

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.011

引用格式:刘瑞波,曹诗娅,何欣月,等.10份野生披碱草种质耐盐碱性综合评价[J].草地学报,2026,34(3):853–864

Liu Rui-bo, Cao Shi-ya, He Xin-yue, et al. Comprehensive Evaluation of Salt-Alkaline Tolerance in 10 Wild *Elymus-dahuricus* Germplasms[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):853–864

10份野生披碱草种质耐盐碱性综合评价

刘瑞波¹, 曹诗娅¹, 何欣月¹, 李嘉禾¹, 伊风艳², 唐芳^{1*}, 王学敏³

(1. 内蒙古农业大学草业学院/农业部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室, 内蒙古自治区草原生态保护学重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 内蒙古自治区林业和草原种苗总站, 内蒙古呼和浩特 010017; 3. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘要:为了探究不同披碱草(*Elymusdahuricus*)种质萌发期和苗期对盐碱胁迫的耐受性,本研究随机选取3份披碱草种质进行不同浓度盐碱胁迫盆栽试验($\text{NaCl}:\text{NaHCO}_3=3:1$),以发芽率为指标确定披碱草耐盐碱评价体系的最佳胁迫浓度为 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在此胁迫浓度下,以清水为对照,采用盆栽试验,通过测定发芽及农艺性状指标,对10份种质的耐盐碱性进行综合评价。结果表明,盐碱胁迫显著抑制披碱草种子萌发与幼苗生长,且抑制效应随浓度升高而增强。E5在 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下各发芽指标均最高,耐盐碱性最强;而E6的所有测定指标均低于其他材料,且 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫下发芽率为0,耐盐碱性最弱。综合评价结果表明,10份披碱草种质的耐盐碱性为 $\text{E5}>\text{E2}>\text{E9}>\text{E1}>\text{E10}>\text{E4}>\text{E3}>\text{E7}>\text{E8}>\text{E6}$,划分为强耐盐碱、耐盐碱、中耐盐碱、弱耐盐碱和不耐盐碱5类。本研究为后续披碱草耐盐碱新品种选育及耐盐碱分子机理的研究提供种质材料与理论支持。

关键词:披碱草;盐碱胁迫;综合评价;种质资源

中图分类号:S602.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0853-12

Comprehensive Evaluation of Salt-Alkaline Tolerance in 10 Wild *Elymusdahuricus* Germplasms

LIU Rui-bo¹, CAO Shi-ya¹, HE Xin-yue¹, LI Jia-he¹, YI Feng-yan², TANG Fang^{1*}, WANG Xue-min³

(1. Pratacultural College of Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Forage Cultivation, Processing and Efficient Utilization of the Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Grassland Ecological Protection of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Forestry and Grassland Seedling Station Hohhot, Inner Mongolia 010017, China; 3. Beijing Institute of Animal Husbandry and Veterinary, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the salt-alkali tolerance of *Elymusdahuricus* accessions during germination and early seedling stages. Three preliminary accessions were first screened under gradient salt-alkali stress ($\text{NaCl}:\text{NaHCO}_3=3:1$) to determine appropriate treatment levels; 100 and 150 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ were selected for subsequent experiments based on germination rate. Ten wild accessions originating from diverse regions and habitats were then subjected to these two stress concentrations in a pot trial, with water as the control. Germination and agronomic traits were measured to comprehensively assess salt-alkali tolerance. Salt-alkali stress significantly inhibited seed germination and seedling growth, and the inhibitory effects intensified with increased concentration. Under 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ stress, accession E5 exhibited the highest values for all germination parameters and was identified as the most tolerant one, whereas E6 showed the poorest performance, with 0% germination at 150 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, indicating lowest tolerance. The ten accessions were consequently ranked as $\text{E5}>\text{E2}>\text{E9}>\text{E1}>\text{E10}>\text{E4}>\text{E3}>\text{E7}>\text{E8}>\text{E6}$, and classified into five categories: highly tolerant, tolerant, moderately tolerant, weakly tolerant and non-tolerant. These results provide valuable germplasm resources and

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-08-17

基金项目:草种基因资源挖掘与种质创新利用(2023YFD120030303);优质饲草种质资源鉴定评价与新种质创制(2025KYPT0148);浑善达克野生草品种培育和种质资源生产抚育资助

作者简介:刘瑞波(2001-),女,汉族,山西忻州人,硕士研究生,主要从事牧草种质资源与育种方向研究,E-mail:18347314833@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: fta223@imau.edu.cn

a theoretical basis for breeding salt-alkali-tolerant *E. dahuricus* cultivars and for elucidating the molecular mechanisms underlying salt - alkali tolerance.

Key words: *Elymusdahuricus*; Salt-alkaline stress; Comprehensive evaluation; Germplasm resources

披碱草(*Elymusdahuricus*)为一种多年生草本植物,具有耐盐碱、耐旱、抗寒、抗风沙、抗病虫害等特性,是我国北方重要的生态草种^[1-2]。其良好的抗逆性使得披碱草在各种环境条件下都能生存,尤其在贫瘠土壤和干旱地区的植被重建中具有不可替代的作用。

土壤盐碱化是全球性的环境和生态难题^[3, 4]。数据显示,全球盐碱土地总面积已突破10亿公顷,其中约10%的耕地正遭受盐碱化危害^[5]。粮农组织预测,至2050年全球约50%的农业用地将遭受盐渍化威胁^[6]。盐胁迫与碱胁迫作为共生的非生物胁迫因子,通过协同作用加剧对植物的伤害,其复合胁迫造成的生理损伤远高于单一胁迫^[7, 8]。Hasegawa等^[9]研究发现,盐胁迫会使植物因高渗透压而水分不足、离子失衡,进而影响代谢和生理功能,甚至导致细胞死亡。研究表明,高浓度的盐碱胁迫抑制植物生长,导致产量大幅降低^[10]。韩岱等^[11]研究发现大豆受到盐碱胁迫时,敏盐品种出现叶片萎蔫、失绿等现象。姜泽宇等^[12]在对工业大麻种子进行NaCl和Na₂CO₃胁迫的研究中发现,发芽率与盐碱浓度呈负相关。近年来,我国盐渍土治理利用的思路已由“以地适种”转向“以种适地”^[13]。因此,筛选培育并种植耐盐碱植物品种是开发利用盐碱地的一种有效手段,对保障粮食安全和改善生态环境意义重大^[14, 15]。

目前,大多数研究主要集中于单一胁迫(盐胁迫或碱胁迫),较少关注盐碱混合胁迫。郑译儒等^[16]研究发现,披碱草干重与盐胁迫浓度呈反比。信龙飞等^[17]在桔梗种子和苗期对盐胁迫响应的研究中表明,高浓度NaCl胁迫会抑制胚芽的生长,抑制程度与胁迫浓度呈正相关。杨紫贻等^[18]采用隶属函数对30份紫花苜蓿进行耐盐性综合评价,筛选出最耐盐的苜蓿品种中苜1号。Yan等^[19]研究指出,碱胁迫显著抑制幼苗生长和光合作用。Guo等^[20]在盐碱胁迫对棉花生长的影响研究中发现,碱胁迫抑制植物矿物元素的吸收并破坏离子平衡。然而,实际的盐碱地通常是中性盐(NaCl, Na₂SO₄)和碱性盐(Na₂CO₃, NaHCO₃)共存,这种盐-碱复合胁迫对植物的影响比单一胁迫更为复杂且独特^[21]。深入探究盐-碱复合胁迫对植物的影响,尤其是针对

