

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.028

引用格式:董朋博,高文晓,马进燕,等.湖南稗子-盐生植物间作对盐碱地土壤质量与牧草产量的协同提升效应[J].草地学报,2026,34(7):2661—2676

DONG Peng-bo, GAO Wen-xiao, MA Jin-yan, et al. Synergistic Effects of Intercropping *Echinochloa Frumentacea* with Halophytes on Soil Quality and Forage Yield in Saline-Alkali Land[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2661—2676

湖南稗子-盐生植物间作对盐碱地土壤质量 与牧草产量的协同提升效应

董朋博¹, 高文晓¹, 马进燕³, 苏晶晶², 高总元¹, 张峰举^{2*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:为探究耐盐牧草、盐生植物间作对盐碱地土壤的改良效果,本研究通过大田试验,设置CK[湖南稗子(*Echinochloa frumentacea*)单作], T₁[湖南稗子、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)间作], T₂[湖南稗子、野榆钱菠菜(*Atriplex aucheri*)间作], T₃[湖南稗子、盐角草(*Salicornia europaea*)间作]4个处理。研究了间作不同盐生植物对盐碱地土壤质量及湖南稗子产量的协同提升效应。结果表明:与CK相比,间作处理显著降低了0~40 cm土层的土壤容重(Soil bulk density, BD)、pH值和全盐量(Total dissolved salt, TDS),其中T₁处理降幅最大,分别为8.84%, 7.19%, 19.86%;土壤孔隙度(Soil total porosity, STP)、有机质(Organic matter, SOM)、碱解氮(Available nitrogen, AN)、有效磷(Available phosphorus, AP)和速效钾(Available potassium, AK)含量显著提高,T₁处理增幅分别为13.38%, 26.02%, 60.01%, 26.46%和22.13%;土壤脲酶(Soil urease, UE)、蔗糖酶(Invertase, INV)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性在T₁处理下分别提高了48.86%, 45.51%, 54.11%,为湖南稗子的出苗和生长提供了良好的土壤环境;T₁、T₂和T₃处理较CK显著提高了湖南稗子产量,增幅分别为55.71%, 40.01%, 20.95%。湖南稗子产量与土壤孔隙度、土壤肥力和酶活性指标呈显著正相关,与土壤容重和盐碱指标呈显著负相关;基于全数据集的土壤质量指数(Soil quality index, SQI)表现为:T₁>T₂>T₃>CK。综上,湖南稗子与盐地碱蓬间作是提升盐碱地土壤质量和作物生产力的最优模式,可作为宁夏引黄灌区及同类型生态区有效的生物改良措施。

关键词:盐碱土;盐生植物;作物产量;间作;土壤质量评价

中图分类号:S156.4;S54

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2661-16

Synergistic Effects of Intercropping *Echinochloa Frumentacea* with Halophytes on Soil Quality and Forage Yield in Saline-Alkali Land

DONG Peng-bo¹, GAO Wen-xiao¹, MA Jin-yan³, SU Jing-jing², GAO Zong-yuan¹, ZHANG Feng-ju^{2*}

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To explore the amelioration effect of intercropping salt-tolerant forage grasses with halophytes on saline-alkali soils, a field experiment was conducted with four treatments: CK (monoculture of *Echinochloa frumentacea*), T₁ (intercropping *E. frumentacea* with *Suaeda salsa*), T₂ (intercropping *E. frumentacea* with *Atriplex aucheri*) and T₃ (intercropping *E. frumentacea* with *Salicornia europaea*). The synergistic effects of intercropping different halophytes on soil quality and *E. frumentacea* yield were investigated. Compared with CK, all the intercropping treatments significantly reduced bulk density (BD), pH and total dissolved salts

收稿日期:2025-09-08;修回日期:2025-11-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900600);宁夏重点研发计划项目(2022BBF03036)资助

作者简介:董朋博(1999-),男,汉族,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事盐碱地综合改良与耐盐作物、牧草高效栽培研究, E-mail: Dong_Orange@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhang_fj@nxu.edu.cn

(TDS) in the 0~40 cm soil layer. The largest reductions (8.84%, 7.19% and 19.86%, respectively) were observed under T_1 . Soil total porosity (STP), soil organic matter (SOM), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and readily available potassium (AK) were markedly increased, with T_1 showing the greatest increments (13.38%, 26.02%, 60.01%, 26.46% and 22.13%, respectively). Activities of soil urease (UE), invertase (INV) and catalase (CAT) rose by 48.86%, 45.51% and 54.11% under T_1 , providing a favorable soil environment for seedling emergence and growth of *E. frumentacea*. Grain yields under T_1 , T_2 and T_3 were significantly higher than that of CK, with increases of 55.71%, 40.01% and 20.95%, respectively. *E. frumentacea* yield was positively correlated with STP, soil fertility indices and enzyme activities, and negatively correlated with BD and salinity-alkalinity indicators. The soil quality index (SQI) calculated from the full dataset ranked the treatments as $T_1 > T_2 > T_3 > CK$. In conclusion, intercropping *E. frumentacea* with *S. salsa* is the optimal pattern for improving saline-alkali soil quality and crop productivity, and can serve as an effective biological amelioration measure in the Ningxia Yellow River irrigation district and similar ecological regions.

Key words: Saline-alkali soil; Halophytes; Crop yield; Intercropping; Soil quality assessment

土壤盐碱化作为全球性的生态环境难题,通过渗透胁迫、离子毒害等多重机制严重抑制作物生长,直接威胁着农业的可持续发展^[1]。据联合国粮农组织(FAO, 2024)评估,全球盐渍化土壤面积达 $13.81 \times 10^8 \text{ hm}^2$,约占陆地面积的10.7%,且呈持续扩张态势^[2]。聚焦我国国情,盐碱地主要分布于华北、东北和西北的内陆干旱、半干旱地区,面积约为 $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中具备农业潜力的约 $1.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[3-4]。宁夏引黄灌区作为我国重要的粮食生产基地,因气候干旱、蒸发强烈和土壤母质含盐量高等自然因素,以及不合理耕作、灌溉失衡等人为因素,导致土壤盐渍化率高达48.93%,严重威胁着区域粮食安全与生态稳定^[5]。以耐盐牧草湖南稗子为核心的生物治盐措施因其生态和经济双重效益而备受关注^[6]。湖南稗子(*Echinochloa frumentacea*)作为禾本科稗属 C_4 牧草,具有耐盐、高产等优良特性,是改良盐碱地的理想先锋植物^[7-9]。然而,研究发现其存在严重的连作障碍,重茬种植在高盐胁迫下生物量与品质显著下降,这极大地限制了其长期的应用效果^[10]。为破解这一瓶颈,本研究创新性地提出引入具有聚盐能力的盐生植物与湖南稗子进行间作。这种“牧草-盐生植物”协同模式,有望利用盐生植物的“生物脱盐”作用直接削减土壤盐库,同时通过间作体系的物种互补效应打破连作障碍,从而实现土壤质量与作物产能的协同提升。因此,系统评估该间作模式的改良效果并揭示其内在机制,对宁夏引黄灌区及同类生态区的盐碱地资源化利用具有重要的意义。

间作作为一种高效的生态农业模式,其核心优势在于利用物种间的互补效应,实现对光、水、养分

等资源的高效利用,并维持农田生态系统的稳定性^[11-12]。将这一理念应用于盐碱地改良,关键在于选择功能互补的间作物种。盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、野榆钱菠菜(*Atriplex aucherii*)和盐角草(*Salicornia europaea*)等藜科真盐生植物,具备强大的聚盐特性,能通过肉质化组织富集 Na^+ , Cl^- 等盐分离子,成熟后将植株移除即可将盐分带出土壤系统,从而有效降低土壤盐度,并改善土壤物理结构(如提升团聚体稳定性、增加入渗率),加速盐分淋洗^[13-15]。在此背景下,将湖南稗子的高生物量优势与盐生植物的聚盐功能相结合,理论上可产生“1+1>2”的协同效应。盐生植物为湖南稗子创造了一个低盐的微环境,有效缓解其连作障碍;而湖南稗子以其茂盛的冠层减少水分蒸发,其庞大的根系系统也能改善土壤结构,为盐生植物生长提供支持。

鉴于此,以往研究多聚焦单一物种的改良效应,而关于耐盐牧草与盐生植物组合的协同提升机制尚不清晰。本研究以湖南稗子(*Echinochloa frumentacea*)单作为对照(CK),设置湖南稗子分别与盐地碱蓬(*Suaeda salsa*, T_1)、野榆钱菠菜(*Atriplex aucherii*, T_2)和盐角草(*Salicornia europaea*, T_3)的1:1间作模式。通过系统分析不同处理下土壤物理、盐碱、养分及生物酶活性的变化特征,构建土壤质量指数(SQI)并利用结构方程模型(SEM),旨在:(1)量化评价不同间作组合对盐碱地土壤质量的综合改良效果;(2)揭示间作系统影响湖南稗子产量的关键驱动路径;(3)筛选出最优的“牧草-盐生植物”搭配组合,为宁夏引黄灌区盐碱地的高效、可持续治理提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于2023年在宁夏石嘴山市平罗县宝丰村(106°44'E, 39°08'N, 海拔1093.4 m)开展试验,地处黄河北部中下游冲积平原,属典型温带大陆性半干旱气候,日照时数长、蒸发强烈、四季风沙频繁。试验区年均气温约9.7℃,年均降水量约176.0 mm(图1),年均蒸发量高达1755 mm,土壤盐渍化严重。试验前,0~40 cm土层土壤理化性质如下(表1)。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验设计,共设4个处理,对照(CK)处理为湖南稗子单作, T_1 处理为湖南稗子和盐地碱蓬间作、 T_2 处理为湖南稗子和野榆钱菠菜间作、 T_3 处理为湖南稗子和盐角草间作。每个处理重复3次,共12个小区,每个小区60 m²(6 m×10 m),四周设1 m宽过道和2 m宽保护行。播种前,按照等距条施方式一次性施入磷酸二铵(N≥18%, P₂O₅≥46%, 云南云天化股份有限公司)500 kg·hm⁻²,生育期内不再追肥,2023年5月4日进行播种、行距

