

李文琪, 张鑫, 田亮, 等. 生物表面活性剂复配土壤调理剂对沙地土壤性质及中科羊草生长的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(5): 131-140.

LI W Q, ZHANG X, TIAN L, et al. Effects of biosurfactants combined with soil conditioner on sandy soil properties and growth of *Leymus chinensis*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(5): 131-140.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.05.15

生物表面活性剂复配土壤调理剂对沙地土壤性质及中科羊草生长的影响

李文琪¹, 张鑫¹, 田亮¹, 张凯煜¹, 李强¹, 亢福仁¹, 高茫²

(1. 榆林学院/陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000;

2. 陕西大润生态建设集团有限公司, 陕西榆林 719000)

摘要:通过大田试验, 选用不同的生物表面活性剂按相同比例和用量与土壤调理剂进行复配, 然后按一定用量施于沙地, 与沙土混合均匀, 研究鼠李糖脂(T1)、槐糖脂(T2)生物表面活性剂复配土壤调理剂对沙地土壤性质及中科羊草生长发育的影响, 探讨生物表面活性剂复配土壤调理剂的可行性。结果表明, 与空白对照相比, T1、T2处理的土壤含水率分别降低27.7%和20.9%, 土壤容重分别降低5.9%和2.9%, pH值分别降低2.3%和1.8%, 有机质含量分别提高91.1%和39.8%, 有效磷含量分别提高221.1%和90.2%, 速效钾含量分别提高16.7%和41.7%, 碱解氮含量分别提高233.2%和122.1%, 株高分别提高53.8%和46.3%, 生物量分别提高360.3%和296.9%, 叶绿素含量分别提高17.0%和14.3%。通过主成分分析得出, CK和T1、T2处理的综合评分分别为-2.99、2.24、0.74, 排名依次为T1>T2>CK, 其中, 处理T1综合评分最高。综上, 生物表面活性剂复配土壤调理剂能有效改善沙土的理化性质和促进中科羊草的生长, 其中, 鼠李糖脂复配土壤调理剂的综合改良效果最佳。

关键词:生物表面活性剂; 土壤调理剂; 沙地修复; 土壤改良; 中科羊草

中图分类号: TQ423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2025)05-0131-10

Effects of Biosurfactants Combined with Soil Conditioner on Sandy Soil Properties and Growth of *Leymus chinensis*

LI Wenqi¹, ZHANG Xin¹, TIAN Liang¹, ZHANG Kaiyu¹, LI Qiang¹, KANG Furen¹, GAO Mang²

(1. Yulin University/Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Northern Shaanxi Mining Area, Yulin 719000, China; 2. Shaanxi Darun Ecological Construction Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: In this study, by a field experiment, various biosurfactants were mixed with soil conditioners at consistent proportions and dosages. These mixtures were then applied to sandy land and sandy soil in predetermined amounts to study the effects of different biosurfactants, specifically T1(rhamnolipid) and T2(sophora glycolipid), in combination with soil conditioners on the properties of sandy soil and the growth and development of *Leymus chinensis*, and investigate feasibility of biosurfactants combined with soil conditioners. The result showed that compared to CK, for the treatments of T1 and T2, the moisture content decreased by 27.7% and 20.9%, respectively; while bulk density reduced by 5.9% and 2.9%, respectively; pH decreased by 2.3% and 1.8%, respectively; organic matter content increased significantly by 91.1% and 39.8%, respectively; available phosphorus content rose dramatically by 221.1% and 90.2%, respectively; available potassium content increased by 16.7% and 41.7%, respectively; alkali hydrolyzed nitrogen showed increases of 233.2% and 122.1%, respectively; plant height improved by 53.8% and 46.3%, respectively; biomass exhibited substantial increases of 360.3% and 296.9%, respectively; chlorophyll content increased by 17.0% and 14.3%, respectively.

收稿日期: 2025-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(32360316); 陕西省科技厅创新能力支撑计划(2022PT-13); 陕西省科技厅区域创新能力引导计划(2021QFY04-03)

作者简介: 李文琪, 在读硕士, 研究方向: 固体废弃物生态化利用, E-mail: 2393587102@qq.com

通信作者: 张凯煜, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事固体废弃物处置及生态修复研究, E-mail: 987083249@qq.com

296.9%, respectively; chlorophyll content increased by 17.0% and 14.3%, respectively. The principal component analysis showed that the comprehensive scores of CK, T1, T2 treatment were -2.99, 2.24, 0.74, and the order was T1>T2>CK, and the comprehensive score of treatment T1 was the highest. In conclusion, the combination of biosurfactants with soil conditioners effectively enhanced both physical and chemical properties within sandy soils while promoting growth of *Leymus chinensis*, with rhamnolipid combined with a soil conditioner demonstrating the best comprehensive improvement effects.

Keywords: biosurfactant; soil conditioner; sand restoration; soil improvement; *Leymus chinensis*

毛乌素沙地作为典型生态脆弱区,其土壤干旱贫瘠,养分供给能力严重不足,常年遭受风蚀,再加上异常的气候变化,使得本就脆弱的植被系统遭受更加严峻的生存压力,区域生态稳定性面临持续性挑战^[1-3]。同时,由于受到政策、自然和社会的三重影响,毛乌素沙地开垦耕地的难度大大增加^[4]。因此,毛乌素沙地治理不仅可以改良土壤性质^[5],而且对于推动生态可持续发展具有重要意义^[6]。

羊草(*Leymus chinensis*)属于禾本科赖草属^[7],主要分布在我国东北三省及内蒙古、河北、山西、陕西等地^[8]。其不仅营养丰富、繁殖力强,同时具备抗低温、抗旱^[9]、抗盐碱^[10]、耐瘠薄的特性,能适应恶劣环境,是目前我国重点推广发展的优良牧草品种之一^[11]。因此,可以通过在沙地大面积种植羊草来减缓土壤沙漠化。

