect of poly(γ -glutamic acid) on microbial community and nitrogen pools of soil[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science, 2013, 63(8): 657~668.
- [30] 王艳芳, 付风云, 李家家, 等. 甲壳素对连作条件下平邑甜茶幼苗生长及土壤环境的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6218~6225.