

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.015

引用格式:奉雨婷,罗李旋,徐倩,等.苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长的影响[J].草地学报,2026,34(5):1737—1745

FENG Yu-ting, LUO Li-xuan, XU Qian, et al. Effect of Soda-Alkali Stress on Seed Germination and Seedling Growth of *Pennisetum glaucum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1737—1745

苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长的影响

奉雨婷¹, 罗李旋¹, 徐倩¹, 卢蕊¹, 胡龙兴^{1,2*}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128;

2. 黄三角农高区院士工作站/国家盐碱地综合利用技术创新中心, 山东东营 257300)

摘要:为明确不同浓度苏打碱胁迫对美洲狼尾草(*Pennisetum glaucum*)种子萌发和幼苗生长的影响,以期筛选出耐苏打碱性强的美洲狼尾草品种。本研究选用12份不同基因型美洲狼尾草种质为试验材料,采用培养皿纸上发芽法,将NaHCO₃和Na₂CO₃按9:1摩尔比例混合后配置浓度梯度为0, 40, 60 mmol·L⁻¹的苏打碱溶液模拟不同程度的苏打碱胁迫,测定美洲狼尾草种子萌发期的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长和胚芽长,并采用隶属函数和聚类分析对12份美洲狼尾草的耐苏打碱能力进行综合分析。结果表明,苏打碱胁迫显著抑制美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长,且随着苏打碱溶液浓度升高而加重。不同基因型美洲狼尾草种子萌发期的耐苏打碱胁迫能力存在显著差异,通过聚类分析可将12份美洲狼尾草分为四类,分别为耐苏打碱型(Ca1165, 占比8.33%)、中等耐苏打碱型(Ca399, Ca727, Ca396, Ca742, Ca382, 占比41.67%)、敏感型(Ca425, Ca481, Ca736, Ca406, 占比33.33%)和高敏感型(Ca424, Ca397, 占比16.67%)。

关键词:苏打碱胁迫;美洲狼尾草;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1737-09

Effect of Soda-Alkali Stress on Seed Germination and Seedling Growth of *Pennisetum glaucum*

FENG Yu-ting¹, LUO Li-xuan¹, XU Qian¹, LU Rui¹, HU Long-xing^{1,2*}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan Province 410128, China;

2. Academician Workstation of Agricultural High-tech Industrial Area of the Yellow River Delta, National Center of Technology Innovation for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying, Shandong Province 257300, China)

Abstract: To investigate the effects of soda-alkali stress at different concentrations on seed germination and seedling growth of pearl millet (*Pennisetum glaucum*), twelve genotypes of pearl millet germplasms were used as experimental materials. Using the Petri dish filter paper germination method, soda-alkali stress was simulated by preparing mixed solutions of NaHCO₃ and Na₂CO₃ at a molar ratio of 9:1, with concentration gradients of 0, 40, and 60 mmol·L⁻¹. Germination-related parameters, encompassing germination rate, germination potential, germination index, vigor index, radicle emergence length, and plumule development length, were measured during the seed imbibition phase. A comprehensive evaluation framework for assessing soda-alkali stress tolerance was established through fuzzy membership function analysis combined with principal component clustering methodology. The results demonstrated that soda-alkali stress significantly inhibited seed germination and seedling growth of pearl millet, with the inhibitory effects intensified as the concentration of soda-alkali

收稿日期:2025-05-26;修回日期:2025-08-25

基金项目:湖南省重点研发计划(2024WK2013);黄三角国家农高区省级科技创新发展专项资金(2022SZX13)资助

作者简介:奉雨婷(2003-),女,汉族,湖南永州人,本科生,主要从事狼尾草逆境生物学相关的研究;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: grass@hunau.edu.cn

solution increased. Furthermore, substantial genotypic variation was observed in soda-alkali stress tolerance during the germination stage among different pearl millet genotypes. Cluster analysis classified the 12 genotypes into four distinct categories: (1) soda-alkali tolerant type (represented by Ca1165, accounting for 8.33%), (2) moderately tolerant type (including Ca399, Ca727, Ca396, Ca742, and Ca382, comprising 41.67%), (3) sensitive type (comprising Ca425, Ca481, Ca736, and Ca406, representing 33.33%), and (4) highly sensitive type (consisting of Ca424 and Ca397, accounting for 16.67%).