土壤调理剂又称土壤改良剂,用于改良土壤结构、降低盐碱危害、调节酸碱度、改善水分状况和修复污染土壤等^[12]。朱磊等^[13]研究发现,添加煤矸石的土壤调理剂能有效改善风沙土的物理结构。孙娅辉等^[14]研究发现,施加土壤改良剂可以有效改良酸性土壤,提高枸杞果实产量和品质。陈花等^[15]研究发现,5%煤气化渣+平菇菌渣+玉米秸秆生物炭配施能有效改善煤矿区土壤的理化性质。生物表面活性剂(Biosurfactants)是由微生物、植物或动物细胞产生的具有表面活性的天然化合物,是由亲水性和疏水性2种不同基团组成的两亲性生物分子^[16]。廉梅花等^[17]和姚丹丹等^[18]研究发现,向土壤中施加表面活性剂可以提高生物修复效率,强化生物修复污染土壤。袁婷婷等^[19]研究发现,一定浓度的表面活性剂鼠李糖脂可以去除荒漠矿区土壤中Cd²⁺。石吉祥等^[20]研究发现,向土壤中施加表面活性剂能促进盆栽生菜的生长。戚兴超等^[21]研究发现,向土壤中施加低浓度的表面活性剂可以提高土壤酶活性。这些研究结果显示,土壤调理剂和生物表面活性剂均可以在一定程度上改良土壤性质和改善土壤条件,但单施生物表面活性剂作用微小,如何能高效利用生物表面活性剂改

良土壤成为亟待解决的问题,同时生物表面活性剂对毛乌素沙地土壤的具体改良效果未知。因此,生物表面活性剂复配土壤调理剂对于提高生物表面活性剂的利用效率和毛乌素沙地土壤的改良治理具有重要的研究价值。

与之前施用单一生物表面活性剂的研究不同,本研究针对毛乌素沙地土壤的特性,以中科羊草为研究对象,将不同的生物表面活性剂与土壤调理剂进行复配,采用田间随机分组的方法,研究不同生物表面活性剂(鼠李糖脂和槐糖脂)复配土壤调理剂对毛乌素沙地土壤性质以及中科羊草生长的影响,以期为毛乌素沙地的治理提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于榆林市榆阳区芹河镇,地理坐标为东经109°30′12″,北纬38°21′53″,地势最高点海拔为1 173.57 m,最低点海拔为1 170.81 m,无霜期为134~169 d,全年平均气温10.2℃,年平均降水量406.9 mm。昼夜温差大,日照充足,春季干燥多风,夏季炎热少雨,秋季降雨较多且温度变化较大,冬季寒冷干燥。试验地土壤类型为风沙土,土壤pH值为8.63,偏碱性。

1.2 试验材料

供试中科羊草种子购于大地种子公司,鼠李糖脂、槐糖脂购于华远食品配料商城,土壤调理剂由陕北矿区生态修复重点实验室自主研发。

1.3 试验设计

试验于2024年4月25日开始布置,采用随机区组设计,设置3个处理,分别按照表1的设计方案施入生物表面活性剂和土壤调理剂。试验每个小区面积为5.50 m×2.92 m,设3个重复。首先将需要施加的生物表面活性剂和土壤调理剂按施加方案称量好混合在一起,之后均匀撒在沙土表面,然后用微耕机翻耕20~30 cm。中科羊草种子采取条播的方式于5月初播种,播种深度2 cm,行距

40 cm,播种量为 7 g/m²。定期除草,每隔 7 d 人工浇水一次,植物生长期间不施肥。

表 1 生物表面活性剂和土壤调理剂配方方案
Tab.1 Application scheme of biosurfactant and soil conditioner in different treatments kg/m²

处理 Treatment	土壤调理剂施加量 The application amount of soil conditioner	生物表面活性剂施加量 The application amount of biosurfactant
CK	0	0
T1	2.87	鼠李糖脂 30
T2	2.87	槐糖脂 30

1.4 测定指标及方法

试验于 2024 年 6 月开始进行数据测定。其中,土壤容重、含水率、植物叶绿素含量于 7、8、9 月中旬每月测定一次;植物株高和生物量于 6、7、8、9 月中旬每月测定一次;土壤 pH 值、有机质含量和养分含量于 8 月中旬植物生长最旺盛的时候测定一次。所有采集的土壤样本和植物样本均重复 3 次。

1.4.1 土壤含水率 用土钻分别取 0~20、20~40 cm 土层的土样置于铝盒,于 105 °C 烘干至恒质量后计算土壤含水率。

土壤含水率^[22](W)=(原土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100% (1)

1.4.2 土壤容重 其采用环刀法测定。

土壤容重($d, g/cm^3$)= $m/(V(1+W))$ (2)

式中, m 为环刀内湿土质量(g), V 为环刀容积(cm^3),为 100 cm^3 ; W 为样品含水率(%)[²²]。

1.4.3 土壤 pH 将风干土样与去离子水按体积比 1:5 混合,振荡 2~3 min 后,静置 30 min,过滤,用 PHSJ-3F 实验室 pH 计测定。

1.4.4 土壤有机质和养分含量 有机质含量采用硫酸-重铬酸钾外加热法测定;速效钾(AK)含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[23]。

1.4.5 植物株高和生物量 植物株高是用直尺测量根茎部到生长点的长度;植物生物量采用烘干法测定^[24]。

1.4.6 植物叶绿素含量 采用型号为 SPAD-502 的叶绿素仪对中科羊草的叶片进行测定。

1.5 数据分析

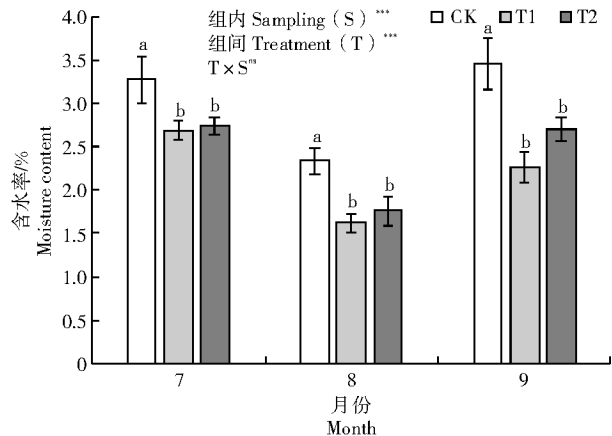
采用 Excel 2010 进行统计绘图;采用 SPSS

23.0 进行差异性水平($P<0.05$)分析、重复测定方差分析(将处理设为组间变量,月份设为组内变量,以 $P<0.05$ 作为差异有统计学意义的标准)以及主成分分析;采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对沙地土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤含水率 由图 1 可知,经主体内效应分析,组内效应差异极显著($P<0.001$),即同一处理在不同月份的土壤含水率变化存在差异,具有时间变化趋势;组内与组间的交互效应差异不显著,表示处理与月份不存在交互作用,即不同处理在各月份的土壤含水率具有相同的变化趋势。经主体间效应分析,组间效应差异极显著($P<0.001$),即不同处理在同一月份的土壤含水率变化存在差异。