披碱草的耐盐碱性研究,具有极为重要的意义。

因此,本研究选取10份不同地区不同生境的野生披碱草种质为实验材料,筛选最佳盐碱胁迫浓度,构建披碱草盐碱胁迫体系,深入探究盐碱混合胁迫对披碱草种子萌发及苗期生长的影响。此外,利用主成分分析、随机森林模型、隶属函数及系统聚类分析等方法对10份披碱草种质的耐盐碱性进行全面评价,筛选极端耐盐碱的种质资源,为后续披碱草耐盐碱品种的选育及耐盐碱分子机理解析提供优异种质材料与理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为2024年8月采集自内蒙古、河北、北京等不同地区的野生披碱草种质,采集地具体信息见表1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 适宜盐碱胁迫浓度确定:随机选取3份披碱草种质资源,选择成熟饱满无病虫害的种子。设计盆栽试验,称取80 g蛭石和160 g火山石(重量比=1:2)充分混匀置于10 cm×10 cm×8 cm(底径×盆径×高度)花盆中,在盆底放置两层纱布,确保基质不外渗。以1/2 Hoagland营养液为底液,配置浓度梯度为0, 35, 70, 105, 140, 175 mmol·L⁻¹ NaCl:NaHCO₃=3:1(摩尔比)的盐碱混合溶液,浇入苗盆基质使其达到100%土壤饱和含水量,模拟盐碱胁迫环境,种子覆土深度1~2 cm。当苗盆内土壤含水量降至70%时,基质的盐碱浓度即可达到设定浓度(0, 50, 100, 150, 200, 250 mmol·L⁻¹)。后续每天称重浇水保证土壤含水量为70%,每两周补充1次1/2 Hoagland营养液。每天观察并记录种子发芽情况,14天后统计发芽率并进行分析,筛选披碱草耐盐碱性评价试验的最佳盐碱胁迫浓度。

萌发期耐盐碱种质筛选:试验以10份种质资源为研究对象,从每份种质中选择成熟饱满无病虫害的种子。设置2个浓度处理,以1/2 Hoagland营养液为底液,配制70 mol·L⁻¹和105 mol·L⁻¹盐碱混合溶液,以等体积清水为对照,浇入苗盆基质使其达

表 1 10 份披碱草种质采集地信息

Table 1 Collection site information of 10 *E. dahuricus* germplasms

编号 Serial number	生境 Habitat	GPS 信息 GPS information	采集地点 Collection places
E1	河边	39.098224°N, 112.326627°E	山西—宁武县呼北线
E2	国道路边	39.988540°N 115.428232°E	河北—涿鹿县·小龙门国家级森林公园
E3	果园林地	40.135289°N, 115.841517°E	北京—门头沟区·大镇路
E4	山坡底下	40.182710°N, 115.513198°E	河北—怀来县·241 省道
E5	路边边坡	42.208887°N, 116.630493°E	内蒙古多伦滦河源国家湿地公园
E6	路边	43.198331°N, 116.139095°E	内蒙古—阿巴嘎旗·207 国道
E7	草甸草原	45.798165°N, 120.362513°E	内蒙古—科尔沁右翼中旗·哈列列达坂
E8	小道路边	46.562515°N, 119.870754°E	内蒙古—东乌珠穆沁旗·呼斯图巴拉日
E9	路边	48.048979°N, 118.471818°E	内蒙古—新巴尔虎左旗·331 国道
E10	路边沟底	48.968600°N, 119.358279°E	内蒙古—鄂温克族自治旗·332 国道

到 100% 土壤饱和含水量,模拟盐碱胁迫环境。当苗盆内土壤含水量降至 70% 时,基质的盐碱浓度即可达到设定浓度(100 mmol·L⁻¹和 150 mmol·L⁻¹)。具体实验方法同上。

1.2.2 指标测定 挑选 25 粒籽粒饱满、大小均匀一致的披碱草种子种于苗盆,覆土深度 1 cm。设置对照组(0mmol·L⁻¹NaCl:NaHCO₃=3:1)和 2 个处理组(100 mmol·L⁻¹,150 mmol·L⁻¹NaCl:NaHCO₃=3:1),各 3 个生物学重复。将苗盆置于 25℃植物培养室中进行培养(16 h 光照,8 h 黑暗),每日定时记录发芽数。计算种子发芽势、发芽率及发芽指数,计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{发芽率}(\%) = & \\ & (\text{21天内出苗种子数/供试种子数}) \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{发芽势}(\%) = & \\ & \text{10天内出苗种子数/供试种子数} \times 100\% \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum(Gt/Dt) \quad (3)$$

式中, Gt 为在第 t 天的发芽数, Dt 为相应的发芽天数。

第 49 天时测定株高、茎粗、分蘖数及地上生物量,测定方法如下:

绝对株高:用直尺测量最长叶片顶部到茎基部的距离;

茎粗:数显游标卡尺贴地面对植株茎基部进行测量;

分蘖数:计数法;

地上生物量:将地上部植株用剪刀贴土壤表层剪下,使用分析天平进行称重。

1.3 评价方法

1.3.1 隶属函数分析 使用各指标相对值对每份

披碱草种质的各指标进行隶属函数值的计算,计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{各指标相对值}(\%) = & \\ & (\text{处理组指标平均值/对照组指标平均值}) \times (4) \\ & 100\% \\ U(x) = & (x - x_{\min} / x_{\max} - x_{\min}) \times 100\%, x = \\ & 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $u(x)$ 为第 x 个指标的隶属函数值

1.3.2 主成分分析 使用主成分分析将 7 个指标降维成 4 个主成分,利用随机森林模型,以 PC1, PC2, PC3 和 PC4 为目标变量分析计算各指标重要值权重,计算公式如下

$$W_x = V_x / m \quad (6)$$

式中, W_x 为第 x 个指标的重要值权重^[22], V_x 为第 x 个指标的重要值; m 为各个指标的重要值之和。

1.3.3 耐盐碱综合评价 利用隶属函数与权重进行综合评价值的计算,计算公式如下:

$$D = \sum_{x=1}^n [U(x) \times W_x], x = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中, D 为加权隶属函数值,即综合评价值^[23]

对 10 份披碱草种质在 100 mmol·L⁻¹ 和 150 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫下的综合评价值分别进行排序。此后,根据 2 个胁迫浓度下的综合评价值计算均值并排名。

1.3.4 聚类分析 使用 100 mmol·L⁻¹ 和 150 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫下的综合评价值进行系统聚类分析,依据欧氏距离对 10 份材料耐盐碱性进行分级。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和分析,使用 SPSS 26.0 软件对数据进行主成分分

析、隶属函数分析和聚类分析,使用R编程语言建立随机森林模型并分析贡献率,Origin 2022作图。

2 结果与分析

2.1 最适盐碱胁迫浓度筛选

从10份野生种质中随机选取3份进行梯度盐碱浓度胁迫处理,以确定披碱草耐盐碱性评价体系中的最佳盐碱胁迫浓度。结果表明,随着盐碱浓度的升高,披碱草发芽率呈逐渐降低的趋势(图1)。50 mmol·L⁻¹盐碱胁迫对披碱草种子萌发和幼苗生长无显著影响;与对照相比,100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下3份披碱草种质的发芽率分别降低了37.89%,20.66%和17.25%,150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下发芽率分别降低了66.84%,60.98%和47.31% ($P < 0.05$);3份种质在200 mmol·L⁻¹和250 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下受到严重抑制,所有材料的种子均不萌发。因此,100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹为筛选披碱草耐盐碱性的最佳胁迫浓度。

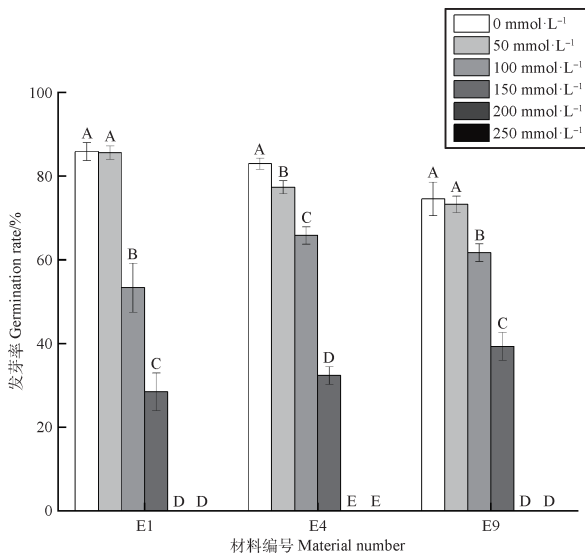


图1 不同盐碱浓度下披碱草种子的发芽率

Fig. 1 Germination rate of *E. dahuricus* seeds under different saline-alkali concentrations

