

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.031

引用格式:李治,武涛,曹丽,等.玉米芯菌糠配比对垂穗披碱草生长及土壤性状的影响[J].草地学报,2026,34(5):1910—1920

LI Zhi, WU Tao, CAO Li, et al. Effects of Corncob Fungus Chaff Ratio on the Growth and Soil Properties of *Elymus nutans*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1910—1920

玉米芯菌糠配比对垂穗披碱草生长及土壤性状的影响

李治¹, 武涛¹, 曹丽¹, 曹晶晶¹, 林刚^{1,2}, 赵雅姣^{1*}, 王诗涛¹, 杨君娟¹

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 国家林业和草原局高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃省自然资源规划研究院, 甘肃兰州 730030)

摘要:本研究通过设置0%, 20%, 40%, 60%四种玉米芯菌糠添加比例的盆栽试验, 探讨其对垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)种子发芽、生长特性、光合特性及盐碱土性状的影响, 明确适宜的菌糠添加比例。结果表明, 菌糠添加对垂穗披碱草生长及土壤性状影响显著($P < 0.05$)。40%添加量处理的效果最优, 其发芽率、发芽势、株高、叶面积、干物质积累及光合效率均显著优于其他处理; 20%添加量处理可显著提升垂穗披碱草净光合速率和气孔导度。60%添加量处理则使土壤pH值、盐分及容重分别较对照降低4.71%, 30.00%, 54.81%, 土壤含水量与孔隙度分别提高31.79%, 26.07%。相关性分析显示, 土壤pH值、盐分与发芽率、土壤含水量、孔隙度与干物质积累均呈显著正相关关系。综上, 40%的玉米芯菌糠添加量最适宜垂穗披碱草发芽及苗期生长, 且可有效改良盐碱土物理性质。

关键词:玉米芯菌糠; 垂穗披碱草; 发芽特性; 生长特性; 土壤性状

中图分类号: S541

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)05-1910-11

Effects of Corncob Fungus Chaff Ratio on the Growth and Soil Properties of *Elymus nutans*

LI Zhi¹, WU Tao¹, CAO Li¹, CAO Jing-jing¹, LIN Gang^{1,2}, ZHAO Ya-jiao^{1*},
WANG Shi-tao¹, YANG Jun-juan¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. Gansu Provincial Natural Resources Planning and Research Institute, Lanzhou, Gansu Province 730030, China)

Abstract: In this study, a pot experiment with four addition ratios (0%, 20%, 40%, and 60%) of Corncob Fungus Chaff (CFC) was carried out to investigate their effects on seed germination, growth characteristics, photosynthetic traits, and saline-alkali soil properties of *Elymus Nutans*, and to identify the optimal addition ratio. The results showed that the addition of CFC significantly affected the growth of *E. Nutans* and soil properties ($P < 0.05$); the 40% addition ratio yielded the optimal effects, with its germination rate, germination potential, plant height, leaf area, dry matter accumulation, and photosynthetic efficiency being significantly superior to those of the other treatments; the 20% addition ratio significantly enhanced the net photosynthetic rate and stomatal conductance of *E. nutans*; the 60% addition ratio reduced soil pH, salinity, and bulk density by 4.71%, 30.00%, and 54.81% compared with the control, respectively, while increasing soil water content and porosity by 31.79% and 26.07%, respectively. Correlation analysis indicated that soil pH and salinity were significantly positively correlated with seed germination rate, and soil water content and porosity were sig-

收稿日期: 2025-05-28; 修回日期: 2025-07-29

基金项目: 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-07); 甘肃省高校青年博士支持项目(2024QB-076); 甘肃农业大学公招博士科研启动经费(GAU-KYQD-2020-18)资助

作者简介: 李治(2001-), 男, 汉族, 海南琼海人, 硕士研究生, 主要从事牧草栽培方向研究, E-mail: 1813539603@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhaoyjj@gsau.edu.cn

nificantly positively correlated with dry matter accumulation. In summary, the 40% CFC addition ratio is most suitable for the germination and seedling growth of *E. nutans*, and can effectively improve the physical properties of saline-alkali soil.

Key words: Corn cob fungus chaff; *Elymus nutans*; Germination characteristics; Vegetative character; Soil properties

盐碱土广泛分布于全球干旱、半干旱区域^[1]。在我国,盐碱土问题主要集中在西北地区,特别是甘肃省的河西地区盐碱土问题较为突出,主要表现为土壤中可溶性盐分含量较高,土壤pH值通常在8.0至9.5之间,且土壤结构紧实、透水性差,导致土壤肥力低下,植物生长受限^[2]。根据相关研究,河西地区盐碱土面积已达到约300 km²,且随着气候变化及人类活动的加剧,盐碱化的进程仍在加速^[3]。该地区若不能有效进行盐碱土改良,必然会进一步制约农业生产及生态环境的可持续发展。对于盐碱土的改良,主要有物理、化学和生物改良法。物理改良方法通常使用深耕、表土覆膜以及翻耕等,能够短期内改善土壤的物理性质,提高土壤的通透性,但长期使用可能导致土壤结构恶化及土壤疲劳^[4]。化学改良法的常用措施为施用石膏、硫酸铝、硫磺等改良剂。这些方法虽能有效降低土壤盐分含量,但其应用成本较高,且可能对土壤和环境产生负面影响^[5],例如石膏(尤其是工业副产品磷石膏)常含镉、铅等重金属,长期大量施用易造成土壤污染^[6]。传统物理和化学改良方法在可持续性和环境安全性方面存在明显短板,因此,亟需探索更为绿色、经济且长效的盐碱土治理策略。

近年来,生物改良技术在土壤修复领域的关注度持续攀升,其中以农业有机废弃物为基础的改良手段因兼具环保性与资源循环性,已在土壤质量提升方面取得显著进展^[7]。据此,本研究以菌糠这一特定有机废弃物为核心研究对象,重点探究其改良盐碱土质量的实际效应。食用菌菌糠是指栽培食用菌后剩余的培养基质,具有较强的水分保持能力,可以改善盐碱土的水分状况,促进植物生长^[8]。同时,食用菌废弃菌糠作为一种富含有机物质的农业废弃物,微生物活性高,含有丰富的氮、磷、钾等植物营养元素,能够显著提升土壤的有机物质含量,改善土壤的物理结构,并提高土壤微生物群落的多样性,从而提升土壤肥力^[9],有效改良土壤板结^[10]。食用菌废弃菌糠与秸秆等其他有机废弃物相比,在土壤中的分解速度较快,能够迅速释放养分,提供植物所需的生长物质。甘肃省河西地区食

用菌产业的发展使得菌糠废料的产量巨大,对于这些菌糠废料,传统的处理方法通常是将其堆积或焚烧,这不仅浪费资源,还可能带来环境污染。若能够将这些废弃物有效利用,不仅能够缓解食用菌菌糠肥料的大量堆积引起的环境污染等问题,还可以提高对废弃物的资源利用率,推动农业的可持续发展。因此,如何合理利用废弃菌糠,已成为当前亟待解决的问题^[11]。

