

DOI:10.11686/cyxb2025064

http://cyxb.magtech.com.cn

祁浩乐, 王思宁, 李晓霞, 等. 野牛草种质耐盐性综合评价及评价模型的初步构建. 草业学报, 2026, 35(1): 119—129.

QI Hao-le, WANG Si-ning, LI Xiao-xia, *et al.* Multivariate evaluation of the salt tolerance of *Buchloe dactyloides* germplasm lines and construction of a preliminary evaluation model. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 119—129.

野牛草种质耐盐性综合评价及评价模型的初步构建

祁浩乐¹, 王思宁², 李晓霞², 石凤翎^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 草地资源教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 国家林业和草原局草原研究中心, 北京 100091)

摘要:本研究采用土培法,以来自美国得克萨斯州、内布拉斯加州等地的 15 份野牛草种质为材料,在 600 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液胁迫条件下进行培养,测定并综合分析了株高、茎粗等表型特征,叶片相对含水量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量等生理生化指标,葡萄糖、蔗糖、淀粉含量等渗透调节物质及 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、总淀粉酶活性等与碳水化合物代谢相关的酶活性,共计 13 项指标。研究结果显示,不同种质材料间耐盐性差异显著($P < 0.05$),采用主成分分析与隶属函数法相结合的方法构建了一种适用于野牛草耐盐性评估的综合评价体系。其中 Bd324 和 Bd769 综合指数表现较优,其隶属函数均值分别达到 0.85 和 0.75。野牛草耐盐性评价回归方程为 $D = 0.351 + 0.266X_1 - 0.211X_2 - 0.191X_3 + 0.121X_4 + 0.144X_5 + 0.093X_6$ 。本研究筛选出的优良种质为后续耐盐育种工作提供了重要材料,同时为盐渍化土地生态修复实践提供了理论依据和种质资源储备。

关键词:野牛草;耐盐性;生理指标;主成分分析;回归方程

Multivariate evaluation of the salt tolerance of *Buchloe dactyloides* germplasm lines and construction of a preliminary evaluation model

QI Hao-le¹, WANG Si-ning², LI Xiao-xia², SHI Feng-ling^{1*}

1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources Ministry of Education P. R. of China, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Grassland Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: In this study, we evaluated the salt tolerance of 15 germplasm lines of buffalo grass (*Buchloe dactyloides*) using a soil culture method. These materials were obtained from places such as Texas and Nebraska in the USA. The germplasm lines were cultivated under saline stress, which was imposed by irrigation with 600 mmol·L⁻¹ NaCl solution. A total of 13 traits were measured and the data submitted to principal component and membership function analyses. The 13 traits were: phenotypic characteristics (plant height and stem diameter) and physiological and biochemical indexes [relative water content of leaves, peroxidase (POD) activity, superoxide dismutase activity, contents of malondialdehyde (MDA), proline, and osmotic adjustment substances, i. e., glucose, sucrose, and starch, and activities of enzymes related to carbohydrate metabolism, i. e., α -amylase, β -amylase, and total amylase]. On univariate analysis of the traits separately, we detected significant differences in salt tolerance among

收稿日期:2025-03-04;改回日期:2025-04-07

基金项目:内蒙古农业大学一流学科科研专项(YLXKZX-NND-003),中国林业科学研究院基础研究基金项目(CAFYBB2022XA002)和国家林业和草原局“优良牧草品种选育”(202201)优秀生选拔公开竞赛项目资助。

作者简介:祁浩乐(1999—),女,内蒙古呼和浩特人,在读硕士。E-mail: m19969045212@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: shifengling@imau.edu.cn

the germplasm lines ($P < 0.05$). Principal component analysis found four principal components (PCs) with eigenvalues greater than 1. PC1 (eigenvalue 3.835) was interpreted as reflecting growth and tolerance under salt stress; PC2 (eigenvalue 2.623) reflected starch metabolism under salt stress; PC3 (eigenvalue 1.814) reflected osmotic regulation capacity under salt stress; PC4 (eigenvalue 1.452) reflected carbohydrate metabolism and energy supply under salt stress. Using a combination of principal component analysis and the membership function method, we constructed a multivariate evaluation system for the assessment of the salt tolerance of *B. dactyloides*. Among the tested materials, Bd324 and Bd769 showed higher multivariate scores, and their average membership function (D) values were 0.85 and 0.75, respectively. Using stepwise regression to predict the D value from the original 13 variables, we obtained the following regression equation for evaluating the salt tolerance of *B. dactyloides*: $D = 0.351 + 0.266X_1 - 0.211X_2 - 0.191X_3 + 0.121X_4 + 0.144X_5 + 0.093X_6$, where X_1 to X_6 correspond to MDA, starch content, POD, total amylase activity, stem thickness, and relative water content of leaves, respectively. The germplasm identified in this study as having superior salt tolerance traits will be useful for breeding new salt-tolerant varieties of *B. dactyloides*. Our findings and collected germplasm also provide a theoretical basis and useful materials for the ecological restoration of saline-alkali land.

Key words: *Buchloe dactyloides*; salt tolerance; physiological indexes; principal component analysis; regression equation

土壤盐渍化作为全球性的环境问题,不仅导致土壤板结、肥力降低,还会严重抑制植物的生长发育,甚至造成植物死亡。近年来,受自然灾害频发和人类不合理利用的双重影响,土壤盐渍化问题日益加剧,对环境的可持续性发展构成严重威胁^[1]。根据2024年联合国粮食及农业组织发布的《50年来首份盐渍土壤全球评估关键报告》^[2]显示,全球盐渍土壤面积达13.81亿 hm^2 ,占全球土地总面积的10.7%,且这一数字仍在持续增长。因此,综合治理盐渍化土地、恢复植被覆盖,对实现“绿水青山就是金山银山”的生态文明建设目标具有重大战略意义。