注:材料E1、E4和E9均为采集自不同地区不同生境下的野生披碱草种质,具体信息见表1。不同大写字母表示不同浓度同一材料差异显著

Note: Materials E1, E4 and E9 are wild *E. dahuricus* germplasms collected from different habitats in different regions, the specific information is shown in table 1, the specific information is shown in table 1. Different uppercase letters indicate significant differences in the same material of different concentrations

2.2 盐碱胁迫对种子萌发期各指标的影响

与对照相比,100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下10份披碱草种质的发芽势、发芽率和发芽指数均显著降低(图2)。不同种质在盐碱胁迫下的萌发能力存在显著差异,E5对盐碱胁迫的耐受性较强。100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,E5的发芽势、发芽率和发芽指数均显著高于其他材料 ($P < 0.05$),且在150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,其余8份披碱草种质发芽势均为0(图2A)。100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,E6的发芽率较对照分别降低了63.28%和94.67% ($P < 0.05$,图2B);100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下E6的发芽指数减少了82.4% ($P < 0.05$),在150 mmol·L⁻¹胁迫下,发芽指数显著降低至0(图2C, $P < 0.05$)。

2.3 盐碱胁迫对披碱草苗期各指标的影响

盐碱胁迫显著抑制披碱草的生长(图3)。在测定的10份种质资源中,仅有E1的株高随胁迫浓度的升高不断增大。除此以外,各种质苗期的所有指标均随胁迫浓度的增长保持不变或持续降低。其中,E1的茎粗在100 mmol·L⁻¹较对照增加了14.67%,E5,E8,E9和E10的分蘖数在100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下无明显差异。在对照组中,E10,E5,E6和E2的株高显著优于其他材料 ($P < 0.05$)。E6对盐碱胁迫表现出高度敏感性,100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,株高、茎粗及地上生物量较对照分别下降了27.46%,39.65%和52.78%;当胁迫浓度上升至150 mmol·L⁻¹时,该种质完全丧失萌发能力,其耐盐碱性显著低于其他材料 ($P < 0.05$)。相比之下,E5表现出较强的耐盐碱性,在不同胁迫浓度下各农艺性状指标无显著差异。综合结果表明,盐碱胁迫对各生长指标均产生负面影响,其中地上生物量的抑制效应最为显著,而分蘖数受影响相对较小(图3C)。

150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,部分种质受到抑制,种子无法萌发,无法进行生长速度的比较分析。因此,本研究选择100 mmol·L⁻¹作为盐碱胁迫浓度,以进行生长速度的研究。

披碱草的生长速度与适应能力呈正相关^[24]。通过对10份种质0~49天内株高的动态监测发现,随着胁迫时间的延续,生长速度呈现先上升后下降的趋势。在种子萌发后一周,生长速度达到峰值,随后逐渐减缓(图4)。各个种质的生长速度表现出

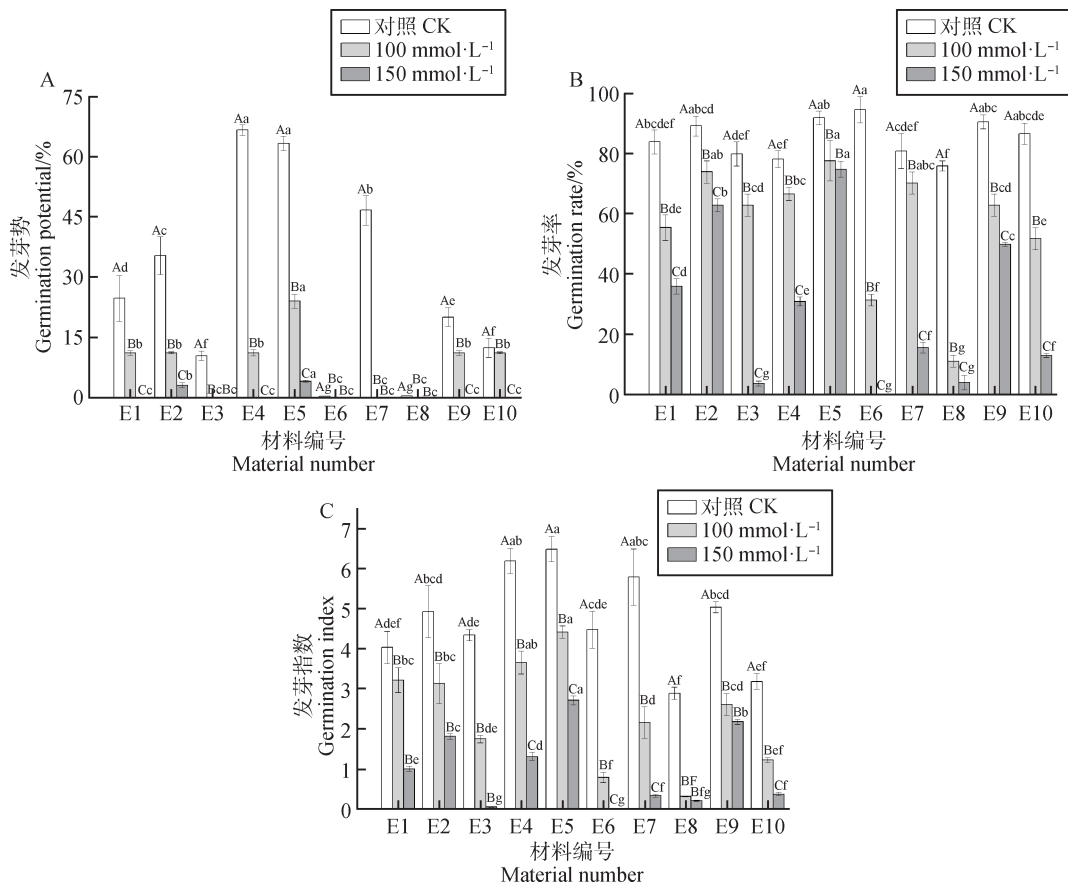


图2 100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下10份披碱草种质的发芽指标

Fig. 2 Germination indexes of 10 *E. dahuricus* germplasms under 100 mmol·L⁻¹ and 150 mmol·L⁻¹ saline-alkali stress

注:不同小写字母表示同一浓度不同材料差异显著,不同大写字母表示不同浓度同一材料差异显著,下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different materials of the same concentration, and different uppercase letters indicate significant differences in the same material of different concentrations, the same as below

明显的波动,表明披碱草在盐碱胁迫下的生长特性具有遗传多样性。大部分种质在0~7天内生长速度迅速上升,而部分种质在此阶段仍未萌发。某些种质如E5在整个胁迫过程中表现出较高的生长速度,表明其具有较强的盐碱适应能力;而其他种质如E6则始终保持较低的生长速度,显示其在盐碱胁迫下的适应能力较弱。

2.4 盐碱胁迫对萌发期和苗期相对指标的影响

盐碱胁迫对10份披碱草种质苗期萌发和生长指标存在显著抑制(表2)。100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,相对发芽率、发芽势、发芽指数、株高、茎粗、分蘖数及地上生物量均值分别为66.25%,27.85%,47.13%,85.91%,79.05%,84.81%和71.43%,150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,各指标均值显著降低至35.44%,1.66%,20.51%,9.38%,56.15%,63.24%和41.56%。其中E6对盐碱胁迫显著敏感,其种子在150 mmol·L⁻¹胁迫下完全丧失萌发能

