

研究报告

DOI:10.14188/j.ajsh.20251229001

沙埋对沙质盐碱地人工种植碱蓬生长与饲用特性的影响

李相儒¹, 赵丹^{2,3}, 李平¹, 李挺¹, 吕俊龙¹, 王忠¹, 迟晨旭^{2,3}, 贾晓鹏², 贾荣亮^{2*}

(1. 内蒙古库布其沙漠技术研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 沙埋是风沙盐碱区常见的生态过程,可显著改变盐生植物生境,并影响其生长适应。为评估沙埋对盐生饲用植物的生长与饲用特性的影响,以内蒙古典型中重度盐碱地人工种植碱蓬(*Suaeda glauca*)为对象,测定了不同沙埋处理0 cm(对照)、轻度沙埋(5 cm)、中度沙埋(10 cm)和重度沙埋(15 cm)下碱蓬种群盖度、密度、高度、归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等生长指标和粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)与酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量等饲用特性指标变化,并分析了不同沙埋处理下土壤理化性质的变化。结果表明:不同沙埋处理程度对碱蓬生长的影响存在差异。随着沙埋程度增加,株高和盖度总体升高,重度处理下分别由(4.5±1.5) cm和28.0%±4.0%增至(9.8±2.0) cm和49.0%±7.0%,但密度由(180±10)株/m²降至(125±10)株/m²;NDVI在中度沙埋处理下最高(0.80±0.10),说明中度沙埋更有利于碱蓬生长指标的协调改善。碱蓬饲用特性对沙埋处理反应明显,其中中度沙埋处理下CP、NDF和ADF分别达到(210±18) g/kg、62.0%±3.0%和34.0%±2.5%,表明中度沙埋显著改变了碱蓬的饲用特性。随着沙埋程度增加,电导率(EC)和Na⁺分别由(1.82±0.14) mS/cm和(5.10±0.28) mg/g降至(1.05±0.11) mS/cm和(3.90±0.18) mg/g,而土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和AP均在中度沙埋处理下达到较高水平,分别为(4.16±0.16) g/kg、(0.36±0.04) g/kg和(7.50±0.60) mg/kg,表明中度沙埋在缓解土壤盐分胁迫和改善养分状况方面综合效果较好。总体而言,中度沙埋在改善土壤环境和促进碱蓬生长方面效果较为明显,并显著影响其饲用特性,可为沙质盐碱地人工种植碱蓬的沙埋调控提供参考。

关键词: 碱蓬;沙埋;盐碱地;饲用特性

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)02-0196-10

Effects of sand burial on the growth and forage traits of artificially cultivated *Suaeda glauca* in sandy saline-alkali soil

LI Xiangru¹, ZHAO Dan², LI Ping¹, LI Ting¹, LÜ Junlong¹, WANG Zhong¹,CHI Chenxu^{2,3}, JIA Xiaopeng², JIA Rongliang^{2*}

(1. Inner Mongolia Kubuqi Desert Research Institute, Ordos 017000, Inner Mongolia, China;

2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sand burial is a common ecological process in wind-sandy saline-alkali regions and can substantially alter

收稿日期: 2025-12-29 修回日期: 2026-03-23 接受日期: 2026-04-15

作者简介: 李相儒(1990-),男,高工,研究方向为荒漠化治理,E-mail: lixr109@163.com

*通信作者: 贾荣亮(1980-),男,博士,教授,研究方向为干旱区植物生理生态学,E-mail: rongliangjia@163.com

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFHH0028)

引用格式: 李相儒, 赵丹, 李平, 等. 沙埋对沙质盐碱地人工种植碱蓬生长与饲用特性的影响[J]. 生物资源, 2026, 48(2): 196-205.

Li X R, Zhao D, Li P, et al. Effects of sand burial on the growth and forage traits of artificially cultivated *Suaeda glauca* in sandy saline-alkali soil [J]. Biotic Resources, 2026, 48(2): 196-205.

the habitat conditions of halophytes, thereby affecting their growth and adaptive performance. To evaluate the effects of sand burial on the growth and forage traits of halophytic forage plants, artificially cultivated *Suaeda glauca* growing in a typical moderately to heavily saline - alkali field in Inner Mongolia was selected as the study species. Four sand burial treatments were established: 0 cm (control), 5 cm (light burial), 10 cm (moderate burial), and 15 cm (severe burial). Growth parameters, including population coverage, density, plant height, and normalized difference vegetation index (NDVI), together with forage traits-related indices, including crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), and acid detergent fiber (ADF), were determined. Soil physicochemical properties under different burial treatments were also analyzed. The results showed that the effects of sand burial on the growth of *S. glauca* differed among burial depths. With increasing burial depth, plant height and coverage increased overall. The height and coverage of plants under severe treatment increased from (4.5 ± 1.5) cm and $28.0\% \pm 4.0\%$ to (9.8 ± 2.0) cm and $49.0\% \pm 7.0\%$, respectively, but the population density decreased from (180 ± 10) to (125 ± 10) plants m^{-2} . NDVI was highest under moderate burial (0.80 ± 0.10), indicating that this treatment was more conducive to the coordinated improvement of plant growth performance. The forage traits of *S. glauca* also responded markedly to sand burial. Under moderate burial, CP, NDF, and ADF reached (210 ± 18) g/kg, $62.0\% \pm 3.0\%$, and $34.0\% \pm 2.5\%$, respectively, suggesting that moderate burial significantly altered forage traits-related traits. In addition, with increasing burial depth, soil EC and Na^+ decreased from (1.82 ± 0.14) mS/cm and (5.10 ± 0.28) mg/g to 1.05 ± 0.11 mS/cm and 3.90 ± 0.18 mg/g, respectively, whereas SOC, TN, and AP reached relatively high levels under moderate burial, with values of (4.16 ± 0.16) g/kg, (0.36 ± 0.04) g/kg, and (7.50 ± 0.60) mg/kg, respectively. These results indicate that moderate burial had a relatively favorable overall effect on alleviating soil salt stress and improving soil nutrient status. Overall, moderate sand burial was more effective in improving the soil environment and promoting the growth of *S. glauca*, while also significantly affecting its forage traits. These findings provide a theoretical basis for the regulation of sand burial in the artificial cultivation of *S. glauca* on sandy saline-alkali land.