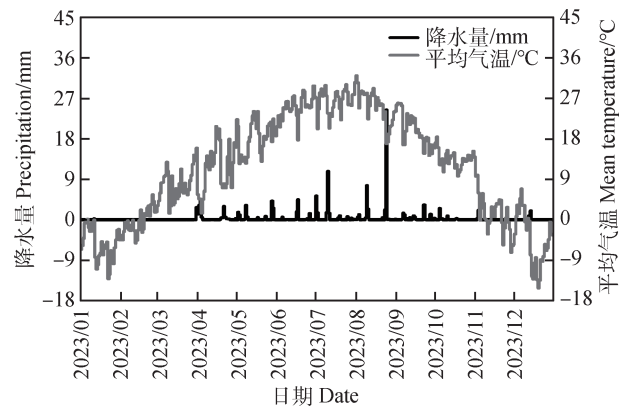


图1 2023年试验区月平均气温和降水量

Fig. 1 Monthly mean temperature and precipitation in the experimental area, 2023

20 cm, 湖南稗子播量33.3 kg·hm⁻², 盐地碱蓬播量41.7 kg·hm⁻², 野榆钱菠菜播量41.7 kg·hm⁻², 盐角草播量25.0 kg·hm⁻²。整个生育期适时进行统一的除草、防虫、灌水(生育期分8次灌水,共计600 m³), 2023年10月初收获。供试湖南稗子源于辽宁省朝阳市畜牧科研所培育的‘朝牧一号’, 而盐地碱蓬、野榆钱菠菜、盐角草由中国科学院新疆生态与地理研究所提供。

表1 2023年试验区土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil in the experimental site in 2023

土层 Soil depth/ cm	容重 Soil density/ (g·cm ⁻³)	孔隙度 Total porosity/ %	全盐含量 Total dissolved salt/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
0~20	1.55	40.68	5.36	2.80	33.94	3.28	72.15
20~40	1.63	37.50	5.90	2.48	30.25	2.52	59.34

1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤物理指标 在2023年10月,作物收获后,在各处理区按梅花形布设5个代表性样点,用容积100 cm³、高5 cm的不锈钢环刀分两层(0~20 cm、20~40 cm)原状采集耕层土壤,每层3个重复;土壤容重测定采用环刀法(105℃烘干至恒重)^[16];土壤总孔隙度按照公式(1)计算,将环刀土样浸入水中24 h,取出后称重(m_1),烘干至恒重后称重(m_2)饱和含水量按照公式(2)计算。

$$STP = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,STP表示土壤总孔隙度, ρ_b 表示土壤容重, ρ_s 表示土壤密度(近似值取2.65 g·cm⁻³)

$$W_{sat} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, W_{sat} 表示土壤饱和含水率。

1.3.2 土壤化学指标 于2023年10月初收获后,在各处理区种植条带内,以“梅花形”布设5个采样点,用不锈钢土钻分层采集0~20 cm和20~40 cm原状混合土样。现场剔除砾石及根系残体后,装入无菌聚乙烯密封袋,贴签后置于4℃便携式冷藏箱运回实验室。样品在室内阴凉通风处自然风干,依次过2 mm,1 mm和0.25 mm尼龙筛,备用。测定方法参照鲁如坤^[17]和鲍士旦^[18]的方法。土壤pH值:使用梅特勒-托利多FE28型pH计测定,按照水土比1:2.5(g/v)加入蒸馏水,震荡5 min、静止30 min测定;全盐含量:使用电导率仪测定的EC_{1:5}值,按照公式(3)换算为土壤全盐含量(TDS);采用双指示中和滴定法测定CO₃²⁻,HCO₃⁻含量;硝酸银滴定法测定Cl⁻含量;EDTA络合滴定法测定Ca²⁺,Mg²⁺含量;火焰光度法测定K⁺,Na⁺含量;EDTA间接络合滴定法测定SO₄²⁻含量;重铬酸钾氧化-外加

热法测定土壤有机质;NaOH碱解扩散法测定土壤碱解氮;NaHCO₃⁻浸提-钼锑抗比色法(UV-1800, 880 nm)测定有效磷;CH₃COONH₄浸提火焰光度法测定速效钾。

$$TDS = 0.003EC_{1:5} \quad (3)$$

1.3.3 土壤生物酶活性指标 苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶(Urease, UE)活性,在37℃,pH值6.7(磷酸盐缓冲液)的条件下,以每克风干土在24小时内催化产生NH₃-N的mg数表示;3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶(Invertase, INV)活性,在37℃,pH值5.5(乙酸-乙酸钠缓冲液)的条件下,以每克风干土在24小时内催化产生C₆H₁₂O₆ mg数表示。高锰酸钾(0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄)滴定法测定过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性,在25℃条件下,以每克风干土每小时消耗KMnO₄ mL数表示^[19]。

1.3.4 植株测定指标 在种植条带区域内按“Z”字形布点,随机选取湖南稗子,钢卷尺测定株高后,整株取样;去离子水快速冲洗并吸干表面水分,立即称鲜重。105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重,称其干重,并计算干鲜比。出苗率:于植株出苗稳定后,在条播小区按对角线布设3个1 m×1 m固定样方,统计正常出苗株数,出苗率(%)=(出苗株数/播种粒数)×100;产量:成熟期按对角线布设3个2 m×2 m样方,齐地面刈割后立即称重,换算每公顷产量。

1.4 土壤综合质量指数(SQI)

为准确评估土壤的综合质量,选取了19项指标考量土壤的物理、盐碱化、养分及生物酶活性对土壤肥力的影响,构建了全数据集的土壤质量综合评价体系。采用线性计算模型,将指标进行标准化处理,转换为0~1无量纲分数,采用“越多越优”型(4)和“越少越优”型(5)的评分函数^[5,20]。对全数据集参评的指标进行主成分分析,通过提取公因子方差,计算各项指标权重值(各项指标公因子方差占公因子方差总和的比值)。采用公式(6)计算土壤质量指数(Soil quality index, SQI)^[20]。

$$S_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

$$S_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

式中 S_i 表示第 i 项指标的线性指数得分(0~1), X_i 表示指标的实测值, $X_{\max}$ 表示指标的最高值, $X_{\min}$

表示指数的最小值。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (6)$$

式中 W_i 为第 i 项指标的土壤质量评价权重值, S_i 为第 i 项土壤评价指标无量纲得分,全数据集($n=19$),SQI评分越优,代表土壤综合质量越好。

1.5 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2021处理数据、并使用Origin 2024绘制可视化图表;IBM SPSS 26.0软件进行主成分分析(PCA);通过Canoco5.0进行冗余分析;通过R语言4.2.0的vegan包分析0~40 cm土壤指标,基于Perason相关系数构建不同土层指标的相似性矩阵,并通过ggplot 2包进行Mantel检验分析;通过Python 3.9的Plspm包进行偏最小二乘路径建模(PLS-PM),分析土壤各维度指标之间的因果关系。

2 结果与分析

2.1 间作盐生植物对土壤物理性质的影响

间作盐生植物显著改善了0~40 cm土层的物理性质,且改良效应随土层加深呈递减趋势($P<0.05$)(图2)。在0~20 cm表层,与CK相比, T_1 、 T_2 和 T_3 处理显著降低了土壤容重($P<0.05$),降幅分别为11.64%、5.27%、7.73%;同时显著提高了土壤总孔隙度和饱和持水量($P<0.05$),其中土壤总孔隙度分别提高了16.52%、10.98%、7.48%;饱和持水量分别提升了30.70%、19.12%、9.50%。各处理间以 T_1 处理改良效果最为显著($P<0.05$), T_2 和 T_3 处理次之。在20~40 cm亚表层,各处理改良效果有所减弱,但与CK相比, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的土壤容重仍显著降低($P<0.05$),分别降低了6.03%、1.20%、3.10%;土壤总孔隙度和饱和持水量亦显著提高($P<0.05$),土壤总孔隙度分别提高了10.23%、2.80%、5.73%;饱和持水量分别提升了8.56%、8.78%、4.95%,其中, T_1 和 T_2 处理的饱和持水量差异不显著,但均显著优于 T_3 处理($P<0.05$)。总体来看,各处理间的改良效果表现为 $T_1>T_2>T_3>CK$ 。这说明,引入盐生植物(特别是盐地碱蓬)能显著提升土壤通气与保水能力,为作物根系生长创造了更优越的物理环境。

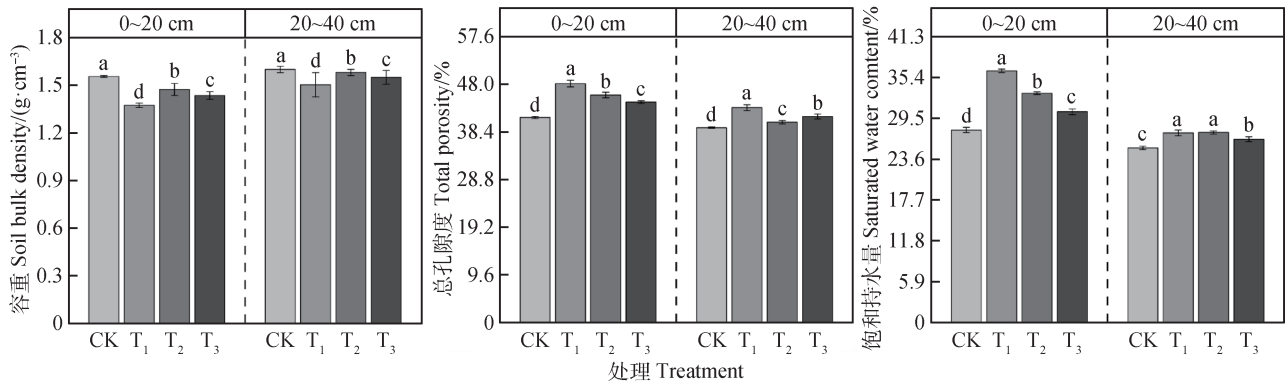


图2 间作盐生植物对土壤物理性质的影响

Fig. 2 Effects of intercropping halophytes on soil physical properties

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same as below

2.2 间作盐生植物对土壤盐碱化程度的影响

间作盐生植物处理显著改善了0~40 cm土层的盐碱状况 ($P < 0.05$) (图3), 具体而言, 在0~20 cm表层, 与CK相比, T₁, T₂和T₃处理显著降低了土壤pH值和全盐含量 ($P < 0.05$), 土壤pH值分别降低了9.27%, 3.46%, 2.03%; 全盐含量分别下降了24.44%, 12.54%, 10.68%, 其中T₁处理降幅最大, T₂和T₃处理的全盐含量差异不显著。在20~40 cm亚表层, 与CK相比, T₁, T₂和T₃处理仍显著降低了土壤pH值和全盐含量 ($P < 0.05$), 土壤pH值分别降低了5.11%, 3.28%, 1.03%; 全盐含量分别下降了15.27%, 10.93%, 7.11%, 且各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。整体来看, 间作盐地碱蓬(T₁)和野榆钱菠菜(T₂)的改良效果优于盐角草(T₃)。