Key words: Soda-alkali stress; *Pennisetum glaucum* L.; Seed germination; Seedling growth

土壤盐碱化已被公认为世界性重大环境问题,全球盐碱土总面积约为9.5亿 hm^2 ,苏打盐碱土占比达37%^[1]。中国约有1亿 hm^2 的盐碱化土壤,位列世界前三^[2]。该土壤类型主要分布在我国的东北、西北、华北和沿海地区^[3]。根据盐分的性质差异,通常将中性盐(NaCl 和 Na_2SO_4)引起的胁迫称为盐胁迫,而将碱性盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)引起的胁迫称为碱胁迫^[4]。其中盐胁迫通过渗透胁迫和离子毒害影响植物的生理功能^[5],而碱胁迫除以上两种胁迫效应外,还会产生高pH胁迫^[6],对植物生长发育的抑制作用远大于单一的盐胁迫^[7]。此外,土壤盐碱化使得耕地质量退化和作物生产力下降,很大程度上已制约农业生产,严重影响我国的粮食安全^[8],而选育和栽培耐盐碱植物是充分利用盐碱化土壤的有效途径^[9]。

植物生长过程中,种子萌发期是植物生长发育的关键阶段^[10],也是对外界胁迫环境响应最敏锐的时期之一^[11],植物的耐盐碱特性可通过种子萌发率和幼苗生长指标进行有效评估。相关研究表明,多数植物在受到盐碱胁迫时,其种子萌发和幼苗生长均会受到抑制,并且其种子萌发率也随着盐碱胁迫处理浓度的增高呈下降趋势,这在灰绿藜^[12](*Chenopodium glaucum* L.)、玉米^[13](*Zea mays* L.)、苜蓿^[14](*Medicago sativa* L.)、结缕草^[15](*Zoysia japonica* Steud.)、高羊茅^[15](*Festuca arundinacea* Schreb.)、甜高粱^[16](*Sorghum bicolor* L.)、白花草木樨^[17](*Melilotus albus* Desr.)、紫穗槐^[18](*Amorpha fruticosa* L.)等植物中已得到证实。种子萌发和幼苗生长是植物适应外界环境的初始阶段^[19],该阶段的耐盐碱特性将影响植物后续的生长发育状况^[20]。因此,进行苏打碱胁迫下种子萌发试验可以有效研究植物的耐苏打碱性强弱,且具备操作简便、可重复性强等优点。

美洲狼尾草(*Pennisetum glaucum* L.)又名御谷、珍珠粟,是一年生禾本科牧草,具有分蘖能力强、生物产量高等特点,为世界上第六大禾谷类作物,在印度、非洲等干旱地区国家广泛种植^[21-23]。美

洲狼尾草兼具粮食作物、优质饲草和生物能源原料功能^[24],适合种植于我国大部分地区。随着我国农业结构调整、草牧业和畜牧业的快速发展,对美洲狼尾草的需求量呈现显著增长趋势^[25]。目前,对于不同美洲狼尾草种质的耐苏打碱胁迫能力的评价研究甚少。现有覃广泉等^[26]认为美洲狼尾草比其他种具有更高的发芽率、发芽指数和活力指数,综合性状表现更为耐盐。

因此,本研究以湖南农业大学草业科学系收集保存的12份美洲狼尾草种质为材料,在萌发期开展耐苏打碱性鉴定和评价,对于筛选耐苏打碱性强的美洲狼尾草种质和开发利用盐碱地资源具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

湖南农业大学草业科学系收集保存的12份美洲狼尾草种质,详见表1。

1.2 试验设计与处理

从12份美洲狼尾草种质材料中挑选饱满健康的种子,采用培养皿纸上发芽法,在人工气候培养箱中进行萌发试验。

为了筛选合适的苏打碱浓度,选取一份美洲狼尾草种子作为试验材料进行预试验,将2种碱性盐 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 按9:1的摩尔比混合配制成浓度梯度为0, 20, 40, 60, 80和100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 共6个苏打碱胁迫处理。试验观测表明,当处理浓度为40 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,供试材料的胚根长和胚芽长较对照组显著下降至50% ($P<0.05$),该浓度可作为临界胁迫阈值,同时增加60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苏打碱处理浓度以研究高浓度苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子萌发的影响。本研究将选取40 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH9.43)和60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH9.45)两个处理浓度进行正式试验。

将美洲狼尾草种子用5%的 NaClO 溶液消毒5 min,

用去离子水冲洗4~5次,吸干水分后,每个基因型各取30粒种子均匀摆放在内铺2层滤纸的培养皿(9 cm)中,将培养皿编号,标注发芽种子类型及种子发芽起始日期。把配制好的40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹的苏打碱溶液依次加入2 mL在相对应的培养皿中,对照组加入等量的无菌水,每个处理3次重复,放于25℃人工气候室内发芽,14 h光照/10 h黑暗的光周期,65%~75%的湿度。从种子置床之日起,每天定时记录每个培养皿内种子萌发数量并及时清理发霉腐烂的种子,萌发标准为胚根突破种皮1 mm,发芽标准为萌发后能发育成正常幼苗(具备完整的根系、伸直的子叶且能独立维持生长),于第3 d统计发芽势,第10 d统计发芽率、发芽指数和活力指数。试验结束后,在每个培养皿中随机选取10株幼苗用直尺(精确到0.01 mm)测定胚根长和胚芽长。