不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。*表示在 0.05 水平差异显著;**表示在 0.01 水平差异极显著;***表示在 0.001 水平差异极其显著;ns 表示差异不显著($P>0.05$)。下同

Different lowercase letters in the figure indicated significant differences at 0.05 level($P<0.05$). * indicated a significant difference at 0.05 level; ** indicated a highly significant difference at 0.01 level; *** indicated an extremely significant difference at 0.001 level; ns indicated no significant difference($P>0.05$). The same as below

图 1 各处理在各月份对土壤含水率的影响

Fig.1 Effects of different treatments on soil moisture content in each month

由图 1 还可知,在 3 个月中,T1 和 T2 处理的土壤含水率均显著低于 CK($P<0.05$)。其中,8 月的土壤含水率较 7 月有所降低,而 9 月又有所升高,整体土壤含水率随时间推进呈现先降低后升高的趋势。其中,T1 和 T2 处理的土壤含水率在

3 个月中均没有显著差异。将各月及 3 次重复的数据进行综合计算得出,与 CK 相比,T1、T2 处理土壤含水率分别降低 27.7% 和 20.9%,其中,T1 处理的土壤含水率最低,7、8、9 月的土壤含水率均显著低于 CK,分别降低了 17.7%、30.8% 和 34.5%。由此得出,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂后,沙地土壤的含水率均得到降低,其中,T1 处理(加鼠李糖脂)的含水率降低最为明显。

2.1.2 土壤容重 由图 2 可知,经主体内效应分析,组内效应差异显著($P < 0.05$),即同一处理在不同月份的土壤容重变化存在差异,具有时间变化趋势;组内与组间的交互效应差异不显著,表示处理与月份不存在交互作用,即不同处理在各月的土壤容重具有相同的变化趋势。经主体间效应分析,组间效应差异极显著($P < 0.001$),即不同处理在同一月份的土壤容重变化存在差异。由图 2 还可知,在 3 个月中,T1 和 T2 处理的土壤容重均显著低于 CK($P < 0.05$)。其中,8 月的土壤容重较 7 月有所升高,而 9 月又有所降低,整体土壤容重随时间推进呈现先升高后降低的趋势。其中,T1、T2 处理的土壤容重在 3 个月均呈现显著差异($P < 0.05$),T1 处理的土壤容重均显著低于 T2 处理。将各月及 3 次重复的数据进行综合计算得出,与 CK 相比,T1、T2 处理土壤容重分别降低 5.9% 和 2.9%,其中,T1 处理的土壤容重最低,7、8、9 月的土壤容重均显著低于 CK($P < 0.05$),分别降低了 6.1%、6.7% 和 4.8%。由此得出,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂后,沙地土壤容重均得到降低,其中,T1 处理(加鼠李糖脂)土壤容重降低最为明显。

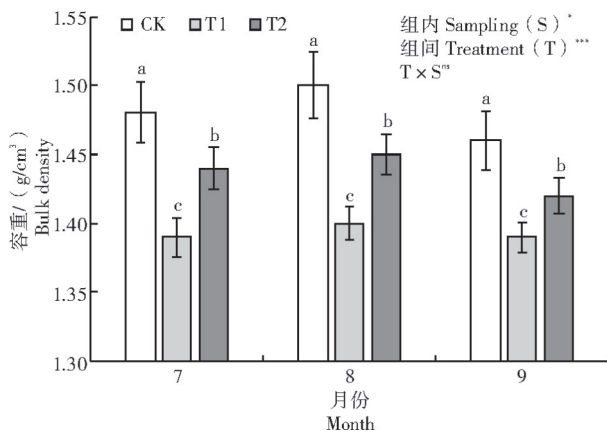


图 2 各处理在各月份对土壤容重的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil bulk density in each month

2.2 不同处理对沙地土壤化学性质的影响

2.2.1 土壤 pH 从图 3 可以看出,综合平均 3 次独立重复,T1 处理的土壤 pH 值显著低于 CK($P < 0.05$),T2 处理的土壤 pH 值与其他处理差异不显著,其中,T1 处理的 pH 值最低,达到了 8.22。与 CK 相比,T1、T2 处理的土壤 pH 值分别降低了 2.3% 和 1.8%。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂对于降低土壤 pH 值有显著作用,其中,T1 处理(加鼠李糖脂)的效果最为明显。

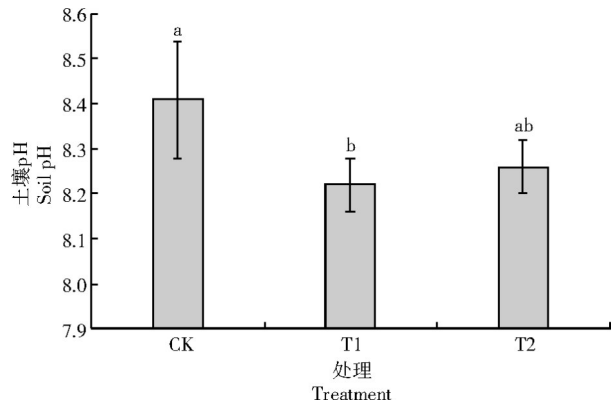


图 3 各处理对土壤 pH 值的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil pH

2.2.2 土壤有机质含量 从图 4 可以看出,综合平均 3 次独立重复,T1 和 T2 处理的有机质含量显著高于 CK($P < 0.05$),T1 处理的有机质含量又显著高于 T2 处理($P < 0.05$)。与 CK 相比,T1、T2 处理的有机质含量分别提高了 91.1% 和 39.8%。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂对于提高土壤有机质含量有显著作用,其中,T1 处理(加鼠李糖脂)的效果最为明显。