选育耐盐植物已成为治理盐渍化土地的重要生物措施之一。考虑到种植成本和管理投入等因素,研究者们正致力于选育和推广耐盐型草坪草品种^[3]。野牛草(*Buchloe dactyloides*)又名牛毛草、水牛草,是禾本科(Gramineae)画眉草亚科(Eragrostoideae)野牛草属(*Buchloe*)多年生草本植物,原产于北美洲中部的半干旱温带和亚热带地区^[4]。相较于大多数草坪草而言,野牛草具有耐贫瘠、抗寒抗旱、耐盐碱、养护费用极低等特点,在干旱和盐碱地区的绿化和生态修复中具有广泛应用,是改良盐碱土壤的重要生态草种之一,极具发展潜质^[5]。近年来,对野牛草的研究主要集中在种子萌发^[6]、遗传多样性^[7]、植株倍性^[8]、逆境胁迫^[9-11],以及克隆分株等方面^[12]。但存在以下关键科学问题亟待解决:不同种质间耐盐性差异缺乏系统评价;盐胁迫下生理响应指标体系的构建尚不完善;适用于盐碱地推广的优质种质筛选标准缺失。因此,筛选耐盐型野牛草种质并开展盐碱地野牛草种植研究,对有效利用盐渍化土地资源、促进景观绿化、生态修复和畜牧业的发展具有重要意义。

在植物抗性评价领域,主成分分析和隶属函数分析法因其能够较为全面筛选关键耐盐指标并对不同种质间的耐盐性进行综合评价而得到广泛应用。这些方法已成功应用于水稻(*Oryza sativa*)^[13]、高粱(*Sorghum bicolor*)^[14]、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)^[15]和黑麦草(*Lolium perenne*)^[16]等植物。本研究以15份野牛草种质材料为对象,通过 $600\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl模拟盐胁迫处理,测定13个生长表型和生理指标参数,并综合运用主成分分析和隶属函数分析法,对野牛草种质材料进行耐盐性综合评价。研究旨在明确不同种质资源的耐盐性差异,为野牛草的耐盐品种选育和盐碱地改良研究提供理论支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试的15份野牛草种质材料于2024年6月采集自中国林业科学研究院野牛草资源圃河北宣化基地。基地地理位置为 $115^{\circ}00' \text{ E}; 40^{\circ}38' \text{ N}$,平均海拔900 m。所选种质资源来源地差异明显(表1)。所有试验材料在资源

圃内采用统一的标准化栽培管理(常规灌溉、不施用盐分且定期修剪),确保试验前具有一致的生长状态和生理基础。

1.2 试验处理

本研究采用梯度浓度法进行预试验。随机选取 5 份野牛草种质材料(2、5、9、11 和 14 号),分别设置 0、200、400、600 和 800 mmol·L⁻¹ 5 个 NaCl 浓度梯度进行胁迫处理,每个处理设置 3 次重复,采用与正式试验相同的栽培管理方式。结果表明,NaCl 溶液浓度为 600 mmol·L⁻¹ 时,5 份野牛草种质材料的生长受到显著抑制($P < 0.05$),且材料间表现出显著的差异性。因此选择 600 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液作为正式试验的胁迫浓度,对 15 份野牛草材料进行耐盐性评价。

试验在河北省宣化市野牛草基地可控环境大棚内进行[温度:昼(25±1)℃/夜(18±1)℃,空气湿度 70%±5%]。采用盆栽试验法,使用口径 15.5 cm、深度 12 cm 的塑料花盆,每盆定量装填 1.5 kg 混合土壤(营养土和蛭石为 1:1,土质疏松,pH 为 6.5~7.5)。

采用单株种植方式,培育过程中将生长期长出的匍匐茎盘于盆内。经过 30 d 的标准化养护管理后,野牛草进入拔节初期,设置 600 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液处理组,以模拟盐胁迫环境;对照组(CK)使用等量蒸馏水浇灌,保持土壤含水率为最大持水量的 70%。每个处理设置 3 个生物学重复,每天通过称重法补充水分,确保土壤含水量恒定,维持试验环境的一致性。盐胁迫处理 15 d 后,选取相同生长部位进行各生理指标的测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高和茎粗的测定 在每盆植株中随机选取 10 株幼苗,用直尺测定其株高,用游标卡尺在茎基部测量其茎粗,取平均值进行分析。

1.3.2 叶片相对含水量的测定 采用烘干法^[17]进行测定,通过叶片相对含水量(leaf relative water content, RWC)的不同来检测野牛草在盐胁迫下保持水分的能力,相对含水量越高其抗失水能力越强。在植株相同时期相同位置迅速剪取 3 片叶片,利用分析天平(LC-FA1004,上海)称量其鲜重,记为 m_1 ;将叶片放到离心管中用自来水浸泡 24 h 后取出并将表面水分擦拭干净,迅速称量其饱和重,记为 m_2 ;将叶片装在牛皮纸袋后放入烘箱,60℃ 烘干 10~15 h,至恒重,称其干重,记为 m_3 。计算公式如下:

$$\text{叶片相对含水量} = \frac{m_1 - m_3}{m_2 - m_3} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 生理及碳水化合物代谢相关指标测定 依据《植物生理学实验指导》^[18]标准方法,对各生理生化指标进行测定。具体方法如下:过氧化物酶(peroxidase, POD)活性采用愈创木酚比色法测定;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性通过氮蓝四唑(nitro blue tetrazolium, NBT)光化学还原法测定;丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量使用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)显色法测定;脯氨酸(proline, Pro)含量采用磺基水杨酸(sulfosalicylic acid, SSA)提取法测定;可溶性糖组分中,葡萄糖(glucose, Glc)和蔗糖(sucrose, Suc)含量采用蒽酮-硫酸(anthrone-sulfuric acid, A-S)比色法测定,淀粉(starch, St)含量则通过酸水解法测定;淀粉酶活性指标中, α -淀粉酶(α -amylase, α -AA)、 β -淀粉酶(β -amylase, β -AL)和总淀粉酶(total amylase, TAA)活性均采用 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)显色法测定。