力;100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下E5的各指标相对值分别为84.65%,37.81%,68.72%,91.82%,86.74%,90.48%及98.02%,显著高于其他材料($P<0.05$),表明其对盐碱胁迫具有较强耐受性;150 mmol·L⁻¹胁迫处理下多数材料的相对发芽势为0,该浓度盐碱环境对种子萌发具有强烈抑制作用。

不同种质对盐碱胁迫的耐受性差异较大(表3)。与对照相比,盐碱处理下各指标均值有不同程度的下降,其中发芽势降幅最大(0.85 ± 0.13),其次为发芽指数(0.65 ± 0.14)和发芽率(0.50 ± 0.16),盐碱胁迫对种子萌发的影响尤为突出。随着盐碱浓度升高,10份种质的各指标均值呈递减趋势。100 mmol·L⁻¹处理下,株高、茎粗、分蘖数和地上生物量较对照分别下降15%,22%,18.6%和9.5%;150 mmol·L⁻¹处理下,对应指标分别下降31.6%,45.9%,37.9%和61.6%,说明高浓度胁迫对植株生长抑制更为严重。

盐碱胁迫显著增加了各指标的变异程度。变异

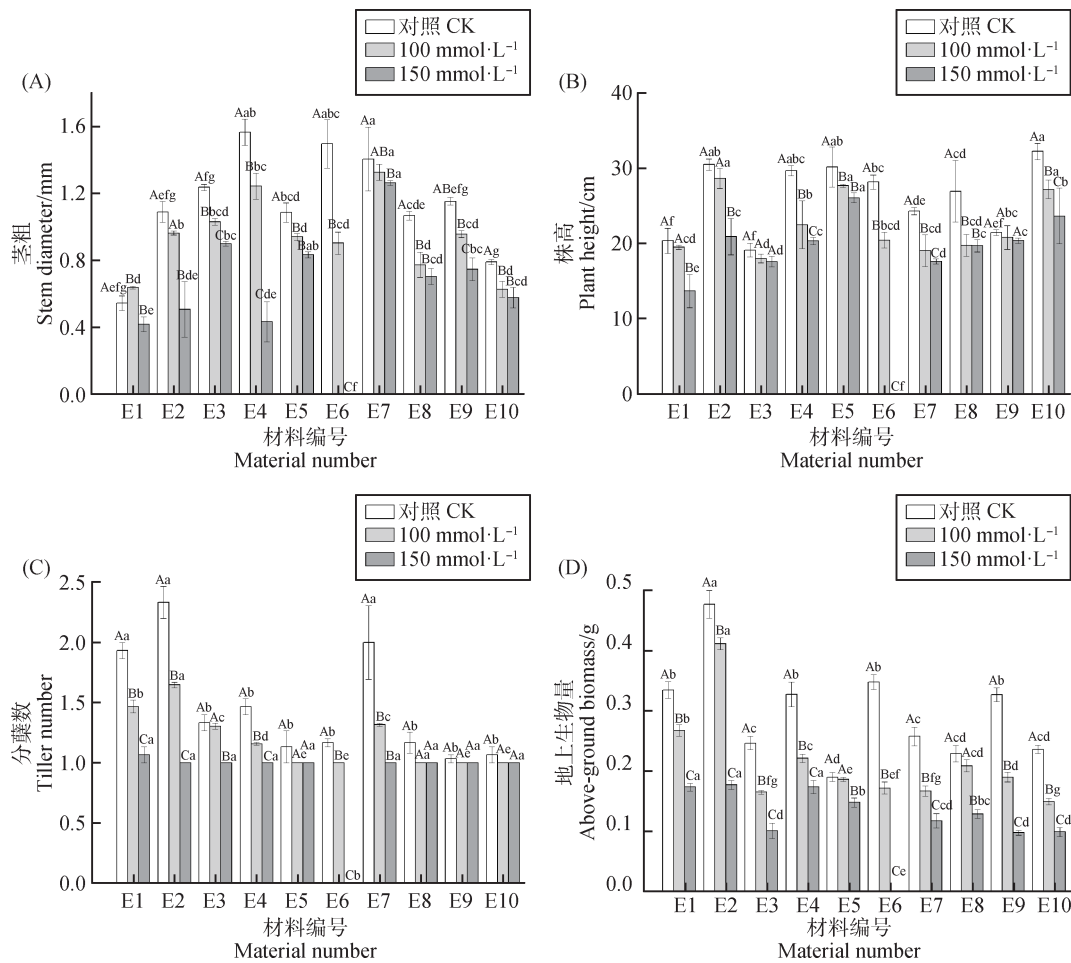


图3 不同盐碱胁迫下10份披碱草种质的农艺性状指标

Fig. 3 Agronomic traits of 10 *E. dahuricus* germplasms under different saline-alkali stresses

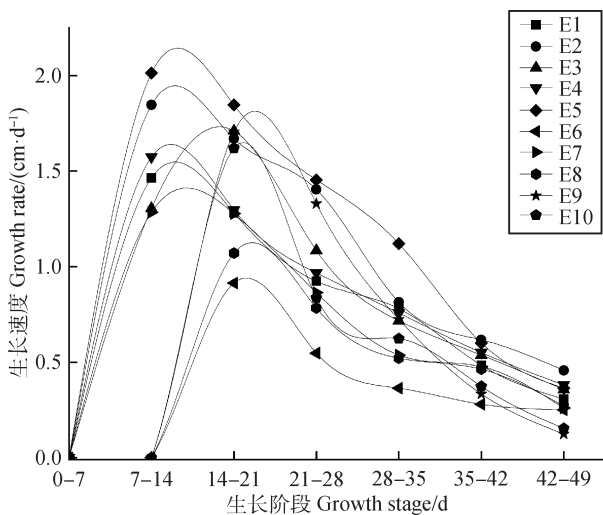


图4 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫下10份披碱草种质在7个阶段的生长速度

Fig. 4 The growth rate of 10 *E. dahuricus* germplasms at 7 stages under $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ saline-alkali stress

系数越高,种质间差异越大。 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下,发芽率、发芽势和发芽指数的变异系数较对照分别

增加了34.68%,93.24%和53.4%; $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下,对应指标的变异系数分别增加了86.13%,201.7%和91.48%,变异系数增幅明显,表明不同个体对盐碱胁迫的响应存在显著差异。在 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下,发芽势的变异系数高达202.53%,该参数可作为筛选耐盐碱种质的重要指标。

2.5 主成分分析

对10份披碱草种质在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫下测定的7个指标进行主成分分析,前4个主成分的贡献率累计达到90.649%,说明这4个主成分能代表整个数据的变化趋势,可作为评价披碱草种质耐盐碱性的主要指标。

2.6 随机森林回归

利用随机森林模型,以PC1,PC2,PC3和PC4为目标变量分析每个指标对模型预测性能的贡献(Mean Decrease in Mean Squared Error, 简称为IncMSE)和每个指标对节点纯度的贡献(Mean

表 2 不同盐碱胁迫下 10 份披碱草种质萌发期和苗期各相对指标

Table 2 Relative indexes of 10 *E. dahuricus* germplasms at germination and seedling stages under different saline-alkali stresses