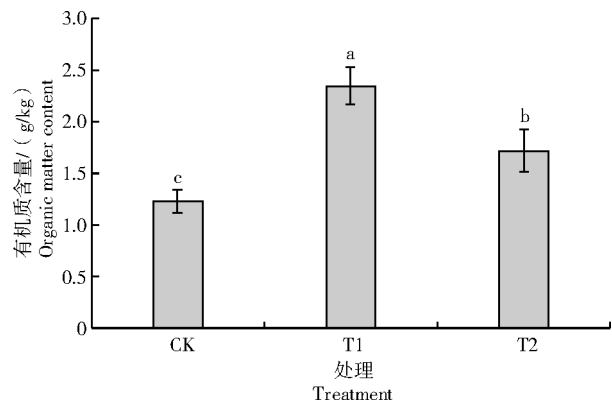


图 4 各处理对土壤有机质含量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on soil organic matter content

2.2.3 土壤速效养分含量 从图5可以看出,综合平均3次独立重复,T1、T2处理的有效磷含量显著高于CK($P<0.05$),T1处理的有效磷含量显著高于T2处理($P<0.05$),T1处理的有效磷含量最高,达到了4.27 mg/kg;T2处理的速效钾含量显著高于CK($P<0.05$),T1处理与T2处理和CK间均没有显著性差异,T2处理的速效钾含量最高,达到了34 mg/kg;T1、T2处理的碱解氮含量均显著高于CK($P<0.05$),T1处理的碱解氮含量又显著高于T2处理($P<0.05$),T1处理的碱解氮含量最高,达到了8.13 mg/kg。与CK相比,T1、T2处理的有效磷含量分别提高221.1%和90.2%,速效钾含量分别提高16.7%和41.7%,碱解氮含量分别提高233.2%和122.1%。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂能显著提高土壤速效养分含量,其中,T1处理(加鼠李糖脂)的效果最为明显。

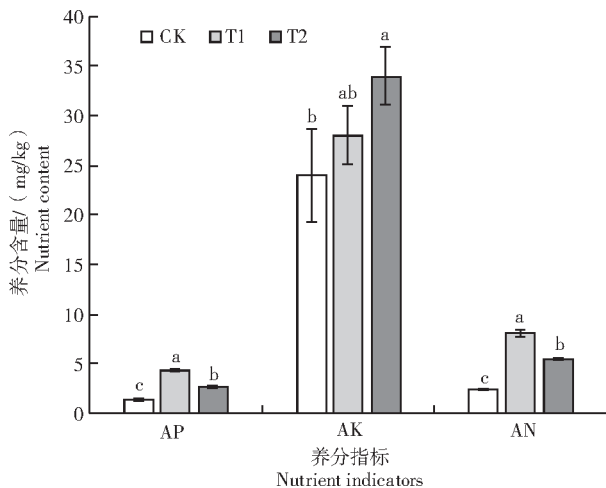


图5 各处理对土壤养分含量的影响

Fig.5 Effects of different treatments on soil nutrient content

2.3 不同处理对中科羊草生长发育的影响

2.3.1 株高 从图6可以看出,经主体内效应分析,组内效应差异极显著($P<0.001$),即同一处理在不同月份的中科羊草株高变化存在差异,具有时间变化趋势;组内与组间的交互效应差异极显著($P<0.001$),表示处理与月份存在交互作用,即不同处理在各月份的中科羊草株高具有不同的变化趋势。经主体间效应分析,组间效应差异极显著($P<0.001$),即不同处理在同一月份的中科羊草株高变化存在差异。从图6还可以看出,在4个

月份中,T1、T2处理的株高都显著高于CK($P<0.05$)。整体上,中科羊草株高随时间推进呈现上升的趋势,其中,6—7月株高提升最为迅速,而7—9月提升速度渐缓。其中,T1、T2处理在6月的株高差异不显著,7、8月的株高呈现显著差异($P<0.05$),9月的株高差异又不显著。将各月及3次重复的数据进行综合计算得出,与CK相比,T1、T2处理的株高分别提高53.8%和46.3%,其中,T1处理的株高最高,6、7、8、9月的株高均显著高于CK,分别提高了45.9%、55.9%、54.6%和59.0%。由此得出,施用不同生物表面活性剂复配土壤调理剂对中科羊草的株高都有一定提升,其中,T1处理(加鼠李糖脂)的效果最为明显。

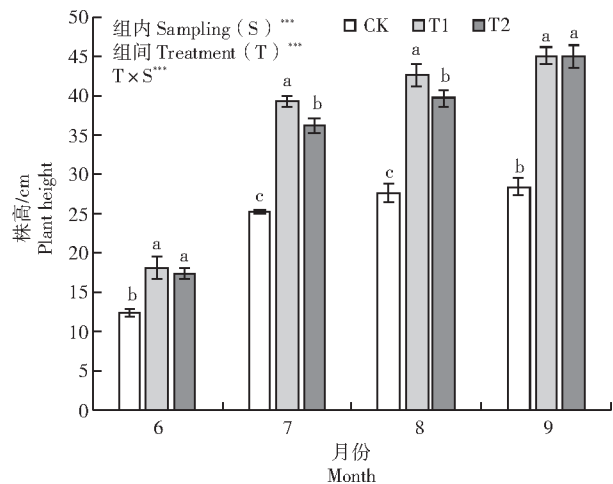


图6 各处理在各月份对中科羊草株高的影响

Fig.6 Effects of different treatments on plant height of *Leymus chinensis* in each month

2.3.2 生物量 从图7可以看出,经主体内效应分析,组内效应差异极显著($P<0.001$),即同一处理在不同月份的中科羊草生物量变化存在差异,具有时间变化趋势;组内与组间的交互效应差异极显著($P<0.001$),表示不同处理与各月份存在交互作用,即不同处理在各月份的中科羊草生物量具有不同的变化趋势。经主体间效应分析,组间效应差异极显著($P<0.001$),即不同处理在同一月份的中科羊草生物量变化存在差异。从图7还可以看出,在4个月份中,T1、T2处理的生物量均显著高于CK($P<0.05$)。整体上,中科羊草生物量随时间推进呈现上升的趋势,其中,6—7月生物量增长最为迅速,7—8月增长较为缓慢,8—9月又呈现迅速增长趋势。其中,T1、T2处理在6月的生