Key words: *Suaeda glauca*; sand burial; saline-alkali soil; forage traits

0 引言

土地盐碱化是中国干旱、半干旱区常见的土地退化现象,严重影响区域生态安全与土地资源的可持续利用,其发生面积已超过 1.5 亿 hm^2 ^[1]。其中,在内蒙古农牧交错区广泛分布的沙质盐碱地,因其土壤结构松散、养分含量低、保水保肥能力差,加之盐分胁迫显著,普遍存在植被覆盖度低、群落稳定性差和生态恢复困难等问题,成为当地盐碱地治理中的重点与难点^[2],亟需因地制宜寻找低成本、高效率的盐碱地改良措施,以提高沙质盐碱地的生态功能、生产能力和综合利用价值^[3]。

在风沙活动频繁的沙质盐碱地中,沙埋是普遍发生的自然现象,也是影响植物生长与盐碱地植被恢复的重要环境因子^[4]。已有研究表明,适度沙埋可削弱地表返盐,降低土壤 pH 和蒸发强度,改善表层微区水盐环境,从而促进植物萌发与生长^[5]。基于此,利用沙埋调控地表环境被认为是荒漠化防治和盐碱地改良中的有效途径^[6]。然而,沙质盐碱地植被恢复同时受到盐碱胁迫与风沙扰动的双重影响,不同沙埋厚度在调节土壤环境和影响植物生长方面可能存在显著差异:沙埋过浅难以形成有效调节,过深则可能对植株生长产生抑制作用^[7-8]。因

此,在盐碱-风沙复合生境下开展沙埋梯度研究,对于明确沙埋改良沙质盐碱地的作用效果及适宜沙埋厚度具有重要意义。

除适宜的沙埋调控外,植物材料的选择同样是影响沙质盐碱地改良效果的重要因素。通常情况下,中重度盐碱地植被稀疏,仅依靠自然恢复难以在短期内形成稳定且具有利用价值的植被。因此,选择耐盐性强、生长较快且兼具利用价值的植物开展人工种植,成为推动沙质盐碱地快速改良和利用的现实需求。碱蓬(*Suaeda glauca*)作为典型一年生盐生植物,具有生长快、耐盐性强、适应性广等特点,同时兼具一定饲用潜力,是沙质盐碱地人工种植与生物改良的理想植物^[9-10]。若将人工种植碱蓬与沙埋调控相结合,可能有助于改善其生长环境,提高植株生长表现和利用价值,从而为盐碱地生物改良提供新的思路。

为验证这一设想,本文以内蒙古典型沙质盐碱地人工种植碱蓬为对象,分析不同沙埋厚度对其生长、饲用特性及土壤环境的影响,明确不同沙埋程度对沙质盐碱地人工种植碱蓬的影响差异及相对适宜的调控范围,为盐碱地的改良利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇盐碱地生物改良试验示范区(39.31°N~39.57°N,108.22°E~108.46°E,海拔1200~1400 m)进行。该区位于库布其沙漠与毛乌素沙地交接处,属于温带大陆性干旱-半干旱气候,年平均气温约7.6℃,年平均降水量280~300 mm,降水集中于7月—9月,年蒸发量大于2000 mm,全年盛行西风和西北风,风蚀作用显著^[11]。受此气候条件的影响,土壤以沙质盐碱土为主,盐碱化程度较高,地表常形成盐壳和板结层,属典型的沙质盐碱地。天然植被以稀疏盐生杂类草群落为主,植被盖度较低^[12]。在盐碱地综合利用试验生物改良试验示范中,前期于该区整地后播撒碱蓬种子,随后实施封育管理,并设置不同的沙埋程度。

1.2 试验设计

结合研究区盐碱地自然沙埋状况及碱蓬植株生长特征,设置4个沙埋处理程度:无沙埋(对照,0 cm)、轻度沙埋(5 cm)、中度沙埋(10 cm)和重度沙埋(15 cm)。为模拟研究区实际沙埋过程,沙埋处理采用分阶段实施方式:播种时统一覆沙2 cm,植株生长中期在此基础上分别继续加沙3、8和13 cm,最终形成5、10和15 cm 3个沙埋处理水平。

2025年7月,在各处理区内选取代表性样地,每个处理设置3个50 cm×50 cm样方作为重复,共设置12个样方。为减少相邻样方间的相互干扰,各样方间距均不小于2 m。

1.3 样品采集

于植被调查同期,在各样方内开展植株与土壤样品采集。植株调查内容包括碱蓬盖度、密度、株高和归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)。其中,盖度采用目测法估算植株投影面积占样方面积的比例,由同一人完成重复观测;密度按样方内实测株数折算为株/m²;株高在每个样方内随机选取5株测定并取平均值;NDVI采用手持式植被指数仪垂直下视测定,每样方重复测定2~3次后取平均值^[13]。

植株样品采集时,剪取各样方内距地表约2 cm以上的全部地上部分,混合作为该样方植物样品,装入信封带回实验室。样品于65℃条件下烘干至恒重后粉碎,并过1 mm筛备用,用于后续饲用特性测定。

土壤样品采集时,在每个样方内按“S”形布点法采集0~20 cm土层土样,去除表层枯落物后用土

钻取样,5点混合形成1个代表性土样。土样带回后自然风干、研磨并过筛,其中一般测定样品过1 mm筛,SOC和TN测定样品进一步研磨后过细筛备用^[14]。

1.4 指标测定

植物样品主要测定饲用特性指标,包括粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)与酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)。其中,CP采用凯氏定氮法测定总氮含量,并按N×6.25换算;NDF和ADF采用Van Soest洗涤纤维分析体系测定,结果分别以g/kg(干基)和干物质质量分数(%)表示^[15-17]。

土壤样品主要测定土壤酸碱度、电导率、可溶性盐离子及养分指标。土壤pH和电导率(EC)采用土:水=1:5(W/V)浸提法测定;可溶性Na⁺含量采用离子色谱法测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热氧化法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;有效磷(AP)采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定^[18]。

