

DOI: 10.11766/trxb202501120025

CSTR: 32215.14.trxb202501120025

韩超群, 王娇, 赵春雷, 邵明安. 不同程度碱胁迫下栽培稗草生长动态及土壤养分的响应特征[J]. 土壤学报, 2025, 62 (6): 1792–1802.  
HAN Chaoqun, WANG Jiao, ZHAO Chunlei, SHAO Ming'an. Growth Dynamics and Soil Nutrient Response Characteristics of *Echinochloa* Utilized Under Different Degrees of Alkaline Stress[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (6): 1792–1802.

## 不同程度碱胁迫下栽培稗草生长动态及土壤养分的响应特征<sup>\*</sup>

韩超群<sup>1</sup>, 王娇<sup>2†</sup>, 赵春雷<sup>2</sup>, 邵明安<sup>1†</sup>

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室, 北京 100101)

**摘要:** 为探究不同程度碱胁迫下栽培稗草的生长状况及其对土壤养分的影响, 以毛乌素盐碱化沙地为研究区域, 根据毛乌素沙地盐碱化程度分别设置 pH 8.4、pH 9.0、pH 9.4、pH 9.7 和 pH 10.0 等 5 个碱胁迫处理, 以裸土为对照 (CK), 监测栽培稗草生长动态及土壤养分变化, 分析栽培稗草用于毛乌素盐碱化沙地植被恢复的适宜性。结果表明: 栽培稗草生长指标和光合特性随 pH 升高总体呈先增大后减小趋势, 其中 pH 9.0 处理下单株叶面积、平均分蘖数、干物质量、净光合速率和水分利用效率均显著高于其他处理, pH 10.0 处理下各项指标较 CK 显著降低。种植栽培稗草后 0~60 cm 土壤全氮 (TN) 含量显著降低, 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 含量显著提高, 而有机质 (SOM) 和硝态氮含量仅在 0~10 cm 土层显著降低。相关性分析显示, 栽培稗草分蘖数、株高与光合特性显著正相关, 根长密度与 SOM、TN、全磷和有效磷等养分变化量显著正相关, 与  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  变化量显著负相关。综上所述, 栽培稗草具有较强的碱胁迫能力, 且对土壤氮素矿化具有促进作用, 证实了其在毛乌素盐碱化沙地种植的适宜性。

**关键词:** 毛乌素沙地; 栽培稗草; 盐碱化沙地; 土壤养分

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

## Growth Dynamics and Soil Nutrient Response Characteristics of *Echinochloa* Utilized Under Different Degrees of Alkaline Stress

HAN Chaoqun<sup>1</sup>, WANG Jiao<sup>2†</sup>, ZHAO Chunlei<sup>2</sup>, SHAO Ming'an<sup>1†</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yellow River Delta Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** 【Objective】This study aimed to explore the growth conditions of *Echinochloa* and its impact on soil nutrients under varying degrees of alkaline stress. 【Method】Using the salinized sandy soil of the Mu Us area, this study set up five alkaline stress treatments based on the degree of salinization: pH 8.4, pH 9.0, pH 9.4, pH 9.7, and pH 10.0, with bare soil as control (CK). Growth dynamics and soil nutrient variations were monitored to evaluate the suitability of *Echinochloa* for vegetation restoration

\* 国家自然科学基金项目 (U2444217) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2444217)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangjiao@igsnrr.ac.cn; mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 韩超群 (1995—), 女, 山西洪洞人, 博士研究生, 主要从事沙地生态恢复研究。E-mail: hancq@nwafu.edu.cn

收稿日期: 2025-01-12; 收到修改稿日期: 2025-04-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-10

in alkaline degraded sandy areas. **【Result】** The results showed that when the pH increased from 8.4 to 9.4, the plant height and leaf area of *Echinochloa* did not decrease. However, a further increase in pH resulted in a significant decrease in plant height and leaf area. The treatment with pH 9.0 had the highest average number of tillers, followed by the treatment with pH 9.4. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and water use efficiency (WUE) of *Echinochloa* in pH 9.0 treatment were 26.39%-53.74% and 21.22%-36.36% higher than those in other treatments, respectively. After planting *Echinochloa* the content of soil organic matter (SOM) and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N) in the 0-10 cm soil layer significantly decreased, total nitrogen (TN) content in the 0-60 cm soil layer significantly decreased, whereas the ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ -N) content significantly increased. The tiller number and plant height of *Echinochloa* were significantly positively correlated with photosynthetic characteristics, and the root length density (RLD) was significantly positively correlated with the changes in SOM, TN, total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP), and significantly negatively correlated with the change in  $\text{NH}_4^+$ -N. **【Conclusion】** The pH 9.0 treatment promoted the growth of *Echinochloa*, however, growth of the above-ground part was hindered when pH was higher than 9.7, while root growth was hindered when pH was higher than 9.4. Cultivated *Echinochloa* mainly affected soil N nutrition, reducing the content of soil TN and  $\text{NO}_3^-$ -N, and increasing the content of  $\text{NH}_4^+$ -N. These findings indicate that *Echinochloa* possesses strong alkaline stress tolerance and enhances soil nitrogen mineralization, confirming its suitability for vegetation restoration in alkaline degraded sandy soils of the Mu Us region.

**Key words:** Mu Us sandy land; *Echinochloa*; Alkaline sandy land; Soil nutrient

毛乌素沙地位于我国北方农牧交错带,生态环境极其脆弱。该区谷地和滩地广泛分布,常有埋深较浅的高矿化度地下水<sup>[1]</sup>,受降水少、蒸发强的气候条件影响,土壤易发生盐碱化;此外,沙地内湖泊、湿地水体多含盐、碱,近些年因水资源过度消耗而出现大面积萎缩,导致高盐碱含量的裸露地表产生<sup>[2-3]</sup>,盐碱化土地进一步增加。由此可知,毛乌素沙地不仅水资源短缺,部分地区还面临土壤盐碱化威胁,严重制约植被生态系统可持续性。在陕西省定边县的研究<sup>[4]</sup>指出,土壤盐碱化会降低樟子松存活与生长能力,进而导致樟子松人工林早衰。因此,探索干旱和盐碱双重胁迫下的植被建设模式是毛乌素沙地生态恢复的重要实践需求。