表 1 野牛草种质资源编号及其地理来源

Table 1 Germplasm resource numbers and geographical origins of *B. dactyloides*

编号 Number	品种 Variety	来源地 Place of origin
1	Bd770	中国北京市 Beijing, China
2	Bd769	中国北京市 Beijing, China
3	Bd380	美国希伯伦市 Hebron, USA
4	Bd415	美国麦克弗森市 McPherson, USA
5	Bd324	美国皮埃尔堡市 Fort Pierre, USA
6	Bd581	美国斯特拉特福市 Stratford, USA
7	Bd631	美国达尔哈特市 Dalhart, USA
8	Bd500	美国普拉特市 Pratt, USA
9	Bd628	美国达尔哈特市 Dalhart, USA
10	Bd358	美国布鲁宁市 Bruning, USA
11	Bd540	美国沙特克市 Shattuck, USA
12	Bd096	美国贝尔菲尔德市 Belfield, USA
13	Bd678	美国达尔哈特市 Dalhart, USA
14	Bd261	美国基斯通市 Keystone, USA
15	Bd436	美国哈钦森市 Hutchinson, USA

1.4 数据分析

为明确不同野牛草品种的耐盐性差异,本研究采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)对盐胁迫下15份野牛草种质材料的13项指标相对值进行降维分析,旋转方式选择最大方差法。基于主成分分析结果,采用隶属函数法对野牛草耐盐性进行综合评价,对15份野牛草材料耐盐性进行排名,值越高表明其耐盐性越强。数据处理和分析均通过Microsoft Excel和SPSS 27.0完成,图表绘制使用Microsoft Excel。具体公式如下:

$$\text{性状相对值} = X_j/X_c \quad (2)$$

$$\text{指标降低百分率} = (X_c - X_s)/X_c \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_s 表示盐处理下某指标测定值的平均值, X_c 表示盐处理下某指标对照值的平均值。

隶属函数计算公式:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (4)$$

式中: U 表示隶属函数值, X_{ij} 表示第*i*个种质的第*j*个主成分值, $X_{j\max}$ 表示第*j*个主成分的最大值, $X_{j\min}$ 表示第*j*个主成分的最小值。

主成分权重计算公式:

$$\omega_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:权重 ω_j 表示第*j*个主成分的重要程度, p_j 表示第*j*个主成分的贡献率。

耐盐综合评价*D*值计算公式:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times \omega_j], j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中:*D*值表示第*i*个野牛草材料在盐胁迫条件下的耐盐性综合评价值^[19]。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对野牛草生长表型的影响

采用600 mmol·L⁻¹ NaCl处理15 d后,参试的15份野牛草的株高均极显著低于对照组($P < 0.01$,图1A),其中1和2号材料的株高降低幅度较小,分别下降了4.79%、6.27%;相比之下,14号材料下降幅度最大,达27.09%。茎粗变化(图1B)同样存在较大差异,下降幅度为4.65%~27.89%。其中,12号材料的茎粗下降最为显著($P < 0.05$),降幅达27.89%。

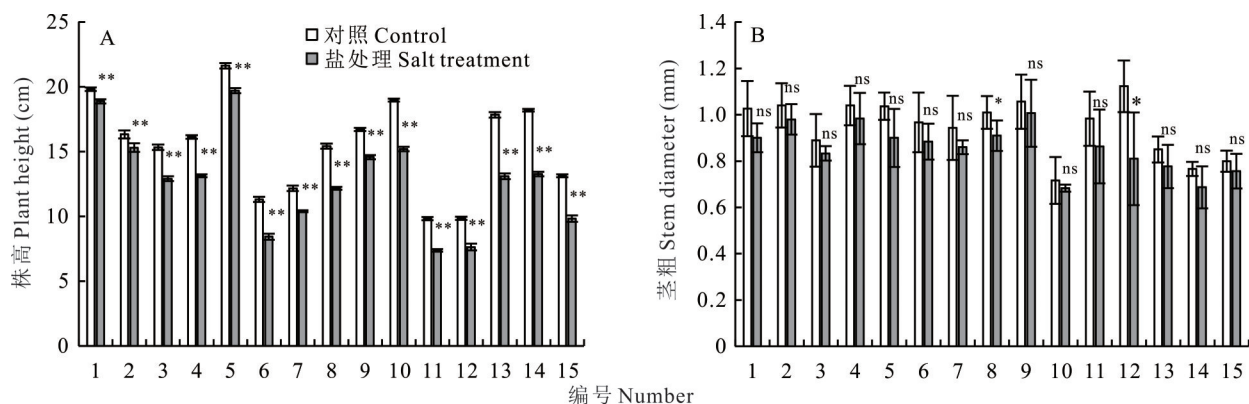


图1 盐胁迫下不同野牛草种质幼苗的株高和茎粗变化

Fig. 1 Changes in plant height and stem diameter of seedlings of different *B. dactyloides* germplasm lines under salt stress

ns: $P > 0.05$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. 下同 The same below.

2.2 盐胁迫对野牛草抗氧化能力的影响

盐胁迫显著影响了野牛草幼苗的生理生化指标。叶片相对含水量(RWC)下降2.25%~14.40%(图2A),其中5号材料下降幅度最小(2.25%);而6号材料的RWC下降幅度最大(14.40%)。与CK相比,6、8、10、12和14