本团队前期研究发现,玉米芯菌糠疏松多孔、保水透气,富含有机物质、氮磷钾等养分,且含活性菌群与酶活性^[12]。关于玉米芯菌糠在牧草生长方面影响的研究很少,根据这些特点,本研究假设玉米芯菌糠可对盐碱土进行改良并促进牧草的生长。垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)作为一种优良的耐盐碱草本植物,广泛分布于我国西北地区,具有较强的耐盐性,在生态脆弱区的应用尤为广泛,既能支持畜牧业可持续发展,又能维护生态平衡。垂穗披碱草不仅能够在高盐环境下正常生长,而且能通过根系对盐分有效排除,表现出显著的盐碱耐性^[13-14]。因此,本研究选择垂穗披碱草作为试验植物,旨在通过盆栽试验评估不同玉米芯菌糠含量对盐碱土的改良和对垂穗披碱草发芽及生长的影响,为废弃菌糠的合理利用,以及盐碱地的生态恢复提供新的解决方案和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验取土于甘肃农业大学武威黄羊镇牧草试验站(37°55' N, 102°40' E)。该试验站年降水量150 mm,年均温7.2℃,年蒸发量2019.9 mm,海拔1550.88 m,无霜期154 d,属于温带干旱荒漠气候,土壤类型为沙壤土,土质属于轻中度盐碱化,试验前两年没有种植过作物。

垂穗披碱草(购买于甘肃绿丰源农业发展有限责任公司,一级种子,发芽率为95%,本试验仅观察苗期,因此计划35天后进行收获)。

1.2 试验设计

本试验于2024年8月28日在甘肃农业大学草业学院试验室内进行,采用盆栽土培试验,土壤取自黄羊镇盐碱土,土壤指标如下:pH值为8.46,土壤有机质含量为 $14.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $0.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $6.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $13.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $136.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $57.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验设置4个玉米芯菌糠添加比例处理组,分别为:对照组(CK,0%添加量),1500 g纯土壤;试验组 T_1 (20%添加量),300 g玉米芯菌糠与1200 g土壤混合;试验组 T_2 (40%添加量),600 g玉米芯菌糠与900 g土壤混合;试验组 T_3 (60%添加量),900 g玉米芯菌糠与600 g土壤混合。各组混合后总重均为1500 g。试验中每个花盆内的土壤以及玉米芯菌糠的重量都通过电子秤准确称取后混合,玉米芯菌糠的处理方式为放入塑料收纳箱内捏碎,以免体积过大不便与土壤混合,混合方式为称取完成一个花盆的量后放入另一个塑料收纳箱内用手搅拌直至完全混合后完全倒入花盆内。每个处理组设有3个重复,共计12盆,每个花盆体积为3.9 L(花盆的长宽高尺寸为 $20\text{ cm}\times 15\text{ cm}\times 13\text{ cm}$)。播种前的试验原土壤记为NS,与CK的区别是该土壤未经过任何菌糠处理且不种植垂穗披碱草,有利于测定时观察到原土壤与CK和各处理组的区别。

每盆均匀撒播100粒大小均一的垂穗披碱草种子,覆盖约1 cm厚的土层,土层为黄羊镇土壤,因为土壤混合玉米芯菌糠后呈颗粒状,有一定的体积,不便于覆盖,以此促进种子发芽。在种子出苗前,为保持土壤表面湿润,用喷壶进行每日2次喷水,喷水时间分别为早上9点和下午19点,每次200 mL,每次喷水前都用量筒称取后倒入喷壶,并在花盆上方覆盖有小孔的保鲜膜,种子出苗后取下保鲜膜,为确保垂穗披碱草正常生长,每隔1 d对植株进行灌溉,每次浇水量为300 mL,以保证土壤的湿度适宜,试验期间不施加任何的肥料。试验种植后放置于光照培养箱中进行生长,生长条件为:光照时间为16 h,光照强度为6000 lx,温度为 25°C ;黑暗时间为8 h,温度为 15°C ,湿度为65%,以确保适宜的光照条件。

试验于种子出苗后定期进行发芽率和株高等相关指标的监测,并每隔5 d对其生长速率进行测定,最后于35 d时进行取样,对其生物量积累、光合

特性以及土壤特性进行测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发芽率相关指标 发芽率(%)=(发芽种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ 。从播种后第3 d开始,每日上午9:00肉眼观察统计出苗数(以胚芽鞘突破土表 $\geq 1\text{ cm}$ 为标准),连续观测至出苗稳定(于种植25 d后观察到无新苗出土,且连续观察3 d无新苗出土)。

发芽势(%)=(前五天发芽种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ 。在发芽初期(一般3~5 d内),每日上午9:00观察统计正常发芽种子的数量,计算发芽势。

1.3.2 形态及生长速率相关指标 株高(cm):于出苗后第10 d,20 d,30 d(苗期关键节点)测定。从每个处理的3盆中各选取生长健壮的10株幼苗,用电子游标卡尺(精度0.01 cm)测量从土壤表面到最顶端展开叶叶尖的垂直高度,取平均值作为该处理株高值。

增长速率($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$):根据株高测定结果计算,公式为:增长速率($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)= $[n+10\text{天株高均值}-N\text{天株高均值}]/10\text{ d}$,其中, $n=10,20,30$,分别对应苗期前、中、后期的生长速率)。

叶面积(cm^2):每个处理随机选取5株幼苗,每株取完全展开的功能叶,采用尺子测量,计算公式为:叶片长度(cm,叶尖至叶鞘基部) $\times$ 最大宽度(cm) $\times 0.75$ (苗期叶片校正系数),每片叶重复测量3次取平均值。

根系长度(cm):在收获时,小心取出整株幼苗(避免根系损伤),用流水冲洗根系附着的土壤,滤纸吸干表面水分后,使用根系扫描仪测定。

干物质含量(%):每个处理随机选取5株幼苗,将地上部(茎、叶)与地下部(根系)分离,用蒸馏水冲洗后用滤纸吸干水分,分别称量鲜重。随后置于烘箱中 105°C 杀青30 min,调至 80°C 烘干至恒重(连续2次称量差值 $\leq 0.001\text{ g}$),用电子天平(精度 0.0001 g)称量干重。计算公式为:地上部干物质含量(%)=(地上部干重/地上部鲜重) $\times 100\%$;根系干物质含量(%)=(根系干重/根系鲜重) $\times 100\%$;单株总干物质积累量(g)=地上部干重+根系干重。

1.3.3 植物叶绿素和光合性状相关指标 叶绿素含量(Soil plant analysis development, SPAD值):采用丙酮提取法测定总叶绿素的含量;使用LI-6400XT光合作用测定仪(Li-cor公司,美国)于晴天

的上午9:00—11:00进行净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)和胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)等指标的测定^[15]。

1.3.4 土壤性状相关指标 土壤pH值:称取5 g鲜土样,按水土比1:2.5加入无 CO_2 蒸馏水,用磁力搅拌器(转速 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)搅拌15 min,静置30 min后,用上海雷磁PHS-3C型pH计(经标准缓冲液校准)测定上清液pH值,每个样品重复测定3次取平均值。