如图4所示, 间作盐生植物处理对部分土壤水溶性盐离子含量影响显著 ($P < 0.05$)。在0~

20 cm表层, 与CK相比, T₁, T₂和T₃处理显著降低了土壤 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 含量 ($P < 0.05$), SO_4^{2-} 含量分别降低了25.79%, 16.54%, 9.19%; CO_3^{2-} 含量分别降低了36.55%, 26.88%, 24.37%; 其中T₁处理降幅最大; T₁和T₂处理显著降低了土壤 Mg^{2+} 含量 ($P < 0.05$), 分别降低了24.50%, 20.31%, 显著优于T₃处理 ($P < 0.05$), 且T₃处理与CK无显著性差异。此外, 仅T₁处理显著降低了土壤 Na^+ 含量 ($P < 0.05$), 降幅达13.99%, 显著优于T₂和T₃处理 ($P < 0.05$)。在20~40 cm亚表层土壤, 与CK相比, T₁处理对土壤 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 含量的改良效果最为显著 ($P < 0.05$), 分别降低了29.64%, 13.43%; T₁和T₂处理显著降低了土壤 Mg^{2+} 含量 ($P < 0.05$), 分别降低了21.26%, 15.84%, 显著优于T₃处理 ($P < 0.05$)。此外, 各处理对土壤 K^+ , HCO_3^- 含量均无显著影响。综上, 间作主要通过降低 Na^+ , Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子含量来改善土壤盐碱环境。

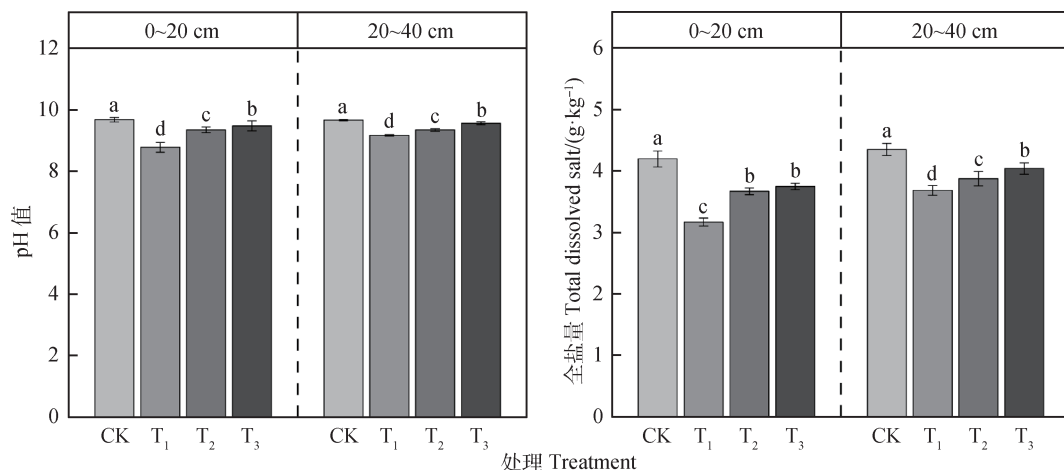


图3 间作盐生植物对土壤pH值和全盐量的影响

Fig. 3 The impact of intercropping halophytes on soil pH and total salt content

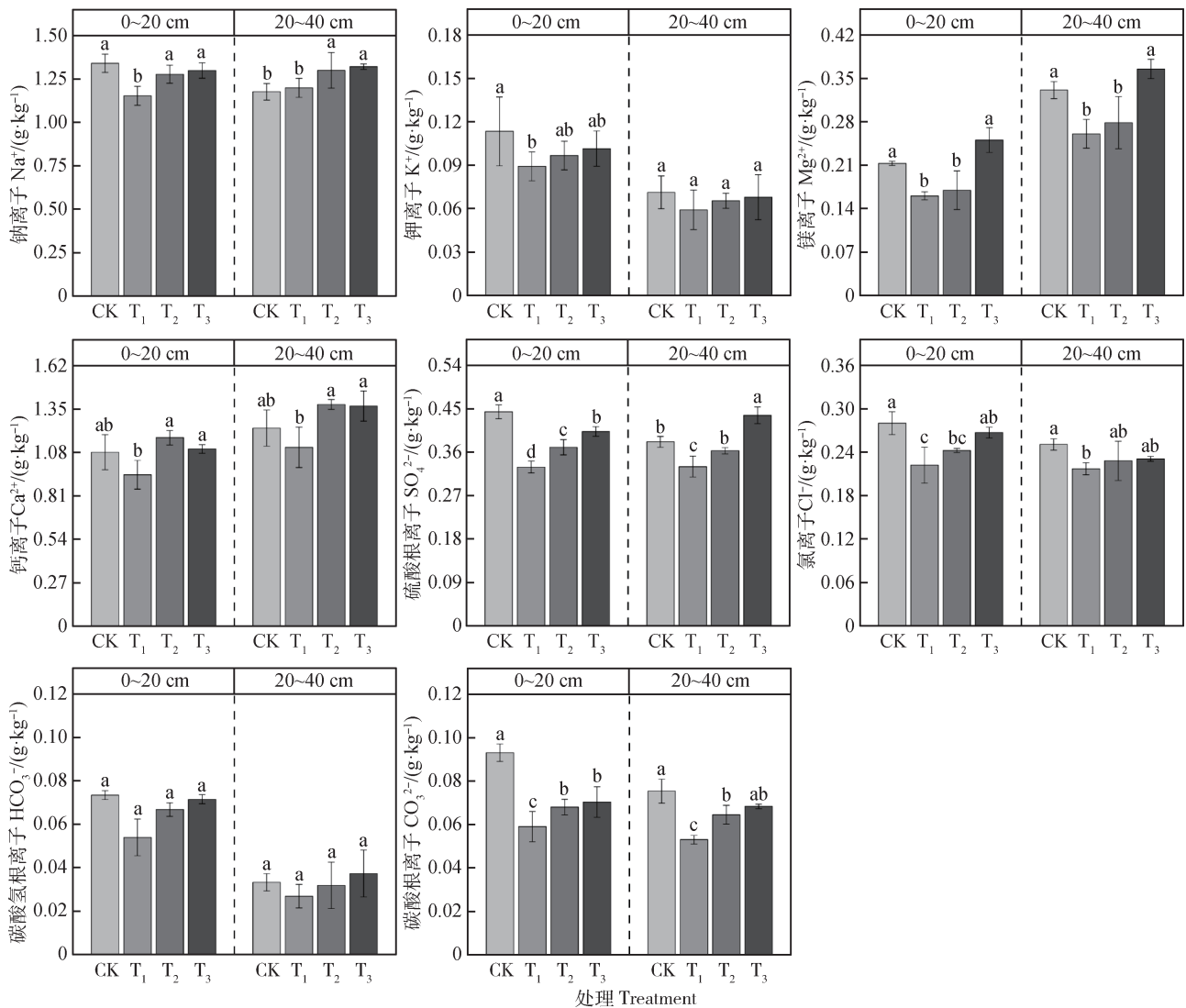


图4 间作盐生植物对土壤水溶性八大盐离子的影响

Fig. 4 Effects of intercropping halophytes on the eight major water-soluble salt ions in soil

2.3 间作盐生植物对土壤养分的影响

间作盐生植物处理显著改善了土壤养分状况 ($P < 0.05$) (图5)。在0~20 cm表层,与CK相比, T₁和T₂处理显著提高了土壤有机质含量 ($P < 0.05$),分别提高了32.11%,15.64%,且T₁处理增幅效果显著优于T₂ ($P < 0.05$),而T₃处理与CK无显著性差异;同时,T₁、T₂和T₃处理均显著提高了土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量 ($P < 0.05$),其中碱解氮含量分别提高了68.48%,45.18%,15.41%;有效磷含量分别提高了25.34%,9.80%,4.86%;速效钾含量分别提高了29.01%,14.80%,8.72%。各养分增幅表现为T₁ > T₂ > T₃ > CK。在20~40 cm亚表层,与CK相比,T₁和T₂处理显著提高了土壤有机质含量 ($P < 0.05$),分别提高了19.93%,16.89%,而T₃处理与CK无显著性差异;此外,各处

理对土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量提升作用亦显著 ($P < 0.05$),其中碱解氮含量分别提高了51.54%,14.99%,7.13%;有效磷含量分别提高了27.58%,13.52%,5.63%;速效钾含量分别提高了15.25%,10.48%,12.28%。总体而言,间作盐生植物能有效提升土壤肥力,其中以间作盐地碱蓬(T₁)的改良效果最优。

2.4 间作盐生植物对土壤生物酶活性影响

经过一个生长季的间作处理,土壤酶活性得到显著提高 ($P < 0.05$) (图6)。在0~20 cm表层,与CK相比,T₁、T₂与T₃处理显著提高了土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性 ($P < 0.05$),增幅范围分别为9.11%~47.57%,6.92%~48.26%,11.93%~39.89%,其中T₁处理提升幅度最大,T₂和T₃处理