1.5 统计分析方法

方差分析(analysis of variance, ANOVA)用于检验不同沙埋程度处理下土壤理化指标、碱蓬生长指标及饲用特性指标的差异,其中以沙埋厚度为自变量,各测定指标为因变量;当差异显著时,采用Tukey HSD法进行事后多重比较^[19]。进一步计算土壤理化性质与碱蓬生长性状、饲用特性指标之间的Pearson相关系数,量化变量间的相关性,并绘制相关性热图^[20]。受样方数量限制,相关性分析结果主要用于揭示变量间的关联趋势,不代表严格因果关系。所有统计分析在R软件(4.5.2)中进行。

2 结果与分析

2.1 沙埋程度对碱蓬生长的影响

不同沙埋程度下碱蓬生长指标差异显著(图1, $P<0.05$)。随沙埋程度增加,株高和盖度总体升高,NDVI呈先升后降趋势,密度则总体下降。

株高以重度沙埋处理最高,为(9.8±2.0) cm,显著高于其余处理($P<0.05$);对照、轻度沙埋和中度沙埋处理之间差异不显著($P>0.05$)。盖度也在重度沙埋处理下达到最大值,为49.0%±7.0%,显著高于中度沙埋处理($P<0.05$),与对照和轻度沙埋处理差异不显著($P>0.05$)。

与株高和盖度不同,NDVI在中度沙埋处理下最高,为0.80±0.10,显著高于其余处理($P<$

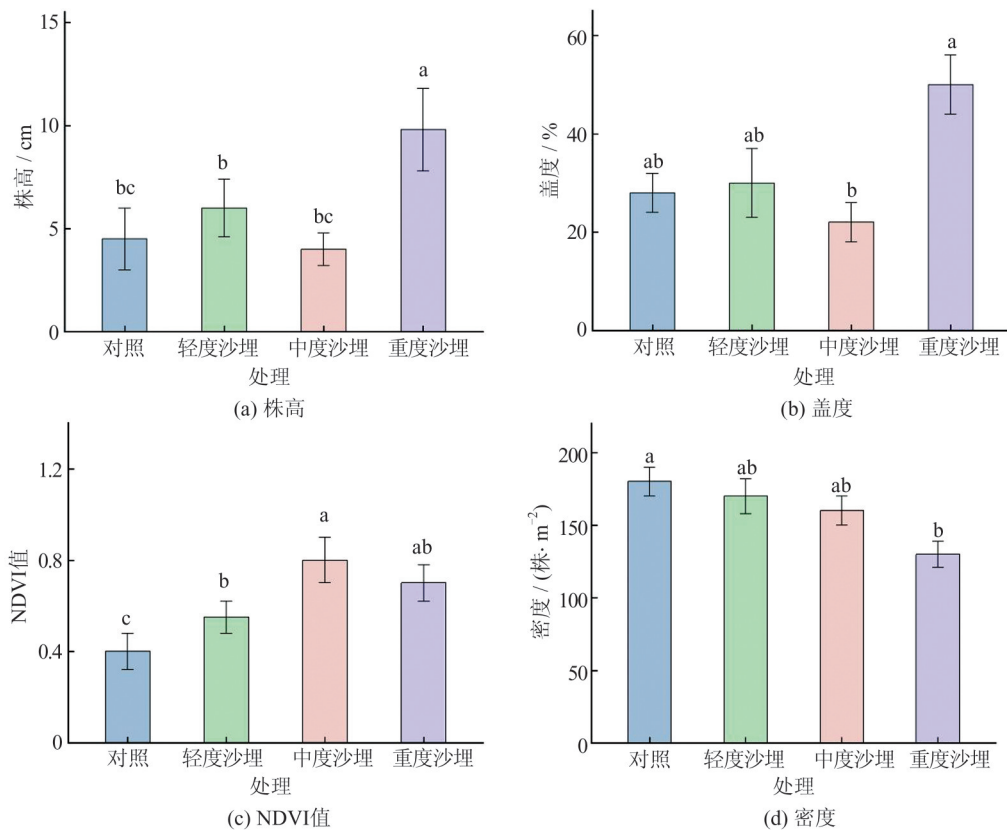


图1 不同沙埋程度碱蓬的生长指标差异

Figure 1 Differences in growth indices of *Suaeda glauca* under different sand burial treatments

0.05)。密度则以对照处理最高、重度沙埋处理最低,分别为 (180 ± 10) 株/ m^2 和 (125 ± 10) 株/ m^2 ,且重度沙埋处理显著低于对照处理($P < 0.05$);轻度和中度沙埋处理处于两者之间,差异不显著($P > 0.05$)。

由此可见,重度沙埋处理下株高和盖度较高,中度沙埋处理下NDVI最大,而密度随沙埋程度增加总体下降。

2.2 沙埋程度对碱蓬饲用特性的影响

不同沙埋程度下碱蓬饲用特性指标差异显著

(图2, $P < 0.05$)。3项指标对沙埋处理的响应趋势基本一致,CP、NDF和ADF均在中度沙埋处理下达到较高水平。

NDF在中度沙埋处理下最高,为 $62.0\% \pm 3.0\%$,显著高于轻度沙埋处理($P < 0.05$),与对照和重度沙埋处理差异不显著($P > 0.05$)。ADF的变化趋势与NDF一致,中度沙埋处理最高,为 $34.0\% \pm 2.5\%$,显著高于轻度沙埋处理($P < 0.05$),与对照和重度沙埋处理差异不显著($P > 0.05$)。