物量差异不显著,7月的生物量呈现显著差异($P < 0.05$),8、9月的生物量差异不显著。将各月及3次重复的数据进行综合计算得出,与CK相比,T1、T2处理的生物量分别提高360.3%和296.9%,其中,T1处理的生物量最高,6、7、8、9月的生物量均显著高于CK,分别提高了222.6%、509.1%、348.4%和316.0%。由此得出,施用不同生物表面活性剂复配土壤调理剂对中科羊草的生物量都有一定提升,其中,T1处理(加鼠李糖脂)的效果最为明显。

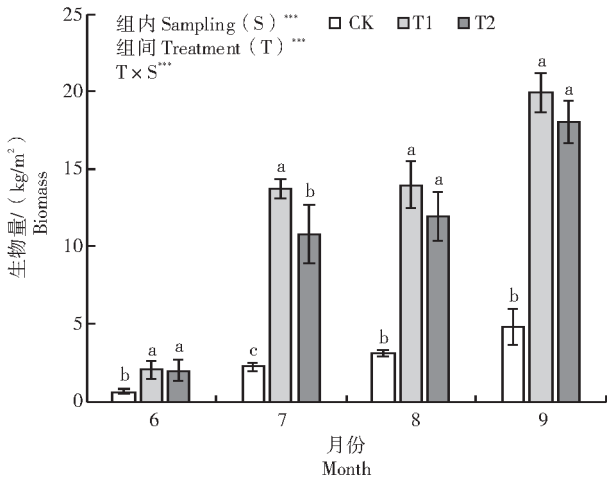


图7 各处理在各月份对中科羊草生物量的影响
Fig.7 Effects of different treatments on the biomass of *Leymus chinensis* in each month

2.3.3 叶绿素含量 由图8可知,经主体内效应分析,组内效应差异不显著,即同一处理在不同月份的中科羊草叶绿素含量变化不存在差异,不具有时间变化趋势;组内与组间的交互效应差异不显著,表示不同处理与各月份不存在交互作用,即不同处理在各月份的中科羊草叶绿素含量具有相同的变化趋势。经主体间效应分析,组间效应差异极显著($P < 0.01$),即不同处理在同一月份的中科羊草叶绿素含量变化存在差异。从图8还可以看出,在3个月中,T1、T2处理的植物叶绿素含量均显著高于CK($P < 0.05$)。整体上,中科羊草的叶绿素含量随时间推进趋于稳定,其中,T1、T2处理的叶绿素含量在3个月中均没有显著差异。将各月及3次重复的数据进行综合计算得出,与CK相比,T1、T2处理的叶绿素含量分别提高17.0%和14.3%,其中,T1处理的叶绿素含量最高,7、8、9月的叶绿素含量均显著高于CK($P < 0.05$),分别提高

了23.9%、13.1%和14.1%。由此得出,施用不同生物表面活性剂复配土壤调理剂对中科羊草的叶绿素含量都有一定提升,其中,T1处理(加鼠李糖脂)的效果最为显著。

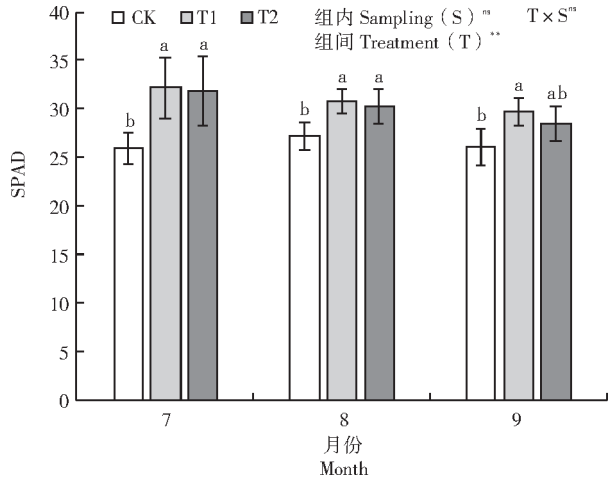


图8 各处理在各月份对中科羊草叶绿素含量的影响
Fig.8 Effects of different treatments on chlorophyll content of *Leymus chinensis* in each month

2.4 建立综合评价体系

根据研究结果,与空白对照相比,所实施的2种不同生物表面活性剂复配土壤调理剂的处理对毛乌素沙地土壤的理化性质及中科羊草的生长发育均产生了不同程度的影响。然而,单一指标难以全面反映各处理的综合改良效能。因此,利用指标之间的相关性进行主成分分析及建立综合效应评价,并依据各处理的综合评分结果,确定最佳处理方案。

2.4.1 改良效果评价指标相关性分析 从表2可以看出, X_1 与 X_2 、 X_3 呈强正相关,与 X_6 呈中度负相关,与 X_{10} 呈完全负线性相关,与其余指标呈强负相关; X_2 与 X_3 呈强正相关,与 X_6 呈中度负相关,与 X_4 、 X_5 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 呈强负相关; X_3 与 X_6 呈中度负相关,与 X_4 、 X_5 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 呈强负相关; X_4 与 X_6 呈中度正相关,与 X_5 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 呈强正相关; X_5 与 X_6 呈弱正相关,与 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 呈强正相关; X_6 与 X_8 呈强正相关,与 X_7 、 X_9 、 X_{10} 呈中度正相关; X_7 与 X_8 、 X_9 、 X_{10} 呈强正相关; X_8 与 X_9 、 X_{10} 呈强正相关; X_9 与 X_{10} 呈强正相关。由此得出,10个指标之间均存在一定的相关性。因此,可采用主成分分析的方法进一步分析。