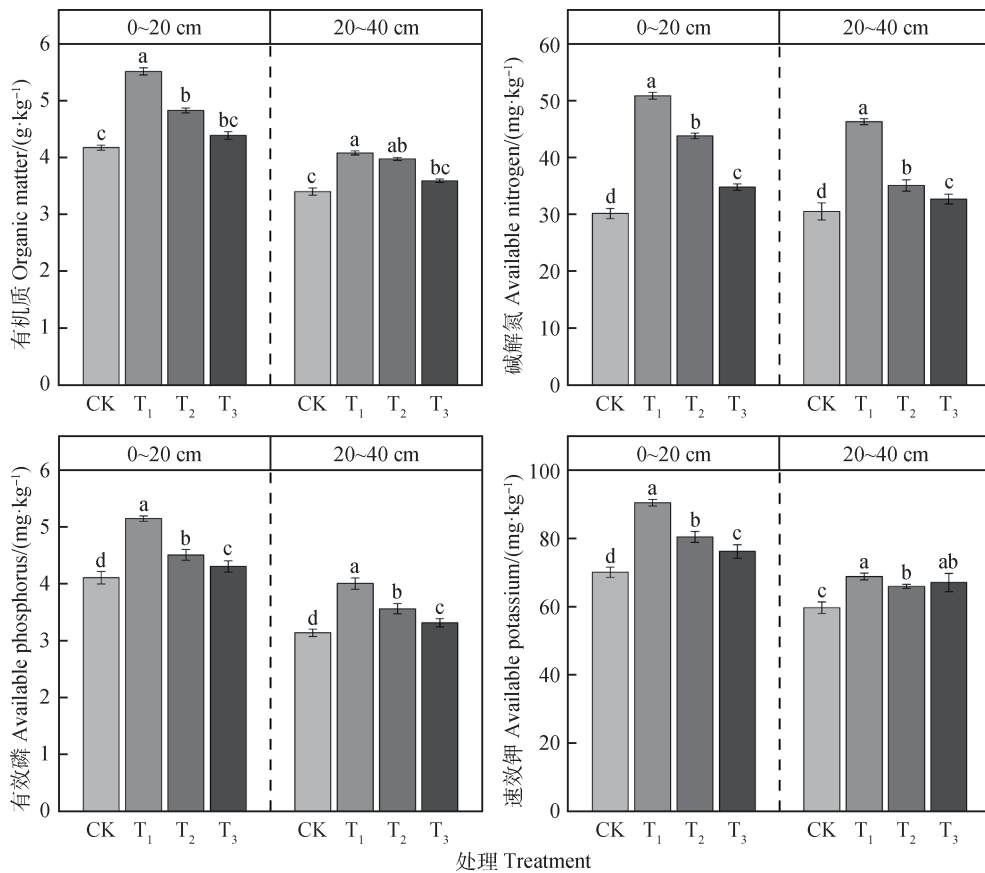


图 5 间作盐生植物对土壤养分的影响

Fig. 5 Effects of intercropping halophytes on soil nutrient properties

次之。在 20~40 cm 亚表层,与 CK 相比, T₁, T₂ 与 T₃ 处理仍显著提高了土壤脲酶活性 ($P < 0.05$), 增幅为 9.59%~50.14%; T₁ 和 T₂ 处理显著提高了土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性 ($P < 0.05$), 蔗糖酶活性分别提高了 42.75%, 17.88%, 过氧化氢酶活性分

别提高了 68.32%, 56.83%, 而 T₃ 处理与 CK 无显著性差异。总体而言, 间作盐生植物 (盐地碱蓬、野榆钱菠菜), 能有效激活土壤生物化学过程, 显著提升土壤酶活性, 从而增强土壤的物质循环能力和解毒功能。

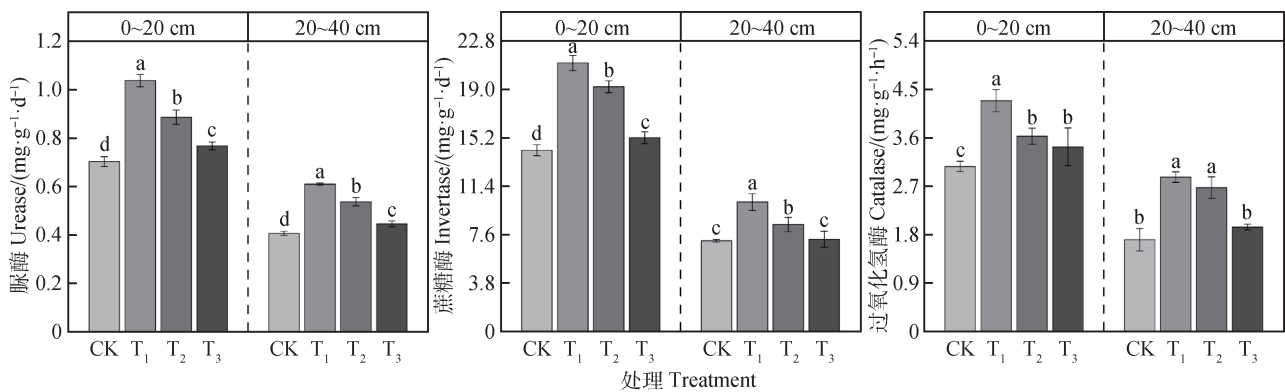


图 6 间作盐生植物对土壤生物酶活性的影响

Fig. 6 Effects of intercropping halophytes on soil enzymatic activities

2.5 间作盐生植物对土壤质量(SQI)的影响

为综合评价间作盐生植物对土壤质量的改良效果, 本研究构建了包含 19 项评价指标的全数据

集, 通过主成分分析计算各指标权重 (表 2), 并采用相应的评分函数进行标准化, 最终计算出土壤质量指数 (SQI)。其中, 对土壤肥力有正向效应的指标

(STP, SOM, TN, AP, AK, UE, INV, CAT)采用“越多越优”型函数,对土壤肥力有负向效应的指标(BD, pH 值, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})采用“越少越优”型函数。

如图 7 所示,在 0~20 cm 表层,与 CK 相比, T_1 处理表现出全面的改良效果(图 7),除 Mg^{2+} 外,其余 18 项指标得分均高于 CK, T_2 和 T_3 处理 HCO_3^- , Ca^{2+} 等盐分离子指标得分较低,但总体综合得分仍高于 CK。

在 20~40 cm 亚表层土壤中,与 CK 相比,各处理的物理、养分及生物酶活性指标得分显著提高了 23.07% 以上,但部分盐分离子得分仍偏低,这可能与深层离子富集现象有关。综合评价结果显示(图 7),间作处理显著提升了土壤质量(SQI)($P < 0.05$)。土壤质量指数(SQI)表现为 $T_1(0.85, 0.72) > T_2(0.54, 0.50) > T_3(0.43, 0.40) > \text{CK}(0.30, 0.25)$,且 T_1 处理显著高于其他处理,表明其综合改良效果最优。

表 2 土壤质量评价指标公因子方差和权重

Table 2 Common factor variance and weight of soil quality evaluation indicators

指标 Indicators	0~20 cm		20~40 cm		指标 Indicators	0~20 cm		20~40 cm	
	公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight		公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight
BD	0.998	0.057	0.970	0.056	K^+	0.774	0.044	0.880	0.051
STP	0.979	0.056	0.970	0.056	Na^+	0.920	0.053	0.979	0.056
pH	0.997	0.069	0.986	0.057	SOM	0.941	0.054	0.926	0.053
TDS	0.885	0.061	0.985	0.057	AN	0.970	0.055	0.925	0.053
CO_3^{2-}	0.962	0.055	0.889	0.051	AP	0.863	0.049	0.659	0.038
HCO_3^-	0.924	0.053	0.914	0.053	AK	0.956	0.054	0.943	0.054
Cl^-	0.713	0.041	0.863	0.050	UE	0.980	0.056	0.994	0.057
SO_4^{2-}	0.879	0.050	0.846	0.049	INV	0.933	0.053	0.892	0.051
Ca^{2+}	0.909	0.052	0.876	0.051	CAT	0.963	0.055	0.949	0.054
Mg^{2+}	0.858	0.049	0.904	0.052					

注:BD 表示容重;STP 表示总孔隙度;TDS 表示全盐量;SOM 表示有机质;AN 表示碱解氮;AP 表示有效磷;AK 表示速效钾;UE 表示脲酶;INV 表示蔗糖酶;CAT 表示过氧化氢酶

Note:BD represents bulk density;STP represents Total porosity;TDS represents Total dissolved salt;SOM represents Organic matter;AN represents Available nitrogen;AP represents Available phosphorus;AK represents Available potassium;UE represents Urease;INV represents Invertase;CAT represents Catalase

2.6 间作盐生植物对湖南稗子生长及产量的影响

由图 8 所示,间作盐生植物显著改善了湖南稗子的生长状况($P < 0.05$)。与 CK 相比, T_1 , T_2 与 T_3 处理显著提高了湖南稗子的株高、干鲜比、出苗率及产量($P < 0.05$),其中,株高分别提高了 16.22%, 10.37%, 10.54%;干鲜比分别提高了 32.69%, 20.42%, 20.23%;出苗率分别提高了 40.71%, 24.54%, 17.41%;产量分别提高了 55.71%, 40.01%, 20.95%。 T_1 处理各项指标均达到了最大值,其株高和干鲜比分别为 146 cm 和 0.37; T_2 和 T_3 处理虽促进了作物生长,但综合效果弱于 T_1 ,且两者的株高和干鲜比无显著性差异。

2.7 间作盐生植物对湖南稗子产量和 SQI 与土壤性质关系

冗余分析(RDA)清晰地揭示了影响湖南稗子产量的关键土壤驱动因子(图 9)。在 0~20 cm 表层,土壤容重(BD)及盐碱化指标(pH 值, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})是限制

产量的主要因子,而土壤肥力(SOM, AN, AP, AK)和生物酶活性(UE, INV, CAT)及孔隙度(STP)则是促进产量的积极因素,与产量和土壤质量指数(SQI)呈正相关关系,上述因子共同解释了 65.37% 的变异。在 20~40 cm 的亚表层, RDA 解释了 58.43% 的变异且各因子对产量的影响强度明显减弱,进一步证实了改良作用主要集中在表层土壤。RDA 识别了关键影响因子,而土壤质量指数(SQI)则整合了这些因子的综合效应。线性回归分析(图 10)进一步证实 SQI 与产量之间存在显著的正线性关系($P < 0.05$)。

Mantel 检验结果揭示了湖南稗子产量与土壤质量指数(SQI)对不同土层环境因子的响应存在显著性差异($P < 0.05$)(图 11)。在 0~20 cm 表层,土壤的物理性质(BD, STP)、盐碱化指标(TDS, CO_3^{2-}),养分(SOM, AN, AK)及酶活性(UE, INV, CAT)均表现出极强的相关性($r \geq 0.5$, $P \leq 0.001$)。相比之下,在 20~40 cm 亚表层,这种协同效应减弱,转变为一种由关键因子主导的响应模式。与产量和 SQI