土壤盐分含量:称取10 g鲜土样,按水土比1:5加入蒸馏水,振荡30 min(转速 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),定性滤纸过滤,取上清液用DDS-307型电导率仪测定 25°C 时的电导率(Electrical conductivity,简称 $EC_{1:5}$),盐分含量(%)= $EC_{1:5}(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})\times 0.012$ (盆栽土壤校正系数),每个样品重复测定3次取平均值。

土壤容重(Soil bulk density):于每盆对角线上取2个0~10 cm土层样品,用体积 100 cm^3 的不锈钢环刀采集原状土后称量环刀+湿土质量, 105°C 烘干至恒重后称量环刀+干土质量,容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)=(干土质量/环刀体积),每个处理重复测定6次(3盆 $\times$ 2次)取平均值。

土壤含水量(Soil water content):称取20 g鲜土样,置于已知质量的铝盒中, 105°C 烘干至恒重(约24 h),计算:含水量(%)=(鲜土质量-干土质量)/干土质量 $\times 100\%$,每个样品重复测定3次取平均值。

土壤孔隙度(Soil porosity):(1-容重/颗粒密度) $\times 100\%$ (颗粒密度取 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[16]。

1.4 数据分析

采用SPSS 27.0进行数据分析,并通过单因素方差分析法和邓肯法对数据进行方差分析和多重比较,使用Origin进行作图。

2 结果与分析

2.1 添加玉米芯菌糠对垂穗披碱草种子发芽的影响

由图1可知,发芽率方面, T_2 显著高于CK($P<0.05$)和 T_3 ($P<0.01$),且 T_3 显著低于 T_1 ($P<0.05$);发芽势方面,CK显著高于 T_3 ($P<0.05$),但均显著低于 T_1 和 T_2 ($P<0.01$),同时 T_1 和 T_2 的发芽势均显著高于 T_3 ($P<0.01$),且 T_2 显著高于 T_1 ($P<0.05$)。

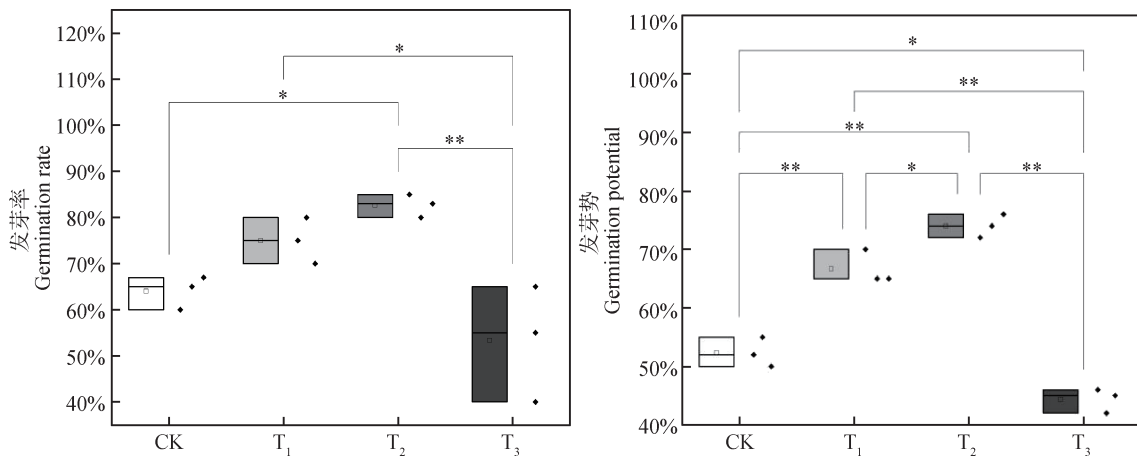


图1 不同含量的玉米芯菌糠对种子发芽率和发芽势的影响

Fig. 1 Effects of different corn cob fungus chaff spent mushroom substrate on seed germination rate and germination potential
注:CK, T_1 , T_2 和 T_3 分别表示不添加玉米芯菌糠处理、添加20%玉米芯菌糠处理、添加40%玉米芯菌糠处理和添加60%玉米芯菌糠处理,*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$),下同

Note: CK, T_1 , T_2 and T_3 represent no corn cob fungus chaff treatment, 20% corn cob fungus chaff treatment, 40% corn cob fungus chaff treatment and 60% corn cob fungus chaff treatment, respectively. * indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$), the same as below

2.2 添加玉米芯菌糠对垂穗披碱草幼苗生长的影响

2.2.1 株高及生长速率 由图2可知,株高方面,在第10天时, T_1 和 T_3 显著高于CK($P<0.05$),其中 T_1 显著高于 T_3 ($P<0.05$), T_2 和CK差异不显著;在

第20天时, T_1 和 T_2 略高于CK,但差异不显著;第30天时, T_2 显著高于CK($P<0.05$)。生长速率方面,第10天时, T_1 和 T_3 均显著高于CK($P<0.05$),且 T_1 显著高于 T_3 ;第20天时, T_2 生长速率略高于CK;第30天时, T_1 和 T_2 均显著高于CK($P<0.05$)。

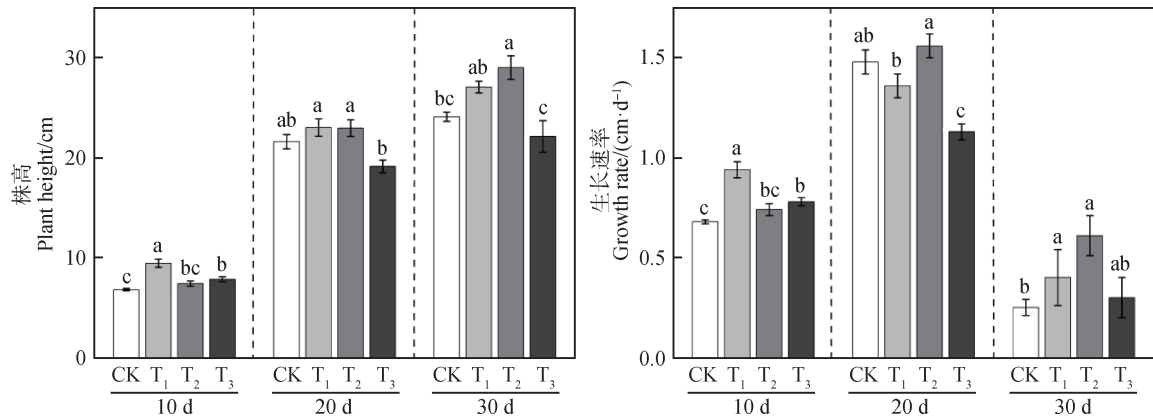


图2 不同添加的玉米芯菌糠对幼苗株高和生长速率的影响

Fig. 2 Effects of different additions of corn cob fungus chaff on seedling height and growth rate

注:不同小写字母表示不同玉米芯菌糠添加量间差异显著($P < 0.05$),字母相同表示差异不显著。下同

Note: Different lowercase letters indicated that there was a significant difference in the amount of corn cob fungus chaff added ($P < 0.05$), and the same letter indicated that the difference was not significant. The same as below