栽培稗草(*Echinochloa* spp.)属禾本科稗属植物,通常植株高大、茎叶繁茂、生物量大,且具有适应性广、抗逆性强等特点,在亚洲地区作为一种牧草作物而被广泛种植<sup>[5-6]</sup>。值得关注的是,栽培稗草对盐碱胁迫具有良好的耐受性,在盐渍度为0.3%的土壤中可正常出苗,进入分蘖期后可在盐渍度0.6%的土壤中正常生长<sup>[6-7]</sup>。不仅如此,栽培稗草还可有效改良盐碱地土壤质量。崔新等<sup>[8]</sup>和阎南南等<sup>[9]</sup>的研究发现在松嫩平原西部中度盐碱化草地上种植栽培稗草可显著提高土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和碱性磷酸酶的活性,同时降低0~10 cm土壤钠离子、镁离子、碳酸氢根离子、硫酸根离子的含量,

提升土壤钾离子、钙离子和氯离子含量,表明在盐碱地种植栽培稗草有助于促进土壤脱盐,改善土壤肥力。在位于干旱区的宁夏石嘴山盐碱地的研究进一步证实种植栽培稗草可显著降低0~20 cm土壤全盐含量,且土壤pH和碱度也显著下降,而0~40 cm土层土壤有机质和全氮含量则显著升高<sup>[10]</sup>。然而,这些研究是在黏质或壤质土壤中开展的,栽培稗草在砂土中种植的适宜性及对土壤养分的影响尚不明确。加之毛乌素沙地受到砂质基质持水性能弱、养分贫瘠的限制,具有明显区域特异性<sup>[1-3]</sup>,在该特殊生境下,栽培稗草用于毛乌素沙地植被建设的可行性和适宜性有待进一步研究。

基于此,本研究以“朝牧一号”栽培稗草为研究对象,通过开展田间模拟试验,监测不同程度碱胁迫下栽培稗草的生长特性,以及土壤养分的动态变化,以了解栽培稗草在毛乌素盐碱化沙地的生长状况及其对土壤的生态效应,可为探索毛乌素盐碱化沙地的植被建设模式提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

田间定位观测试验在陕西省神木市毛乌素治沙造林基地开展,基地位于毛乌素沙地东南缘(38°54'N, 109°52'E),属温带半干旱大陆性季风气候,多年平

均气温9.1℃,多年平均降水量420 mm,年蒸发量1 800~2 500 mm<sup>[11]</sup>。年内降水分布不均匀,7—9月降水量占全年降水量的70%以上<sup>[12]</sup>。研究区内土壤类型为砂质新成土<sup>[12]</sup>,砂粒占比93.87% (体积分数),土壤容重为1.68 g·cm<sup>-3</sup>,土壤pH在8.1~8.5。

## 1.2 样品采集及测试

在基地内选择地势平坦的盐碱荒地建立5个2 m×10 m定位观测小区,土壤pH约为8.4,采集0~60 cm土层土壤作为对照(CK)。通过多次撒施固体碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)配合灌溉措施使其中4个小区土壤耕作层pH分别达到9.0±0.2(pH 9.0)、9.4±

0.2(pH 9.4)、9.7±0.2(pH 9.7)、10.0±0.2(pH 10.0),另1个小区不添加Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(pH 8.4)。具体方法为:采用分次添加法,每次添加5 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>后灌溉,并于次日同一时间测定土壤pH,循环操作直至完成Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>设定总量(11.25、22.50、33.75和45 kg)。选取“朝牧一号”栽培稗草品种为试验对象,于2022年4月—2023年9月连续两个生长季进行田间观测试验,每年5月下旬采用条带浅沟方式播种,栽培稗草生育时期见表1。播种深度3~5 cm,播种后适量灌溉保证植物存活,苗期后不再人工灌溉。出苗后间苗至行距45 cm、株距20 cm。生长过程中人工去除杂草。

表1 栽培稗草生育时期

Table 1 Growth stage of *Echinochloa* (mmdd)

播种	出苗期	拔节期	孕穗期	抽穗期	成熟期
Seeding	Emerge stage	Elongation stage	Booting stage	Heading stage	Maturation stage
0522	0525—0611	0701—0720	0721—0810	0811—0825	0901—0930

于栽培稗草各生育时期测定叶片光合特征,具体方法为:每个小区选择3株长势基本一致的植株,在晴天上午9:00至11:00利用便携式光合仪(LI-6400 XT, LI-COR Biosciences, 美国)测定旗叶的净光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )<sup>[13]</sup>,利用 $P_n$ 和 $T_r$ 计算叶片瞬时水分利用效率(WUE),计算公式为 $WUE=P_n/T_r$ 。同时利用土钻采集扰动土壤样品测定土壤基本理化性质,具体方法为:10 cm为间隔采集0~60 cm深度土壤样品,每个小区取三次重复。土样风干研磨后分别过1 mm和0.15 mm筛,采用重铬酸钾加热法测定土壤有机质(SOM)含量,凯氏定氮仪(SINO KT8400, FOSS, 丹麦)测定土壤全氮(TN)含量,氯化钾浸提+流动分析仪(San++, Skalar Analytical B.V., 荷兰)测定土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N),硫酸-高氯酸消解-钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP),碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷(AP)含量<sup>[14]</sup>。同时采集根系样品,在室内水洗后使用根系分析系统(WinRHIZO Pro, Regent Instruments, 加拿大)测定根长和根表面积并计算根长密度,计算公式为:RLD=L/V。式中RLD为根长密度,cm·cm<sup>-3</sup>;L为每土层土壤体积的总根长,cm;V为含有根系样品的土壤体积,cm<sup>3</sup>。根据稗草类植物物候,抽穗期株高和单株叶面积为生育期最大值,且无效分蘖消亡、

有效分蘖数维持稳定<sup>[15]</sup>,因此,在抽穗期用直尺测量叶长、叶宽和株高,使用系数法计算叶面积(叶面积=叶长×叶宽×0.75)<sup>[16]</sup>,同时用计数法统计分蘖数。成熟期刈割1 m×1 m栽培稗草地上部分,洗去表面灰尘后烘干至恒重,得到1 m<sup>2</sup>干物质量,每小区三次重复。

## 1.3 数据处理

使用SPSS 25.0进行单因素方差分析,使用Origin 2023进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,使用Origin 2023绘图。