表2 各指标相关系数矩阵

Tab.2 Correlation coefficient matrix of each index

指标	Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1		1.000									
X_2		0.998	1.000								
X_3		0.985	0.971	1.000							
X_4		-0.976	-0.988	-0.923	1.000						
X_5		-0.968	-0.982	-0.910	0.999	1.000					
X_6		-0.529	-0.471	-0.668	0.330	0.298	1.000				
X_7		-0.993	-0.998	-0.957	0.995	0.991	0.422	1.000			
X_8		-0.932	-0.906	-0.981	0.830	0.811	0.801	0.881	1.000		
X_9		-0.966	-0.947	-0.996	0.886	0.870	0.730	0.928	0.994	1.000	
X_{10}		-1.000	-0.995	-0.990	0.969	0.960	0.554	0.989	0.942	0.973	1.000

注: X_1 . 含水率; X_2 . 容重; X_3 . pH; X_4 . 有机质含量; X_5 . 有效磷含量; X_6 . 速效钾含量; X_7 . 碱解氮含量; X_8 . 株高; X_9 . 生物量; X_{10} . 叶绿素含量。

Note: X_1 . Moisture content; X_2 . Bulk density; X_3 . pH; X_4 . Organic matter content; X_5 . Available phosphorus content; X_6 . Available potassium content; X_7 . Alkali hydrolyzed nitrogen content; X_8 . Plant height; X_9 . Biomass; X_{10} . Chlorophyll content.

2.4.2 各成分的特征根与方差贡献率分析 从表3可以看出,主成分 P_1 和 P_2 的特征根分别为8.96和1.04,贡献率分别为89.6%和10.4%,累计贡献率达100.0%,其可代表10个指标的全部信息。

表3 各主成分的特征根和贡献率

Tab.3 Characteristic root and contribution rate of each principal component

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
Principal component	Characteristic root	Contribution rate	Cumulative contribution rate
P_1	8.96	89.6	89.6
P_2	1.04	10.4	100.0

2.4.3 特征向量及主成分表达式分析 所选的10个指标对应2个主成分 P_1 、 P_2 的相关系数如表4所示。 P_1 和 P_2 主成分与初始指标的关系函数表达式如公式(3)(4)所示。

表4 主成分的特征向量

Tab.4 Characteristic vectors of principal components

指标	Index	P_1	P_2	指标	Index	P_1	P_2
X_1		-0.997	0.074	X_6		0.591	0.807
X_2		-0.990	0.141	X_7		0.981	-0.195
X_3		-0.995	-0.099	X_8		0.956	0.292
X_4		0.957	-0.292	X_9		0.983	0.185
X_5		0.946	-0.324	X_{10}		0.999	-0.046

$$P_1 = -0.333X_1 - 0.331X_2 - 0.332X_3 + 0.320X_4 + 0.316X_5 + 0.197X_6 + 0.328X_7 + 0.319X_8 + 0.328X_9 + 0.334X_{10} \quad (3)$$

$$P_2 = 0.073X_1 + 0.139X_2 - 0.097X_3 - 0.287X_4 - 0.318X_5 + 0.793X_6 - 0.192X_7 + 0.287X_8 + 0.182X_9 - 0.045X_{10} \quad (4)$$

2.4.4 改良效果综合评价 各项指标的数据标准化处理后,将主成分 P_1 、 P_2 代入综合评价方程(5),得出各处理的综合得分。

$$P = 0.896P_1 + 0.104P_2 \quad (5)$$

CK和T1、T2处理的得分分别为-2.99、2.24、0.74,排名依次为T1>T2>CK,由此可以看出,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂后,T1、T2处理得分均高于CK,其中,T1处理(鼠李糖脂复配土壤调理剂)的综合评分最高。

3 结论与讨论

3.1 生物表面活性剂复配土壤调理剂对土壤物理性质的影响

土壤含水率是衡量土壤水分状况的重要指标,土壤含水率较高说明土壤有较好的保水性,而土壤含水率较低说明土壤保水性较差,但是其孔隙度较大,有利于植物根系深扎、吸收养分,从而促进植物生长。本研究结果显示,施用生物表面活性剂降低了土壤的含水率,这与饶品华等^[25]研究发现的“表面活性剂降低了土壤的持水量”的结果一致。这可能是由于生物表面活性剂在土壤粒子上形成一层吸附层或单分子层,降低了土壤粒子的界面张力,增加了孔隙度,从而降低了土壤的保水性能。但是毛乌素沙地常年缺水,植物离开水分难以存活,所以,如何提高土壤的保水性能至

关重要。孙自亮^[26]研究发现,保水剂能增强土壤的持水能力,减少水分蒸发和渗漏损失。马玉等^[27]研究发现,鼠李糖脂与保水剂联合可以吸附荒漠矿区土壤中的 Cd^{2+} ,并且其吸附效率大于施加单一物质的吸附效率。因此,本试验在未来的拓展中,可以利用生物表面活性剂与保水剂的联合作用,将土壤调理剂同时与生物表面活性剂和保水剂复配,以此改善试验中沙地土壤含水率低的问题并达到吸附土壤中重金属离子的目的,其为毛乌素沙地实施土壤修复和生态修复提供了新思路。土壤容重是衡量土壤松紧程度和孔隙状况的重要指标。本研究结果显示,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂降低了土壤的容重,这与彭奥翔^[28]研究发现的“施用一定量的鼠李糖脂可以显著降低土壤容重”的结果一致。这可能是由于生物表面活性剂和土壤调理剂中的有机肥促使土粒之间吸附叠加形成团聚体,增加了土壤的孔隙度和渗透性。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂通过降低土壤含水率和容重,改善了土壤的物理性质。

3.2 生物表面活性剂复配土壤调理剂对土壤化学性质的影响

土壤 pH 值是衡量土壤化学性质的重要指标,土壤 pH 值较高或较低都会影响土壤养分的有效性和有机质的分解,从而抑制植物的生长。本研究结果表明,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂可以降低土壤 pH 值,这与寇威等^[29]研究发现的“有机肥配施鼠李糖脂可以改良土壤环境,降低土壤 pH 值”的结果一致。这可能是由于生物表面活性剂本身具有酸性基团并且促进了产酸微生物的生长以及有机质分解产生有机酸,从而降低了土壤 pH 值。土壤有机质和养分含量是衡量土壤肥力的重要指标。本研究结果表明,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂可以提高土壤有机质和养分含量。张才芳^[30]研究发现,在蔗叶还田的基础上,增施生物表面活性剂可提高土壤有效磷、速效钾、速溶有机碳和可溶性有机氮含量,这与本研究结果一致。这可能是由于生物表面活性剂促进了土壤调理剂中有机质的分解,释放出更多的养分,同时促进了土壤中微生物的生长和活动,加速了有机态养分向无机态养分转化。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂通过降低土壤 pH 值、提高土壤有机质和养分含量,改善了土壤的化学