2.2.2 根长及叶面积 由图3可知,根系长度方面, T_2 显著高于CK, T_1 , T_3 ($P < 0.05$),且 T_2 , T_3 与CK间无显著

差异;叶面积方面, T_2 显著高于 T_1 ($P < 0.05$),极显著高于CK和 T_3 ($P < 0.01$), T_1 , T_3 与CK间无显著差异。

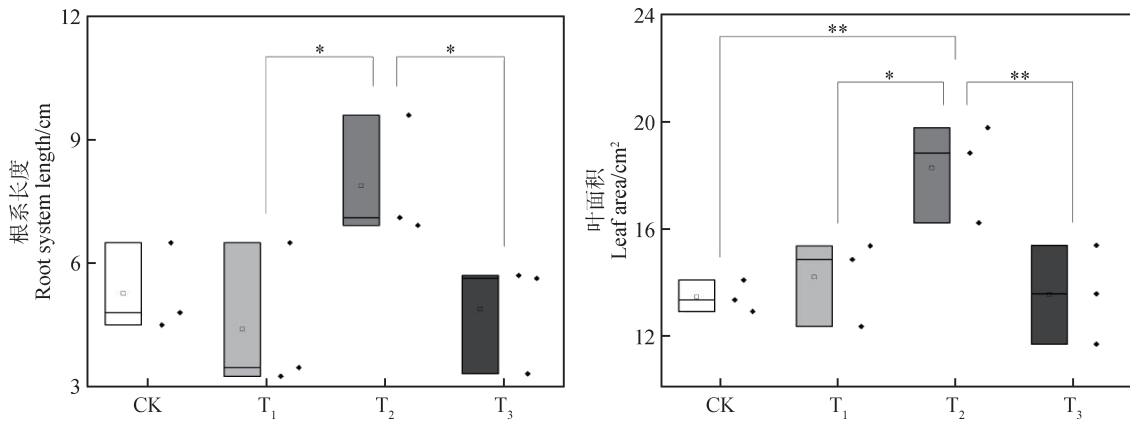


图3 不同添加量的玉米芯菌糠对幼苗根长和叶面积的影响

Fig. 3 Effects of different amounts of corn cob fungus chaff spent mushroom substrate on root length and leaf area of seedlings

2.2.3 干物质含量、根冠比 由图4可知, T_2 和 T_3 的干物质含量显著高于CK ($P < 0.05$), T_2 的根冠比显著高于CK和 T_3 ($P < 0.01$), T_1 的根冠比显著高于CK ($P < 0.05$)。

2.3 添加玉米芯菌糠对垂穗披碱草幼苗光合效率特性的影响

由表1可知,3个不同比例玉米芯菌糠添加处理的叶绿素含量显著高于CK ($P < 0.05$), T_1 的净光合速率显著高于CK ($P < 0.05$), T_3 的蒸腾速率显著低于其他处理 ($P < 0.05$), T_1 的气孔导度显著高于其他处理 ($P < 0.05$), T_1 和 T_2 的胞间 CO_2 浓度显著高于CK和 T_3 ($P < 0.05$)。

2.4 添加玉米芯菌糠对垂穗披碱草土壤性状的影响

2.4.1 土壤pH值及土壤盐分 由图5可知,随着玉米芯菌糠施用量的增加,土壤的pH值和盐分含量均呈下降趋势,其中,3个不同比例玉米芯菌糠添加处理较播种前的土壤和CK处理pH值都显著降低 ($P < 0.05$), T_3 处理组的土壤盐分含量较CK显著降低30.00% ($P < 0.05$)。

2.4.2 土壤容重、土壤含水量及土壤孔隙度 由图6可知,随着玉米芯菌糠添加量的增加,土壤容重逐渐降低,其中3个不同的玉米芯菌糠添加处理较播种前的土壤和CK处理土壤容重都显著降低 ($P < 0.05$), T_3 处理的土壤容重显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。随着玉米芯菌糠添加量的增加,

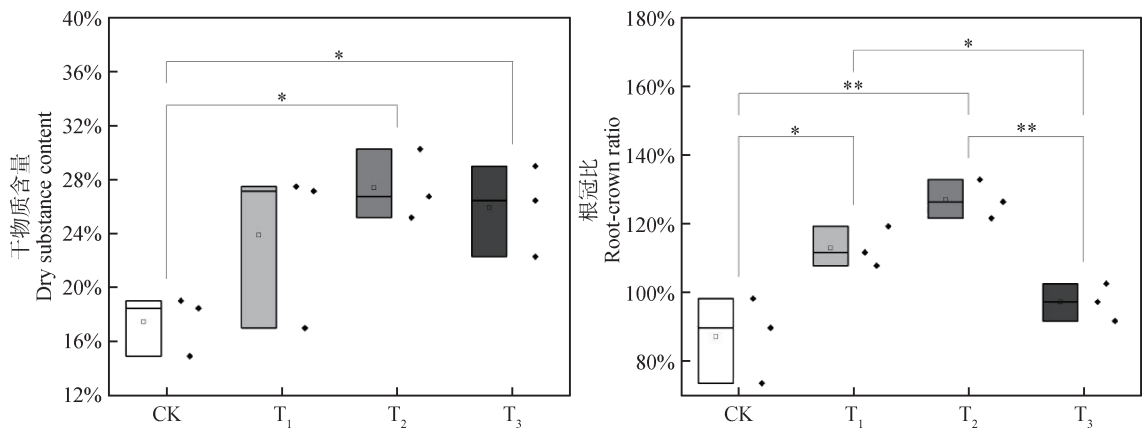


图 4 不同添加量的玉米芯菌糠对幼苗干物质含量和根冠比的影响

Fig. 4 Effects of different amounts of corncob fungus chaff spent mushroom substrate on dry matter content and root-shoot ratio of seedlings

表 1 不同添加量的玉米芯菌糠对叶绿素和气体交换参数的影响

Table 1 Effects of different amounts of corncob fungus chaff spent mushroom substrate on chlorophyll and gas exchange parameters

处理 Treatment	叶绿素含量 Chl/ (mg·g ⁻¹)	净光合速率 P _n / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	蒸腾速率 T _r / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 G _s / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 C _i / (μmol·mol ⁻¹)
CK	1.10±0.03 ^b	7.09±0.62 ^b	6.72±1.15 ^a	190.3±20.85 ^b	295.35±4.45 ^c
T ₁	1.33±0.03 ^a	12.32±1.12 ^a	7.97±1.26 ^a	237.18±8.99 ^a	306.85±2.07 ^{ab}
T ₂	1.39±0.03 ^a	10.85±1.50 ^{ab}	7.90±0.83 ^a	177.17±8.91 ^b	314.34±2.95 ^a
T ₃	1.29±0.08 ^a	9.80±1.00 ^{ab}	5.64±0.18 ^b	133.66±8.79 ^c	298.80±1.30 ^{bc}