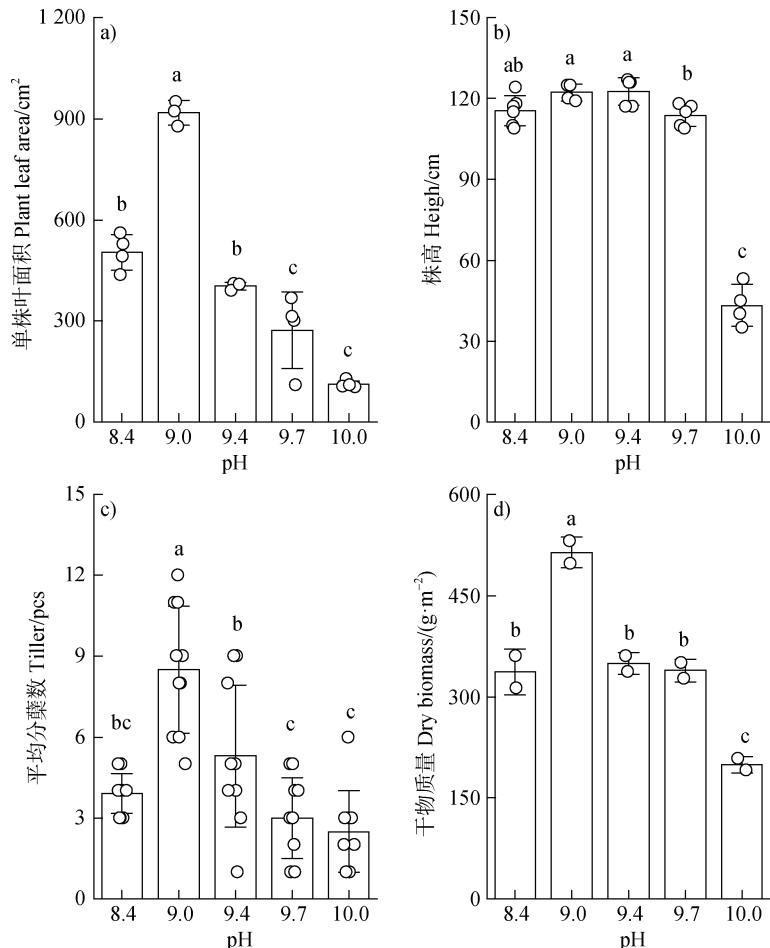
## 2 结果

### 2.1 不同程度碱胁迫下栽培稗草的生长特性

不同土壤pH条件下栽培稗草生长特性存在显著差异(图1)。其中,单株叶面积随土壤pH升高呈现先增加后降低趋势,pH 9.0处理的单株叶面积显著高于其他处理47.16%~87.72%( $P < 0.05$ ),且pH 9.4与pH 8.4处理间无显著差异,pH 9.7和pH 10.0处理的单株叶面积较pH 8.4分别减少了44.36%和76.76%(图1a)。除pH 10.0处理外,其他处理间株高无显著差异,且平均株高均大于110 cm,pH 10.0处理栽培稗草株高仅为43.30 cm,显著低于其

他处理 162.82%~183.14% (图 1b)。图 1c 显示不同碱胁迫下栽培稗草的平均分蘖数随土壤 pH 增大先增多后减少, 其中 pH 9.0 处理平均分蘖数最多, 其次为 pH 9.4 处理, 其平均分蘖数较 pH 9.7 和 pH 10.0 处理分别多 2.3 和 2.8 个 ( $P < 0.05$ ), 但三者与 pH 8.4 处理均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

当土壤 pH 升高时, 栽培稗草干物质量也表现为先增大后减少 (图 1d), pH 9.0 处理干物质量较其他处理高 32.11%~158.18%, pH 9.4 和 pH 9.7 处理较 pH 10.0 处理高 41.17%~42.95%, 但与 pH 8.4 均无显著差异。



注: 图中不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different letters indicate significant differences between treatments at the level of 0.05. The same below.

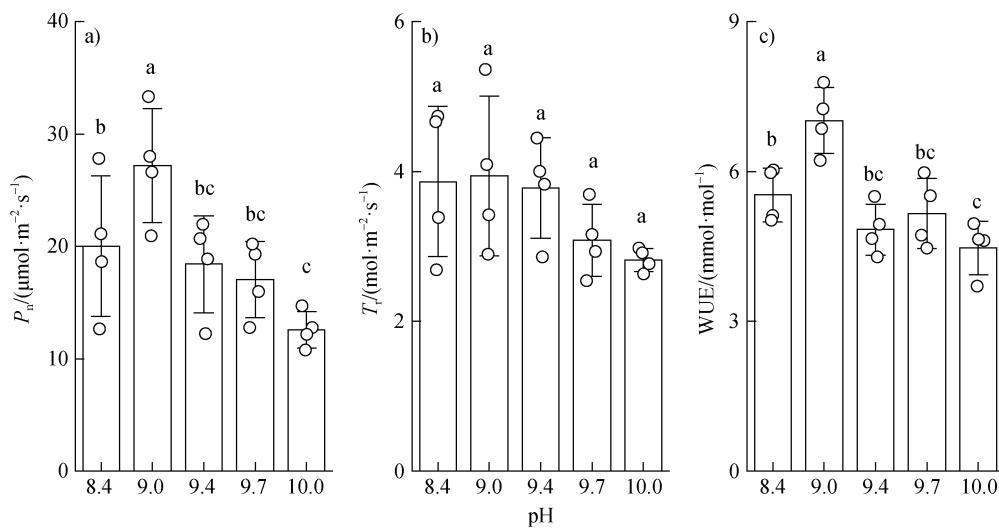
图 1 不同程度碱胁迫下栽培稗草的生长特性 (a. 单株叶面积, b. 株高, c. 平均分蘖数, d. 干物质量)

Fig. 1 Growth characteristics of *Echinochloa* under different alkaline stress (a. plant leaf area, b. height, c. tiller, d. dry biomass)

图 2 显示了栽培稗草各生育时期光合特征平均值, 如图所示, 栽培稗草光合特征显著受碱胁迫影响。 $P_n$  和 WUE 随 pH 升高均先增加后降低, 其中 pH 9.0 处理最高。与其他处理相比, pH 9.0 处理的  $P_n$  提高 26.39%~53.74%, WUE 提高 21.22%~36.36%。其他处理中, 仅 pH 10.0 处理的 WUE 低于 pH 8.4 处理 19.17%, pH 9.4 和 9.7 条件下  $P_n$  和 WUE 均无显著变化。栽培稗草的  $T_r$  在 5 个碱胁迫之间均无显著差异。