表1 12份美洲狼尾草种质资源信息

Table 1 Basic information for the 12 *Pennisetum glaucum*

编号 No.	种子库编号 Accession	原产地 Origin
Ca382	PI 518646	美国 USA
Ca396	PI 521624	肯尼亚 Kenya
Ca397	PI 521625	肯尼亚 Kenya
Ca399	PI 521627	肯尼亚 Kenya
Ca406	PI 521634	肯尼亚 Kenya
Ca424	PI 521652	肯尼亚 Kenya
Ca425	PI 521654	肯尼亚 Kenya
Ca481	PI 526322	津巴布韦 Zimbabwe
Ca727	PI 526571	津巴布韦 Zimbabwe
Ca736	PI 526580	津巴布韦 Zimbabwe
Ca742	PI 526586	津巴布韦 Zimbabwe
Ca1165	PI 661416	印度 India

1.3 测定项目与方法

本试验测定的指标有发芽势、发芽率、胚根长、胚芽长,并根据公式计算种子发芽指数(Germination index, GI)和种子活力指数(Vigor index, VI)。相关计算方法如下:

发芽势(Germination energy, GE)=(第3天种子发芽数/供试种子数)×100%;

发芽率(Germination rate, GR)=(第10天种子发芽数/供试种子数)×100%;

$$I_G = \sum (G_t / D_t);$$

式中: I_G 为种子发芽指数, G_t 为 t 时间的萌发数, D_t 为相应的萌发天数。

$$I_V = I_G \times L_r;$$

式中: I_V 为种子活力指数, L_r 为平均根长。

相对发芽势(Relative germination vigor, RGV)=

(各处理组的发芽势/对照的发芽势)×100%;

相对发芽率(Relative germination rate, RGR)=

(各处理组的发芽率/对照的发芽率)×100%;

相对胚根长(Relative root length, RRL)=

(各处理组的胚根长/对照的胚根长)×100%;

相对胚芽长(Relative plumule length, RPL)=(各处理组的胚芽长/对照的胚芽长)×100%;

相对发芽指数(Relative germination index, RGI)=

(各处理组的发芽指数/对照的发芽指数)×100%;

相对活力指数(Relative vigor index, RVI)=

(各处理组的活力指数/对照的活力指数)×100%。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2021统计和处理数据,计算原始数据的平均值和标准差。并且运用软件SPSS 27.0对相关萌发指标和生长指标进行方差分析和聚类分析,用Duncan's法检验差异显著性。计算每份种子材料各个指标的隶属函数值,并求其隶属函数平均值,以评价每份种子材料的综合耐苏打碱能力。

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}).$$

式中, $U(X_j)$ 表示某一基因型某一指标的隶属函数值, j 为不同基因型种子材料, X_j 为不同基因型种子材料的某一指标测定值, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为所有基因型种子材料某一指标测定值的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 苏打碱胁迫对不同美洲狼尾草种子萌发的影响

由表2可知,12份基因型美洲狼尾草种子供试材料的发芽势和发芽率存在差异($P < 0.05$),在40 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下,12份美洲狼尾草种子供试材料的发芽势降幅为5.89%~78.85%,发芽率的降幅为1.54%~76.56%;在60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下12份美洲狼尾草种子供试材料的发芽势降幅为39.69%~86.54%,发芽率的降幅为31.89%~89.06%。以上说明,在40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下12份美洲狼尾草种子材料的发芽势和发芽率均有不同程度的降低,且浓度越高抑制越强。并且,在相同浓度胁迫下,发芽势的降幅普遍高于发芽率的降幅,表明苏打碱胁迫对供试种子材料初期的萌发速率的抑制作用更大。

表 2 苏打碱胁迫对不同基因型美洲狼尾草种子萌发的影响

Table 2 Effect of soda-alkali stress on the seed germination of different genotypes of *P. glaucum*