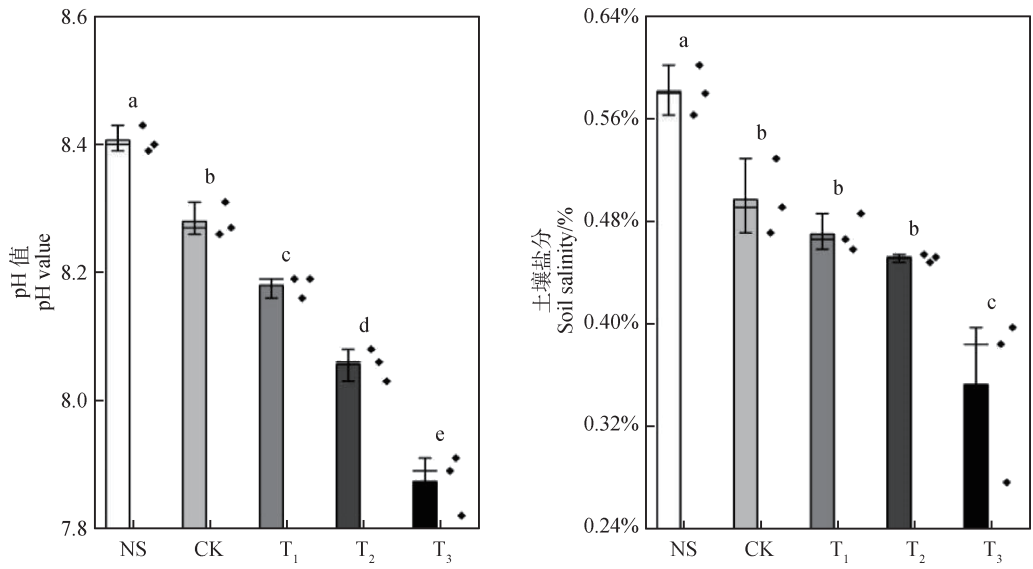


图 5 不同添加量的玉米芯菌糠对土壤 pH 值和土壤盐分的影响

Fig. 5 Effects of different amounts of corncob fungus chaff spent mushroom substrate on soil pH value and soil salinity

注: NS 代表播种前的土壤,下同

Note: NS represents the soil before sowing, the same as below

土壤含水量和土壤孔隙度逐渐升高,其中 3 个不同的玉米芯菌糠添加处理较播种前的土壤和 CK

处理土壤含水量和土壤孔隙度都显著提高 ($P<0.05$)。

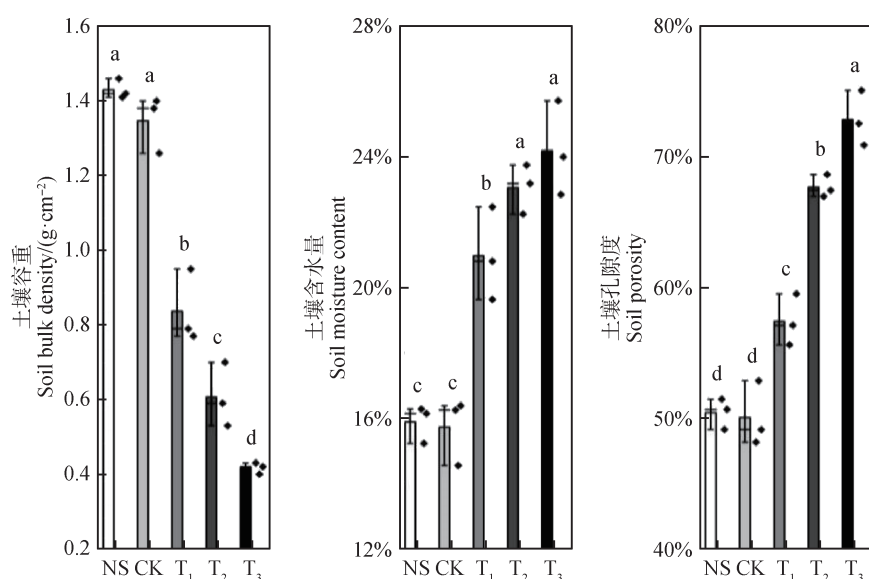


图 6 不同含量的菌糠对土壤容重、含水量和孔隙度的影响

Fig. 6 The effects of different contents of mushroom bran on soil bulk density, water content and porosity

2.5 添加玉米芯菌糠后的土壤对植物发芽和生长的相关性分析

由图7可知,pH值和土壤盐分与发芽率、土壤含水量和土壤孔隙度与干物质含量、发芽势和株高与土壤盐分、土壤含水量和土壤孔隙度与根冠比成显著正相关关系($P<0.05$),pH值和土壤容重与干物质含量、土壤容重与根冠比成显著负相关关系($P<0.05$)。

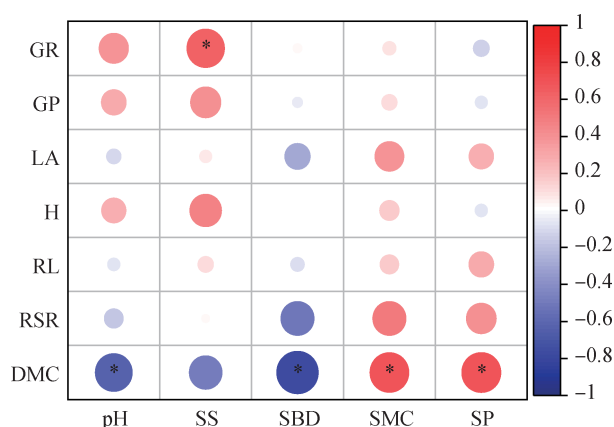


图 7 不同添加量的玉米芯菌糠土壤与植物发芽、生长的相关性

Fig. 7 The correlation between soil and plant germination and growth with different addition amounts of corncob fungus chaff mushroom bran

注:SS,SBD,SMC,SP,GR,GP,LA,H,RL,RSR和DMC分别代表土壤盐分、土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度、发芽率、发芽势、叶面积、株高、根系长度、根冠比和干物质含量

Note: SS, SBD, SMC, SP, GR, GP, LA, H, RL, RSR and DMC stand for soil salinity, soil bulk density, soil water content, soil porosity, germination rate, germination potential, leaf area, plant height, root length, root-crown ratio and dry matter content, respectively

3 讨论

3.1 发芽率和发芽势

发芽率可以反映种子在特定环境条件下萌发的能力,发芽率越高,说明种子的发芽潜力越强,适应环境的能力越好;而发芽势反映了种子在萌发过程中启动的速度,发芽势越高,越具有生长优势^[17]。本研究发现,随着土壤玉米芯菌糠添加量的增大,垂穗披碱草的发芽率和发芽势均呈现先增加后降低趋势,且在玉米芯菌糠添加量为40%时,发芽表现最佳,这说明玉米芯菌糠作为一种有机肥料,在改良土壤环境、促进植物发芽和生长方面发挥了重要作用。玉米芯菌糠中富含的有机物质和营养成分能够改善土壤结构、增强土壤的水分保持能力,进而为植物提供更为适宜的生长条件^[18],特别是在盐碱土等不良土壤条件下,添加适量的玉米芯菌糠能够有效改善土壤的物理和化学性质,为种子的萌发提供更加优越的环境^[19]。然而,当菌糠添加量进一步达到60%时,发芽率反而出现了下降,且发芽势显著低于CK,表明过量的玉米芯菌糠添加可能对种子的发芽产生负面影响。这一方面可能是因为玉米芯纤维本身具备极强的吸水与保水能力,过量添加会使基质整体持水量显著升高,远超种子萌发所需的适宜水分阈值。此时基质中多余水分无法及时排出,易在种子周围形成积水环境,导致种子根系(或萌发中的胚根)处于缺氧状态。而种子萌发依赖有氧呼吸提供能量,缺氧会直接抑制呼吸