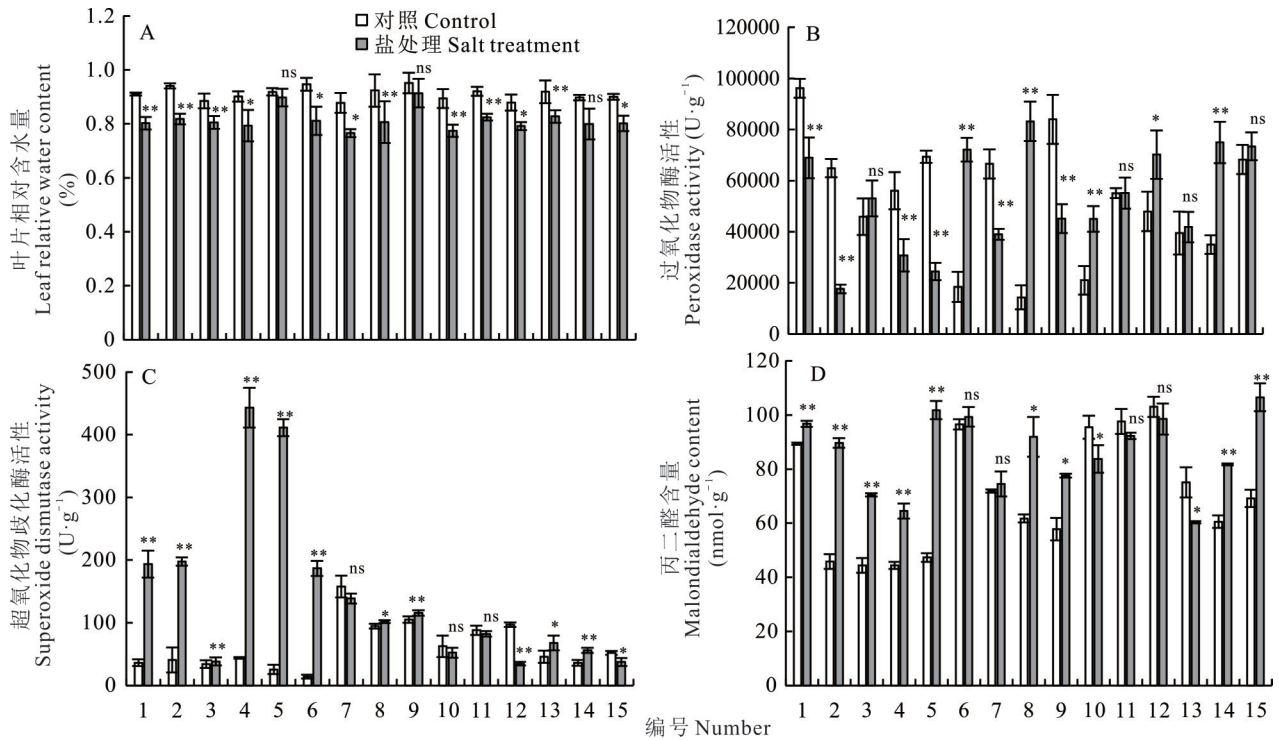


图 2 盐胁迫下野牛草幼苗的叶片相对含水量、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量的变化

Fig. 2 Changes in leaf relative water content, peroxidase activity, superoxide dismutase activity and malondialdehyde content of *B. dactyloides* seedlings under salt stress

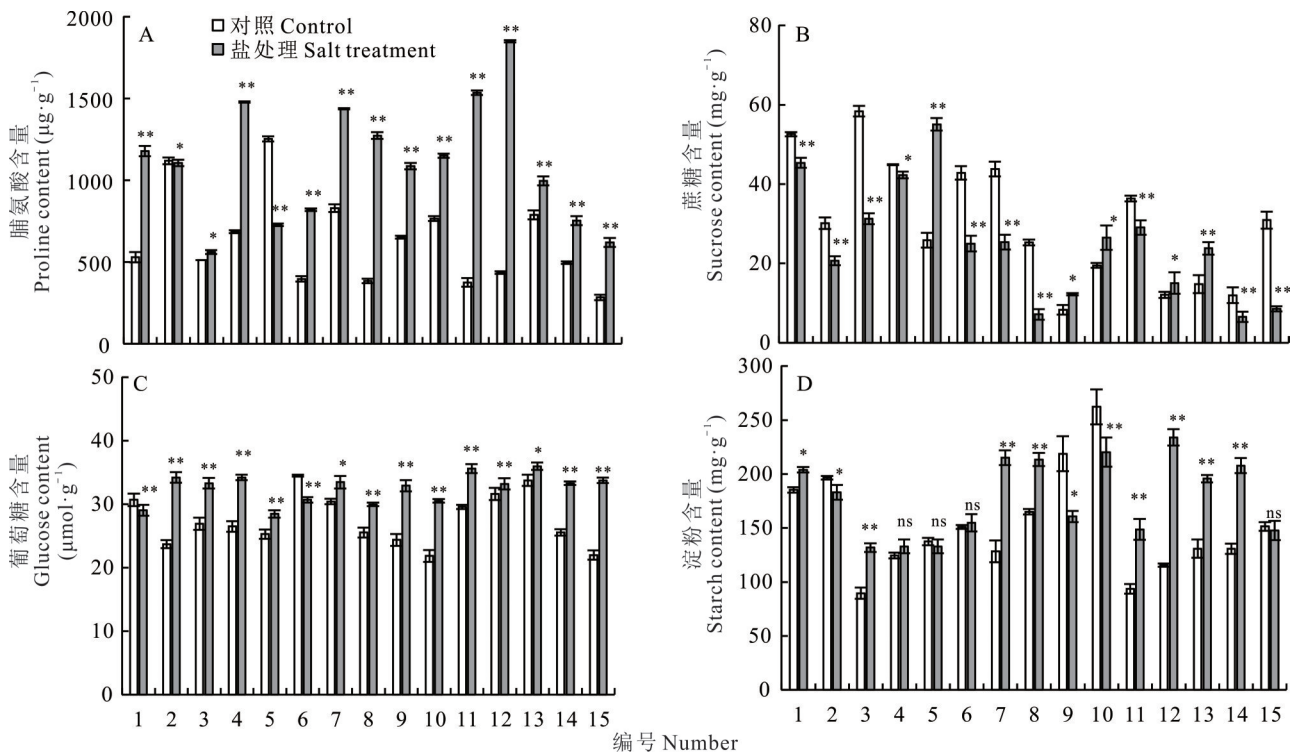


图 3 盐胁迫下野牛草幼苗的脯氨酸、蔗糖、葡萄糖和淀粉含量的变化

Fig. 3 Changes in proline, sucrose, glucose and starch contents of *B. dactyloides* seedlings under salt stress

号材料的 POD 活性显著升高 ($P < 0.05$, 图 2B); 而 1、2、4、5、7 和 9 号材料的 POD 活性显著降低 ($P < 0.05$), 显示出不同的抗氧化策略。1、2、4、5 和 6 号材料的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性较 CK 显著升高 ($P < 0.01$, 图 2C)。丙