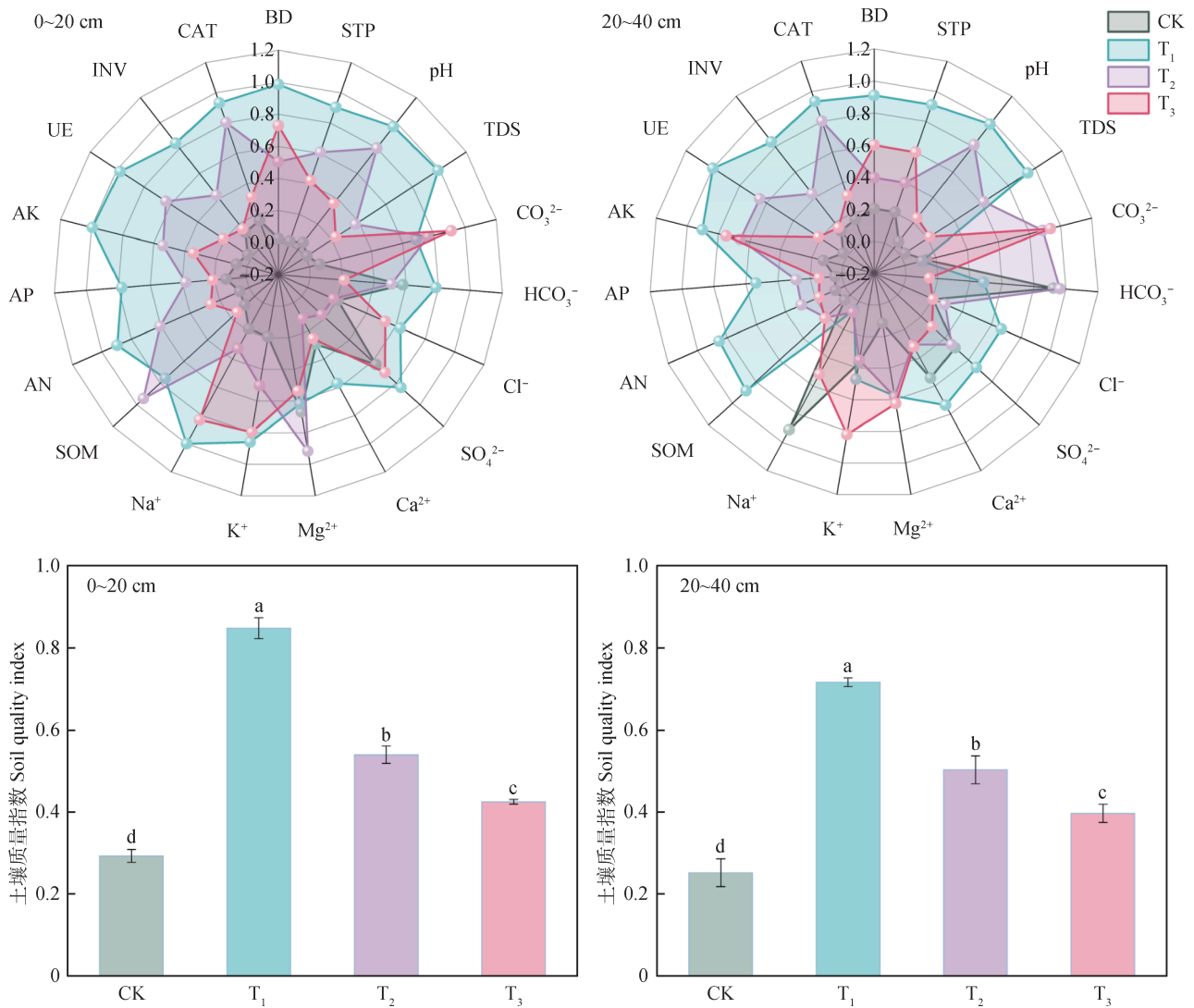


图 7 间作盐生植物对 0~40 cm 土壤指标得分、土壤质量指数的影响

Fig. 7 Effects of intercropping halophytes on 0~40 cm soil indicator scores and soil quality index

注:BD 表示容重;STP 表示总孔隙度;TDS 表示全盐量;SOM 表示有机质;AN 表示碱解氮;AP 表示有效磷;AK 表示速效钾;UE 表示脲酶;INV 表示蔗糖酶;CAT 表示过氧化氢酶,下同

Note:BD represents bulk density;STP represents Total porosity;TDS represents Total dissolved salt;SOM represents Organic matter;AN represents Available nitrogen;AP represents Available phosphorus;AK represents Available potassium;UE represents Urease;INV represents Invertase;CAT represents Catalase, the same as below

显著相关的因子范围显著缩小,主要集中在 pH 值、Na⁺、TDS 和少数酶活性等核心指标上。这表明深层土壤的改良效果和作物响应,更多地依赖于少数关键瓶颈因子的突破。

依据相关分析,本研究构建了偏最小二乘路径模型(PLS-PM, GOF > 0.5)(图 12),模型表现出极高的解释力。模型分别解释了 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤质量指数(SQI)变异的 97.1% 和 95.1%,以及产量变异的 99.1% 和 96.7%。在 0~20 cm 表层土壤,间作盐生植物对土壤的物理性质、肥力水平和土壤的酶活性产生了强烈的正向效应($\beta =$

0.663~0.869, $P < 0.001$)。这些改善的土壤性质共同对 SQI 产生显著的正向驱动($\beta = 0.147 \sim 0.435$, $P < 0.001$),而土壤盐碱特性则呈现负向效应($\beta = -0.153$, $P \geq 0.05$)。最终,土壤质量(SQI)的提升,显著地促进了湖南稗子产量的提高($\beta = 0.423$, $P < 0.05$)。在 20~40 cm 亚表层土壤,间作对土壤的物理性质与酶活性仍具有显著的正向效应($\beta = 0.666 \sim 0.798$, $P < 0.001$),但对土壤的肥力和盐碱特性的影响减弱($\beta = -0.683 \sim -0.542$, $P < 0.01$)。这种分层效应可能源于盐生植物根系在亚表层分布受限,以及离子淋溶与养分下移的滞后性。

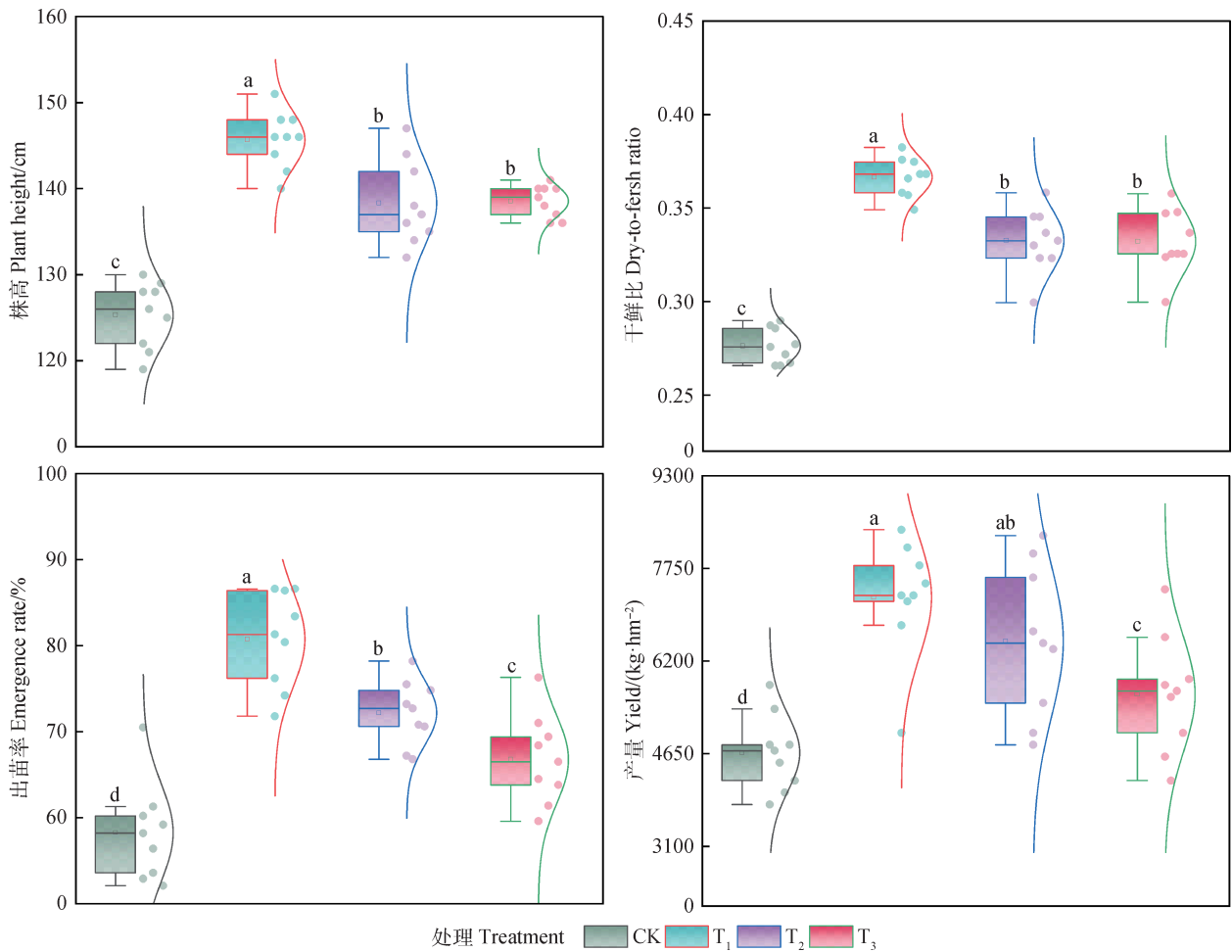


图8 间作盐生植物对湖南稗子生长及产量的影响

Fig. 8 Effects of intercropping halophytes on the growth and yield of *Echinochloa frumentacea*

3 讨论

3.1 间作盐生植物对土壤理化及生物特性的综合改良效应

土壤pH值、全盐和盐分离子含量是表征土壤盐渍化程度的关键指标,也是评估盐碱地改良成效的核心依据^[4]。已有研究表明,在盐碱荒地种植盐生植物(如盐地碱蓬、毛叶苕子、白茎盐角),具有良好的脱盐降碱效果^[21]。本研究进一步表明,与湖南稗子单作(CK)相比,间作盐生植物能显著降低0~40 cm土层pH值、全盐量及 Na^+ 、 Cl^- 等盐分离子含量,其中以盐地碱蓬、和野榆钱菠菜处理效果尤为显著。一方面,在地上部,盐生植物冠层与湖南稗子高秆形成的复合覆盖层,可有效抑制土壤表面水分蒸发,减少“上行水”携带的可溶性盐向表层富集^[22];另一方面,在地下部,盐生植物通过其特化的盐囊泡、盐腺等结构,选择性吸收并富集 Na^+ 、 Cl^- ,