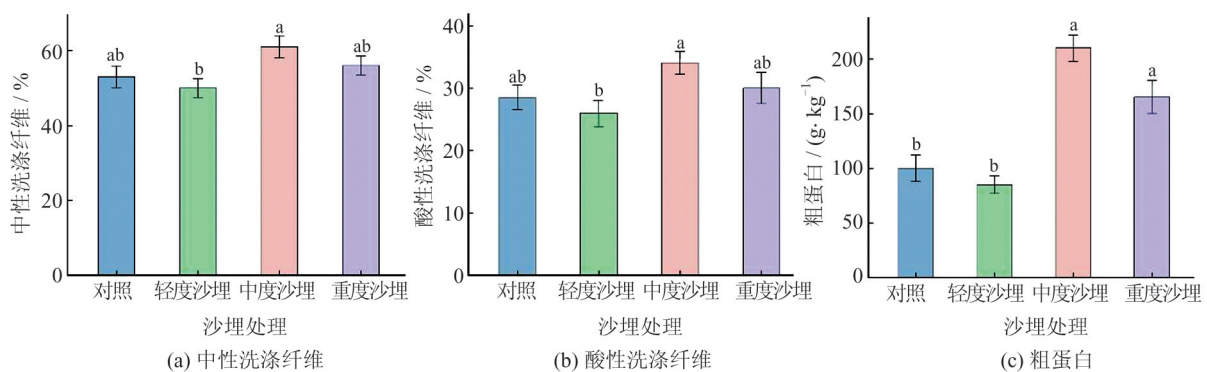


图2 不同沙埋程度碱蓬的饲用特性指标差异

Figure 2 Differences in forage quality indices of *Suaeda glauca* under different sand burial treatments

CP在中度沙埋处理最高,为 (210 ± 18) g/kg,显著高于对照和轻度沙埋处理($P<0.05$);重度沙埋处理为 (165 ± 20) g/kg,与中度沙埋处理差异不显著($P>0.05$),但显著高于对照和轻度沙埋处理($P<0.05$);对照与轻度沙埋处理之间差异不显著($P>0.05$)。

综上,中度沙埋处理下CP、NDF和ADF数值均较高,轻度沙埋处理整体较低,不同沙埋程度下碱蓬饲用特性表现出明显差异。

2.3 沙埋程度对土壤理化性质的影响

不同沙埋程度下土壤理化指标存在显著差异(图3, $P<0.05$)。其中,pH变化幅度较小,EC和 Na^+ 随沙埋程度增加而下降,SOC、TN和AP则呈先升高后下降的趋势。

研究发现,各处理间土壤pH差异不显著($P>0.05$),数值由 9.20 ± 0.08 降至 8.75 ± 0.04 。相比之下,EC随沙埋程度增加持续下降,由对照处理的 1.82 ± 0.14 mS/cm降至重度沙埋处理的 (1.05 ± 0.11) mS/cm,各处理间差异显著($P<0.05$)。 Na^+ 含量也呈下降趋势,重度沙埋处理最低,为 3.90 ± 0.18 mg/g,显著低于对照处理($P<0.05$);轻度和中度沙埋处理居中。

土壤养分指标均在中度沙埋处理下达到最高值,SOC、TN和AP分别为 (4.16 ± 0.16) g/kg、 (0.36 ± 0.04) g/kg和 (7.50 ± 0.60) mg/kg。SOC

在中度沙埋处理下显著高于对照和重度沙埋处理($P<0.05$);TN和AP也均在中度沙埋处理下显著高于对照处理($P<0.05$),轻度和重度沙埋处理与其余处理差异不显著($P>0.05$)。

总之,EC和 Na^+ 随沙埋程度增加持续降低,而SOC、TN和AP在中度沙埋处理下达到较高水平。

2.4 土壤理化指标、碱蓬生长与饲用特性的相关性

Pearson相关性分析表明,土壤理化指标、碱蓬生长指标与饲用特性指标之间存在不同程度的相关关系(图4)。其中,pH、EC和 Na^+ 两两之间均呈极显著正相关,相关系数为0.98~0.99;SOC、TN和AP两两之间也均呈极显著正相关,相关系数为0.94~0.98。

在生长指标中,株高与盖度呈极显著正相关($r=0.97$),二者与NDVI均呈正相关;密度与株高、盖度和NDVI的相关性较弱,其中与盖度和NDVI均为负相关。盐分相关指标与密度呈显著或极显著正相关,相关系数为0.91~0.96。

在饲用特性指标中,NDF与ADF呈极显著正相关($r=0.99$),CP与NDF、ADF也呈显著正相关,相关系数分别为0.88和0.85。与此同时,SOC、TN和AP与NDVI、NDF、ADF和CP总体呈正相关,pH、EC和 Na^+ 与CP总体呈负相关。