性质。

3.3 生物表面活性剂复配土壤调理剂对中科羊草生长的影响

株高直观反映植物的生长趋势,生物量反映植物的物质积累能力和评估植物生产力,它们都是衡量植物生长状况的重要指标。本研究结果表明,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂可以提高中科羊草的株高和生物量,这与邓杰勇^[31]研究发现的“施用 0.4 g/L 的表面活性素可以促进小白菜种子的萌发和幼苗的生长”以及邓红梅等^[32]研究发现的“低浓度(≤ 0.6 mmol/L)阴离子表面活性剂 SDS 能促进番茄幼苗的生长”的结果一致。这可能是由于生物表面活性剂增加了植物根系细胞膜的通透性,扩大了植物根系的吸收范围,提高了植物对养分的吸收效率;同时生物表面活性剂可促进微生物与植物形成共生关系,帮助植物吸收养分、分泌生长激素等。叶绿素是衡量植物光合能力的重要指标。本研究结果表明,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂可以提高中科羊草的叶绿素含量,这与张丹丹^[33]研究发现的“灌溉鼠李糖脂可以提高小白菜的叶绿素含量”的结果一致。这可能是由于生物表面活性剂降低了植物叶片表面的张力,促进叶片表面气孔张开,增加 CO_2 的吸收量,从而提高光合作用效率,增加植物叶绿素含量。由此可见,生物表面活性剂复配土壤调理剂通过提高植物株高、生物量和叶绿素含量,促进了植物的生长。

本试验结果表明,与 CK 相比,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂处理的土壤含水率、容重和 pH 值降低,土壤有机质含量和养分(有效磷、速效钾和碱解氮)含量得到显著提升,中科羊草的株高、生物量和叶绿素含量得到显著提升。主成分综合评分排名依次为 $T1 > T2 > CK$,其中,处理 T1(鼠李糖脂复配土壤调理剂)的综合评分最高,达到了 2.24。综上所述,施用生物表面活性剂复配土壤调理剂可以有效改善毛乌素沙地土壤的理化性质和促进中科羊草的生长发育,可以作为治理毛乌素沙地的有效措施。

参考文献:

- [1] 杨新乐. 种子处理及土壤改良对毛乌素沙地主要草本植物适应干旱环境的影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
YANG X L. Main herbaceous plants adapted to arid environment with seed treatment and soil improvement in Mu Us Des-

- ert[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2014.
- [2] 王德富.毛乌素沙地植被恢复对土壤剖面碳氮水分布的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
WANG D F. The impacts of vegetation restoration on carbon, nitrogen and water distribution in soil deep profile of the Mu Us Sandy Land[D]. Yangling:Northwest A & F University,2024.
- [3] 周炎广,武子丰,胡日娜,等.毛乌素沙地新垦地土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(1):138-147.
ZHOU Y G, WU Z F, HU R N, et al. Characteristics of soil wind erosion in new reclamation land of Mu Us sandy land, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1):138-147.
- [4] 李河.陕北榆林毛乌素沙地新开垦耕地空间分布特征:以靖边县为例[J].安徽农业科学,2021,49(21):79-81.
LI H. Spatial distribution characteristics of newly reclaimed cultivated land in mu us sandy land of Yulin, northern Shaanxi: a case study of Jingbian County[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(21):79-81.
- [5] 王志,彭茹燕,王蕾,等.毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究[J].水土保持学报,2006,20(2):14-16.
WANG Z, PENG R Y, WANG L, et al. Studies on soil properties of aeolian sandy land improvement and utilization in south edge of musu desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2):14-16.
- [6] 高晓宇.毛乌素沙地生态治理现状与未来高质量农业发展对策[J].农业灾害研究,2023,13(9):248-250.
GAO X Y. The current situation of ecological governance of maowusu sandy land and future[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2023, 13(9):248-250.
- [7] 刘国兵,焦德志,周婵.羊草生物学和生态学特性研究进展[J].生态科学,2024,43(6):193-199.
LIU G B, JIAO D Z, ZHOU C. Advances in studies on biological and ecological characteristics of *Leymus chinensis*[J]. Ecological Science, 2024, 43(6):193-199.
- [8] 刘公社,齐冬梅.羊草生物学研究进展[J].草业学报,2004,13(5):6-11.
LIU G S, QI D M. Research progress on the biology of *Leymus chinensis*[J]. Acta Pratacultural Science, 2004, 13(5):6-11.
- [9] 李怡.羊草种质资源抗旱性综合评价及抗旱相关基因表达研究[D].北京:中国农业科学院,2019.
LI Y. Comprehensive evaluation on drought-resistance of *Leymus chinensis* germplasm resources and research on expression of drought-resistant related gene[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [10] 郭秀芳,屈璐璐,贾振宇,等.羊草耐盐碱性研究进展[J].草原与草业,2022,34(1):11-13.
GUO X F, QU L L, JIA Z Y, et al. Research progress on salt and alkaline tolerance of *Leymus chinensis*[J]. Grassland and Prataculture, 2022, 34(1):11-13.
- [11] 焦德志,林立东,丁雪梅,等.扎龙保护区不同生境羊草种群生物量的年龄结构[J].黑龙江畜牧兽医,2008(11):42-43.
JIAO D Z, LIN L D, DING X M, et al. Age structure of *Leymus chinensis* population biomass in different habitats in Zhalong Nature Reserve[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2008(11):42-43.
- [12] 中华人民共和国农业部.土壤调理剂效果试验和评价要求:NY/T 2271—2012[S].北京:中国农业出版社,2013.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Requirements for soil conditioner effect test and evaluation: NY/T 2271-2012[S]. Beijing:China Agricultural Press, 2013.
- [13] 朱磊,古文哲,刘小铭,等.煤矸石土壤调理剂对毛乌素沙地柳枝稷生长的影响[J].山西农业科学,2024,52(5):60-67.
ZHU L, GU W Z, LIU X M, et al. Effect of coal gangue soil conditioner on growth of switch grass in Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(5):60-67.
- [14] 孙娅辉,郑中兵,字楠华,等.不同土壤改良剂对芒果果实产量和品质的影响[J].河南农业科学,2024,53(8):118-125.
SUN Y H, ZHENG Z B, ZI N H, et al. Effects of different soil amendments on yield and quality of mango fruit[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(8):118-125.
- [15] 陈花,刘娜,姚晓倩,等.改良基质对煤矿区土壤理化性质的优化[J].山西农业科学,2025,53(1):90-100.
CHEN H, LIU N, YAO X Q, et al. Optimization improved substrates on soil physical and chemical properties in coal mining area[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1):90-100.
- [16] 张岑茜,余跃惠,张凡,等.生物表面活性剂资源化处理含油污泥研究进展[J].应用化工,2024,53(9):2145-2150.
ZHANG C Q, SHE Y H, ZHANG F, et al. Research progress of biosurfactant resource treatment of oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(9):2145-2150.
- [17] 廉梅花,曾祥峰,马阳阳,等.表面活性剂强化生物修复重金属和多环芳烃污染土壤研究进展[J].生态学杂志,2024,43(9):2813-2823.
LIAN M H, ZENG X F, MA Y Y, et al. Surfactant-enhanced bioremediation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9):2813-2823.
- [18] 姚丹丹,王辉,田坤,等.土壤多环芳烃污染生物表面活性剂强化修复的研究进展[J].应用化工,2023,52(1):164-170.
YAO D D, WANG H, TIAN K, et al. Research on biosurfactant-enhanced remediation in PAHs-contaminated soil [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(1):164-170.
- [19] 袁婷婷,马玉,王志强,等.鼠李糖脂对荒漠矿区土壤重金属镉的去除效率研究[J].矿业研究与开发,2020,40(11):117-122.
YUAN T T, MA Y, WANG Z Q, et al. Removal efficiency of rhamnolipid on heavy metal of cadmium in desert mining soil[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11):117-122.
- [20] 石吉祥,王劲松,刘秋霞,等.表面活性剂对生菜生长及水氮运移的影响[J].灌溉排水学报,2024,43(4):50-58.
SHI J X, WANG J S, LIU Q X, et al. Effect of surfactants on lettuce growth and water and nitrogen transport in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4):50-58.
- [21] 戚兴超,刘艳丽,焦安昊,等.离子型表面活性剂对菠菜生长与土壤酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1048-1055.
QI X C, LIU Y L, JIAO A H, et al. Effects of ionic surfactants on spinach growth and soil enzyme activities[J]. Journal