SO_4^{2-} 等有害盐分离子于地上部,通过收获实现盐分的“永久性”移除^[23]。此外,种间互补效应进一步激发了根际协同脱盐作用,盐生植物与湖南稗子的根系分泌的有机酸(如苹果酸、柠檬酸)不仅能直接置换土壤胶体上的交换性 Na^+ ,还可通过降低根际微域pH值,促进 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的溶解,从而加速盐分的淋溶^[7,24]。这与Liang等^[25]和何振邦等^[26]研究结论一致。

土壤容重作为表征土壤物理质量的核心指标,其变化直接调控土壤孔隙结构及水、肥、气、热的耦合过程,进而影响土壤的生态功能^[27]。已有研究表明,禾本科作物如湖南稗子通过高生物量输入与根系交错生长,可显著降低土壤容重,提升孔隙度^[28]。盐生植物(如盐地碱蓬、盐角草等)则因其对高盐、干旱等极端环境具有显著耐受性,被广泛用于改良盐碱地^[29]。然而,单一作物在盐碱生境中的改良效果常受限于耐盐阈值及生物量累积的瓶颈^[30]。本研究发现,间作盐生植物可显著降低0~40 cm土层

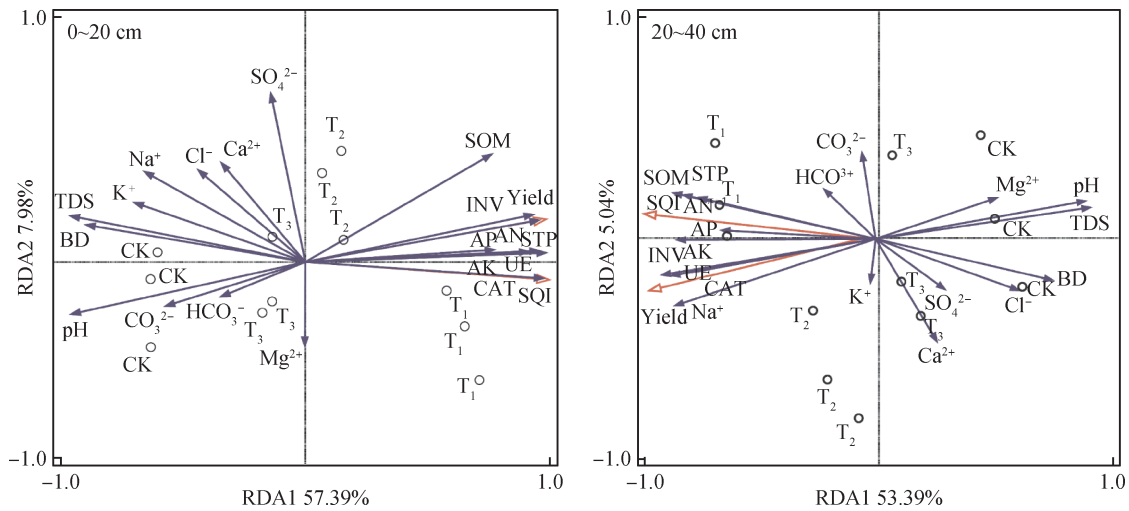


图 9 湖南稗子产量和土壤质量与土壤性质的冗余分析

Fig. 9 Redundancy analysis (RDA) of *Echinochloa frumentacea* yield and soil quality in relation to soil physicochemical properties

注:箭头表示环境变量和响应变量,箭头长度反映变量对排序轴的解释程度;箭头之间的夹角用于表示变量间的相关关系,锐角表示正相关,钝角表示负相关,夹角越小相关性越强

Note: Arrows represent environmental and response variables, and the arrow length reflects the contribution of each variable to the ordination axes. The angle between arrows indicates the correlation between variables, with acute angles representing positive correlations and obtuse angles representing negative correlations; smaller angles indicate stronger correlations

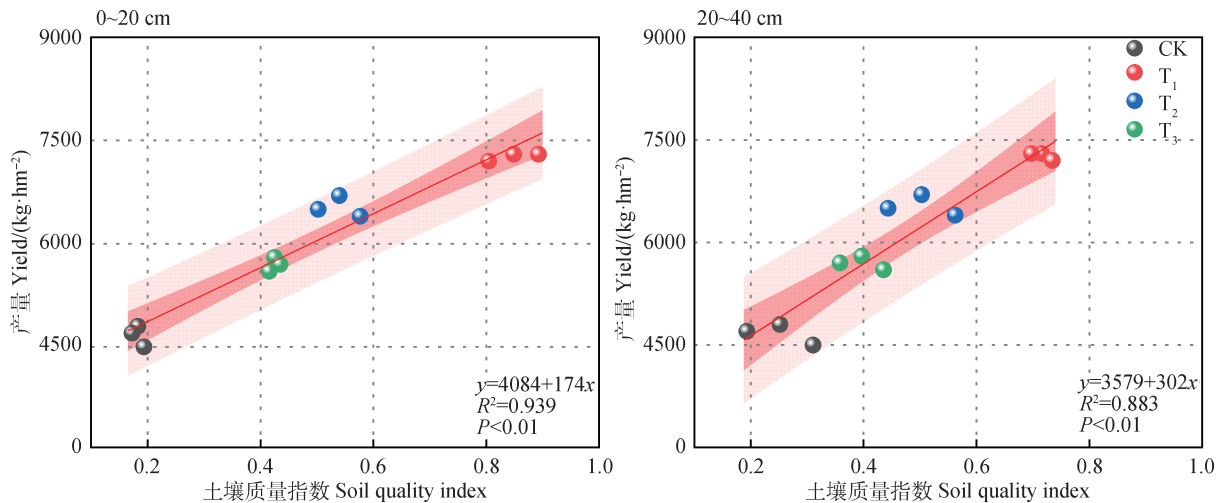


图 10 湖南稗子产量和土壤质量的关系

Fig. 10 Relationship between *Echinochloa frumentacea* yield and soil quality index (SQI)

的土壤容重、提高孔隙度和持水能力,其中湖南稗子、盐地碱蓬间作处理对土壤容重降低幅度(8.84%)及总孔隙度提升(13.38%)尤为显著,进一步验证了深根系与须根系作物在结构互补方面对重构多孔体系的重要性。土壤有机质和养分是衡量土壤肥力的关键指标^[31]。苏媛等^[23]研究指出,盐生植物通过“排盐-促根”双重效应可协同提升盐碱土中养分的生物有效性。汪雪等^[32]研究表明,与单作相比,紫花苜蓿和燕麦间作能显著提高0~40 cm土层的有机质与有效磷含量。本研究也表明,较单

作湖南稗子(CK),间作盐地碱蓬和野榆钱菠菜可以显著提高土壤的有机质、碱解氮、有效磷及速效钾含量,这与Wang等^[33]和李炜蕾等^[34]的研究结果一致。一方面,盐生植物选择性吸收 Na^+ 、 Cl^- 等盐基离子降低土壤渗透势,促进盐分淋溶;同时,根系发育优化了土壤结构,提高孔隙比与水分入渗能力,为养分迁移与微生物活动创造有利条件。另一方面,盐生植物根系分泌有机酸等活性物质,溶解矿物结合态养分;根际富集的功能微生物(如固氮菌、解磷菌)加速了有机质的矿化与养分周转,显著提

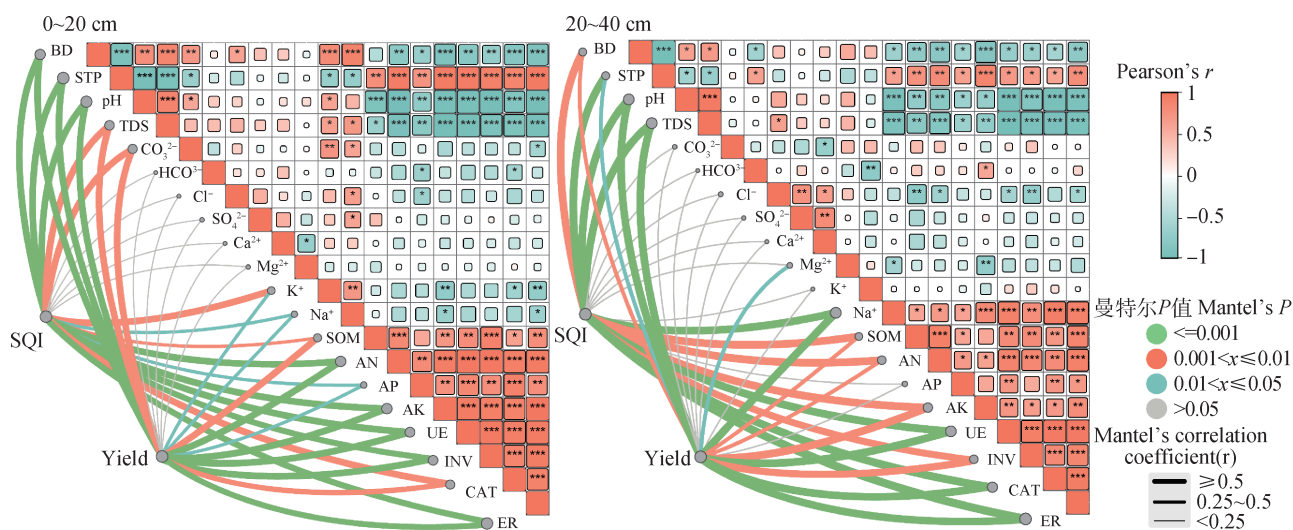


图 11 湖南稗子产量和土壤质量与土壤性质的 Mantel 检验分析

Fig. 11 Mantel test analysis of the relationships between *Echinochloa frumentacea* yield and soil quality with soil properties
 注:ER 表示出苗率;*, **, *** 分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 水平差异显著

Note:ER represents Emergence rate;*, **, and *** indicate significance at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively

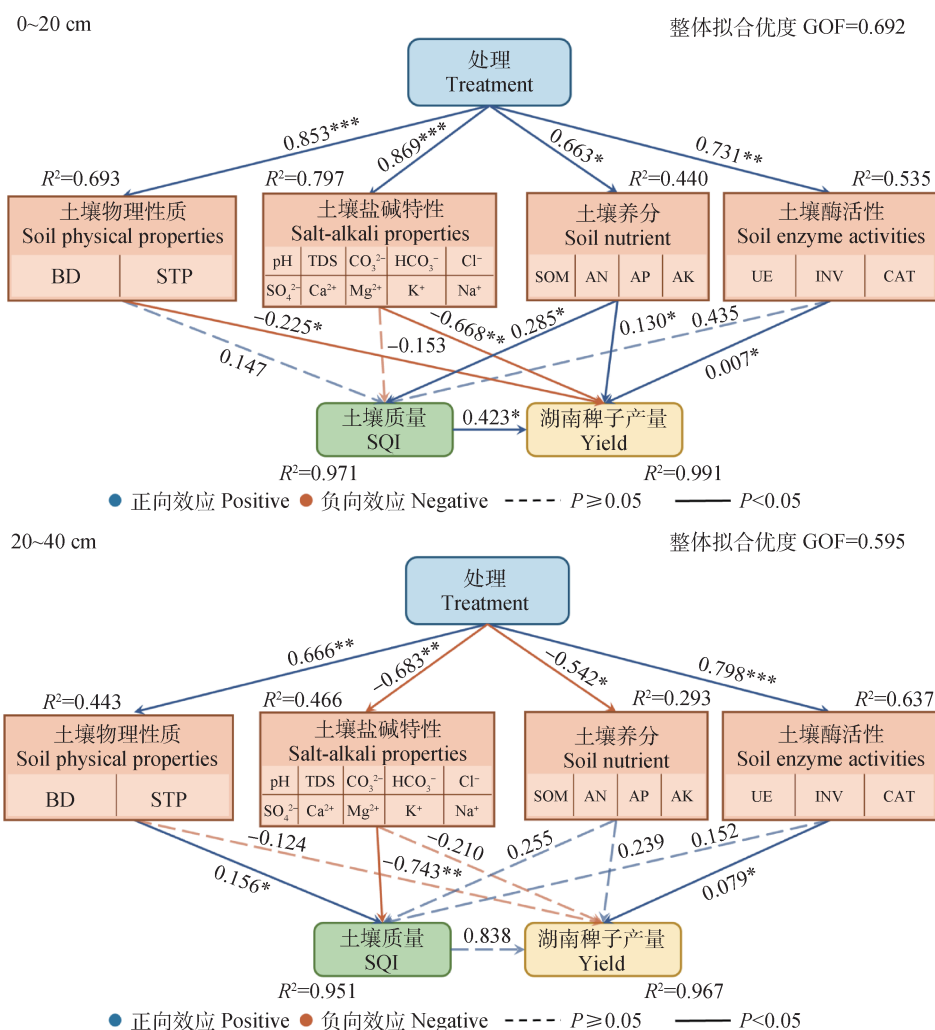


图 12 湖南稗子产量和土壤质量与环境因子的偏最小二乘路径模型

Fig. 12 Partial least squares path modeling (PLS-PM) illustrating the effects of environmental factors on *Echinochloa frumentacea* yield and soil quality

升碱解氮、速效磷等生物有效性^[35]。此外,深根系的盐生植物(如盐地碱蓬)可吸收淋溶至深层土壤的 NO_3^- , K^+ 等养分,经枯落物分解后向表层土壤富集;须根系湖南稗子则高效利用该养分库,实现养分在土体中的循环与协同增效^[36]。该机制与Shrivastava等^[37]的研究结论相似。

土壤酶活性是衡量土壤生物学活性的综合指标,能够反映土壤肥力状况与养分转化进程,可作为评估盐渍化生态系统土壤综合质量演变的预警指标^[38]。前人研究已揭示了间作对土壤酶活性的提升作用,如樊盛菊等^[39]和唐秀梅等^[40]分别在牧草和玉米花生间作系统中观察到多种土壤酶活性的增加。间作可通过优化土壤微生态环境,有效激发土壤生物活性。在此基础上,本研究进一步聚焦于盐生植物间作系统,结果同样显示,土壤的脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性显著提升,这与莫雪等^[41]的研究结果相似。不仅印证了间作模式的普适优势,也为盐渍化土壤的生物修复提供了新的实证支持。一方面,间作模式通过“地上-地下”的协同效应,改善了酶促反应的环境与底物供应,地下部分的深根系与浅根系植物的生态位互补,扩大了根际影响范围,其多样化的根系分泌物为产酶微生物提供了丰富的碳源与能源,直接刺激了其活性^[42]。同时盐生植物发挥其降盐效果,并分泌有机酸共同缓解了盐碱环境对酶蛋白的抑制作用,为土壤酶活性创造了更适宜的微环境^[43]。其次,间作模式促进了地表凋落物的归还,虽然短期内对土壤有机质的贡献有限,但这些凋落物在初期分解的产物,也为土壤肥力的提升奠定了基础^[44]。另一方面,本研究基于一个生长季的观测结果发现,由根系活动驱动的根本过程是土壤酶活迅速响应的关键,而凋落物分解和有机质累积是一个相对缓慢的过程,其对土壤肥力的长期增益效应,需通过更长时间的定位试验来精准评估。

3.2 土壤质量-作物产能协同增效

本研究通过构建土壤质量指数(SQI),综合评估了间作盐生植物对盐渍化土壤的改良效应^[45],并揭示了其与作物产能的内在联系。结果表明,间作处理,尤其是湖南稗子、盐地碱蓬间作(T_1),实现了土壤质量与湖南稗子产量的协同提升,这也印证了盐生植物在盐碱地生态修复中的巨大潜力。然而,这种改良效应并非均匀分布,而是呈现出显著的垂

直分层特征。本研究发现,间作对土壤物理、化学、生物性质的全面改善主要集中在0~20 cm土层,这与构建的偏最小二乘路径模型(PLS-PM)的分析结果高度一致。表层土壤质量的提升(SQI)对湖南稗子产量具有显著的正向效应($\beta=0.423$, $P<0.05$)。其原因是:间作系统通过深浅根系搭配,首先优化了表层土壤的物理结构(降低容重、增加孔隙度),这不仅为作物根系伸展创造了空间,更重要的是改善了土壤的水分运移条件。良好的孔隙结构促进了降雨及灌溉水的入渗,加速了表层盐分离子(Na^+ , Cl^- 等)的淋溶过程,从而有效降低了盐碱化程度^[46]。同时,盐生植物的根系分泌物与归还的凋落物为表层土壤注入了丰富的有机质和能源,激活了微生物群落,提升了脲酶、蔗糖酶等关键酶的活性,进而增强了养分的生物有效性^[47]。这一系列连锁反应,共同构成了一个“结构改善-盐分消减-生物激活-养分增效”的良性微生态循环^[48]。这不仅与Qiu等^[35]提出的“盐生植物通过根际微域调控实现盐碱地快速改良”的观点一致,而且通过PLS-PM量化了这一过程对作物产量的直接贡献。也为项凌飞等^[49]强调的“土壤基础地力”的重要性提供了来自间作系统的实证。与表层相比,间作对20~40 cm土层的改良效果显著减弱。这一发现与窦旭等^[50]研究发现相符。其原因可归结为以下几点:(1)尽管盐生植物具有深根系,但其根系密度、细根数量及分泌物均随土层加深而急剧减少。这意味着在亚表层,根际激发效应和微生物驱动的养分循环强度远低于表层,限制了生物改良的潜力^[51]。(2)盐渍化土壤的亚表层通常更为紧实,导水率低。表层改良后,入渗的水分在此处运移受阻,难以形成有效的淋溶作用来带走深层盐分。同时,虽然植物蒸腾能降低地下水位,抑制盐分随毛细管上升,但这种“隔盐”作用对已存在于亚表层土壤中的原生盐分清除能力有限^[52]。(3)有机质与养分输入的“表聚”现象:凋落物输入和大部分根系死亡都发生在表层,导致有机质和养分循环具有强烈的表聚性。亚表层土壤长期处于“低能量、低输入”状态,微生物活性低,养分贫瘠,形成了一个相对惰性的层次^[53]。因此,间作系统在短期内主要通过对表层土壤的强力改良来创造一个适宜作物生长的“优质表层”,从而实现增产。在盐碱地改良初期,应优先关注和培育表层土壤的健康。对于深层盐渍化严重的土壤,可能需要结合深耕、暗管排盐等工程措施,或依赖

更长期的植物修复过程,才能实现整个剖面的系统性改良。

4 结论

研究表明,湖南稗子与盐地碱蓬间作是一种有效的盐碱地生物改良模式。其核心机制在于通过优化表层土壤(0~20 cm)的微生态环境,即改善土壤结构、降低盐分胁迫、激活生物活性及提升养分有效性,从而显著提高土壤综合质量指数(SQI),并最终实现作物产量的提升。研究揭示了改良效应的垂直分异规律,即表层是改良作用的“热点区域”,而亚表层改良效果受限于根系分布、水分运移和有机质输入。这一发现不仅深化了对盐生植物改良机制的理解,也为制定“表层优先、分层治理”的精准盐碱地改良策略提供了科学依据。未来研究应聚焦于长期定位试验,评估间作系统对深层土壤的持续改良效应,并筛选根系穿透力更强、改良效率更高的盐生植物品种。