整体上看,土壤盐分指标、养分指标、碱蓬生长指标和饲用特性指标之间存在较明显的相关性。

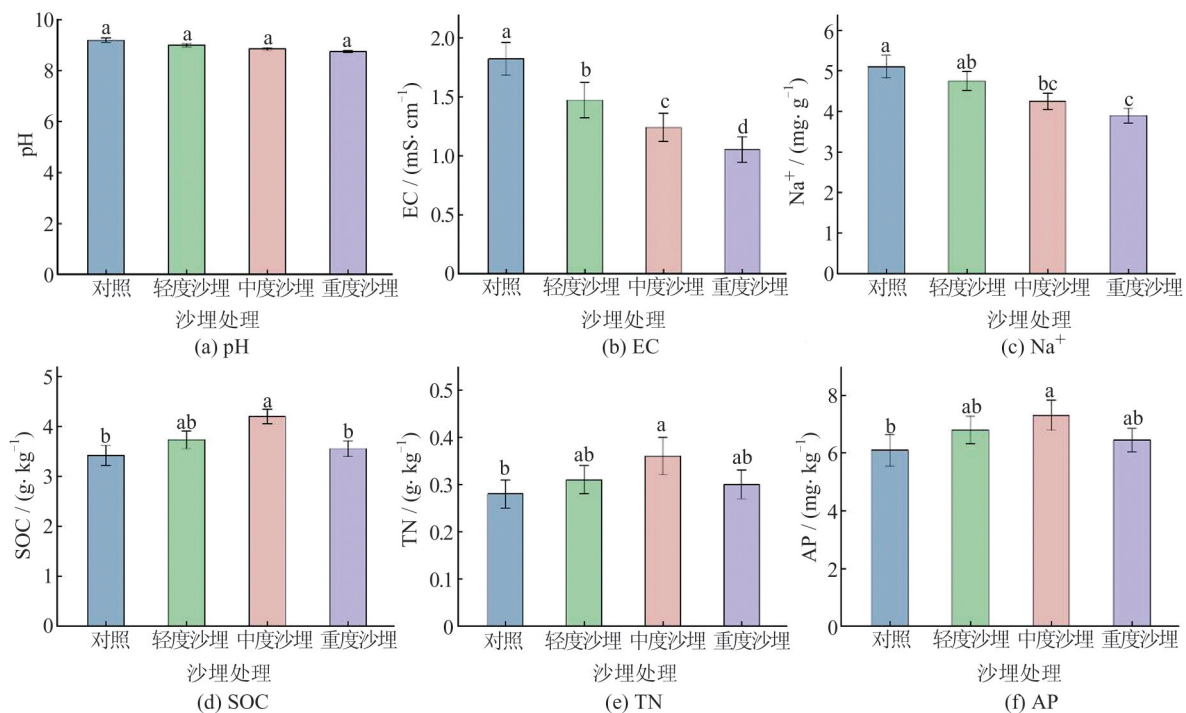


图3 不同沙埋程度土壤理化指标差异

Figure 3 Differences in soil physicochemical properties under different sand burial treatments

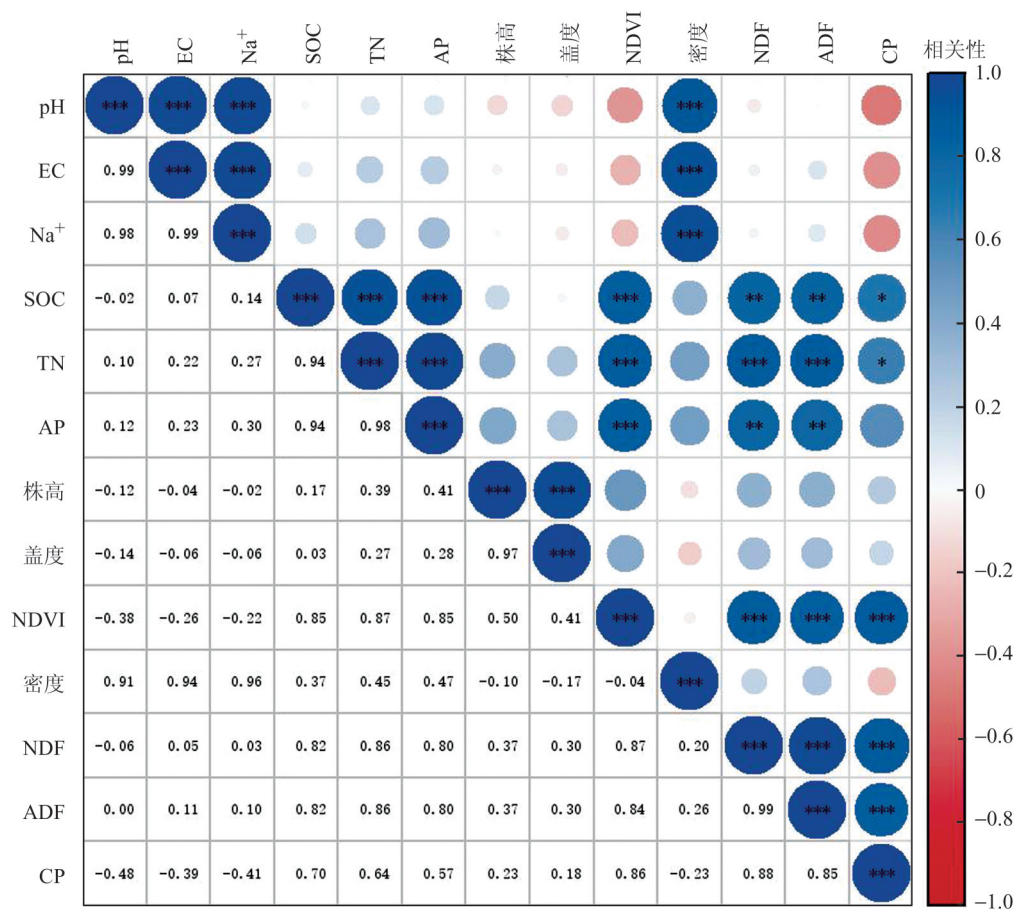


图4 土壤理化指标、碱蓬生长与饲用特性指标的相关性分析

Figure 4 Correlations among soil physicochemical properties, growth traits, and forage quality indices of *Suaeda glauca*

3 讨论

沙埋处理显著影响了碱蓬生长、饲用特性及土壤理化性质。总体上,沙埋能够在一定程度上缓解土壤盐分胁迫、改善养分状况,并促进碱蓬生长,但不同处理程度间存在明显差异,其中,中度沙埋综合效果最佳。这说明,沙埋并非单纯的不利扰动,而是风沙盐碱区一种具有生态调节作用的自然过程。在本研究中,中度沙埋通过改善土壤环境促进了碱蓬生长,并显著改变了其饲用特性,表明适宜的沙埋处理可为中重度沙质盐碱地生态改良提供新的调控途径。但其内在作用机制及不同植物间的响应差异,仍有待进一步探讨。

3.1 沙埋对碱蓬生长的调节作用

本研究表明,人工种植碱蓬的生长对不同沙埋程度表现出显著的响应差异。随着沙埋程度增加,碱蓬株高和盖度总体升高,而密度持续下降,NDVI在中度沙埋处理下达到最高,说明沙埋并非只促进碱蓬生长,而是同时改变了个体生长表现与群体维持状态。其中,适度沙埋有利于植物通过株体伸长和冠层扩展维持地上部建成,而过强沙埋则会增加

幼苗出土的难度,这与荒漠植物对沙埋胁迫的普遍响应规律一致^[21]。

从已有研究看,沙埋效应通常存在明显阈值:在一定范围内,沙埋可刺激植株发生补偿性生长;一旦超过耐受限度,则会转而抑制存活和生物量积累^[22]。这一规律在沙地榆幼苗研究中也得到验证,即部分沙埋能够促进株高增长、气体交换和生物量形成,而完全埋压会显著降低植株表现^[23]。因此,本研究中株高和盖度随沙埋增强而升高,并不意味着重度沙埋对碱蓬整体生长最为有利,而更可能反映了其对埋压环境的形态适应。