材料编号 Material number	相对发芽率 Relative germination rate/%		相对发芽势 Relative germination potential/%		相对发芽指数 Relative germination index/%		相对株高 Relative plant height/%		相对茎粗 Relative stem size/%		相对分蘖数 Relative tillering number/%		相对地上生物量 Relative above-ground biomass/%	
	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100
E1	43.00±2.24 ^d	66.45±3.32 ^{cd}	0.00±0.00 ^f	45.11±1.19 ^e	25.11±1.28 ^b	81.27±10.43 ^a	68.04±6.31 ^e	97.09±7.35 ^a	77.78±8.86 ^a	81.28±7.21 ^{ab}	55.19±2.89 ^{de}	75.98±3.00 ^{bc}	49.80±2.09 ^{bcd}	79.60±6.24 ^{bc}
E2	70.60±3.15 ^b	82.89±3.73 ^{ab}	8.65±2.04 ^a	31.61±1.63 ^d	37.87±3.45 ^e	65.11±11.93 ^{ab}	68.59±1.33 ^e	94.06±2.13	46.90±3.32 ^{bc}	89.04±4.81 ^a	43.12±2.33 ^e	70.86±3.49 ^e	35.50±3.45 ^{de}	86.38±5.55 ^{ab}
E3	4.50±0.92 ^j	79.37±7.64 ^{abc}	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	1.27±0.23 ^e	40.44±2.84 ^{cd}	92.20±3.62 ^a	94.89±7.29 ^{ab}	72.87±3.85 ^a	83.27±0.69 ^{ab}	75.40±3.97 ^{bc}	98.55±6.51 ^a	37.37±5.83 ^{de}	65.06±2.03 ^{cde}
E4	39.54±.48 ^d	85.15±1.32 ^a	0.00±0.00 ^f	16.68±0.34 ^e	21.33±2.37 ^b	59.34±5.25 ^{bc}	68.60±3.05 ^e	75.78±2.04 ^{bcd}	27.73±0.89 ^e	79.58±4.32 ^{ab}	68.45±2.98 ^{cd}	78.87±3.10 ^{abc}	51.40±3.79 ^{bc}	66.66±4.71 ^{cd}
E5	81.53±.17 ^b	84.65±2.13 ^a	6.33±0.18 ^b	37.81±2.04 ^{cd}	41.96±1.18 ^e	68.72±5.88 ^{ab}	86.37±1.06 ^{abc}	91.82±2.07 ^{abcd}	77.05±3.33 ^a	86.74±2.90 ^{ab}	90.48±9.52 ^{ab}	90.48±9.52 ^{ab}	76.11±2.73 ^a	98.02±2.61 ^a
E6	0.00±0.00 ^f	33.20±2.32 ^e	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	17.52±1.52 ^{cd}	0.00±0.00 ^f	72.46±1.25 ^d	0.00±0.00 ^f	61.54±5.24 ^e	0.00±0.00 ^f	85.86±2.53 ^{abc}	0.00±0.00 ^f	47.33±2.25 ^e
E7	19.34±1.08 ^e	86.96±5.20 ^a	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	6.09±1.19 ^{cd}	37.10±3.67 ^{cd}	72.59±2.84 ^{bc}	78.42±2.03 ^{abcd}	72.70±15.62 ^a	74.53±5.50 ^{abc}	52.85±9.33 ^{de}	69.34±11.35 ^e	43.29±7.78 ^{bcd}	63.07±2.93 ^{de}
E8	5.26±0.01 ⁱ	14.62±0.01 ⁱ	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	7.50±0.83 ^e	11.13±0.64 ^f	73.12±2.92 ^{bc}	73.23±6.48 ^{cd}	65.84±2.97 ^{ab}	72.28±5.23 ^{bc}	86.75±6.88 ^{abc}	86.75±6.88 ^{abc}	53.95±6.31 ^e	91.10±3.95 ^{ab}
E9	55.17±1.04 ^c	69.54±4.67 ^{bcd}	0.00±0.00 ^f	57.10±6.72 ^b	43.45±2.43 ^a	52.10±6.57 ^{bcd}	94.95±2.74 ^a	96.88±1.57 ^a	64.48±1.75 ^{ab}	82.86±1.12 ^{ab}	96.97±3.03 ^a	96.97±3.03 ^a	26.62±1.36 ^e	56.26±0.55 ^{de}
E10	15.07±1.02 ^e	59.69±2.21 ^d	0.00±0.00 ^f	90.22±2.37 ^a	11.92±1.56 ^e	38.59±1.71 ^{de}	73.61±4.33 ^{bc}	84.46±2.27 ^{abcd}	72.98±1.89 ^a	79.35±3.65 ^{ab}	94.44±5.56 ^{ab}	94.44±5.56 ^{ab}	38.06±0.81 ^{de}	60.82±0.84 ^{de}

表 3 10 份野生披碱草种质 7 个指标值的统计分析表

Table 3 Statistical analysis table of 7 index values of 10 wild *E. dahuricus* germplasms

盐碱浓度 Salt concentration	参数 Parameter	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thick/mm	分蘖数 Tiller number	地上生物量 Above-ground biomass/g
0 mol·L ⁻¹	最小值 Min	72.00	0.00	2.62	19.06	0.54	1.03	0.1758
	中位数 Median	88.00	24.00	4.70	27.50	1.12	1.25	0.2780
	最大值 Max	96.00	68.00	7.19	32.19	1.81	2.33	0.4626
	均值 Average	85.00	28.00	4.74	26.24	1.18	1.46	0.2830
	标准差 SD	7.00	23.00	1.27	4.45	0.35	0.44	0.0788
	变异系数 CV/%	8.00	83.00	0.27	0.17	0.30	0.30	0.2784
100 mol·L ⁻¹	最小值 Min	11.11	0.00	0.32	17.95	0.44	1.00	0.1349
	中位数 Median	62.96	11.11	2.39	20.57	0.95	1.08	0.1739
	最大值 Max	77.78	23.98	4.42	28.60	1.33	1.64	0.3973
	均值 Average	56.47	7.95	2.33	22.30	0.92	1.19	0.1996
	标准差 SD	19.63	7.48	1.25	3.77	0.25	0.22	0.0734
	变异系数 CV/%	34.76	94.07	53.67	16.92	27.25	18.71	36.7953
150 mol·L ⁻¹	最小值 Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000
	中位数 Median	23.33	0.00	0.69	19.98	0.64	1.00	0.1087
	最大值 Max	75.00	4.00	2.72	26.02	1.26	1.07	0.1626
	均值 Average	29.13	0.7	1.00	17.95	0.64	0.91	0.1086
	标准差 SD	25.11	1.42	0.92	6.79	0.32	0.30	0.0472
	变异系数 CV/%	86.21	202.53	91.75	37.83	50.35	33.41	43.4267

表 4 盐碱胁迫下 10 份披碱草种质测定指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of determination indexes of 10 *E. dahuricus* germplasms under saline-alkali stress

变量 Variable	主成分因子 Principal component factor						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
特征值 Eigen value	2.1175	0.8556	0.773 80	0.728 58	0.644 44	0.433 54	0.226 48
贡献率 Contribution/%	0.6405	0.1046	0.085 54	0.075 83	0.059 33	0.026 85	0.007 33
累计贡献率 Cumulative contribution/%	0.6405	0.7451	0.830 66	0.906 49	0.965 82	0.992 67	1.000 00

Decrease in Node Purity, 简称为 IncNodePurity)。结果表明,披碱草种质萌发及生长指标的 IncMSE 值由大到小排名为发芽势(20.09) > 发芽指数(19.39) > 发芽率(16.16) > 株高(15.89) > 地上生物量(12.71) > 分蘖数(6.65) > 茎粗(5.24), Inc-

NodePurity 排名为发芽指数(117.82) > 发芽势(113.02) > 发芽率(98.39) > 株高(70.95) > 地上生物量(40.89) > 茎粗(11.57) > 分蘖数(7.11)。由 IncMSE 和 IncNodePurity 计算指标重要值,发芽指数、发芽势、发芽率、株高、地上生物量、茎粗和分蘖