参考文献

- [1] ZHENG Y, CAO X, ZHOU Y, et al. Effect of planting salt-tolerant legumes on coastal saline soil nutrient availability and microbial communities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118574
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global status of salt-affected soils: Main Report[R]. Rome: FAO, 2024.
- [3] 张朝辉, 张邦彦, 谢小伟, 等. 盐碱地甜高粱间作大豆对作物生产性能和光合特性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 219-228
ZHANG C H, ZHANG B Y, XIE X W, et al. Effects of sweet sorghum intercropping soybean on crop production performance and photosynthetic characteristics in saline-alkali land[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 219-228
- [4] 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
- [5] 张邦彦, 谢小伟, 张朝辉, 等. 有机-无机改良物料对盐碱地土壤质量及湖南稗子产量的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(8): 15-29
ZHANG B Y, XIE X W, ZHANG C H, et al. Effect of organic-inorganic amendments on the quality of saline-alkaline soil and yield of *Echinochloa frumentacea* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(8): 15-29
- [6] WANG G Z, NI G, FENG G, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: progress and prospects[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(2): 216-228
- [7] 张杨, 曹靖, 李广, 等. 盐碱胁迫下湖南稗子苗期根系分泌物代谢组学[J]. *生态学报*, 2024, 44(8): 3540-3549
ZHANG Y, CAO J, LI G, et al. Metabolomics analysis of root exudates in *Echinochloa frumentacea* seedling stage under saline-alkali stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3540-3549
- [8] 陆安桥, 张峰举, 许兴, 等. 盐胁迫对湖南稗子苗期生长及生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(5): 84-93
LU A Q, ZHANG F J, XU X, et al. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Echinochloa frumentacea* seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(5): 84-93
- [9] 贾晓辉, 张峰举, 谢小伟, 等. 施用不同氮肥对盐碱地湖南稗子生产性能以及养分吸收的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(1): 272-279
JIA X H, ZHANG F J, XIE X W, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on performance and nutrient uptake of *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 272-279
- [10] 万力生, 姜文奎, 刘升林, 等. 海子1号湖南稗子高产性能的研究[J]. *草业科学*, 1991, 8(1): 13-18
WAN L S, JIANG W K, LIU S L, et al. A study on the high-yield property of billion dollar grass[J]. *Pratacultural Science*, 1991, 8(1): 13-18
- [11] ZHANG W L, SHAO J H, HUANG K, et al. The research progress and application prospects of maize intercropping systems in enhancing farmland ecosystem services[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2025, 53(1): 14344
- [12] 王升, 王全九, 周蓓蓓, 等. 膜下滴灌棉田间作盐生植物改良盐碱地效果[J]. *草业学报*, 2014, 23(3): 362-367
WANG S, WANG Q J, ZHOU B B, et al. Effect of interplanting halophyte in cotton fields with drip irrigation under film to improve saline-alkali soil[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(3): 362-367
- [13] 董积忠, 尹传华, 王海孝, 等. 两种盐生植物生物移盐能力及土壤改良效果比较[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 124-128
DONG J Z, YIN C H, WANG H X, et al. Comparison of two species of halophyte in removing and reducing soil salinity from saline soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(1): 124-128
- [14] 杨策, 陈环宇, 李劲松, 等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(10): 1578-1586
YANG C, CHEN H Y, LI J S, et al. Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1578-1586
- [15] 王宁, 赵振勇, 张心怡, 等. 几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6): 1104-1112
WANG N, ZHAO Z Y, ZHANG X Y, et al. Salt absorption capacity and ecological significance of selected chenopodiaceae halophytes[J]. *Journal of New Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022,

- 28(6):1104-1112
- [16] 张甘霖. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社, 2012:13-17
ZHANG G L. Methods for laboratory analysis of soil investigation[M]. Beijing: Science Press, 2012:13-17
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:70-123
LU R K. Methods for agro-chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:70-123
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000:22-37
BAO S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:22-37
- [19] ALEF K, NANNIPIERI P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry [M]. London, San Diego: Academic Press, 1995:310-320
- [20] CHANG F, ZHANG H, SONG J, et al. Once-middle amount of straw interlayer enhances saline soil quality and sunflower yield in semi-arid regions of China: evidence from a four-year experiment [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344:118530
- [21] 李晓瑾, 郭丽琢, 高玉红, 等. 不同植物对河西盐渍土的改良效果[J]. 核农学报, 2024, 38(12):2442-2450
LI X J, GUO L Z, GAO Y H, et al. The effects of different plants on saline-alkali soil in the Hexi Region [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(12):2442-2450
- [22] 张蛟, 崔士友. 盐生植物和秸秆覆盖对滩涂极重度盐土养分和降盐效果的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(1):56-61
ZHANG J, CUI S Y. Effects of halophyte and straw mulching on soil nutrients and desalting in extreme saline soil of mudflat areas [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(1):56-61
- [23] 苏媛, 田长彦, 买文选, 等. 滴灌条件下西北干旱区农田生物排盐研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(4):925-938
SU Y, TIAN C Y, MAI W X, et al. Progress and prospect of biological salt removal from farmland under drip irrigation in arid area of northwest China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4):925-938
- [24] ZHAO Y, LI T, LIU J, et al. Ecological stoichiometry, salt ions and homeostasis characteristics of different types of halophytes and soils [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 990246
- [25] LIANG J, SHI W. Cotton/halophytes intercropping decreases salt accumulation and improves soil physicochemical properties and crop productivity in saline-alkali soils under mulched drip irrigation: a three-year field experiment [J]. Field Crops Research, 2021, 262:108027
- [26] 何振邦, 郭丽琢, 高玉红, 等. 三种盐生植物对河西地区盐渍土理化性状的改良作用[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(6):210-217
HE Z B, GUO L Z, GAO Y H, et al. Improvement effect of three halophytes on the physical and chemical properties of saline soils in hexi corridor [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(6):210-217
- [27] SCHILLACI C, PEREGO A, VALKAMA E, et al. New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780:146609
- [28] 李明明. 盐生植物 || 湖南稗子间作改良盐碱地效果研究[D]. 银川:宁夏大学, 2024:22-36
LI M M. Study on the effect of intercropping of halophytes || *Echinochloa frumentacea* to improve saline-alkaline land [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024:22-36
- [29] 郭洋, 陈波浪, 盛建东, 等. 几种一年生盐生植物的吸盐能力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):269-276
GUO Y, CHEN B L, SHENG J D, et al. Salt absorption capacities of several annual halophytes [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1):269-276
- [30] 雷金银, 张建宁, 班乃荣, 等. 不同类型耐盐植物对盐碱土物理性质的影响[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(12):58-60
LEI J Y, ZHANG J N, BAN N R, et al. Effects of different types of salt-tolerant plants on the physical properties of saline-alkali soil [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011, 52(12):58-60
- [31] 朱华. 土壤有机质对农业土壤肥力的影响及其改良措施[J]. 河北农机, 2025(4):123-125
ZHU H. Effects of soil organic matter on agricultural soil fertility and its improvement measures [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2025(4):123-125
- [32] 汪雪, 刘晓静, 王静, 等. 紫花苜蓿-燕麦连续间作下根系及土壤养分时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10):2683-2692
WANG X, LIU X J, WANG J, et al. Temporal-spatial variations of root and soil nutrient under continuous intercropping of alfalfa and oat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10):2683-2692
- [33] WANG J C, SONG M N, YAO L R, et al. Metagenomic analysis reveal the phytoremediation effects of monocropping and intercropping of halophytes *halogeton glomeratus* and *suaeda glauca* in saline soil of northwestern china [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25:213
- [34] 李炜蕾, 丁习武, 王晓婷, 等. 间作盐生植物对马铃薯产量、盐碱地改良和经济效益的影响[J]. 中国蔬菜, 2023(6):92-96
LI W Q, DING X W, WANG X T, et al. Effects of intercropping halophytes on potato yield, improvement of saline-alkali land and economic benefits [J]. China Vegetables, 2023(6): 92-96
- [35] QIU L P, KONG W B, ZHU H S, et al. Halophytes increase rhizosphere microbial diversity, network complexity and function in inland saline ecosystem [J]. Science of the Total Environment, 2022, 831:154944
- [36] 何子建, 史文娟, 杨军强. 膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23):129-138
HE Z J, SHI W J, YANG J Q. Water and salt transport and desalination effect of halophytes intercropped cotton field with

- drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 129-138
- [37] SHRIVASTAVA P, KUMAR R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2014, 22(2): 123-131
- [38] 李冬林, 张姣佼, 杨磊, 等. 水系连通与碱蓬复播对滨海退化湿地植被恢复及土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2025, 34(9): 1421-1431
- LI D L, ZHANG J J, YANG L, et al. Effects of water system connectivity and reseeded of Suaeda salsa on vegetation restoration and soil physical and chemical properties in degraded coastal wetlands[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(9): 1421-1431
- [39] 樊盛菊, 齐树亭, 武洪庆, 等. 盐生植物根际对土壤中微生物数量和酶活性的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2006(1): 38-41
- FAN S J, QI S T, WU H Q, et al. Effect of the halophytes rhizosphere on the amount of microorganism and the enzyme activity in soil[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2006(1): 38-41
- [40] 唐秀梅, 黄志鹏, 吴海宁, 等. 玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 223-230
- TANG X M, HUANG Z P, WU H N, et al. Correlation and principal component analysis of the soil environmental factors in corn/peanut intercropping system[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 223-230
- [41] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 895-904
- MO X, CHEN F J, YOU C, et al. Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in yellow river delta[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 895-904
- [42] 王雨晴, 马子奇, 侯嘉欣, 等. 盐胁迫下植物根系分泌物的成分分析与生态功能研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(1): 12-23
- WANG Y Q, MA Z Q, HOU J X, et al. Research progress in the composition analysis and ecological function of plant root exudates under salt stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2024, 40(1): 12-23
- [43] ZHANG X, WEI L Q, WANG Z Z, et al. Physiological and molecular features of puccinellia tenuiflora tolerating salt and alkaline-salt stress[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 55(3): 262-276
- [44] TANG X M, JIANG J, HUANG Z P, et al. Sugarcane/peanut intercropping system improves the soil quality and increases the abundance of beneficial microbes[J]. Journal of Basic Microbiology, 2021, 61(2): 165-176
- [45] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 91-98
- MEI N, GU Y, LI D Z, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 91-98
- [46] GUERCHI A, MNAFGUI W, JABRI C, et al. Improving productivity and soil fertility in medicago sativa and hordeum maritimum through intercropping under saline conditions[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 158
- [47] SONG H Y, CHEN D, SUN S X, et al. Peach-Morchella intercropping mode affects soil properties and fungal composition[J]. PeerJ, 2021, 9: e11705
- [48] BROOKER R W, BENNETTA E, CONG W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. New Phytologist, 2015, 206(1): 107-117
- [49] 项凌飞, 张峰举, 麻冬梅, 等. 氮磷钾配施对盐碱地湖南稷子生产性能和营养品质的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(7): 185-195
- XIANG L F, ZHANG F J, MA D M, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium rationing on production performance and nutritional quality of Echinochloa frumentacea in saline soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 185-195
- [50] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 279-290, 330
- DOU X, SHI H B, LI R P, et al. Distribution characteristics of salinity and nutrients in salinized soil profile and estimation of salt migration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 279-290, 330
- [51] SAMPEDRO I, PÉREZ-MENDOZA D, TORAL L, et al. Effects of halophyte root exudates and their components on chemotaxis, biofilm formation and colonization of the halophilic bacterium halomonas anticariensis FP35T[J]. Microorganisms, 2020, 8(4): 575
- [52] CALLAGHAN M V, CEY E E, BENTLEY L R. Hydraulic conductivity dynamics during salt leaching of a sodic, structured subsoil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1563-1574
- [53] SHEIN E V, UMAROVA A B, DEMBOVETSKII A V, et al. Effect of subsoil compaction on the hydraulic processes in landscapes[J]. International Agrophysics, 2003, 17(3): 117-122

(责任编辑 刘婷婷)