- of Agro-Environment Science, 2016, 35(6): 1048-1055.
- [22] 黄素芳, 芮松青, 岳明强, 等. 金丝小枣园自然生草对果实品质及土壤养分的影响[J]. 北方园艺, 2018(16): 55-60.
HUANG S F, RUI S Q, YUE M Q, et al. Effects of natural grass on fruit quality and soil nutrient in Jinsi jujube orchard [J]. Northern Horticulture, 2018(16): 55-60.
- [23] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 科学技术出版社, 1977: 73-78.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physicochemical analysis[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1977: 73-78.
- [24] 艾锋, 张生, 李强, 等. 蚯蚓肥复配土壤调理剂对盐碱地土壤性质及中科羊草生长的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(5): 531-538.
AI F, ZHANG S, LI Q, et al. Effects of earthworm fertilizer mixed with soil conditioner on soil properties in saline alkali land and the growth of *Leymus chinensis*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(5): 531-538.
- [25] 饶品华, 肖稳发, 徐普利, 等. 表面活性剂对土壤持水特性的影响及其数学模拟[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(1): 19-23.
RAO P H, XIAO W F, XU J L, et al. Effects of surfactants on soil water retention characteristics and its mathematic simulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science), 2009, 27(1): 19-23.
- [26] 孙自亮. 保水剂对土壤水肥特性及玉米产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(12): 43-49.
SUN Z L. Effects of water retaining agents on water and fertilizer properties of soil and maize yield[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2024, 52(12): 43-49.
- [27] 马玉, 汪溪远, 师庆东, 等. 保水剂与鼠李糖脂联合吸附荒漠矿区土壤Cd的效率研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(11): 82-88.
MA Y, WANG X Y, SHI Q D, et al. Study on the combined adsorption efficiency of water retaining agent and rhamnolipid on Cd in soil of desert mining area[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 82-88.
- [28] 彭奥翔. 鼠李糖脂改土效果及对平邑甜茶生长影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
PENG A X. Effect of rhamnolipid on soil amelioration and growth of *Malus hupehensis*[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [29] 寇威, 刘佳月, 卢可欣, 等. 有机肥与鼠李糖脂和氯化胆碱配施对盐渍土性质和番茄生长及耐盐性的影响[J/OL]. 中国农业科技导报, 2025: 1-13. [2025-07-28]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2024.0100>.
KOU W, LIU J Y, HU K X, et al. Effect of organic fertilizer with rhamnolipid and choline chloride on properties of saline soils and growth and salt tolerance of tomatoes[J/OL]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025: 1-13. [2025-07-28]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2024.0100>.
- [30] 张才芳. 蔗叶还田深度和生物表面活性剂对土壤养分和微生物群落的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
ZHANG C F. Effects of sugarcane leaves amendmentsto different soil depth and biosurfactanton soil nutrition and microbial community[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [31] 邓杰勇. 表面活性素对小白菜等作物生长及叶面肥上应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
DENG J Y. Studies of surfaction on growth of Chinese cabbage and other crops and application on foliar application[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [32] 邓红梅, 周天. 阴离子表面活性剂 SDS 对番茄幼苗若干生理指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15321-15323.
DENG H M, ZHOU T. Effect of anionic surfactant SDS on some physiological indexes of tomato seedling[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(35): 15321-15323.
- [33] 张丹丹. 鼠李糖脂对基质栽培小白菜抗盐性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHANG D D. Effect of rhamnosin on salt resistance of Chinese cabbage in matrix cultivation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.