## 2.2 种植栽培稗草对土壤养分含量的影响

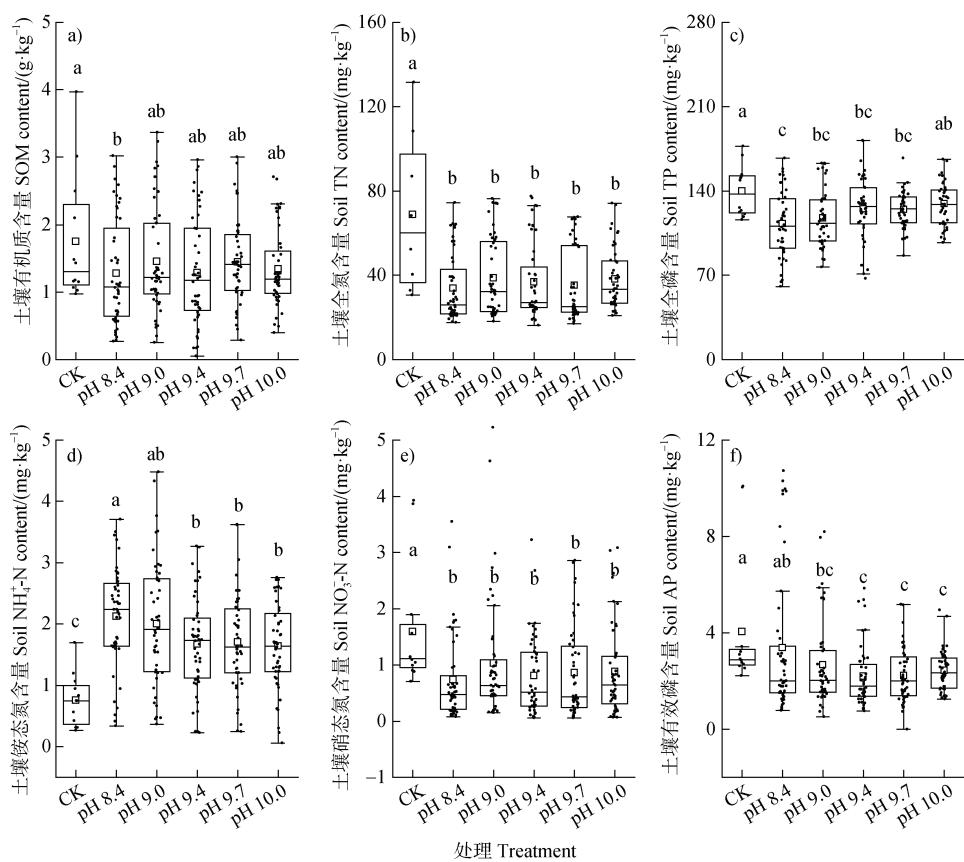
图 3 显示了种植栽培稗草后 0~60 cm 土壤养分平均含量。如图所示, 土壤 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均显著降低, 而  $\text{NH}_4^+$ -N 含量则显著提高 ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, pH 8.4 处理 SOM 含量减少 26.85%, 其他处理 SOM 含量均与 CK 无显著差异, 且 SOM 含量在不同种植栽培稗草处理间也无显著变化 (图 3a)。土壤 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量在种植栽培稗草后较 CK 分别减少了 43.76%~50.86% 和 35.07%~54.01%, 但



注:  $P_n$  表示净光合速率,  $T_r$  表示蒸腾速率, WUE 表示水分利用效率。下同。Note:  $P_n$ , net photosynthetic rate;  $T_r$ , transpiration rate; WUE, water use efficiency. The same below.

图 2 不同程度碱胁迫下栽培稗草光合特征

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of *Echinochloa* under different alkaline stress



注: CK 表示裸土。下同。Note: CK stands for bare soil (control). The same below.

图 3 种植栽培稗草对土壤养分含量的影响 (a. 有机质, b. 全氮, c. 全磷, d. 铵态氮, e. 硝态氮, f. 有效磷)

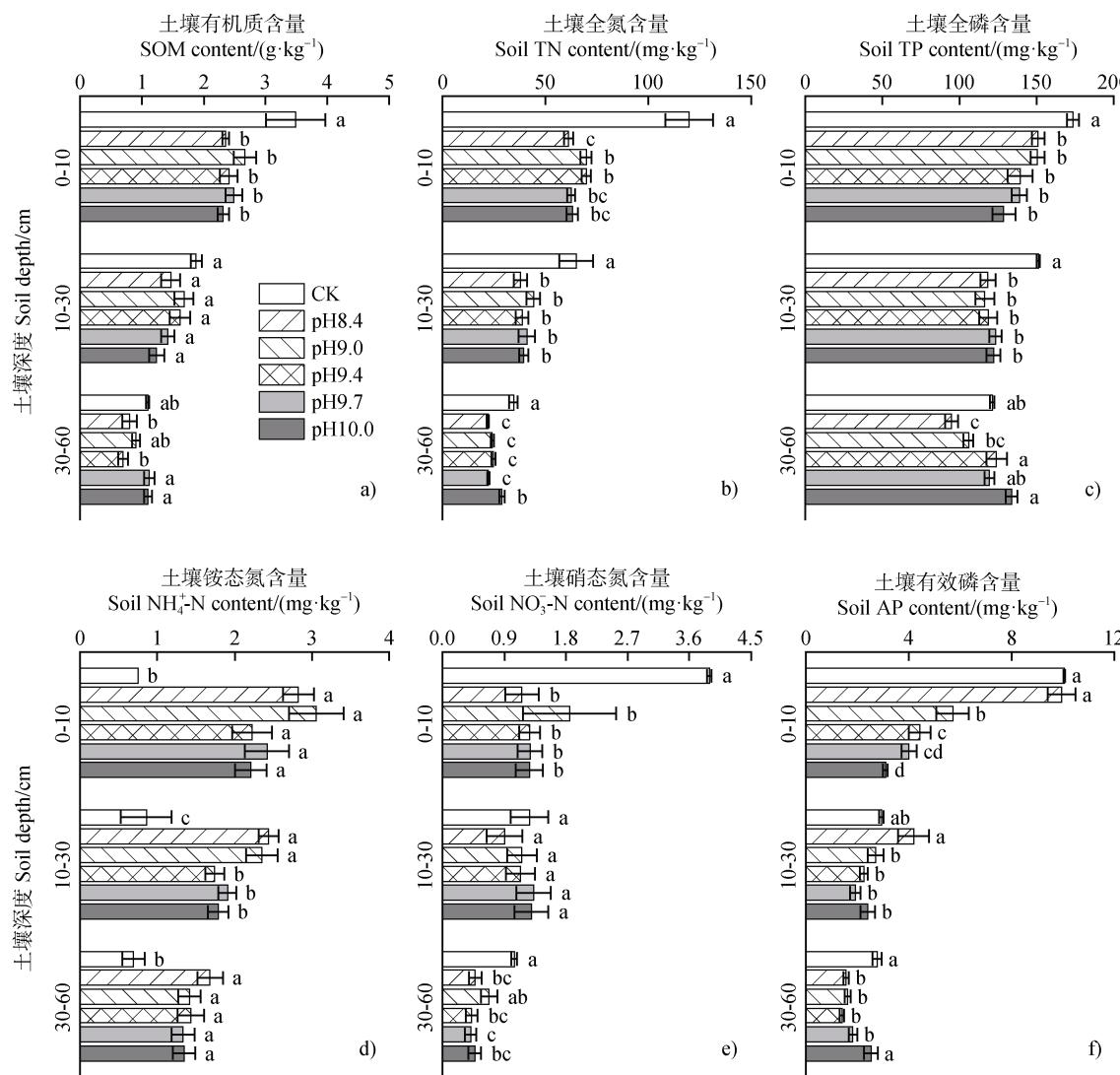
Fig. 3 The impact of planting *Echinochloa* on soil nutrients content (a. organic matter, b. total nitrogen, c. total phosphorus, d. ammonium nitrogen, e. nitrate nitrogen, f. available phosphorus)

TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量在不同碱胁迫处理间无显著差异(图 3b 和图 3e);相反地,栽培稗草处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量为  $2.12\sim 1.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是 CK 的 1.15 倍~1.79 倍。除 pH 10.0 处理外,各处理土壤 TP 含量在种植栽培稗草后降低了 10.56%~19.51% (图 3c)。除 pH 8.4 处理 AP 含量与 CK 无显著差异外,其他处理 AP 含量均显著下降 (图 3f)。

### 2.3 不同深度土壤养分含量特征

图 4 展示了种植栽培稗草后不同深度土壤养分的变化特征。在 0~10 cm 土壤中,栽培稗草各处理 SOM、TN、TP 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均显著低于 CK,

而土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量则较 CK 高 66.02%~75.46%; pH 8.4 与 CK 处理间土壤 TP 含量无差异,但 pH 继续升高导致该土层 TP 含量降低 43.21%~69.24%。土壤 TN 和 TP 含量在 10~30 cm 土层仍表现出栽培稗草处理显著低于 CK, 分别降低 31.99%~41.83% 和 18.38%~23.04%, 但 5 个栽培稗草处理之间差异不显著。而土壤 SOM 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量与 CK 相比不再显著偏低。30~60 cm 土壤 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 AP 含量在多数栽培稗草处理中低于 CK, 且 pH 10.0 处理 TN 和 AP 含量显著高于其他处理。



注: 不同字母表示相同土层不同处理之间差异显著,  $P < 0.05$ 。Note: Different letters indicate significant differences among treatments in the same soil layer,  $P < 0.05$ 。

图 4 不同深度土壤养分含量特征 (a. 有机质, b. 全氮, c. 全磷, d. 铵态氮, e. 硝态氮, f. 有效磷)

Fig. 4 Profile distribution of soil nutrient concentrations (a. organic matter, b. total nitrogen, c. total phosphorus, d. ammonium nitrogen, e. nitrate nitrogen, f. available phosphorus)

总体而言,种植栽培稗草后, SOM 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量仅在 0~10 cm 土层中出现显著下降。不同深度土壤 TN 含量均表现出栽培稗草处理低于 CK, 但 30~60 cm 土壤中 pH 10.0 处理反而高于其他胁迫处理。与 CK 相比, 各土层  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均显著增加, 其中 0~10 cm 增加最为显著, 且栽培稗草处理仅在 10~30 cm 存在差异, 表现为 pH 8.4 和 pH 9.0 处理相对较高。

#### 2.4 栽培稗草生长特性对土壤养分变化量的影响

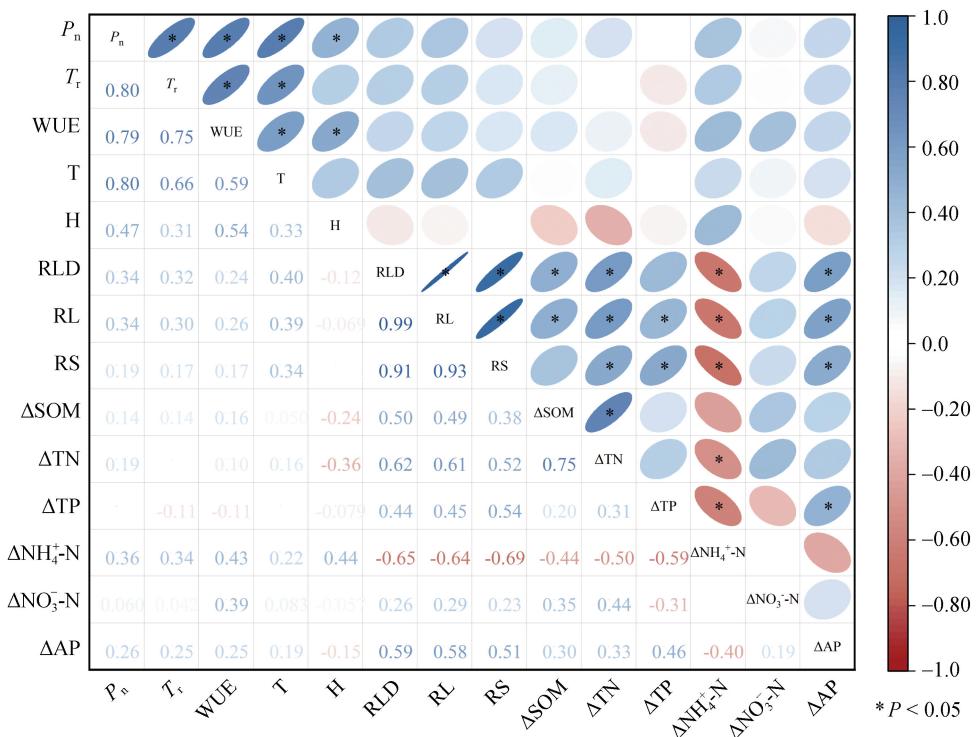
图 5 显示了栽培稗草各项生长特性与土壤养分变化量的 Spearman 相关性分析结果。由图可知, 栽培稗草分蘖数与叶片  $P_n$ 、 $T_r$  和 WUE 均呈显著正相关关系, 株高与  $P_n$  和 WUE 呈显著正相关( $P < 0.05$ )。种植栽培稗草前后土壤养分变化量( $\Delta$ )与栽培稗草

根长密度、根长、和根表面积均显著相关, 其中  $\Delta\text{SOM}$ 、 $\Delta\text{TN}$ 、 $\Delta\text{TP}$  和  $\Delta\text{AP}$  与根长密度、根长和根表面积显著正相关, 而  $\Delta\text{NH}_4^+$ -N 则与根长密度、根长和根表面积均显著负相关( $P < 0.05$ )。栽培稗草叶片光合特征、分蘖数和株高与根系及土壤养分变化量未呈现出显著相关性。

### 3 讨 论

#### 3.1 碱胁迫对栽培稗草生长的影响

植物的生长形态和生物量能够直观反映其在盐碱胁迫下的状态, 本研究中栽培稗草的株高、分蘖数等生长特性均处于正常水平<sup>[17]</sup>, 土壤 pH 提高至 9.4 后, 栽培稗草的株高、叶面积、分蘖数和干物质