基因型 Genotype	发芽势 Germination energy/%			发芽率 Germination rate/%		
	对照 CK	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)	对照 CK	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)
Ca382	70.00±3.33 ^{abcA}	60.00±3.33 ^{abA}	42.22±12.62 ^{abB}	76.67±3.33 ^{abA}	70.00±11.55 ^{abA}	52.22±6.94 ^{abB}
Ca396	60.00±3.33 ^{bcdA}	25.56±7.70 ^{efB}	15.56±7.70 ^{bcdB}	75.56±1.92 ^{abA}	41.11±5.09 ^{db}	22.22±7.70 ^{cdeC}
Ca397	37.78±3.85 ^{eA}	12.22±6.94 ^{fb}	8.89±1.92 ^{db}	68.89±6.94 ^{bcA}	17.78±10.18 ^{eB}	11.11±5.09 ^{deB}
Ca399	56.67±0.00 ^{cdA}	53.33±3.33 ^{abcA}	20.00±5.77 ^{bcdB}	56.67±0.00 ^{cA}	55.56±1.92 ^{abcdA}	25.56±5.09 ^{cdeB}
Ca406	74.44±3.85 ^{abcA}	48.89±15.03 ^{abcB}	17.78±5.09 ^{bcdC}	76.67±6.67 ^{abA}	64.44±9.62 ^{abcA}	24.44±3.85 ^{cdeB}
Ca424	57.78±13.88 ^{cdA}	12.22±12.62 ^{fb}	7.78±1.92 ^{db}	71.11±15.03 ^{bcA}	16.67±13.33 ^{dB}	7.78±1.92 ^{dB}
Ca425	66.67±16.67 ^{bcdA}	33.33±12.02 ^{ceB}	10.00±5.77 ^{cdB}	75.56±13.47 ^{abA}	41.11±12.62 ^{dB}	11.11±5.09 ^{deC}
Ca481	77.78±3.85 ^{abA}	38.89±7.70 ^{cdeB}	16.67±10.00 ^{bcdC}	77.78±3.85 ^{abA}	51.11±12.62 ^{cdB}	31.11±17.11 ^{bcB}
Ca727	86.67±3.33 ^{aA}	62.22±20.37 ^{aAB}	45.56±12.62 ^{abB}	88.89±5.0 ^{9aA}	72.22±13.47 ^{aAB}	56.67±17.32 ^{abB}
Ca736	56.67±20.82 ^{cdA}	30.00±12.02 ^{cdeAB}	12.22±1.92 ^{cdB}	68.89±15.03 ^{bcA}	51.11±6.94 ^{cdA}	27.78±1.92 ^{bcdB}
Ca742	76.67±3.33 ^{abcA}	41.11±6.94 ^{bcdB}	23.33±3.33 ^{bcC}	80.00±3.33 ^{aA}	53.33±5.77 ^{bcdB}	34.44±1.92 ^{bcC}
Ca1165	50.00±13.33 ^{deA}	44.44±1.92 ^{abcdeAB}	28.89±8.39 ^{bB}	72.22±5.09 ^{bA}	71.11±5.09 ^{abA}	45.56±19.25 ^{abA}

注:同列数字后的不同小写字母代表同一处理间不同基因型间差异显著($P<0.05$),同行数字后的不同大写字母代表同一基因型不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters following values in the same column indicate significant differences between genotypes under the same treatment ($P<0.05$), while different uppercase letters following values in the same row denote significant differences between treatments for the same genotype ($P<0.05$). The same convention applies hereafter

2.2 苏打碱胁迫对不同美洲狼尾草种子发芽指数和活力指数的影响

由表 3 可知,苏打碱胁迫下 12 份美洲狼尾草参试种子材料的发芽指数和活力指数相对于对照组均有不同程度的降低。在 40 mmol·L⁻¹ 苏打碱胁迫下,有 6 份美洲狼尾草种子发芽指数降低 50% 及以上,其中 Ca406 降幅最大,为 78.52%,表明其受盐碱胁迫的影响比较大;Ca396 降幅最小,为 9.63%,说明其对于低浓度的盐碱胁迫表现出一定的适应性。在 60 mmol·L⁻¹ 苏打碱胁迫下,发芽指数的降幅为

44.48%~88.13%,Ca399 的降幅最大,Ca1165 的降幅最小。活力指数是种子活力的一个重要指标,在 40 mmol·L⁻¹ 苏打碱胁迫下,12 份基因型种子材料中有 9 份种子材料的活力指数下降了 90% 以上,影响最小的为 Ca396,其活力指数下降了 81.37%。在 60 mmol·L⁻¹ 苏打碱胁迫下,12 份基因型种子材料的种子活力进一步下降,其中 Ca406 和 Ca424 的种子活力指数下降至 2.00 以下,种子存活能力严重受损。通过进一步分析可知,苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子活力指数的抑制程度大于发芽指数。

表 3 苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子发芽指数和活力指数的影响

Table 3 Effects of soda-alkali stress on germination index and vigor index of *P. glaucum*