二醛(MDA)含量的变化结果表明,2、3、5、8和15号材料较CK显著升高($P < 0.05$,图2D)。

2.3 盐胁迫对野牛草糖类渗透调节指标的影响

脯氨酸(Pro)含量在15份材料中均发生显著变化($P < 0.05$,图3A)。其中,与对照相比,11和12号材料的Pro含量极显著增加($P < 0.01$);而5号材料的Pro含量极显著降低($P < 0.01$)。可溶性糖和淀粉含量对盐胁迫的响应呈材料特异性(图3B~D)。葡萄糖含量方面,除1和6号材料外,其余材料均较CK显著增加($P < 0.05$),其中2和15号材料的增幅较大。蔗糖含量变化出现分化,5、9、10、12和13号材料显著升高,其余材料则呈下降趋势。淀粉含量的变化更为复杂,1、3、7、8、11、12、13和14号材料显著增加,2、9和10号材料显著降低,其余材料变化不显著。

2.4 盐胁迫对野牛草碳水化合物代谢酶的影响

在 $600 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl胁迫处理下,15份野牛草材料的淀粉酶活性呈复杂的变化。与对照相比, α -淀粉酶活性方面,3、10、13和14号材料显著升高,2、4、5、6、8和9号材料显著降低,其余材料变化不显著(图4A)。 β -淀粉酶活性方面,5号材料显著升高,1、7、10、13和14号材料显著降低,其余材料变化不显著(图4B)。总淀粉酶(TAA)活性结果显示,5和11号材料显著升高,1、7和13号材料显著降低,其余材料变化不显著(图4C)。

2.5 野牛草耐盐性指标主成分及隶属函数分析

对在 $600 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl处理下野牛草的13个调查指标进行主成分分析,结果表明:根据特征值大于1的标准,剔除贡献率小的指标,共提取到4个主成分,其累积方差贡献率为74.807%,表明这4个因子能够有效反映野牛草幼苗的耐盐性(表2)。第1主成分特征值为3.835,方差贡献率为29.500%(表2),其中株高、茎粗和MDA含量的因子载荷量较大(大于0.5),该主成分反映的是盐胁迫下野牛草的生长状态与抗氧化能力(表3);第2主成分特征值为2.623,方差贡献率为20.180%(表2),其中总淀粉酶活性和 β -淀粉酶活性的因子载荷量均大于0.7,该主成分反映的是盐胁迫下野牛草的淀粉代谢能力(表3);第3主成分特征值为1.814,方差贡献率为13.955%(表2),其中叶片相对含水量和蔗糖含量的因子载荷量均大于0.7,该主成分反映的是盐胁迫下野牛草的水分管理与渗透调节能力(表3);第4主成分特征值为1.452,方差贡献率为11.172%(表2),其中葡萄糖含量的因子载荷量大于0.8,该主成分反映的是盐胁迫下野牛草的糖类代谢与能量供应能力(表3)。综上,本研究利用主成分分析将野牛草的13个耐盐相关指标转换为4个独立的综合指标,并将其用于进一步的综合评价分析。

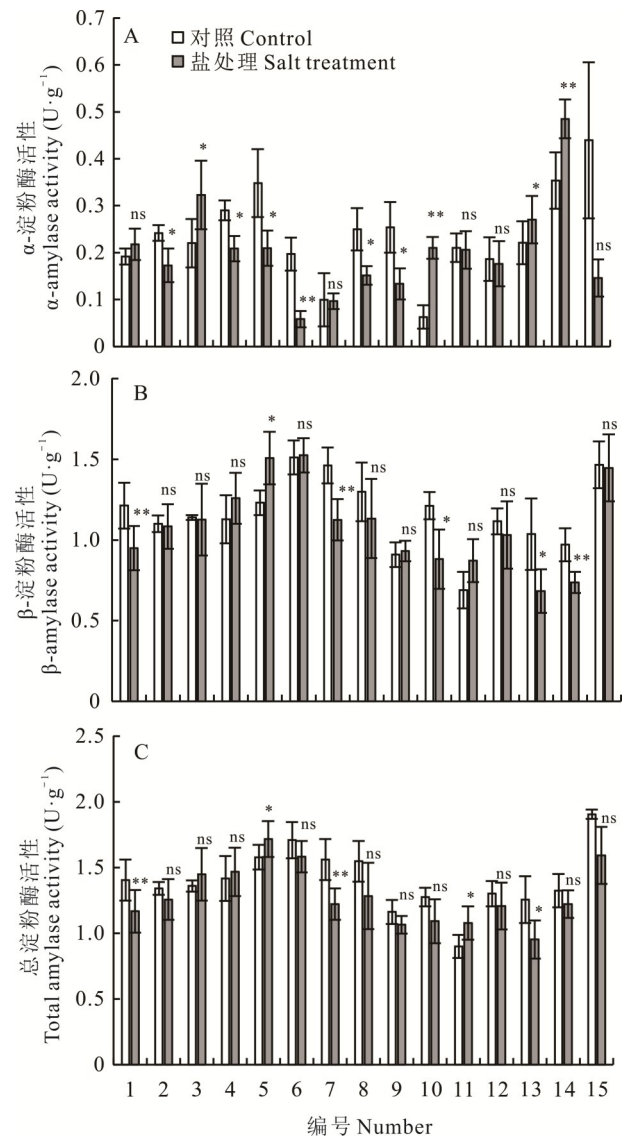


图4 盐胁迫下野牛草幼苗 α -淀粉酶、 β -淀粉酶和总淀粉酶活性的变化

Fig. 4 Changes in α -amylase, β -amylase and total amylase activity of *B. dactyloides* seedlings under salt stress

2.6 野牛草耐盐性回归方程建立及资源综合评价

各材料 D 值为 0.22~0.85, 得分最高的是 5 号材料(0.85), 最低的是 12 号材料(0.22)。因此筛选得到高耐盐材料有 2、3、4、5 和 9 号; 中耐盐材料有 1、10、11、14 和 15 号; 低耐盐材料有 6、7、8、12 和 13 号(表 4)。