注: T: 分蘖数; H: 株高; RLD: 根长密度; RL: 根长; RS: 根表面积;  $\Delta\text{SOM}$ 、 $\Delta\text{TN}$ 、 $\Delta\text{TP}$ 、 $\Delta\text{NH}_4^+$ -N、 $\Delta\text{NO}_3^-$ -N、 $\Delta\text{AP}$  分别表示栽培稗草处理土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量、有效磷含量与各自对照的差值; 热图颜色代表斯皮尔曼 (Spearman) 相关系数, 并用数值进行表示; Spearman 显著性的差异在  $P < 0.05$  水平上用\*标注。Note: T: tiller number; H: plant height; RLD: root length density; RL: root length; RS: root surface area;  $\Delta\text{SOM}$ ,  $\Delta\text{TN}$ ,  $\Delta\text{TP}$ ,  $\Delta\text{NH}_4^+$ -N,  $\Delta\text{NO}_3^-$ -N,  $\Delta\text{AP}$  indicate the differences in soil organic matter content, total nitrogen content, total phosphorus content, ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content, and available phosphorus content, respectively, between the *Echinochloa* treatment and their respective controls; The heat map color represents the Spearman correlation coefficient, which is expressed by numerical values; The significant differences of Spearman are marked with \* at the levels of  $P < 0.05$ .

图 5 栽培稗草生长特性与土壤养分变化量的相关性

Fig. 5 Correlation between *Echinochloa* biological characteristics and soil nutrients change

量等仍与 pH 8.4 处理无显著差异(图 1), 表明栽培稗草具有极强的耐盐碱能力, 证实了其在毛乌素盐碱化沙地中种植的可行性。本研究所选品种“朝牧一号”在宁夏西大滩盐碱地的引种试验中平均株高达 151 cm<sup>[18]</sup>, 远高于本研究中栽培稗草平均株高, 一方面可能是由于宁夏试验区土壤结构、质地和水分条件等相对较优, 另一方面是因为本试验未施用任何肥料, 可能在一定程度上制约了栽培稗草的生长。已有研究发现, 施肥可使栽培稗草地上部鲜物质量提升超过 70%, 其中氮肥增产效果最显著<sup>[19-20]</sup>, 由此可以推测, 在毛乌素沙地种植栽培稗草时配合农业管理措施将有效改善栽培稗草生长状况, 提高栽培稗草生物量。

一般情况下, 盐碱胁迫对植物光合作用具有抑制效应, 进而阻碍植物正常生长<sup>[21]</sup>。但在本研究中, 土壤 pH 从 8.4 升至 9.0 时, 栽培稗草的  $P_n$ 、 $T_r$  和 WUE 反而显著增大(图 2), 这是因为盐碱胁迫可提高栽培稗草叶片脯氨酸和多胺含量, 增强植被对  $\text{Na}^+$  的适应能力, 有效缓解胁迫损伤, 显著提升植物干鲜物质量和光合速率等生长指标<sup>[22]</sup>。此外, 还有研究揭示了栽培稗草根系耐盐碱胁迫的机理, 栽培稗草根系一方面能够分泌多种生物活性物质, 例如脂质、酚酸、黄酮和核苷酸等, 可促进植物调节自身代谢平衡以适应盐碱环境的压力<sup>[23]</sup>; 另一方面还能合成茉莉酸等化合物, 茉莉酸作为一种植物激素, 可增强植物的抗氧化防御能力, 从而减轻盐分胁迫对植物的危害<sup>[24-25]</sup>。一定程度的盐胁迫通常对耐盐植物生长具有促进作用, 过量的盐才会对植物生长产生危害<sup>[26-27]</sup>。本研究中, 栽培稗草地上部生长随 pH 升高呈先增高后降低趋势, 在 pH 9.0 条件下表现最佳, 在 pH 达到 9.7 后才出现株高和干物质量等指标的显著降低(图 1); 同时, 栽培稗草叶片  $P_n$ 、WUE 和根长密度也表现为 pH 9.0 处理最高(表 2), 表明栽培稗草可在 pH 9.0 的环境中正常生长, 且 pH 提高至 9.0 对栽培稗草生长有促进作用。当 pH 提高至 9.4 时, 栽培稗草的株高、平均分蘖数和叶面积等指标与 pH 8.4 处理无显著差异, 但根长密度显著低于 pH 8.4 处理(表 2), 这是由于植株地上部和地下部对盐碱胁迫耐受性具有差异而导致的。根系是植物最先接触胁迫环境的器官, 对胁迫环境更敏感, 根系受到盐碱胁迫后, 地上部分逐渐对胁迫产生响应<sup>[28]</sup>。类似现象在其他植物中也有发现, 例如

Rahmati Ishka 等<sup>[27]</sup>的研究显示, 盐胁迫会同时减少拟南芥地上部和根系生长速率, 然而根系生长速率的减少程度大于地上部; 桉树生长发育对盐胁迫响应特征也类似, 弗吉尼亚桉树根冠比在 50  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐胁迫条件下显著增加, 但地上部干物质量的积累无明显减少<sup>[29]</sup>。

表 2 不同碱胁迫下不同土层栽培稗草根长密度

Table 2 Root length density of *Echinochloa* in different soil layers under different alkaline stress

处理 Treatment			
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm
pH 8.4	62.27 ± 3.61b	27.63 ± 2.49ab	1.97 ± 0.64a
pH 9.0	89.89 ± 2.43a	35.98 ± 4.59a	0.93 ± 0.28ab
pH 9.4	48.17 ± 2.14b	23.50 ± 2.16bc	0.76 ± 0.36ab
pH 9.7	50.04 ± 4.65b	18.99 ± 1.55bc	0.28 ± 0.28b
pH 10.0	59.93 ± 5.39b	15.99 ± 3.41c	0.06 ± 0.01b

注: 同列不同字母表示不同处理之间差异显著,  $P < 0.05$ 。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different treatments,  $P < 0.05$ .