此外,重度沙埋下株高和盖度虽继续增加,但NDVI并未同步提高,反而以中度沙埋处理表现最佳。该结果说明,形态扩展能力与群体活力并不完全一致。前者更多体现植株对埋压环境的逃逸式响应,后者则更能反映绿色组织比例及冠层综合生理状态。类似现象在沙埋对灌丛和草地群落的影响研究中亦有体现,即沙埋能够改变植物形态建成,但其对群体功能维持的作用取决于沙埋强度是否处于适宜范围^[24-25]。

综上所述,在风沙—盐碱复合生境中,碱蓬对沙

埋的响应不仅受机械覆压控制,还与沙埋对微环境的调节密切相关。适度覆沙可削弱地表蒸发并缓解表层返盐,从而改善近地表水盐条件;而过强埋压则会使机械胁迫重新成为主导限制因子。因此,中度沙埋综合生长表现最好,本质上反映了“环境改善效应”与“埋压胁迫效应”之间的相对平衡^[26]。

3.2 沙埋对碱蓬饲用特性的调节作用

本研究显示,沙埋处理显著改变了碱蓬的饲用特性,其中中度沙埋处理下CP含量最高,而NDF和ADF也处于较高水平,表明沙埋影响了碱蓬营养性组分与结构性组分的相对配置。

已有研究指出,盐生植物的饲用特性随环境变化而变化。以盐地碱蓬为代表的盐生饲草资源,往往兼具较强逆境适应能力和一定营养潜力,但其适口性和饲用价值需要结合粗蛋白、纤维及矿质含量综合评价^[27-28]。在盐水灌溉条件下,盐生碱蓬的生物量、盐分去除能力和饲用营养指标均随环境条件变化而发生调整,表明盐生植物的饲用特性具有明显的可塑性^[29]。

本研究中,中度沙埋处理下CP、NDF和ADF均维持在较高水平,说明该处理显著影响了碱蓬营养组分与结构性组分的积累特征。相关研究表明,不同生境下盐地碱蓬的生长、化学计量特征及适口性存在显著差异,其形成过程与环境驱动下的蛋白表达调控密切相关^[30]。因此,本研究所观察到的饲用特性变化,实质上反映了碱蓬对沙埋调节后生境条件的综合响应。

从适应机制看,不同盐生植物对盐碱胁迫的代谢响应存在明显差异,其适应策略与物种特性密切相关^[31]。这为本研究中中度沙埋处理下粗蛋白升高提供了可能的解释,即当表层盐分胁迫减弱、养分条件改善后,碱蓬可能增强氮素吸收与同化,从而促进粗蛋白积累;与此同时,NDF和ADF仍维持较高水平,说明沙埋处理在提高营养组分的同时,也影响了植株结构性组分的形成。其对饲用价值的实际影响仍需结合更多品质评价指标进行综合判断。与单纯盐度梯度研究相比,本研究进一步表明,风沙环境因素可通过影响植株资源分配格局而调节盐生饲草相关品质指标,这对于风沙盐碱区盐生植物资源开发具有一定参考价值^[32]。

3.3 沙埋对土壤理化性质的改良效应

本研究表明,随着沙埋程度增加,土壤EC和Na⁺持续下降,而SOC、TN和AP在中度沙埋处理下达到较高水平,说明沙埋对土壤理化性质的影响具有双重性:一方面,覆沙对表层降盐具有持续作

用;另一方面,土壤培肥效应并不随沙埋增强而线性增加,而是存在相对适宜的调控区间。该结果表明,沙埋对土壤的作用并非单一物理覆盖效应,而是降盐过程与植物-土壤反馈共同作用的结果^[33]。

在盐碱地改良研究中,阻断返盐、促进盐分淋洗被认为是降低表层盐害的关键途径。碱蓬生长能够显著改善滨海重盐碱地土壤结构,降低表层盐分并增加有机质含量,说明耐盐植物建植本身即具有明显的改土作用^[34]。因此,本研究中EC和Na⁺随沙埋程度增加而下降,说明沙层覆盖可能通过削弱蒸发驱动的毛管返盐过程,降低盐分在表层的再聚集强度。

与此同时,中度沙埋下SOC、TN和AP较高,提示土壤培肥效应更多依赖植被生长及其根际过程,而非覆沙本身。已有研究表明,碱蓬根际土壤细菌群落结构和潜在功能与裸地存在明显差异,且其根际系统有助于养分积累和土壤功能恢复^[35]。这表明,当沙埋强度适宜、植株生长较好时,根系分泌物输入、枯落物归还及微生物过程可能共同促进SOC、TN和AP的提高。

近年的研究进一步显示,碱蓬群落土壤细菌多样性及群落结构与土壤盐分、养分和植被特征密切相关,说明盐生植物及其生境条件能够共同塑造根际微生境^[36]。盐生植物能够通过离子调节、渗透调节及与根际微生物互作等多种途径增强其在盐碱环境中的适应能力,并在盐碱农业开发中具有应用潜力^[37]。这些结果与本研究中中度沙埋综合改良效果最优的现象是一致的。

值得注意的是,重度沙埋下EC和Na⁺虽继续下降,但SOC、TN和AP并未同步提高,说明土壤改良效果不能仅以降盐程度作为判断依据。过强沙埋虽然强化了物理脱盐过程,却因群体密度下降而削弱了植被对土壤的正反馈,从而限制了土壤肥力恢复。已有综述指出,盐生植物与根际微生物之间存在显著互作关系,这种互作对土壤养分积累和逆境缓冲具有重要作用^[38]。因此,中度沙埋的优势并不在于单一指标达到极值,而在于其在降盐、促生长和培肥之间形成了更稳定的协同关系。

3.4 研究意义、局限性与展望

综合上述结果可以认为,在风沙-盐碱复合生境中,沙埋并非单纯的不利扰动,而是影响植物生长、饲用特性形成和土壤改良过程的重要生态调节因子。中度沙埋表现出最佳综合效应,不在于其单独最大化了某一指标,而在于其较好协调了表层降盐、植株生长和土壤培肥之间的关系。这一认识与盐碱