以耐盐综合评价价值(D 值)作为因变量, 13 项指标的性状相对值作为自变量进行逐步回归分析, 建立最优回归方程: $D=0.351+0.266X_1-0.211X_2-0.191X_3+0.121X_4+0.144X_5+0.093X_6$, $R^2=0.992$, 达极显著水平($P<0.001$)。由方程可以看出, 13 个耐盐指标中有 6 个指标对野牛草幼苗具有显著影响, 其中 $X_1\sim X_6$ 分别是 MDA、淀粉含量、POD、总淀粉酶活性、茎粗和叶片相对含水量。利用所得的回归方程对不同野牛草材料进行耐盐性预测, 并对回归方程的估计精度进行评价(表 5), 结果表明各野牛草材料的预测值估计精度在 94.65% 及以上, 说明该方程中的 6 项指标对野牛草耐盐性具有显著影响, 可将原本的 13 个指标简化为 6 个进行计算, 可用此方程进行野牛草种质资源材料的耐盐性评价。

3 讨论

土壤盐渍化严重制约着生态系统稳定和农业可持续发展。野牛草因其抗逆性强, 被视为理想的环保

表 2 初始特征值和提取的主成分贡献率

Table 2 Initial eigenvalues and extracted principal component contribution rate

成分 Component	特征值 Eigenvalues	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative contri- bution rate (%)
初始特征值 Initial eigenvalues			
1	3.835	29.500	29.500
2	2.623	20.180	49.681
3	1.814	13.955	63.636
4	1.452	11.172	74.807
5	0.981	7.546	82.353
6	0.750	5.768	88.121
7	0.555	4.270	92.391
8	0.543	4.175	96.566
9	0.325	2.498	99.064
10	0.068	0.520	99.584
11	0.031	0.239	99.823
12	0.015	0.119	99.942
13	0.007	0.058	100.000
提取平方和载入 Extraction sums of squared loadings			
1	3.835	29.500	29.500
2	2.623	20.180	49.681
3	1.814	13.955	63.636
4	1.452	11.172	74.807

表 3 因子载荷矩阵

Table 3 Factor loading matrix

性状 Trait	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
株高 Plant height	0.528	0.089	0.417	-0.178
茎粗 Stem diameter	0.761	-0.135	-0.234	0.400
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.076	0.366	0.763	-0.035
丙二醛含量 Malondialdehyde (MDA) content	0.587	0.598	0.142	0.045
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase (SOD) activity	0.460	0.437	0.145	-0.641
过氧化物酶活性 Peroxidase (POD) activity	-0.110	-0.099	-0.735	-0.274
脯氨酸含量 Proline (Pro) content	-0.810	0.204	-0.328	-0.011
蔗糖含量 Sucrose content	0.057	-0.072	0.861	-0.257
葡萄糖含量 Glucose content	0.338	0.137	0.001	0.873
淀粉含量 Starch content	-0.847	-0.104	-0.018	-0.063
α -淀粉酶活性 α -amylase activity	-0.019	-0.643	0.204	0.368
总淀粉酶活性 Total amylase activity	-0.141	0.795	0.268	0.133
β -淀粉酶活性 β -amylase activity	0.013	0.947	0.157	0.018

表4 野牛草各品种的主成分值、隶属函数值和综合评价价值(D值)

Table 4 The principal component value, membership function value and comprehensive evaluation value (D value) of different varieties of *B. dactyloides*

编号 Number	主成分 Principal component				隶属函数 Membership function				D值 D value	评价排序 Rank
	F1	F2	F3	F4	U1	U2	U3	U4		
1	0.72	0.53	0.68	0.04	0.64	0.28	0.45	0.21	0.44	9
2	1.88	1.51	0.80	0.81	0.98	0.60	0.48	0.75	0.75	2
3	0.83	1.31	0.72	0.84	0.67	0.53	0.46	0.76	0.61	5
4	1.04	1.78	0.69	0.50	0.73	0.68	0.45	0.55	0.64	4
5	1.94	2.75	2.46	0.34	1.00	1.00	1.00	0.02	0.85	1
6	0.49	1.17	0.32	0.37	0.57	0.49	0.14	0.00	0.38	12
7	0.28	0.17	0.25	0.49	0.51	0.16	0.31	0.54	0.38	11
8	0.08	0.74	0.75	0.37	0.45	0.35	0.00	0.47	0.34	14
9	1.36	1.42	1.40	0.75	0.83	0.57	0.67	0.71	0.71	3
10	0.92	0.33	0.43	1.16	0.70	0.00	0.37	0.97	0.49	7
11	0.67	1.89	0.45	0.70	0.22	0.72	0.38	0.68	0.45	8
12	1.42	0.87	0.54	0.04	0.00	0.39	0.40	0.26	0.22	15
13	0.13	0.17	0.63	0.33	0.46	0.05	0.43	0.44	0.34	13
14	0.20	0.56	0.10	0.80	0.48	0.29	0.27	0.74	0.43	10
15	0.89	1.14	0.00	1.21	0.69	0.48	0.24	1.00	0.59	6

表5 回归方程的估计精度分析

Table 5 Analysis of estimation precision of regression equation

编号 Number	D值 D value	预测值 Pre- diction value	差值 Differ- ence value	估计精度 Evalua- tion accuracy (%)	编号 Number	D值 D value	预测值 Pre- diction value	差值 Differ- ence value	估计精度 Evalua- tion accuracy (%)
1	0.441	0.466	0.025	94.65	9	0.710	0.708	0.002	99.74
2	0.750	0.738	0.012	98.40	10	0.488	0.463	0.025	94.81
3	0.607	0.613	0.006	99.04	11	0.454	0.458	0.004	99.07
4	0.639	0.642	0.003	99.53	12	0.219	0.210	0.008	96.18
5	0.854	0.846	0.007	99.13	13	0.342	0.347	0.005	98.66
6	0.380	0.383	0.003	99.29	14	0.428	0.432	0.004	99.08
7	0.384	0.370	0.013	96.49	15	0.593	0.610	0.017	97.21
8	0.340	0.341	0.001	99.78					

型生态修复草种之一^[20]。目前,在紫花苜蓿^[21]、草地早熟禾(*Poa pratensis*)^[17]、长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)^[22]、小黑麦(*Triticosecale wittmack*)^[23]、大豆(*Glycine max*)^[24]和玉米(*Zea mays*)^[25]等物种中耐盐资源的筛选工作已有很多报道,但在野牛草中研究相对较少。