### 3.2 种植栽培稗草对土壤养分状况的影响

多项研究证实种植栽培稗草对土壤养分具有积极作用。例如, 在宁夏盐碱地开展的研究表明种植栽培稗草可显著提高 0~20 cm 土层 SOM 含量, 一方面是由于栽培稗草较大生物量对盐碱沙地土壤有机质的积极作用, 另一方面栽培稗草根系也可通过调节菌群和代谢物改善土壤理化性质进而提高 SOM 含量<sup>[10]</sup>。本研究中除 pH 8.4 处理外, 其他处理在无施肥的情况下并未出现 SOM 含量显著降低的现象(图 3a), 考虑到本研究中土壤养分极其贫瘠限制了栽培稗草正常生长, 可以推测如果配合施肥措施提高栽培稗草生物量, 将有效提升 SOM 水平。氮素是植物需求量最大的营养元素, 且作物根系主要吸收硝态氮和铵态氮等矿物氮, 因此种植栽培稗草后土壤 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均显著降低(图 3b, 图 3e), 但栽培稗草各处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均显著增加(图 3d), 这可能是由于 SOM 含量较高, 为土壤氮素的矿化作用提供了充足的底物, 但碱胁迫抑制了土壤硝化作用<sup>[30]</sup>, 类似现象在石灰性荒漠土壤有类似发现, 受到盐碱胁迫后土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著增加, 而硝化速率和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均显著降低<sup>[31]</sup>。在种植栽培稗草后, 土壤 TP 含量在除 pH 10.0 外的其

他处理间未呈现出显著差异,但pH 8.4处理的AP却显著高于其他处理(图3f),反映出土壤磷素受pH影响较大,通常土壤pH越高,磷素溶解度越低,AP含量也越低<sup>[32-33]</sup>;同时,pH 8.4处理土壤AP含量较CK无显著降低(图3f)也体现了栽培稗草对促进土壤磷有效性具有一定积极作用。此外,通过对比可以发现,栽培稗草对氮素的需求量远大于磷素,因此在田间管理中应注意对氮素的补充,以保证栽培稗草正常生长。虽然以往研究表明种植栽培稗草可有效提升耕层土壤养分<sup>[8-9]</sup>,但这些结果均是基于连续多年种植试验取得的,因此,栽培稗草在毛乌素沙地干旱和盐碱双重胁迫下的生长特性及其对土壤质量的影响尚需通过多年田间观测试验进一步验证。

植物根系是吸收土壤水分和养分的主要器官,已有大量研究表明根长密度与有机质、全氮含量呈正相关<sup>[34-35]</sup>。本研究结果(图5)与此一致,栽培稗草根系的根长、根表面积和根长密度均与SOM、TN、TP和AP的变化量呈现出显著的正相关性,与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N变化量表现出显著负相关关系,这表明栽培稗草对土壤养分含量的影响程度与根系密切相关。然而,由于植物地上部分和地下部分的适应性演化彼此独立<sup>[36]</sup>,栽培稗草光合特性、植株生长指标与根系相关指标并未表现出相关性。

## 4 结 论

栽培稗草具有较强的耐盐碱和耐旱能力,可在pH高达10.0的盐碱沙地中生长,且pH 9.0的碱胁迫对栽培稗草光合速率具有积极作用,进而促进栽培稗草生长发育,但pH>9.4时栽培稗草根系生长受阻,pH>9.7时地上部分生长也受阻,因此建议土壤pH≤9.4时可选择栽培稗草作为生态恢复物种,受更强碱胁迫区域则需与改土等措施配合。在盐碱化沙地种植栽培稗草可显著提升土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,但导致土壤TN、TP和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量降低,且对氮素的需求远大于磷素,在毛乌素沙地采用栽培稗草进行植被恢复时,应配合施用氮肥以提升产量,长期种植有望显著改善土壤质量。

## 参考文献 (References)

[ 1 ] Xu L. Research of soil geochemical indexes based

ecogeological vulnerability assessment——A case study of Mu Us Sandy Land[D]. Beijing, China University of Geosciences (Beijing), 2022. [徐亮. 基于土壤地球化学指标的生态地质脆弱性评价——以毛乌素沙地为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.]

- [ 2 ] Shen W B. The degradation and evolution mechanism of wetlands at southeast of Mu Us Sandy Land[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2013. [申卫博. 毛乌素沙地东南缘湿地退化演变机理[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.]
- [ 3 ] Shen W B, Liu Y P, Zheng J Y, et al. Characteristics of vertical distribution of soil biogenic elements in Mu Us degraded wetland[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2012, 26 (5): 220—223. [申卫博, 刘云鹏, 郑纪勇, 等. 毛乌素退化湿地土壤生源要素垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26 (5): 220—223.]
- [ 4 ] Zhang H, Zhang Z N, Liu S L. Afforestation effect of *Pinus sylvestris* var. *monglica* on soil salinity degree in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36 (1): 44—48. [张惠, 张泽宁, 刘姝玲. 毛乌素沙地樟子松造林效果对土壤盐渍化程度的响应[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36 (1): 44—48.]
- [ 5 ] Ye C Y, Fan L J. Orphan crops and their wild relatives in the genomic era[J]. Molecular Plant, 2021, 14 (1): 27—39.
- [ 6 ] Gao Y T, Zhang X Y. Drought resistant, salt alkali tolerant, high-yield, high-quality grain and grass harvesting—“Chaomu No.1” *Echinochloa*[J]. China Seed Industry, 2003 (2): 44—45. [郜玉田, 张雪艳. 抗旱耐盐碱高产优质粮草兼收的朝牧一号稗子[J]. 中国种业, 2003 (2): 44—45.]
- [ 7 ] Subramanian A, Raj R N, Jeyaprakash P. *In vitro* and *in vivo* screening of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* (roxb.) link) germplasm for salinity tolerance[J]. Plant Archives, 2020, 20 (2): 7389—7397.
- [ 8 ] Cui X, Cui G W, Li H Y, et al. Influence of straw covering and reseeding on soil enzyme activity in saline and alkaline grassland in Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36 (5): 95—100. [崔新, 崔国文, 李洪影, 等. 覆盖秸秆和补播牧草对松嫩平原退化盐碱草地土壤酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36 (5): 95—100.]
- [ 9 ] Yan N N, Cui G W, Zhang X, et al. The influence of straw covering and reseeding on soil ion content in saline and alkaline grassland in Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37 (2): 112—116. [阎南南, 崔国文, 张茜, 等. 覆盖秸秆和补播牧草对松嫩退化盐碱草地土壤盐离子含量的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37 (2): 112—116.]
- [ 10 ] Wang X Q, Xu X, Lu A Q, et al. Cultivation of two barnyard varieties improves physicochemical properties