作用的正常进行,能量供应不足便会显著降低种子发芽势^[20]。另一方面,过量添加的玉米芯菌糠中,会存在大量未充分吸水的纤维颗粒,这些干燥纤维因自身强吸水特性,会与种子形成“水分竞争”关系:其会优先吸收基质中的可用水分,导致种子无法顺利获取萌发所需的水分以完成吸水膨胀过程,进而直接延缓萌发进程,甚至阻碍种子突破种皮的初始萌发步骤。本研究还发现,当玉米芯菌糠添加量为20%时,垂穗披碱草的发芽表现较差,虽然相较于不添加玉米芯菌糠的土壤有所提高,但未能达到40%添加量为的效果,这一现象可能是由于在较低添加量下,玉米芯菌糠未能充分发挥其改良土壤条件的作用。与之相对的是,玉米芯菌糠添加量为40%时能够提供更为丰富的养分和有机物质,改善土壤结构,增强微生物活性,从而为种子发芽提供更为有利的环境。因此,通过本试验得知,玉米芯菌糠的添加量在20%至40%这个范围对垂穗披碱草的发芽和生长具有显著的促进作用,但过量添加会对其发芽产生抑制作用。

3.2 植物生长性状

本研究中,随着玉米芯菌糠添加量的增加,垂穗披碱草的株高、生长速率、根长、叶面积、地上地下生物量以及根冠比均表现出一定的规律性变化。当玉米芯菌糠添加量为40%时,各指标均达到最佳值;玉米芯菌糠添加量为20%时次之;而玉米芯菌糠添加量为60%时,其生长表现甚至低于无添加的对照组。这一现象表明玉米芯菌糠对垂穗披碱草的生长具有一定的促进作用,但过量添加玉米芯菌糠会对植物生长产生负面影响。菌糠作为一种富含有机物质的农业废弃物,适量的玉米芯菌糠添加到土壤中后能够增加土壤的有机物质含量,提高土壤的水分保持能力、透气性以及营养物质的供应能力,进而为植物的生长提供更为优越的环境^[21]。也有研究表明,适量的有机物质添加有助于提高土壤微生物的活性,促进植物根系对水分和养分的吸收^[22],这也可能是垂穗披碱草生长表现较好的原因之一。当玉米芯菌糠添加量为20%时,垂穗披碱草的生长表现次优。虽然20%的玉米芯菌糠的添加改善了土壤环境,但其效果不及40%处理组显著,这可能是因为20%的玉米芯菌糠添加量不足以显著提高土壤的有机物质含量,也可能是由于玉米芯菌糠对土壤性质的改善不足以满足植物生长的所

有需求。李杰等的研究也发现^[23],低浓度有机物的添加对土壤的影响较为缓慢,其效果在短期内较难显现,因此植物的生长也未能达到最佳状态。根冠比的变化通常与植物的水分吸收能力、养分分配策略和生长环境密切相关^[24]。在本研究中,随着玉米芯菌糠添加量的增大,根冠比呈现逐渐上升的趋势,40%处理组的根冠比最高。这表明,适量的玉米芯菌糠添加促进了垂穗披碱草根系的生长,增强了其水分和养分吸收能力,并通过增加根系生长来提高对资源的获取能力。因此,玉米芯菌糠对垂穗披碱草的生长具有促进作用^[25]。

3.3 光合特性

在本研究中,垂穗披碱草在不同玉米芯菌糠添加量下表现出不同的光合特性。首先,添加玉米芯菌糠后,垂穗披碱草的叶绿素含量显著高于不添加玉米芯菌糠的处理,这可能是因为玉米芯菌糠中富含有机物质和植物所需的养分(如氮、磷、钾等),能够改善土壤的营养状况,为植物提供更多的养分,从而促进叶绿素的合成^[26]。尤其是在盐碱土中,玉米芯菌糠的添加有助于改善土壤结构和水分保持能力,减轻盐分对植物的胁迫,从而支持植物更好地进行光合作用,增加其叶绿素含量^[27]。其次,关于净光合速率的变化,添加20%和40%玉米芯菌糠处理的净光合速率均大于不添加菌糠和添加60%的菌糠处理,这一现象也进一步表明适量的菌糠添加可以促进植物的光合作用,而过量的玉米芯菌糠则可能带来不利影响。在20%和40%玉米芯菌糠添加量下,植物能够利用提供的有机物质提高光合作用效率,从而表现出较高的净光合速率。相比之下,60%玉米芯菌糠添加量可能抑制植物气孔的正常开闭与二氧化碳吸收,导致蒸腾速率降低,进而降低光合速率,该现象也已在该研究中得到证实^[28]。这进一步说明,适量的玉米芯菌糠添加会改善土壤的水分状况和植物的水分吸收能力,导致气孔导度和蒸腾速率增加。适量添加有机物质可以改善土壤结构,增加土壤的水分保持能力,从而促进植物的光合作用和提高净光合速率^[29-30]。此外,土壤中添加有机物质还能够增加气孔导度和蒸腾速率,因为它改善了土壤水分状况,减轻了植物的水分胁迫。

3.4 土壤性状

在本研究中,随着玉米芯菌糠添加量的增加,

土壤pH值和盐分逐渐降低,这一现象可能与玉米芯菌糠中的有机酸和腐殖质有关。菌糠作为一种富含有机物的农业废料,含有丰富的腐殖酸和其他有机酸,这些有机酸在分解过程中可以与土壤中的碱性离子发生反应,从而中和土壤中的碱性成分,降低土壤pH值^[31]。此外,玉米芯菌糠添加后,土壤中微生物活动增强,微生物在分解过程中可能产生一些有机酸,进一步促进土壤pH值的降低^[32]。因此,适量的玉米芯菌糠添加能够有效缓解盐碱土的碱性问题,有助于改善土壤环境,从而促进植物生长。对于盐分的降低,菌糠的有机物质可通过改善土壤结构和水分保持能力,帮助减少盐分的积聚。研究表明,有机物质的加入能够促进土壤中盐分的淋洗,降低表层盐分的浓度,从而改善土壤的盐分状况^[33]。在盐碱土中,过高的盐分浓度会抑制植物根系的水分吸收,而菌糠能够通过改善土壤水分状况和促进盐分的洗脱作用,有效减轻盐分的危害,从而为植物提供更适宜的生长环境^[34]。在土壤的物理性质方面,研究发现随着玉米芯菌糠添加量的增加,土壤含水量和孔隙度均有所增加,容重则逐渐降低^[35]。这一现象表明,玉米芯菌糠改善了土壤的物理性质。玉米芯菌糠中的有机物质能够改善土壤的团粒结构,增加土壤的孔隙度,进而提升土壤的水分保持能力和透水性^[36]。有机物质的加入不仅增加了土壤的孔隙度,使土壤变得更加疏松,而且改善了土壤的水分调节能力,增加了土壤的持水量,帮助植物在干旱或盐碱环境下更好地吸收水分^[37]。此外,容重的降低与土壤孔隙度的增加密切相关,这种变化表明土壤结构的改善,有助于根系的生长和水分的吸收,使植物能够在更适宜的环境中生长。因此,玉米芯菌糠添加量在40%时能够在改善土壤物理特性的同时,提升土壤的水分保持能力和通气性,为植物提供更加有利的生长条件。