基因型 Genotype	发芽指数 Germination index			活力指数 Vigor index		
	对照 CK	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)	对照 CK	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	苏打碱胁迫 Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)
Ca382	16.92±1.18 ^{aA}	7.31±1.20 ^{bcB}	4.46±0.47 ^{bcC}	1007.93±85.96 ^{aA}	66.48±24.83 ^{bcB}	12.72±4.25 ^{abcB}
Ca396	13.61±0.75 ^{bcA}	12.30±0.64 ^{aA}	4.81±0.68 ^{bcB}	447.28±67.54 ^{cA}	83.33±28.71 ^{bB}	12.17±5.70 ^{abcB}
Ca397	17.41±1.90 ^{aA}	11.43±1.61 ^{aB}	7.92±2.93 ^{aB}	764.91±153.69 ^{abA}	32.94±3.24 ^{defB}	14.14±11.50 ^{abB}
Ca399	8.88±1.52 ^{efA}	7.39±1.33 ^{bcAB}	4.93±0.89 ^{bcB}	409.41±63.00 ^{cA}	32.94±7.09 ^{defB}	17.62±2.83 ^{aB}
Ca406	8.94±2.27 ^{efA}	1.92±1.35 ^{dB}	1.33±0.29 ^{dB}	353.01±180.69 ^{cA}	8.31±6.50 ^{efB}	1.84±1.04 ^{deB}
Ca424	6.20±0.25 ^{fA}	1.74±0.84 ^{dB}	1.38±0.33 ^{dB}	293.14±81.47 ^{cA}	6.20±4.24 ^{fB}	1.45±0.58 ^{eB}
Ca425	11.24±1.57 ^{cdeA}	4.97±0.69 ^{cB}	3.44±1.97 ^{cdB}	801.73±212.60 ^{abA}	22.20±3.42 ^{defB}	4.63±3.25 ^{bcdB}
Ca481	10.96±0.90 ^{cdeA}	8.56±2.11 ^{bA}	2.80±0.70 ^{cdB}	528.91±86.09 ^{bA}	46.38±18.68 ^{cdB}	3.88±1.25 ^{cdeB}
Ca727	14.72±1.59 ^{abA}	8.93±2.68 ^{bB}	6.03±1.87 ^{abB}	985.15±267.56 ^{aA}	114.55±18.91 ^{aB}	15.42±11.04 ^{aB}
Ca736	12.39±2.18 ^{bcdA}	5.70±1.48 ^{cB}	2.83±1.71 ^{cdB}	814.86±285.47 ^{abA}	44.07±24.77 ^{cdB}	2.56±1.09 ^{cdeB}
Ca742	8.38±2.48 ^{efA}	4.68±0.46 ^{cB}	2.59±0.20 ^{cdB}	390.98±132.06 ^{cA}	32.92±3.34 ^{defB}	11.84±3.11 ^{abcdB}
Ca1165	10.28±2.06 ^{deA}	4.87±1.63 ^{cB}	1.22±0.54 ^{dC}	235.33±41.22 ^{cA}	37.37±16.39 ^{cdeB}	3.64±1.23 ^{cdeB}

2.3 苏打碱胁迫对不同美洲狼尾草幼苗生长情况的影响

如表 4 所示,与对照相比,苏打碱胁迫显著降低了美洲狼尾草种子的胚根长,且抑制作用随胁迫浓度增加而增强。在 40 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下,胚根长的下降幅度在 66.09%~93.59% 之间,材料 Ca1165 的降幅最小,材料 Ca425 的降幅最大。在 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下,胚根生长严重受到抑制,胚根长进一步下降,其中有 11 份基因型种子材料的胚根长降至 1.00~4.00 mm。苏打碱胁迫对

胚芽长的抑制作用弱于胚根长,但影响趋势一致。在 40 mmol·L⁻¹苏打碱胁迫下胚芽长下降幅度为 1.54%~89.49%,Ca397 的降幅最大,Ca1165 的降幅最小。在 60 mmol·L⁻¹苏打碱胁迫下,12 份供试种子材料的胚芽长进一步下降,降幅范围在 25.52%~93.89% 之间,呈现出明显的基因型差异,Ca397 受到抑制程度最大,降幅高达 93.89%,Ca1165 的降幅最小,表现出相对较强的耐苏打碱性。以上分析说明,苏打碱胁迫对胚根长的抑制程度大于胚芽长。

表 4 苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子胚根长和胚芽长的影响

Table 4 Effects of soda-alkali stress on seed root and bud length of *P. glaucum*

基因型 Genotype	胚根长 Root length/mm			胚芽长 Plumule length/mm		
	对照	苏打碱胁迫	苏打碱胁迫	对照	苏打碱胁迫	苏打碱胁迫
	CK	Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)	CK	Soda-alkali stress (40 mmol·L ⁻¹)	Soda-alkali stress (60 mmol·L ⁻¹)
Ca382	59.64±4.23 ^{abcdA}	9.03±3.04 ^{bB}	2.88±0.97 ^{bcC}	38.71±1.67 ^{bA}	15.72±0.25 ^{cdB}	13.19±3.49 ^{aB}
Ca396	32.77±3.43 ^{efA}	6.72±2.10 ^{bcdB}	2.50±1.01 ^{bcdB}	31.07±2.06 ^{dA}	20.69±0.56 ^{bcdB}	13.23±3.93 ^{aC}
Ca397	43.89±6.93 ^{cdefA}	2.91±0.44 ^{eB}	1.61±0.77 ^{cdeB}	27.68±3.00 ^{deA}	2.91±0.44 ^{fb}	1.69±0.66 ^{cB}
Ca399	46.46±6.35 ^{bcdA}	4.44±0.16 ^{deB}	3.64±0.76 ^{abB}	27.20±0.40 ^{deA}	14.78±3.65 ^{dB}	4.10±0.03 ^{bcC}
Ca406	37.88±9.58 ^{defA}	4.23±0.74 ^{deB}	1.30±0.57 ^{deB}	33.04±1.38 ^{cA}	20.24±2.07 ^{bcdB}	12.52±2.18 ^{aC}
Ca424	47.00±11.42 ^{bcdA}	3.53±1.10 ^{deB}	1.07±0.32 ^{eB}	25.68±0.99 ^{eA}	9.43±2.36 ^{eB}	4.10±2.91 ^{bcC}
Ca425	70.80±10.77 ^{aA}	4.54±1.11 ^{deB}	1.23±0.53 ^{deB}	38.34±0.44 ^{bA}	20.83±3.80 ^{bcB}	4.03±0.63 ^{bcC}
Ca481	48.28±6.94 ^{abdeA}	5.28±0.95 ^{cdeB}	1.40±0.44 ^{deB}	39.72±2.09 ^{bA}	19.30±1.39 ^{bcdB}	6.12±2.61 ^{bcC}
Ca727	68.77±26.35 ^{abA}	13.23±2.07 ^{aB}	2.38±1.31 ^{bcdB}	52.38±3.69 ^{aA}	28.83±4.36 ^{aB}	13.02±1.22 ^{cC}
Ca736	65.67±22.00 ^{abcA}	7.32±2.39 ^{bcdB}	0.99±0.22 ^{eB}	41.26±2.82 ^{bA}	23.45±7.36 ^{bb}	7.51±5.51 ^{bcC}
Ca742	46.91±10.30 ^{bcdeA}	7.04±0.16 ^{bcdB}	4.53±0.85 ^{aB}	19.20±0.85 ^{fA}	9.02±1.53 ^{eB}	3.99±1.58 ^{bcC}
Ca1165	23.00±1.34 ^{fA}	7.80±2.29 ^{bcB}	3.06±0.39 ^{bcC}	16.89±5.80 ^{fA}	16.63±1.85 ^{cdA}	12.58±2.26 ^{aA}