- of saline-alkali land through mediating rhizospheric microbiome and metabolome[J]. *Agronomy*, 2022, 12 ( 6 ): 1322.
- [ 11 ] Gu L X, Lv P, Ma F, et al. Drift potential characteristics of Mu Us Sandy Land calculated with different data sources[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42 ( 5 ): 54—62. [顾立霞, 吕萍, 马芳, 等. 不同数据源下毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42 ( 5 ): 54—62.]
- [ 12 ] Guo Q, Bu C F, Li Y P, et al. The spatial distribution characteristics of soil nutrients underlying biological crusts at regional scale: A case study of Mu Us Sandy Land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 ( 3 ): 699—708. [郭琦, 卜崇峰, 李宜坪, 等. 区域尺度生物结皮下伏土壤养分的空间分布特征——以毛乌素沙地为例[J]. *土壤学报*, 2022, 59 ( 3 ): 699—708.]
- [ 13 ] Chen T X, Yang S Y, Su Y H. Overexpression of potassium channel ZmK2; 1 in rice improves nitrogen utilization potential[J]. *Soils*, 2023, 55 ( 3 ): 520—527. [陈天祥, 杨顺瑛, 苏彦华. 钾通道 ZmK2; 1 在水稻中超表达提升水稻氮素利用潜力[J]. *土壤*, 2023, 55 ( 3 ): 520—527.]
- [ 14 ] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 15 ] Zhang G P, Zhou W J. Crop production[M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2016. [张国平, 周伟军. 作物栽培学[M]. 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.]
- [ 16 ] Xiong Z H, Yang C, Zhang G, et al. Effects of potassium addition on physiological characteristics and grain yield under drought stress condition in different growth stages of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 ( 1 ): 140—150. [熊志豪, 杨丞, 张赓, 等. 不同生育期干旱胁迫条件下施肥对水稻生理特性及产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61 ( 1 ): 140—150.]
- [ 17 ] Liao P Q, Masoom A, Mao H Y, et al. Life history traits of an *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* population with extreme adaptations to rice planting systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 ( 9 ): 3067—3074. [廖平强, Masoom Aatiqa, 毛海燕, 等. 特异性适应稻作系统的稗草种群生活史特性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 ( 9 ): 3067—3074.]
- [ 18 ] Zhang J L, Yang B, Meng J. A study of introduction experiment of Chaomu No.1 tares[J]. *Ningxia Journal of Agricultural and Forest Science and Technology*, 2013, 54 ( 3 ): 5—6. [张俊丽, 杨斌, 蒙静. 朝牧一号稗子引种试验研究[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54 ( 3 ): 5—6.]
- [ 19 ] Pan X J. Study on reproductive allocation and reproductive characteristics of *Echinochloa crusglli* ( L. ) Beauv under different single treatments[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011. [潘星极. 不同单因素条件下稗草生殖分配及生殖分株数量特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.]
- [ 20 ] Wang Y N, Mi G H. Effects of nitrogen application rates on weed occurrence in maize field in northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29 ( 4 ): 155—160. [王玉娜, 米国华. 不同氮肥施用量对东北玉米田杂草发生的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29 ( 4 ): 155—160.]
- [ 21 ] Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 ( 16 ): 5565—5577. [王佺珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37 ( 16 ): 5565—5577.]
- [ 22 ] Yamamoto A, Shim I S, Fujihara S, et al. Physiochemical factors affecting the salt tolerance of *Echinochloa crus-galli* Beauv. var. *formosensis* Ohwi[J]. *Weed Biology and Management*, 2003, 3 ( 2 ): 98—104.
- [ 23 ] 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. [张杨, 曹靖, 李广, 等. 盐碱胁迫下湖南稷子苗期根系分泌物代谢组学[J]. *生态学报*, 2024, 44 ( 8 ): 3540—3549.]
- [ 24 ] Ali A Y A, Zhou G S, Elsiddig A M, et al. Effects of jasmonic acid in foliar spray and an humic acid amendment to saline soils on forage sorghum plants' growth and antioxidant defense system[J]. *PeerJ*, 2022, 10: e13793.
- [ 25 ] You L X, Wang P, Kong C H. The levels of jasmonic acid and salicylic acid in a rice-barnyardgrass coexistence system and their relation to rice allelochemicals[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2011, 39 ( 4/5/6 ): 491—497.
- [ 26 ] Yi L P, Ma J, Li Y. Effects of salt stress on root characteristics and vigor of three desert halophytes at seedling stage[J]. *Scientia Sinica ( Terrae )*, 2006, 36 ( S2 ): 86—94. [弋良朋, 马健, 李彦. 盐胁迫对 3 种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36 ( S2 ): 86—94.]
- [ 27 ] Rahmati Ishka M, Sussman H, Hu Y, et al. Natural variation in salt-induced changes in root: Shoot ratio reveals SR3G as a negative regulator of root suberization and salt resilience in *Arabidopsis*[J]. *eLife*, 2025, 13: RP98896.
- [ 28 ] An Y, Gao Y, Tong S Z, et al. Morphological and physiological traits related to the response and adaption of *Bolboschoenus planiculmis* seedlings grown under salt-alkaline stress conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 567782.
- [ 29 ] Wang S F, Hu Y X, Sun H J, et al. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 ( 4 ): 1021—1029. [王

- 树凤, 胡韵雪, 孙海青, 等. 盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021—1029.]
- [ 30 ] Li F R, Liu J L, Ren W, et al. Land-use change alters patterns of soil biodiversity in arid lands of northwestern China[J]. *Plant and Soil*, 2018, 428 (1): 371—388.
- [ 31 ] Guo J X, Zhou Y X, Guo H J, et al. Saline and alkaline stresses alter soil properties and composition and structure of gene-based nitrifier and denitrifier communities in a calcareous desert soil[J]. *BMC Microbiology*, 2021, 21 (1): 246.
- [ 32 ] Lambers H. Phosphorus acquisition and utilization in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73 (1): 17—42.
- [ 33 ] Li X L, Gao Q C, Liu Y X, et al. Effects of salt gradient on transformation of different phosphorus forms[J]. *Soils*, 2024, 56 (6): 1222—1230. [李小林, 高乾程, 刘雨星, 等. 盐分梯度对土壤中不同磷素形态转化的影响[J]. 土壤, 2024, 56 (6): 1222—1230.]
- [ 34 ] Li Q S, Wang D M, Xin Z B, et al. Root distribution in shrub communities of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (15): 5104—5109. [李青山, 王冬梅, 信忠保, 等. 滇江水陆交错带典型灌木群落根系分布与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5104—5109.]
- [ 35 ] Li H, Hu C J, Zhao R Q, et al. Root distribution characteristics of three typical plantations in a Loess Hills region[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38 (5): 1420—1428. [李浩, 胡婵娟, 赵荣钦, 等. 黄土丘陵区典型人工林的根系分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38 (5): 1420—1428.]
- [ 36 ] He Y Y, Guo S L, Wang Z. Research progress of trade-off relationships of plant functional traits[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43 (12): 1021—1035. [何芸雨, 郭水良, 王喆. 植物功能性状权衡关系的研究进展[J]. 植物生态学报, 2019, 43 (12): 1021—1035.]

(责任编辑: 陈荣府)