盐胁迫显著抑制野牛草的生长,具体表现为株高和茎粗均呈下降趋势,整体来看,5号材料(Bd324)下降幅度最小,而12号材料(Bd096)受盐胁迫影响最为显著。说明盐胁迫可能使得植株叶片保水能力减弱,细胞膨压降低进而影响其光合作用等过程,严重阻碍了植物的正常生长。进一步研究发现,野牛草自身也会通过一些生理变化来抵抗逆境的伤害,如叶片相对含水量显著降低,POD和SOD活性会显著增强,以清除活性氧,抑制膜脂过氧化过程^[26]。在本研究中,高耐盐材料(如5号等)优先激活SOD来应对活性氧(reactive oxygen species, ROS),同时

POD 活性显著降低,MDA 含量显著升高,表明其在高浓度的盐胁迫条件下,通过与其他生理途径相互作用,共同调节,减少植物对 POD 的依赖,同时允许部分细胞受到损伤,在一定程度上缓解盐胁迫带来的危害,维持细胞内的生理平衡,以保证整体植株的存活^[27-29]。此外,脯氨酸、淀粉和糖类物质在野牛草的能量供应中也发挥着重要作用^[30],如 2 号材料积累葡萄糖,5 号材料则倾向于蔗糖合成,表明野牛草可能通过积累糖类物质来增强渗透调节能力^[31]。

科学且合理地筛选测定指标是鉴定野牛草耐盐性的关键,针对野牛草耐盐性评价指标冗余的问题,本研究通过逐步回归分析,筛选出 MDA 含量、淀粉含量、POD 活性、总淀粉酶活性、茎粗和叶片相对含水量 6 项核心指标,构建了预测精度达 94.65% 的回归方程 ($D=0.351+0.266X_1-0.211X_2-0.191X_3+0.121X_4+0.144X_5+0.093X_6$, $R^2=0.992$, $P<0.001$)。这一结果与其他植物的耐盐性评价研究思路一致,但相较于传统仅依赖 SOD、POD 等抗氧化指标的筛选体系,本研究首次明确了在野牛草耐盐胁迫中糖代谢和淀粉代谢相关酶活性的重要作用,这可能与野牛草独特的碳分配策略有关,盐胁迫下耐盐种质(如 2 和 5 号等)通过调控淀粉代谢过程将体内淀粉分解为葡萄糖和蔗糖等小分子糖类,为细胞提供能量和参与渗透调节,从而表现出更强的耐盐性^[32]。本研究系统解析了野牛草耐盐性的生理基础,有效简化耐盐性鉴定流程,建立了基于多指标协同的评价体系,为野牛草耐盐育种提供了更高效的筛选工具。

4 结论

盐胁迫对野牛草苗期生长有显著影响。对 15 份野牛草材料综合评价,筛选出强耐盐野牛草种质 5 份(Bd324、Bd769、Bd628、Bd415 和 Bd380),其中 MDA 含量、淀粉含量、POD 活性、总淀粉酶活性、茎粗和叶片相对含水量可作为后续野牛草耐盐种质筛选的主要评价指标。本研究为后续野牛草耐盐种质定向筛选提供了技术支撑。

参考文献 References:

- [1] Trejo-Téllez L I. Salinity stress tolerance in plants. *Plants*, 2023, 12(20): 3520.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The key report of the first global assessment of saline and sodic soils in the past 50 years. (2024-12-11)[2025-01-13]. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-launches-first-major-global-assessment-of-salt-affected-soils-in-50-years/zh?continueFlag=4abf1b7994dcaae427c557d85985fad>.
联合国粮食及农业组织. 50 年来首份盐渍土壤全球评估关键报告. (2024-12-11)[2025-01-13]. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-launches-first-major-global-assessment-of-salt-affected-soils-in-50-years/zh?continueFlag=4abf1b7994dcaae427c557d85985fad>.
- [3] Li Y, Li Y L, Zhai C Y, *et al.* Research advances in salt resistance of turfgrasses. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(5): 839—851.
李岩, 李永龙, 翟晨元, 等. 草坪草耐盐性研究进展. *植物生理学报*, 2023, 59(5): 839—851.
- [4] Guo H, Cui Y N, Li Z, *et al.* Photosynthesis, water status and K/Na homeostasis of *Buchloe dactyloides* responding to salinity. *Plants*, 2023, 12(13): 2459.
- [5] Guo L Z, Meng H Z, Teng K, *et al.* Effects of nitrogen forms on the growth and nitrogen accumulation in *Buchloe dactyloides* seedlings. *Plants*, 2022, 11(16): 2086.
- [6] Sun J, Xiong J B, Liu Y Z, *et al.* Analysis on factors causing the seed dormancy of *Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(5): 665—669.
孙杰, 熊军波, 刘永志, 等. 野牛草种子休眠原因分析. *草地学报*, 2009, 17(5): 665—669.
- [7] Wu F, Chen J, Wang J, *et al.* Intra-population genetic diversity of *Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm (buffalograss) determined using morphological traits and sequence-related amplified polymorphism markers. *3 Biotech*, 2019, 9(3): 97.
- [8] Zhao C F. The correlation analysis of different ploidy and phenotype characteristics of buffalo grass. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
赵成芳. 野牛草(*Buchloe dactyloides*)不同倍性与表型特征相关性分析. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [9] Liu M Y, Guo L Z, Teng K, *et al.* Differences in the physiological responses of female and male *Buchloe dactyloides* plants to