2.4 苏打碱胁迫对不同美洲狼尾草种子萌发影响的综合评价

各供试材料在单一指标上各有优势,单凭凭借某一指标难以评价 12 份供试材料的耐苏打碱性。因此,本研究采用隶属函数分析法对 12 份不同基因型美洲狼尾草种子的相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对芽长、相对发芽指标、相对活力指数进行综合评价,计算以上六个值的平均隶属函数值并进行排序,以消除材料间的背景差异。据表 5 可知,在 40 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下 12 份种质资源的耐苏打碱性综合排名为:Ca1165>Ca399>Ca396>Ca727>Ca382>Ca481>Ca742>Ca736>Ca406>Ca425>Ca397>Ca424。据表 6 可知,在 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下 12 份种质资源的耐苏打碱性综合排名为:Ca1165>Ca399>Ca742>Ca382>Ca727>Ca396>Ca397>Ca481>Ca406>Ca736>Ca425>Ca424。

在 40 mmol·L⁻¹和 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下,基因型 Ca1165 的隶属函数平均值排名均为第 1,基因型 Ca399 的隶属函数平均值排名均为第 2

(如表 5、表 6),说明这两份供试种子材料的耐苏打碱性强于其他供试种子材料,属于耐苏打碱种质资源。基因型 Ca424 在 40 mmol·L⁻¹和 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下排名均为 12,说明其在苏打碱胁迫下表现极为敏感,属于敏苏打碱种质资源。基因型 Ca742 在 40 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下排名为第 7,在 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下排名为第 3,说明在高浓度的苏打碱胁迫下其耐性逐渐显现。

根据 40 mmol·L⁻¹和 60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫处理下美洲狼尾草种子萌发期间各指标的隶属函数平均值制作聚类函数分析图(如图 1),在欧式距离为 5 处可将所有不同基因型的美洲狼尾草种子供试材料分为四大类,第 I 类为耐苏打碱型,其中包括材料 Ca1165,共 1 份,占供试材料的 8.33%;第 II 类为中等耐苏打碱型,其中包括材料 Ca399, Ca727, Ca396, Ca742, Ca382,共 5 份,占供试材料的 41.67%;第 III 类为敏感型,包括材料 Ca425, Ca481, Ca736, Ca406,共 4 份,占供试材料的 33.33%;第 IV 类为高敏感型,包括材料 Ca424, Ca397,共 2 份,占供试材料的 16.67%。

表 5 40 mmol·L⁻¹苏打碱胁迫下不同基因型美洲狼尾草种子各相对生长指标的隶属函数值

Table 5 Membership function values of relative growth indices for different genotypes of *P. glaucum* seeds under 40 mmol·L⁻¹ soda-alkali stress

基因型 Genotype	相对发芽势 Relative germination vigor	相对发芽率 Relative germination rate	相对胚根长 Relative root length	相对胚芽长 Relative plumule length	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vigor index	隶属函数平均值 Membership value	排序 Rank
Ca382	0.905	0.885	0.317	0.342	0.316	0.271	0.506	5
Ca396	0.413	0.294	0.512	0.637	1.000	1.000	0.643	3
Ca397	0.032	0.153	0.008	0.000	0.641	0.133	0.161	11
Ca399	0.994	1.000	0.114	0.498	0.896	0.359	0.644	2
Ca406	0.808	0.610	0.173	0.577	0.000	0.014	0.364	9
Ca424	0.000	0.000	0.040	0.298	0.095	0.000	0.072	12
Ca425	0.413	0.395	0.000	0.498	0.330	0.039	0.279	10
Ca481	0.564	0.395	0.164	0.433	0.823	0.403	0.464	6
Ca727	0.771	0.694	0.466	0.506	0.569	0.576	0.597	4
Ca736	0.677	0.436	0.172	0.527	0.356	0.199	0.394	8
Ca742	0.576	0.445	0.312	0.414	0.498	0.382	0.438	7
Ca1165	1.000	0.928	1.000	1.000	0.137	0.833	0.816	1