3.5 植物发芽和生长的相关性分析讨论

土壤pH值、盐分与发芽率呈显著正相关,且发芽势、株高也与土壤盐分呈显著正相关,结合本试验菌糠改良盐碱土的处理范围来看,尽管土壤pH值与盐分含量随玉米芯菌糠添加量的增加而降低,但降低后的水平仍未超出垂穗披碱草萌发及幼苗生长的适宜阈值区间,这也进一步解释了上述相关性结果的合理性。适度的盐分水平可能通过维持细胞渗透压促进种子吸水萌发,而pH值的降低(由

高碱向中性趋近)则缓解了强碱性对酶活性的抑制,二者共同为发芽和株高生长提供了有利的化学环境。这也印证了菌糠通过调节盐碱土化学性质(降低pH值和盐分至适宜范围)间接促进植物生长的作用机制。

土壤含水量和孔隙度与干物质含量、根冠比呈显著正相关,且与土壤容重呈显著负相关,体现了土壤物理结构对植物物质积累与分配的关键影响。土壤通气性与保水能力都有所改善,这不仅为植物光合作用和养分吸收提供了充足水分与氧气,还为根系扩展创造了疏松环境,促进了地下生物量的积累,进而提高根冠比,反映了植物在优化土壤物理条件下的资源获取策略。而土壤容重与干物质含量、根冠比的显著负相关,进一步证实了土壤紧实度对植物生长的限制作用,即高容重会阻碍根系穿透与养分运输,最终抑制干物质积累。

综上,这些相关性结果表明,菌糠改良盐碱土对植物的促进作用,是通过协调土壤化学性质(pH值、盐分)与物理结构(含水量、孔隙度、容重)共同实现的。其中,土壤物理结构(高孔隙度、适宜含水量、低容重)的改良是植物干物质积累和根系发育的基础,而化学性质的适度调节则为种子萌发与幼苗生长提供了必要的化学环境。这也说明了,在利用菌糠改良盐碱土时,需兼顾土壤理化性质的协同优化,才能最大化发挥其对垂穗披碱草生长的促进效应。

4 结论

本研究证实,40%的玉米芯菌糠添加量可显著提升垂穗披碱草发芽率和苗期生长,同时降低土壤pH值和盐分含量(30.00%),改善土壤物理结构(孔隙度提升了26.07%),为盐碱土改良提供了可行方案。

参考文献

- [1] 卫雨西,陈丽娟,冯起,等. 干旱区盐碱土微生物特征及其影响因素研究进展[J]. 中国沙漠,2024,44(3):18-30
WEI Y X, CHEN L J, FENG Q, et al. Progress on microbial characteristics in arid salt-affected soils and related factors[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 18-30
- [2] JONES M, HUYNH T, DEKIWADIA C, et al. Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics[J]. Journal of Bionanoscience, 2017, 11(4): 241-257
- [3] 牛世全,景彩虹,廖世齐,等. 河西走廊盐碱土细菌种群结构多样性的研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 90-95

- NIU S Q, JING C H, LIAO S Q, et al. Bacterial population structure diversity in saline-alkali soil in Hexi Corridor [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2013, 49(2): 90-95
- [4] 郑晓梅, 丁旭扬, 黄婷, 等. 一株产酸黑曲霉的分离鉴定及其在盐碱土改良中的应用[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 69-73, 78
- ZHENG X M, DING X Y, HUANG T, et al. Isolation and identification of an acid-producing *Aspergillus niger* and its application in improvement of saline-alkali soil [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(4): 69-73, 78
- [5] 赵国杰, 牛世全, 达文燕, 等. 四株无机解磷菌处理碱化土壤的理化性质及质量评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 996-1002
- ZHAO G J, NIU S Q, DA W Y, et al. Assessment of soil quality and physicochemical properties of the alkaline soil amended with four inorganic phosphate-dissolving microbial inoculants [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 996-1002
- [6] 黄武强, 周红. 提高环境效益的食用菌菌渣循环再利用方式[J]. 中国食用菌, 2019, 38(1): 104-106
- HUANG W Q, ZHOU H. Review on the recycling methods of edible fungi residues based on environmental benefit [J]. Edible Fungi of China, 2019, 38(1): 104-106
- [7] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244
- XU R K. Research progresses in soil acidification and its control [J]. Soils, 2015, 47(2): 238-244
- [8] 李寿强, 张小强, 鲁耀泽, 等. 不同粒径与添加比例的复合菌糠对土壤吸水-持水能力的影响[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(3): 61-66
- LI S Q, ZHANG X Q, LU Y Z, et al. Effect of different particle size and adding ratio of compound fungi chaff on soil water absorption and water holding capacity [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022, 28(3): 61-66
- [9] 张河庆, 吴婕, 韩帅, 等. 4种周年轮作模式对耕作层土壤微生物的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(20): 73-80
- ZHANG H Q, WU J, HAN S, et al. Effects of four annual rotation patterns on soil microbial community [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(20): 73-80
- [10] 赵自慧, 史应仙, 聂有富, 等. 玉米芯及其生物质肥料对土壤板结的改良效果试验[J]. 南方农业, 2024, 18(21): 75-79
- ZHAO Z H, SHI Y X, NIE Y F, et al. Experimental study on the improvement effect of corn cobs and their biomass fertilizers on soil compaction [J]. South China Agriculture, 2024, 18(21): 75-79
- [11] 王乐乐, 刘艳丰, 王铁男, 等. 菌糠发酵饲料开发利用的研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(19): 136-139
- WANG L L, LIU Y F, WANG T N, et al. Research progress on development and utilization of fermented feed from mushroom bran [J]. Feed Research, 2021, 44(19): 136-139
- [12] 杨航, 宋福超, 王诗涛, 等. 固态发酵平菇-青稞秸秆菌糠饲料化利用研究[J]. 草地学报, 2025, 33(4): 1289-1298
- YANG H, SONG F C, WANG S T, et al. Research on the utilization of solid-state fermented oyster mushroom-highland barley straw fungus-bran as feed [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1289-1298
- [13] 单建明, 袁卫民, 田丽敏, 等. 蘑菇菌糠堆肥在小白菜上的肥效研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15684-15685
- SHAN J M, YUAN W M, TIAN L M, et al. Study on fertilizer efficiency of mushroom dregs on pakchoi [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(32): 15684-15685
- [14] 谢修鸿, 梁运江, 李玉. 黑木耳菌糠改良苏打盐碱土效果研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 130-133, 152
- XIE X H, LIANG Y J, LI Y. Effect of waste material cultured *Auricularia auricula* on soda alkali-saline soil improvement [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 130-133, 152
- [15] 蔡兴栋, 王利, 徐发明, 等. 灌水量调控玉米秸秆厌氧还田对菠菜生产的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(5): 163-171
- CAI X D, WANG L, XU F M, et al. Effects of irrigation amount regulation of corn straw anaerobic returning on spinach production [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(5): 163-171
- [16] 谢向誉, 魏本柱, 康金林, 等. 油茶幼林套种西瓜对油茶生长·经济效益·土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(21): 133-136, 159
- XIE X Y, WEI B Z, KANG J L, et al. Effect of interplant of young *Camellia oleifera* forest on *Camellia oleifera* growth, economic benefit and soil physicochemical properties [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(21): 133-136, 159
- [17] 彭学文, 解文强, 周廷斌, 等. 利用平菇菌糠栽培双孢蘑菇高产配方筛选研究[J]. 河北农业科学, 2015, 19(3): 46-48
- PENG X W, XIE W Q, ZHOU T B, et al. Study on screening the high yield cultivating formula for *Agaricus bisporus* using spent *Pleurotus* substrate [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(3): 46-48
- [18] WOODS J, WILLIAMS A, HUGHES J K, et al. Energy and the food system [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2991-3006
- [19] POLAT E, UZUN HI, TOPÇUOĞLU B, et al. Effects of spent mushroom compost on quality and productivity of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in greenhouses [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(2): 176-180
- [20] 马长云. 优质品种‘冠麦1号’选育及高产栽培技术分析[J]. 农业开发与装备, 2025(9): 225-227
- MA Y Y. Breeding of high-quality variety ‘Guanmai No. 1’ and analysis of high-yield cultivation techniques [J]. Agricultural Development and Equipment, 2025(9): 225-227
- [21] 张瑜, 陈波, 乔悦. 连云港滨海盐碱地植物种植常用土壤改良技术与实践[J]. 现代园艺, 2024(12): 80-82
- ZHANG Y, CHEN B, QIAO Y. Common soil improvement techniques and practice of plant planting in Lianyungang coastal saline-alkali land [J]. Contemporary Horticulture, 2024(12): 80-82
- [22] 刘斌, 韩亚男, 袁旭峰, 等. 木耳菌糠的5种前处理对水稻育苗