地修复研究中强调“工程调控-生物改良-综合利用”协同推进的方向相一致^[39]。

本研究仍存在一定局限。首先,试验仅基于单一地区和单一生长季,所得结论主要反映短期响应,尚不足以说明不同年份气候波动和不同盐碱类型条件下的稳定性。其次,本研究主要依据地上部生长、饲用特性及土壤理化指标推断机制,对根系构型、离子分配和渗透调节过程缺乏直接证据。已有研究表明,在干旱、盐分和沙埋共同作用下,种子萌发和幼苗建植对埋沙深度高度敏感,说明埋沙阈值可能在植物生活史早期就已形成。因此,后续研究有必要进一步将萌发-建植过程与成株阶段响应联系起来。

未来应结合多生长季定位试验,系统评估不同沙埋处理下碱蓬群体更新、饲用特性形成及土壤改良持续性的时空稳定性;同时引入根系性状、离子平衡、渗透调节物质及根际微生物组学指标,以增强对“中度沙埋优势机制”的直接解释。总体而言,本研究表明,沙埋程度可作为风沙盐碱区植被恢复与盐生饲草资源利用中的重要调控因子。

4 结 论

沙埋处理通过调节土壤盐分与养分状况,显著影响了人工种植碱蓬的生长表现和饲用特性。随着沙埋处理程度增加,碱蓬株高和盖度总体升高,NDVI在中度沙埋处理中较高,而密度总体下降,说明沙埋有利于植株生长并提高地表覆盖度,但不同生长指标的响应并不一致。中度沙埋处理下粗蛋白含量最高,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维也处于较高水平,表明沙埋显著改变了碱蓬的饲用特性。与此同时,随着沙埋处理程度增加,土壤EC和Na⁺含量总体下降,而SOC、TN和AP在中度沙埋处理中相对较高,表明中度沙埋能够在一定程度上缓解表层土壤盐分胁迫并改善养分状况。综合来看,沙埋对沙质盐碱地的改良效应存在明显处理差异,其中中度沙埋在土壤环境优化、碱蓬生长促进和饲用特性调节方面表现较优,可为风沙盐碱区人工种植碱蓬及盐碱地生物改良提供科学依据。

参考文献

- [1] 刘子金,徐存东,朱兴林,等. 干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 367-379.
Liu Z J, Xu C D, Zhu X L, et al. Comprehensive assessment and evolution analysis of soil salinization in artificial oasis in arid desert area[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 367-379.
- [2] 郭伟,薛帅,张哲超,等. 生物技术修复盐碱化草地研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(7): 200-208.
Guo W, Xue S, Zhang Z C, et al. Research progress on bioremediation of saline-alkali grassland: a review [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(7): 200-208.
- [3] 高岩,李韶慧. 盐碱地综合利用现状及对策[J]. 现代农业科技, 2025(15): 67-71.
Gao Y, Li S H. Present situation and countermeasures of comprehensive utilization of saline-alkali land [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025 (15): 67-71.
- [4] 魏巍,白玛嘎翁,周娟娟,等. 沙埋和水分对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西藏农业科技, 2025, 47(4): 24-28.
Wei W, Bai M, Zhou J J, et al. Effects of sand burial and moisture on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana*[J]. Xizang Journal of Agricultural Sciences, 2025, 47(4): 24-28.
- [5] Zhao J D, Shi C Y, Wang D Y, et al. Sand burial, rather than salinity or drought, is the main stress that limits the germination ability of *Sophora alopecuroides* L. seed in the desert steppe of Yanchi, Ningxia, China [J]. Plants, 2023, 12(15): 2766.
- [6] Li F, Xie Y H, Zhu L L, et al. Changed clonal growth form induced by sand burial facilitates the acclimation of *Carex brevicuspis* to competition [J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0121270.
- [7] 黄如,李峰,余炜诚,等. 泥沙淤积和种间竞争对辣蓼生长及生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(7): 2046-2054.
Huang R, Li F, Yu W C, et al. Effects of sediment deposition and interspecific competition on the growth and ecological stoichiometric characteristics of *Polygonum hydropiper* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(7): 2046-2054.
- [8] Guan B, Zhang L, Li M, et al. The sediment burial depth and salinity control the early developments of *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta[J]. Nordic Journal of Botany, 2021, 39(1): 02956.
- [9] 刘小京,郭凯,封晓辉,等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 345-353.
Liu X J, Guo K, Feng X H, et al. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 345-353.
- [10] 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]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2022, 28(6): 1104-1112.
- [11] 易小雅, 张德全, 刘勇, 等. 2000—2020年内蒙古杭锦旗植被变化特征及其对气候要素的响应[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(3): 51-62.
- Yi X Y, Zhang D Q, Liu Y, et al. Vegetation change and its response to climate factors in Hanggin Banner, Inner Mongolia, China from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(3): 51-62.
- [12] 朱玉朵, 王薇, 黄乾, 等. 黄河三角洲盐碱地土壤盐分和浅层地下水水质变化规律研究[J]. *中国农学通报*, 2025, 41(23): 45-52.
- Zhu Y D, Wang W, Huang Q, et al. Research on variation patterns of soil salinity in saline-alkali land and shallow groundwater quality in the Yellow River Delta [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(23): 45-52.
- [13] 林杰, 董波, 潘颖, 等. 南京市植被覆盖管理措施因子的时空格局动态变化[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(5): 617-626.
- Lin J, Dong B, Pan Y, et al. Spatial and temporal dynamic changes of vegetation cover and management factor in Nanjing City [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5): 617-626.
- [14] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉. 不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(12): 2149-2159.
- Du Y N, Li T Y, He B H. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of purple soil under different fertilization and cultivation methods [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12): 2149-2159.
- [15] 白炬, 田伟辰, 仇子健, 等. 不同氮肥类型及用量对盐碱耕地青贮玉米产量及饲用品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(9): 1683-1693.
- Bai J, Tian W C, Qiu Z J, et al. Effects of different nitrogen types and levels on the yield and forage quality of silage maize in saline-alkali soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(9): 1683-1693.
- [16] 回金峰, 魏孔钦, 孙延亮, 等. 伊犁河流域紫花苜蓿干草产量和营养品质对海拔高度的响应[J]. *草业学报*, 2025, 34(10): 41-50.
- Hui J F, Wei K Q, Sun Y L, et al. Response of alfalfa hay yield and nutritional quality to altitude in the Yili River basin [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(10): 41-50.
- [17] 匡宗洋, 穆麟, 魏岚, 等. 不同混合比例和乳酸菌添加对全株玉米和大豆混合青贮品质及有氧稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(6): 227-238.
- Kuang Z Y, Mu L, Wei L, et al. Effects of different mixture ratios and lactic acid bacteria on the quality and aerobic stability of mixed silage made from whole maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) plants [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 227-238.
- [18] 张晓东, 李兵, 刘广明, 等. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27(11): 1744-1754.
- Zhang X D, Li B, Liu G M, et al. Effect of composite soil improvement agents on soil amendment and salt reduction in coastal saline soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11): 1744-1754.
- [19] 林小兵, 武琳, 周利军, 等. 不同种植年限粉葛对农田土壤镉的富集特征[J]. *热带生物学报*, 2023(2): 153-158.
- Lin X B, Wu L, Zhou L J, et al. Enrichment of cadmium by *Pueraria thomsonii* Benth planted for different years in farmland [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2023(2): 153-158.
- [20] 刘鑫, 尹泽润, 盛浩, 等. 水稻土微生物群落、酶活性及理化性质对有机肥、石灰连续施用的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(1): 63-73.
- Liu X, Yin Z R, Sheng H, et al. Response of microbial community, enzyme activity, and physicochemical property in paddy soil to continuous organic fertilizer and lime amendments [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(1): 63-73.
- [21] 赵春彦, 秦洁, 贺晓慧, 等. 轻度沙埋对典型荒漠植物的影响[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 63-72.
- Zhao C Y, Qin J, He X H, et al. Effects of sand burial on typical desert plants [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 63-72.
- [22] 赵鑫宇, 罗亚勇, 刘瑞香, 等. 埋种深度及模拟降雨对少花蒺藜草 (*Cenchrus pauciflorus*) 幼苗生长的影响[J]. *中国沙漠*, 2025, 45(4): 324-333.
- Zhao X Y, Luo Y Y, Liu R X, et al. Effects of sand depth and water supply on the emergence and growth of *Cenchrus pauciflorus* seedlings [J]. *Journal of Desert Research*, 2025, 45(4): 324-333.
- [23] Shi L, Zhang Z J, Zhang C Y, et al. Effects of sand burial on survival, growth, gas exchange and biomass allocation of *Ulmus pumila* seedlings in the Hunshandak Sandland, China [J]. *Annals of Botany*, 2004, 94(4): 553-560.
- [24] Liu B, Liu Z M, Lü X T, et al. Sand burial compensates for the negative effects of erosion on the dune-building shrub *Artemisia wudanica* [J]. *Plant and Soil*,