表 6 60 mmol·L⁻¹苏打碱胁迫下不同基因型美洲狼尾草种子各相对生长指标的隶属函数值

Table 6 Membership function values of relative growth indices for different genotypes of *P. glaucum* seeds under 60 mmol·L⁻¹ soda-alkali stress

基因型 Genotype	相对发芽势 Relative germination vigor	相对发芽率 Relative germination rate	相对胚根长 Relative root length	相对胚芽长 Relative plumule length	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vigor index	隶属函数平均值 Membership value	排序 Rank
Ca382	1.000	1.000	0.281	0.409	0.332	0.238	0.543	4
Ca396	0.323	0.266	0.519	0.534	0.537	0.604	0.464	6
Ca397	0.091	0.215	0.184	0.000	0.771	0.385	0.274	7
Ca399	0.597	0.466	0.537	0.131	1.000	1.000	0.622	2
Ca406	0.366	0.222	0.164	0.465	0.069	0.052	0.223	9
Ca424	0.000	0.000	0.065	0.144	0.236	0.046	0.082	12
Ca425	0.066	0.033	0.019	0.064	0.429	0.066	0.113	11
Ca481	0.508	0.170	0.118	0.136	0.313	0.105	0.225	8
Ca727	0.924	0.835	0.166	0.274	0.666	0.314	0.530	5
Ca736	0.514	0.173	0.000	0.177	0.251	0.000	0.186	10
Ca742	0.562	0.362	0.691	0.214	0.813	0.680	0.554	3
Ca1165	0.912	0.946	1.000	1.000	0.000	0.309	0.695	1

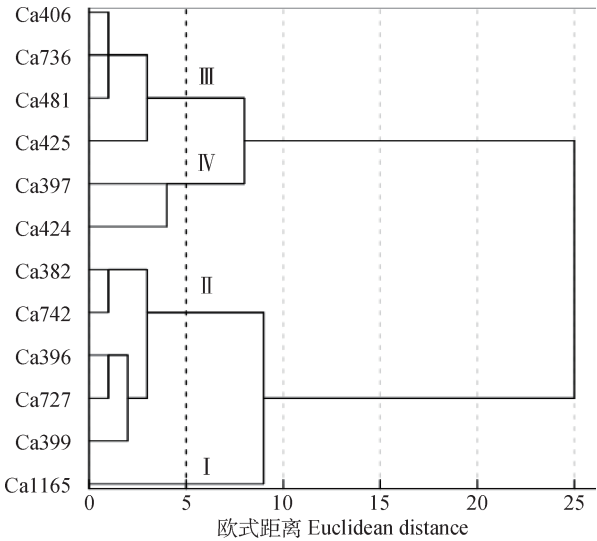


图 1 12 份不同基因型美洲狼尾草种子供试材料耐苏打碱的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of soda-alkali tolerance in 12 genotypes of *P. glaucum*

3 讨论

土壤盐碱化已成为制约世界农业发展的重大环境因素,其中苏打盐碱土比例达 1/3,在盐碱地种植的农作物产量低,甚至不能生长,对农业生产构成严重威胁^[27]。采用耐盐碱植物修复盐碱地,是一种经济、环保、有效的途径。美洲狼尾草是狼尾草属高大禾草,病虫害少、草地管理成本低,具有一定的耐盐碱性,但不同基因型的苏打碱耐性有较大差异,且关于苏打碱对不同来源的美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长的影响研究较少,因此选育耐苏打碱的美洲狼尾草品种对修复和利用盐碱地具有重要意义。

本研究选取 12 份不同来源的美洲狼尾草种子材料,测定其在 40 mmol·L⁻¹和 60 mmol·L⁻¹苏打碱浓度胁迫下的发芽势、发芽率等 6 种指标,并采用

隶属函数和聚类分析进行综合评价。结果表明,40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹苏打碱胁迫处理下所有美洲狼尾草种子供试材料的发芽势和发芽率均呈下降趋势,说明苏打碱胁迫会抑制美洲狼尾草种子的萌发,且抑制作用随苏打碱溶液浓度升高而增强,这与贾秀峰^[28]的研究结果一致。产生这种现象的原因可能是苏打碱胁迫下溶液中的Na⁺浓度过高,导致种子内部渗透势低于外界环境,以致无法吸收水分,抑制了种子的呼吸作用,加上高pH值的影响,可能破坏赤霉素信号转导,使得种子难以萌发,甚至停止萌发^[29]。