- drought stress. *Pratacultural Science*, 2024, 41(6): 1397–1406.
- 刘牧野, 郭丽珠, 滕珂, 等. 野牛草雌、雄株对干旱胁迫的生理响应差异. *草业科学*, 2024, 41(6): 1397–1406.
- [10] Li Z L, Huang K X, Sun Y. Salt-tolerance evaluation and analysis on buffalo grass germplasm resources. *Grassland and Prataculture*, 2022, 34(2): 27–34.
- 李智林, 黄可心, 孙彦. 野牛草种质资源耐盐性评价与筛选. *草原与草业*, 2022, 34(2): 27–34.
- [11] Ren Y C, Liu J, Li M, *et al.* Effects of shading stress on antioxidant system of two buffalograss varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1345–1351.
- 任艺慈, 刘洁, 李茂, 等. 遮阴胁迫对两种野牛草抗氧化系统的影响. *草地学报*, 2017, 25(6): 1345–1351.
- [12] Li W, Qian Y Q, Han L, *et al.* The response of enzymatic active oxygen scavenging system in leaves of *Buchloe dactyloides* to differences photoperiod. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(7): 1428–1436.
- 李伟, 钱永强, 韩蕾, 等. 野牛草克隆分株酶促活性氧清除系统对差异光周期的响应. *西北植物学报*, 2015, 35(7): 1428–1436.
- [13] Ding C S, Xu C S, Lu B, *et al.* Comprehensive evaluation of rice qualities under different nitrogen levels in South China. *Foods*, 2023, 12(4): 697.
- [14] Fu J P, Liu F C, Yan B Q, *et al.* Comprehensive evaluation and screening of adaptability of different sorghum varieties. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2025(5): 1–13.
- 付江鹏, 柳发财, 闫宝琴, 等. 不同高粱品种适应性综合评价与筛选. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025(5): 1–13.
- [15] Feng Y X, Chen Z, Chen L Y, *et al.* Comprehensive evaluation of physio-morphological traits of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties under salt stress. *Plant Physiology*, 2025, 177(1): e70044.
- [16] Shi Y H, Wan L Q, Liu J N, *et al.* Analysis of the principal components and the subordinate function of *Lolium perenne* drought resistance. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(5): 669–672.
- 石永红, 万里强, 刘建宁, 等. 多年生黑麦草抗旱性主成分及隶属函数分析. *草地学报*, 2010, 18(5): 669–672.
- [17] Xia H M, Cao Z J, Yu M Y, *et al.* Tolerance of 30 Kentucky bluegrass varieties to NaCl stress during the seedling stage. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3124–3137.
- 夏华美, 曹志坚, 于铭玥, 等. 30份草地早熟禾苗期耐盐性综合评价. *草业科学*, 2023, 40(12): 3124–3137.
- [18] Gao J F. *Experimental guide of plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 高俊凤. *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] Xu Z C, Lu X L, Wei Y C, *et al.* Salt tolerance identification and evaluation of a population of wild soybean SP1 mutants at the seedling stage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11): 168–178.
- 徐宗昌, 鲁雪莉, 魏云冲, 等. 航天诱变野大豆 SP1 群体苗期耐盐性鉴定与评价. *草业学报*, 2023, 32(11): 168–178.
- [20] Webb, John J. The life history of buffalo grass. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 1941, 44: 58–75.
- [21] Wang N, Wan C, Gao S, *et al.* Screening and evaluation of salt tolerance of 80 alfalfa varieties at the seedling stage. *Pratacultural Science*, 2024, 41(3): 684–699.
- 王宁, 万畅, 高山, 等. 80份紫花苜蓿品种苗期耐盐性筛选与评价. *草业科学*, 2024, 41(3): 684–699.
- [22] Xu M, Wang Q, Wang Y X, *et al.* Effects of different salt stress on seed germination and seedling growth of *Elytrigia elongate*. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(1): 15–20.
- 徐曼, 王茜, 王奕骁, 等. 不同盐胁迫对长穗偃麦草种子萌发及幼苗生长的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 15–20.
- [23] Wang M, Lu X L, Wang J Y, *et al.* Evaluation and screening of the salt tolerance of triticale germplasm at the germination and seedling stages. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(5): 58–68.
- 王萌, 鲁雪莉, 王菊英, 等. 小黑麦种质萌发期苗期耐盐资源评价与筛选. *草业学报*, 2024, 33(5): 58–68.
- [24] Yuan Y T, Zhang X Y, Wu G F, *et al.* Comprehensive evaluation of salt tolerance of soybean germplasm resources based on principal component and membership function analysis. *Soybean Science*, 2025, 44(1): 22–32.
- 袁宇婷, 张晓燕, 吴谷丰, 等. 基于主成分和隶属函数分析的大豆种质资源耐盐性综合评价. *大豆科学*, 2025, 44(1): 22–32.
- [25] Tian H, Liu H, Zhang D, *et al.* Screening of salt tolerance of maize (*Zea mays* L.) lines using membership function value and GGE biplot analysis. *PeerJ*, 2024, 29(12): e16838.
- [26] Panda S K, Khan M H. Salt stress influences lipid peroxidation and antioxidants in the leaf of an indica rice (*Oryza saliva* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2003, 9(2): 273–278.

- [27] Miao H, Wei L, Yang Y P, *et al.* Comprehensive screening of *Agropyron* cultivars for tolerance to salt stress at the seedling stage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 200–211.
苗涵, 魏莱, 杨燕萍, 等. 海水胁迫下冰草幼苗期耐盐性指标筛选. *草业学报*, 2023, 32(3): 200–211.
- [28] Liu Y, Yang W, Ma H L, *et al.* Effects of salt stress on seedling physiological characteristics of six Kentucky bluegrass. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(5): 140–150, 162.
刘燕, 杨伟, 马晖玲, 等. 盐胁迫对 6 种草地早熟禾幼苗生理特性的影响. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(5): 140–150, 162.
- [29] Guo X, Ahmad N, Zhao S, *et al.* Effect of salt stress on growth and physiological properties of *Asparagus* seedlings. *Plants*, 2022, 11(21): 2836.
- [30] Yan F, Zhang J, Li W, *et al.* Exogenous melatonin alleviates salt stress by improving leaf photosynthesis in rice seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 163(3): 367–375.
- [31] Yao Y H, Kang Y C, Yang X Y, *et al.* Effects of NaCl stress on physiological and biochemical characteristics, yield and quality of potato. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2020(4): 36–42.
姚彦红, 康益晨, 杨昕宇, 等. NaCl 胁迫对马铃薯生理生化特性产量及品质的影响. *甘肃农业科技*, 2020(4): 36–42.
- [32] Li Y, Chu Y, Yao K, *et al.* Response of sugar metabolism in the cotyledons and roots of *Ricinus communis* subjected to salt stress. *BMC Plant Biology*, 2023, 25(1): 62–71.