数的重要值权重依次为 24.68%, 23.95%, 20.61%, 15.62%, 9.64%, 3.02% 和 2.48% (图 5)。

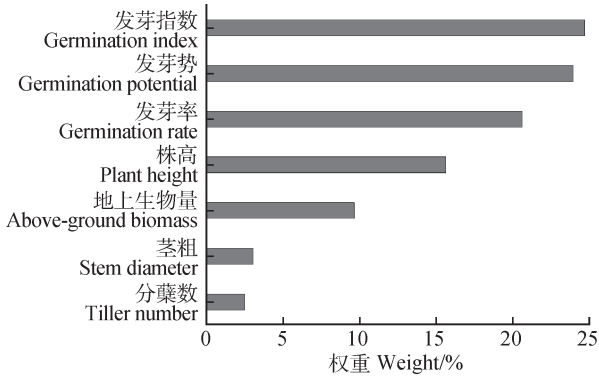


图 5 盐碱胁迫下 10 份披碱草种质测定指标的权重分析

Fig. 5 Weight analysis of determination indexes of 10 *E.*

dahuricus germplasms under saline-alkali stress

2.7 苗期耐盐碱性综合评价

对 10 份披碱草种质耐盐碱性进行综合评价。结果表明,不同材料对盐碱胁迫的响应存在显著差异。本研究利用主成分分析与随机森林模型确定权重系数,通过隶属函数加权计算获得综合评价 D 值(表 5)。该数值与种质耐盐碱性呈正相关,D 值越高,表明种质受盐碱胁迫影响越小。在 100 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫条件下,种质综合评价 D 值排序为 E5>E1>E2>E9>E10>E3>E4>E7>E8>E6。其中 E5 的 D 值最高(D=77.03),耐盐碱性最强,而 E6 的 D 值(D=9.21)最低,耐受能力最弱。当胁迫浓度为 150 mmol·L⁻¹ 时,D 值排序为 E5>

E2>E9>E1>E4>E10>E7>E8>E3>E6。按照 100 mmol·L⁻¹ 和 150 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫下的 D 值计算均值,其排名为 E5>E2>E9>E1>E10>E4>E3>E7>E8>E6,其中 E5 和 E6 的综合评价排名未变。这一现象表明 E5 具有稳定的耐盐碱特性,其 D 值在两种浓度下均显著高于其他种质,而 E6 的耐盐碱能力在不同胁迫浓度下均处于最低。

2.8 聚类分析

依据不同浓度下的综合评价值对 10 份野生披碱草进行聚类分析,结果显示,在欧氏距离为 0.25 时,可将种质按盐碱性强弱分为 5 类(I, II, III, IV, V)。第 I 级为强耐盐碱型,由 E5 组成;第 II 级为耐盐碱型,由 E1, E2 和 E9 组成;第 III 级为中耐盐碱型,由 E3, E10 和 E4 组成;第 IV 级为弱耐盐碱型,由 E7 和 E8 组成;第 V 级为不耐盐碱型,由 E6 组成(图 6)。通过欧氏距离聚类量化了 10 份种质耐盐碱特性的差异,结果与综合评价体系高度一致。E5 和 E6 分别作为抗性与敏感的极端类型。

3 讨论

植物的耐盐碱性受多方面因素的影响,作为植物生长发育和盐碱胁迫的起点,种子萌发是植物耐盐碱性鉴定及耐盐碱种质早期筛选的基础^[25, 26]。徐婷等^[27],发芽势、发芽率和发芽指数等指标可作为植物萌发期耐盐碱性筛选的重要指标。王尧薇等^[28]表明

表 5 不同盐碱胁迫下 10 份披碱草种质苗期耐盐碱性综合评价

Table5 Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance of 10 *E. dahuricus* germplasms at seedling stage under different saline-alkali stresses

材料编号 Material Number	隶属函数值 Subordinate function values														综合评价值 Integrated assessment value		排名 Rank		均值 Average	综合排名 Integrated rank
	相对发芽率 Relative germination rate		相对发芽势 Relative germination potential		相对发芽指数 Relative germination index		相对株高 Relative plant height		相对茎粗 Relative stem size		相对分蘖数 Relative tillering number		相对地上生物量 Relative above-ground biomass		100	150	100	150	0.85	1
	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150						
	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹	mol·L ⁻¹						
E5	0.97	0.17	0.42	0.16	0.83	0.20	0.79	0.15	0.93	0.05	0.70	0.06	1.00	0.13	0.78	0.92	1	1	0.85	1
E2	0.95	0.15	0.35	0.21	0.77	0.17	0.88	0.12	1.00	0.03	0.14	0.03	0.76	0.06	0.70	0.77	3	2	0.73	2
E9	0.76	0.11	0.62	0.00	0.59	0.20	1.00	0.17	0.80	0.05	0.96	0.07	0.18	0.05	0.68	0.64	4	3	0.66	3
E1	0.71	0.09	0.50	0.00	1.00	0.12	0.96	0.12	0.70	0.05	0.31	0.04	0.63	0.09	0.73	0.50	2	4	0.61	4
E10	0.63	0.03	1.00	0.00	0.40	0.06	0.48	0.13	0.67	0.05	0.87	0.07	0.27	0.07	0.61	0.40	5	6	0.50	5
E4	0.98	0.08	0.19	0.00	0.70	0.10	0.13	0.12	0.68	0.02	0.40	0.05	0.37	0.09	0.48	0.46	7	5	0.47	6
E3	0.89	0.01	0.00	0.00	0.43	0.01	0.89	0.16	0.81	0.05	1.00	0.05	0.35	0.06	0.54	0.35	6	9	0.44	7
E7	1.00	0.04	0.00	0.00	0.38	0.03	0.24	0.13	0.46	0.05	0.00	0.04	0.31	0.07	0.35	0.35	8	8	0.35	8
E8	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.13	0.43	0.05	0.62	0.06	0.86	0.09	0.18	0.37	9	7	0.28	9
E6	0.26	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	10	10	0.05	10

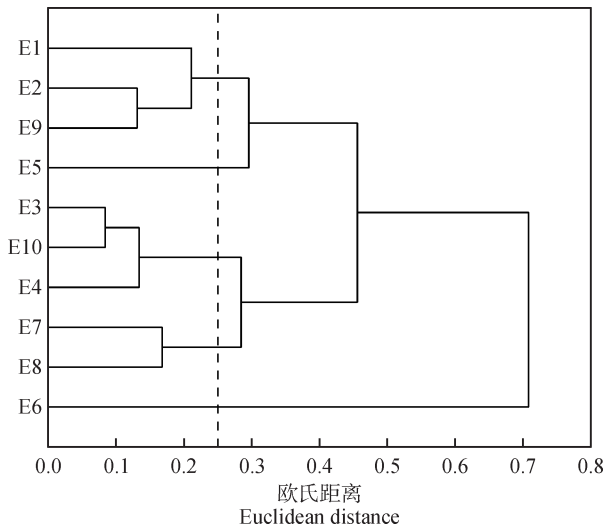


图6 10份披碱草种质的耐盐碱性聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of saline-alkali tolerance of 10

E. dahuricus germplasms

盐碱胁迫显著抑制异株荨麻种子的萌发,申吴燕等^[29]研究12种植物萌发期耐盐性发现所有种子受到盐胁迫后各个生长指标与胁迫浓度呈反比。本研究发现,盐碱胁迫下披碱草的萌发受到显著抑制,发芽势、发芽率和发芽指数随胁迫浓度的增加而呈下降趋势,与前人研究结果相一致,可能是盐碱胁迫对植物产生了渗透胁迫、离子毒害等危害^[30]。极高的变异系数表明发芽势可作为筛选抗逆种质的关键指标。

盐碱胁迫显著影响披碱草的生长发育,株高、茎粗、分蘖数及地上生物量4个指标在100 mol·L⁻¹和150 mol·L⁻¹盐碱胁迫下均表现出不同程度的降低,这与赵洲等^[31-33]结果相似。可能是盐碱胁迫下植物光合同化能力降低、碳同化量减少致使其生长遭受抑制^[34]。刘永惠等^[35]15份花生品种进行萌发期抗旱性鉴定,结果发现低浓度胁迫会促进植物生长,本研究中E1的茎粗也表现出同样的趋势。不同种质材料受盐碱抑制的程度并不相同,耐盐碱性较强的材料在胁迫环境下可维持较高的生长速度和生物量积累,可能具有更完善的盐碱调节机制^[36]。