- 2014, 374(1): 263-273.
- [25] 李文婷, 张超, 王飞, 等. 沙埋与供水对毛乌素沙地两种重要沙生植物幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1192-1199.
- Li W T, Zhang C, Wang F, et al. Effects of sand burial and water supply on seedlings growth of two dominant psammophytes in Mu Us sandland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1192-1199.
- [26] Li J S, Hussain T, Feng X H, et al. Comparative study on the resistance of *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* to drought, salt, and alkali stresses[J]. Ecological Engineering, 2019, 140: 105593.
- [27] 武海雯, 陈军华, 吴亚琦, 等. 我国盐生饲料植物资源与营养价值分析[J]. 中国饲料, 2022(19): 104-115.
- Wu H W, Chen J H, Wu Y Q, et al. Review of plant resources and nutritional value of fodder halophytes in China[J]. China Feed, 2022(19): 104-115.
- [28] Song Y, Liu J Y, Wang J Z, et al. Growth, stoichiometry, and palatability of *Suaeda salsa* from different habitats are demonstrated by differentially expressed proteins and their enriched pathways[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 733882.
- [29] 高峰, 刘洁, 牟方正, 等. 盐生植物饲用研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2025, 47(1): 46-59.
- Gao F, Liu J, Mou F Z, et al. Research progress on feed utilization of halophytes[J]. World Sci-Tech R & D, 2025, 47(1): 46-59.
- [30] Song X Q, Yang N, Su Y H, et al. *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* employ different adaptive strategies to cope with saline - alkali environments[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2496.
- [31] Chen Q, Xie H S, Wei G Y, et al. Metabolic differences of two constructive species in saline-alkali grassland in China[J]. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 53.
- [32] Norman H C, Masters D G, Barrett-Lennard E G. Halophytes as forages in saline landscapes: interactions between plant ecology and animal production[J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 185(1/2): 1 - 20.
- [33] 孙一航, 赵一航, 孔令泽来, 等. 不同生长时期碱蓬对根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(1): 78-86.
- Sun Y H, Zhao Y H, Kong L Z L, et al. Effects of *Suaeda glauca* at different growth stages on bacterial community structure in the rhizosphere soil[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(1): 78-86.
- [34] An X C, Wang Z F, Jiao K R, et al. Bacterial community characteristics in the rhizosphere of *Suaeda glauca* versus bulk soil in coastal silt soil modified by sea-sand and their implications[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 9: 1001449.
- [35] Xu H, Li N, Li W J, et al. Composition and diversity of rhizosphere microorganisms of *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024, 12: 1343672.
- [36] Dai H, Jia M Y, Xue J H, et al. Complementary rhizosphere microbial strategies drive functional specialization in coastal halophyte succession: differential adaptation of *Suaeda glauca* and *Phragmites communis* to saline - alkali stress[J]. Microorganisms, 2025, 13(6): 1399.
- [37] Song J, Wang B S. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model [J]. Annals of Botany, 2015, 115(3): 541-553.
- [38] Feng K H, Sun P, Chen Y Y, et al. Endophytic bacteria promote the growth of *Suaeda glauca* in saline-alkali stress: regulation of osmotic pressure and antioxidative defense system[J]. Journal of Ocean University of China, 2023, 22(4): 1109-1118.
- [39] Guo Y H, Dong J S, Wang J R, et al. Regional adaptability and integrated evaluation of saline-alkali soil remediation technologies: a comprehensive review [J]. Ecological Indicators, 2025, 180: 114305.