- 基质性质及稻苗生长的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16):3098-3107
- LIU B, HAN Y N, YUAN X F, et al. Effects of five fungal chaff pretreatment methods on substrate properties and growth of rice seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(16): 3098-3107
- [23] 李杰, 祝凌, 全利红, 等. 有机种植对温室土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4):690-697
- LI J, ZHU L, TONG L H, et al. Effect of organic planting on soil fertility quality in greenhouse [J]. Soils, 2019, 51(4): 690-697
- [24] DAWAR K, KHAN A U, AL-MUTAIRI M, et al. Utilizing spent mushroom substrate biochar to improve *Zea mays* L. growth and biochemical resilience against cadmium and chromium toxicity[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):17511
- [25] 徐爽, 阚雨晨. 食(药)用菌菌糠对砂壤土团聚体性状的影响[J]. 农学报, 2023, 13(5):58-65
- XU S, KAN Y C. Effects of edible(medicinal) fungus residues on aggregate properties of sandy loam soils[J]. Journal of Agriculture, 2023, 13(5):58-65
- [26] WANG R C, WANG Z Y, LIU Z M, et al. Effects of different proportions of cattle manure and mushroom residue on yield and quality of cucumber fruit[J]. Plants, 2025, 14(9):1371
- [27] 毛碧增, 贺满桥, 陈丽闽, 等. 蘑菇菌糠复配生物基质对番茄营养生长及光合作用的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(9): 1821-1827
- MAO B Z, HE M Q, CHEN L M, et al. Effects of spent mushroom compound substrate on growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(9):1821-1827
- [28] 熊华烨, 秦俊梅, 马浩天. 含土霉素土壤添加不同基质后对玉米生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2):283-289
- XIONG H Y, QIN J M, MA H T. Effects of adding different substrates on physiological traits of maize in a oxytetracycline contaminated soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2):283-289
- [29] 李祥英, 张英华, 胥丽娜, 等. 解淀粉芽孢杆菌对烟草叶片光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(3):518-522
- LI X Y, ZHANG Y H, XU L N, et al. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* on photosynthetic characteristics of tobacco leaves[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(3):518-522
- [30] 李晓博, 李晓, 李玉. 双孢蘑菇菌糠对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 食用菌, 2008, 30(3):63-64
- LI X B, LI X, LI Y. Effects of *Agaricus bisporus* bran on the growth, yield and quality of tomato[J]. Edible Fungi, 2008, 30(3):63-64
- [31] WANG M J, SUN D S, XU Z M. Effects of spent mushroom substrate treated with plant growth-promoting rhizobacteria on blueberry growth and soil quality[J]. Microorganisms, 2025, 13(4):932
- [32] ZHU W T, LAI X Z, LIU C F, et al. Enhancement of biomethane yield from spent mushroom substrate: biological pretreatment with the chlamydospores of *Trichoderma viride*[J]. Fermentation, 2025, 11(3):152
- [33] 谢修鸿, 李玉. 姬松茸菌糠改良苏打盐碱土对土壤化学性质及牧草生长的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(5): 518-522
- XIE X H, LI Y. Effect of waste material cultured *Agaricus blazei* on chemical characteristics of soda alkali-saline soil and growth of forage grass[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2010, 32(5):518-522
- [34] 谢修鸿, 梁运江, 王晓红, 等. 菌糠等物料施入风沙土对其溶解性有机质组分的动态变化影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):149-153
- XIE X H, LIANG Y J, WANG X H, et al. Dynamic change of dissolved organic matter fractions after application of organic materials including spent mushroom substrate to aeolian sandy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 149-153
- [35] 张华微, 张天翼, 王栩. 菌糠改良土壤孔隙度效果的研究[J]. 河北农业科学, 2011, 15(8):37-38, 68
- ZHANG H W, ZHANG T Y, WANG X. Effect of mushroom waste on soil porosity improvement[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(8):37-38, 68
- [36] GRIMM D, WÖSTEN H A B. Mushroom cultivation in the circular economy [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(18):7795-7803
- [37] 周祥, 严媛媛, 陈爱晶. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. 食用菌, 2018, 40(1):9-12
- ZHOU X, YAN Y Y, CHEN A J. Research progress on resource utilization of edible fungus residue[J]. Edible Fungi, 2018, 40(1):9-12

(责任编辑 闵芝智)