植物的耐盐碱性是复杂的综合性状,多指标综合评价比单项指标评价更能准确全面地反映植物耐盐性的强弱^[37]。目前,国内外许多学者通过灰色关联分析法、主成分分析结合隶属函数分析法以及聚类分析多方法结合进行综合评价。Mi等^[38]主成分分析法和隶属函数分析法探究苜蓿耐盐性,发现抗坏血酸过氧化物酶和过氧化氢酶可作评价植物耐盐性的主要指标。金杭霞等^[39]模糊隶属函数法

和聚类分析将96份大豆材料划分为5类,并筛选到30份萌发期耐盐大豆材料。范惠玲等^[37]主成分分析、隶属函数分析法以及聚类分析将399份蚕豆种质材料分成4类:耐盐碱、中耐盐碱、弱耐盐碱和不耐盐碱。李波和于海龙^[40]利用隶属函数评价苜蓿抗盐碱性,结果显示‘WL343HQ’和‘WL903HQ’最强。结合前人研究,本试验采用主成分分析、随机森林模型和隶属函数分析法对披碱草耐盐碱性进行综合评价。结果表明,10份野生披碱草种质在100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹下耐盐碱性强弱排名大致相同,仅有E3有所偏差。两个浓度下对耐盐碱性评价的结果稍有差异,但基本吻合。极耐盐碱与不耐盐碱的两份极端种质排名一致,与李晶晶等^[41]在100 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹下对花生耐盐碱的研究结果相同。结合100 mmol·L⁻¹与150 mmol·L⁻¹下的综合评价进行聚类分析,分类结果与100 mmol·L⁻¹的排名较为接近。因此,100 mmol·L⁻¹可作为披碱草盐碱评价体系的最佳浓度。本研究发现,E5的耐盐碱性最强,可为后续披碱草耐盐碱性遗传研究、耐盐碱基因挖掘提供材料支持和理论依据。

本研究发现,不同野生披碱草种质在盐碱胁迫下表现出显著的生长差异,表明其在抗逆机制上存在较大的遗传多样性。耐盐碱性较强的种质在150 mmol·L⁻¹胁迫下仍保持较高的萌发率和生物量,可能具备较强的渗透调节与氧化胁迫缓解机制。李景欣等^[42]曾指出,牧草对盐胁迫的响应差异明显,随着盐浓度升高,游离脯氨酸和丙二醛含量上升,其中披碱草表现出最强的耐盐性,表明野生披碱草在抗逆育种中的应用潜力。通过与国内外禾本科植物及披碱草相关研究的对比,本研究为盐碱胁迫下披碱草的耐性筛选提供了新的浓度体系,填补了复合盐碱胁迫的研究空白。尽管近年来披碱草的耐盐碱性研究有所进展,但其研究深度仍待提升。未来的研究应聚焦于耐盐碱调控机制,尤其是差异表达基因筛选或转录组分析,以期耐盐植物种质的挖掘与利用提供理论依据。

4 结论

10份披碱草种质的萌发及生长受盐碱胁迫的抑制,其耐盐碱性在不同胁迫浓度下存在显著差异;100 mmol·L⁻¹是披碱草盐碱评价体系的最

佳浓度, $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫严重抑制种子萌发和幼苗生长。通过综合评价 D 值和聚类分析综合评价将 10 份披碱草种质分为耐盐碱性不同的 5 个类别: 强耐盐碱(E5)、耐盐碱(E1、E2 和 E9)、中耐盐碱(E3、E4 和 E10)、弱耐盐碱(E7 和 E8)、不耐盐碱(E6); 10 份披碱草种质的耐盐碱性综合排名为 $E5 > E2 > E9 > E1 > E10 > E4 > E3 > E7 > E8 > E6$, 其中 E5 的耐盐碱性最强, E6 耐盐碱性最弱。

参考文献

- [1] 周宝元. PEPC 对水稻抗旱性的调节效果及其机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 36-40
ZHOU B Y. Effect of PEPC on rice drought resistance [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011: 36-40
- [2] 史小玲, 薛立, 任向荣, 等. 华南地区 4 种阔叶幼苗水分胁迫条件下的抗旱性初探[J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 760-767
SHIXL, XUEL, REN X R, et al. Preliminary study on drought resistance of four broadleaved seedlings under water stress in South China[J]. Forest Research, 2011, 24(6): 760-767
- [3] 曾怡, 袁嘉苗, 杨静, 等. 23 份紫花苜蓿材料萌发期的耐盐性综合评价[J]. 草地学报, 2025, 33(7): 2249-2261
CENGY, YUANJ M, YANGJ, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 23 alfalfa materials during seeds germination stage[J]. ActaAgrestia Sinica, 2025, 33(7): 2249-2261
- [4] 皮冬鸽, 李海燕, 杨允菲, 等. 不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子萌发的影响[J]. 草地学报: 1-11(2025-07-08). <https://link.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CDXU2025070300&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
PI DG, LI H Y, YANG YF, et al. The Effects of Saline-alkali Stress on Seed Germination of *Artemisia sieversiana* and *A. lavandulifolia* under Different Temperatures [J]. ActaAgrestia Sinica: 1-11 (2025-07-08). <https://link.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CDXU2025070300&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [5] SHEN QF, YU J H, FU LB, et al. Iomic, metabolomic and proteomic analyses reveal molecular mechanisms of root adaptation to salt stress in Tibetan wild barley[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 123: 319-330
- [6] BUTCHERK, WICK AF, DESUTTERT, et al. Soil salinity: athreat to global food security[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(6): 2189-2200
- [7] BARTELS D, SUNKAR R. Drought and salt tolerance in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2005, 24(1): 23-58
- [8] FANG S, HOU X, LIANG X L. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 667458
- [9] HASEGAWA PM. Sodium (Na^+) homeostasis and salt tolerance of plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 19-31
- [10] EL-SAWI MA, AL-GHAMDI AA, ALI HM, et al. Azospirillumlipoferum FK1 confers improved salt tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) by modulating osmolytes, antioxidant machinery and stress-related genes expression[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 159: 55-65
- [11] 韩岱, 时晓磊, 丁孙磊, 等. 60 份大豆种质资源苗期耐盐性鉴定评价[J]. 大豆科学, 2023, 42(4): 494-505
HAND, SHI X L, DING SL, et al. Evaluation of salt tolerance in 60 soybean germplasm resources at seedling stage[J]. Soybean Science, 2023, 42(4): 494-505
- [12] 姜泽宇, 齐国超, 车野, 等. 盐碱胁迫对不同类型工业大麻品种生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2025(2): 22-29
JIANG Z Y, QI G C, CHE Y, et al. Effects of salt alkali stress treatment on growth of different types of industrial hemp varieties[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2025(2): 22-29
- [13] 柴龙行, 白金顺, 贺维昭, 等. 华北平原内陆盐碱区玉米品种资源耐盐性综合评价及分类[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(10): 147-156
CHAI L X, BAI J S, HE W Z, et al. Comprehensive evaluation and classification of maize salt tolerance during germination in the inland saline-alkali region of the North China plain[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(10): 147-156
- [14] 马林, 任崑, 陈小梅, 等. 不同品系小麦的耐盐性研究[J]. 新疆农业大学学报, 2014, 37(2): 123-126
MA L, REN W, CHEN X M, et al. Studies on wheat resistance to salt of different strains[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2014, 37(2): 123-126
- [15] 律兆松, 王汝楠. 不同生物措施改良苏打盐土效果的模糊综合评价初探[J]. 土壤通报, 1989, 20(5): 200-204
LU Z S, WANG R Y. Preliminary study on fuzzy comprehensive evaluation of improving soda saline soil by different biological measures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1989, 20(5): 200-204
- [16] 郑译儒, 赵俊超, 龚束芳, 等. NaHCO_3 和 Na_2CO_3 胁迫对碱茅和披碱草种子萌发、幼苗生长和生理指标的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(2): 228-239
ZHENG Y R, ZHAO J C, GONG S F, et al. Effects of NaHCO_3 and Na_2CO_3 stress on seed germination, seedling growth, and physiological indexes of *Puccinellia chinampoensis* and *Elymus dahuricus* [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(2): 228-239
- [17] 信龙飞, 谷彩花, 张艳玲, 等. 盐胁迫对桔梗种子萌发和幼苗光合特性的影响[J]. 种子, 2022, 41(9): 40-46
XIN L F, GU C H, ZHANG Y L, et al. Effects of salt stress on seed germination and photosynthetic characteristic of *Platycodon grandiflorum* seedlings[J]. Seed, 2022, 41(9): 40-46
- [18] 杨紫贻, 唐芳, 王亚文, 等. 30 份苜蓿种质萌发期耐盐性评价[J]. 草原与草业, 2021, 33(2): 6-14

- YANG ZY, TANG F, WANG YW, et al. Evaluation of 30 alfalfa germplasms during the germination period[J]. Grassland and Prataculture, 2021, 33(2): 6-14
- [19] YAN G, SHI Y, CHEN F, et al. Physiological and metabolic responses of *Leymus chinensis* seedlings to alkali stress [J]. Plants, 2022, 11(11): 1494
- [20] GUO H, HUANG Z, LI M, et al. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21844
- [21] GONG B, WANG X, WEI M, et al. Overexpression of S-adenosylmethionine synthetase 1 enhances tomato callus tolerance to alkali stress through polyamine and hydrogen peroxide cross-linked networks[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2016, 124(2): 377-391
- [22] 金明, 刘旭升, 逢洪波, 等. 水稻芽期耐寒性综合评价及耐寒指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 25-35
- JIN M, LIU X S, PANG H B, et al. Comprehensive evaluation of cold tolerance and selection of cold tolerant evaluation indicators of rice at the germination stage[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(7): 25-35
- [23] 顾晓. 水稻耐盐性评价指标体系及耐盐性综合评价[D]. 海口: 海南大学, 2019
- GU X. Evaluation index system of salt tolerance of rice and comprehensive evaluation of salt tolerance[D]. Haikou: Hainan University, 2019
- [24] 柴凤久, 刘泽东, 尤海洋, 等. 松嫩盐碱草原禾本科牧草引种试验[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011(5): 91-93
- CHAI F J, LIU Z D, YOU H Y, et al. Introduction experiment of gramineous forage grass in Songnen saline-alkali grassland [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2011(5): 91-93
- [25] 汪茜, 李继婷, 王维中, 等. 不同盐分胁迫对四种牧草种子萌发的影响[J]. 甘肃畜牧兽医, 2023, 53(3): 142-148
- WANG Q, LI J T, WANG W Z, et al. Effects of different salt stress on seed germination of four forages[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary, 2023, 53(3): 142-148
- [26] 朱晓旭, 高玉刚. 混合盐碱胁迫对板蓝根种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 147-150
- ZHU X X, GAO Y G. Effects of mixed saline-alkali stress on seed germination of *Isatis digotica* seeds[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(6): 147-150
- [27] 徐婷, 柳延涛, 王海江, 等. 盐碱胁迫对花生种子发芽特性影响及盐害综合鉴定评价[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(5): 1037-1047
- XU T, LIU Y T, WANG H J, et al. Effects of saline-alkali stress on germination characteristics of peanut seeds and comprehensive identification and evaluation of salt damage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(5): 1037-1047
- [28] 王尧薇, 武俊喜, 汪艳, 等. 盐碱胁迫对异株荨麻种子萌发的影响[EB/OL]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?Filename=ZWZZ20241021004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>, 2024-10-23/2025-08-17
- WANG Y W, WU J X, WANG Y, et al. Effects of saline-alkali stress on seed germination of *Urtica dioica* L. [EB/OL]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?Filename=ZWZZ20241021004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>, 2024-10-23/2025-08-17
- [29] 申吴燕, 吐尔逊娜依·热依木, 雪热提江·麦提努日, 等. 12种植物萌发期耐盐性筛选[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(10): 1912-1920
- SHEN W Y, TUERXUNNAYI R, XUEREYIJIAN M, et al. Selection of salt tolerance of 12 forage species in Xinjiang during germination period[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(10): 1912-1920
- [30] 毛恋, 芦建国, 江海燕. 植物响应盐碱胁迫的机制[J]. 分子植物育种, 2020, 18(10): 3441-3448
- MAOL, LU J G, JIANG H Y. Mechanisms of plant responses to salt-alkali stress [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(10): 3441-3448
- [31] 赵洲, 张丽, 高新磊, 等. 复合盐碱胁迫对燕麦生长及代谢的影响[EB/OL]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?Filename=ZWZZ20250327005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>, 2025-03-28/2025-08-17
- ZHAO Z, ZHANG L, GAO X L, et al. Effects of saline-alkali stress on growth and metabolism of oat [EB/OL]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?Filename=ZWZZ20250327005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>, 2025-03-28/2025-08-17
- [32] HU H R, LIU H, DU G H, et al. Fiber and seed type of hemp (*Cannabis sativa* L.) responded differently to salt-alkali stress in seedling growth and physiological indices [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 129: 624-630
- [33] 丁绪, 马悦, 韩金鹏, 等. 不同大豆品种在三种非生物胁迫下的抗性鉴定[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(4): 1002-1017
- DING X, MA Y, HAN J P, et al. Identification of resistance of different soybean varieties under three abiotic stresses[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(4): 1002-1017
- [34] 岳小红, 曹靖, 耿杰, 等. 盐分胁迫对啤酒大麦幼苗生长、离子平衡和根际 pH 变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7373-7380
- YUE X H, CAO J, GENG J, et al. Effects of different types of salt stress on growth, ion balance and rhizosphere pH changes in beer barley seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7373-7380
- [35] 刘永惠, 詹成芳, 沈一, 等. 不同花生品种(系)萌发期抗旱性鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(2): 233-238
- LIU Y H, ZHAN C F, SHEN Y, et al. Identification of drought tolerance in peanut varieties/lines at the germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(2): 233-238
- [36] 周振玲, 林兵, 周群, 等. 耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应及其生理机制[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(2): 153-165
- ZHOU Z L, LIN B, ZHOU Q, et al. Responses of rice varieties

- differing in salt tolerance to salt stress and their physiological mechanisms[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(2): 153-165
- [37] 范惠玲,路妍,金文海,等. 基于根系表型性状的蚕豆耐盐碱性鉴定与综合评价[J]. *植物学报*, 2025, 60(2): 204-217
FAN H L, LU Y, JIN W H, et al. Identification and comprehensive evaluation of fababean salt-alkali tolerance based on root phenotypic traits [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2025, 60 (2) : 204-217
- [38] MI J, REN X Y, SHI J, et al. An insight into the different responses to salt stress in growth characteristics of two legume species during seedling growth[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 14:1342219
- [39] 金杭霞,郭丹丹,杨清华,等. 利用模糊隶属函数法综合评价大豆萌发期耐盐性[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(24): 8265-8271
JIN H X, GUO D D, YANG Q H, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance in soybean germination period by fuzzy subordinate function method [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(24): 8265-8271
- [40] 李波,于海龙. 苏打盐碱胁迫下不同来源苜蓿品种抗盐性综合评价[J]. *草地学报*, 2017, 25(1): 204-208
LI B, YU H L. Comprehensive evaluation on salt tolerance of different alfalfa varieties under soda salt and alkali stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(1): 204-208
- [41] 李晶晶,王金秀,曹议丹,等. 高油酸花生萌发期和苗期耐盐碱性鉴定及评价[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(15): 44-52
LI J J, WANG J X, CAO Y D, et al. Peanut with high oleic acid content: identification and evaluation of salt-alkaline tolerance during germination and seedling stage [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(15): 44-52
- [42] 李景欣,杨帆,赵娜,等. 4种披碱草属牧草苗期耐盐性评价[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2013(9): 77-79
LI J X, YANG F, ZHAO N, et al. Evaluation of salt resistance for four kinds of *Elymus* forage grasses in seedling period [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2013 (9): 77-79

(责任编辑 彭露茜)