此外,本研究还发现,美洲狼尾草的发芽指数和活力指数在40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下相对于对照组都显著下降($P < 0.05$),且活力指数的下降幅度远大于发芽指数;苏打碱胁迫对胚根的抑制作用大于对胚芽的抑制作用,这是由于种子萌发过程中胚根先突破种皮,能够首先感知外界环境的变化,而后传递给叶片^[30],因而根所受到的毒害比茎叶更深,时间更长,此结果与王跳霞等人^[31]研究结果一致。在60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下生长的幼苗尤其缓慢,其中大多数芽苗开始腐烂发黄,这可能是由于高浓度碱性盐胁迫导致根系外环境中的pH值升高,破坏根系的生理功能甚至使根细胞解体,为抵抗高pH对植物自身的影响则需代谢出更多的物质与能量,然而代谢途径已被阻碍^[32]。

多项研究发现,同一种植物的不同基因型的耐盐碱能力有差异^[33],且盐碱胁迫会影响植物的多个生长发育阶段,需使用多项指标评价植物的耐盐碱能力,使得试验结果更加全面准确可信。本试验通过模糊隶属函数法分别对40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫下美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长过程中的6个指标的变化来评价不同基因型种子供试材料的耐苏打碱能力。同时采用聚类分析将12份美洲狼尾草供试材料的耐苏打碱能力进行定性分类,分为耐苏打碱型、中等耐苏打碱型、敏感型和高敏感型四大类,其中耐苏打碱型和中等耐苏打碱型共占比50%。本研究是在实验室内模拟苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子萌发的影响,今后还需在大田试验中进一步验证其耐苏打碱能力,增加幼苗在盐碱土上生长的相关试验,测定相关生长指标和生理生化指标,从而筛选出能够在田间大面积推广应用的耐苏打碱品种,以更好利用盐碱边际土地。

4 结论

40 mmol·L⁻¹和60 mmol·L⁻¹的苏打碱胁迫显著影响了美洲狼尾草种子的萌发特性,12份不同基因型美洲狼尾草种子供试材料的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、胚根长和胚芽长均随苏打碱浓度升高而下降。此外,苏打碱胁迫对于美洲狼尾草种子萌发期间的活力指数和胚根长抑制程度较大,对于发芽势、发芽率的抑制程度相对较小。不同基因型美洲狼尾草的耐苏打碱性存在较大差异,Ca1165, Ca399, Ca727, Ca396, Ca742, Ca382的耐苏打碱胁迫能力较强, Ca425, Ca481, Ca736, Ca406, Ca424, Ca397的耐苏打碱胁迫能力较弱。

参考文献

- [1] 杨春武,李长有,尹红娟,等. 小冰麦(*Triticum aestivum*-*Agropyron intermedium*)对盐胁迫和碱胁迫的生理响应[J]. 作物学报,2007,33(8):1255-1261
YANG C W, LI C Y, YIN H J, et al. Physiological response of xiaobingmai (*Triticum aestivum*-*Agropyron intermedium*) to salt-stress and alkali-stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8):1255-1261
- [2] 岳健敏,任琼,张金池. 植物盐耐机理研究进展[J]. 林业科技开发,2015,29(5):9-13
YUE J M, REN Q, ZHANG J C. Research progress on plant salt tolerance mechanism[J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(5):9-13
- [3] 魏立兴. 外源脱落酸对水稻(*Oryza sativa* L.)盐碱胁迫的诱抗效应及其生理机制[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2015:6
WEI L X. Priming effect and the mechanism of abscisic acid on saline-alkaline stress tolerance in rice (*Oryza Sativa* L.) [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015:6
- [4] 刘建新,王金成,贾海燕. 燕麦幼苗对盐胁迫和碱胁迫的生理响应差异[J]. 水土保持学报,2015,29(5):331-336
LIU J X, WANG J C, JIA H Y. Differences between physiological responses of avena nuda seedlings to salt and alkali stresses [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5):331-336
- [5] 杨春武,李长有,张美丽,等. 盐、碱胁迫下小冰麦体内的pH及离子平衡[J]. 应用生态学报,2008,(5):1000-1005
YANG C W, LI C Y, ZHANG M L, et al. pH and ion balance in wheat-wheatgrass under salt-or alkali stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, (5):1000-1005
- [6] 于婵,张依琳,李秋莹,等. 盐碱胁迫对牛至种子萌发和幼苗生理生化特性的影响[J]. 草地学报,2024,32(6):1882-1892
YU C, ZHAGN Y L, LI Q Y, et al. Effects of saline-alkali stresses on seed germination and seedling physiological and

- biochemical characteristic [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32 (6):1882-1892
- [7] 武伟,田雨,张红香,等. 盐、碱胁迫与温度对黄花苜蓿种子发芽的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(11):1847-1853
WU Y, TIAN Y, ZHANG H X, et al. Effects of salinity, alkalinity, temperature and their interactions on seed germination of *Medicago falcata* [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32 (11): 1847-1853
- [8] 李亮,武洪庆,马朝阳,等. 印度梨形孢促进蒺藜苜蓿生长及其提高耐盐性研究[J]. *微生物学通报*, 2015, 42(8):1492-1500
LI L, WU H Q, MA C Y, et al. Growth promotion and salt tolerance induction by *Piriformospora indica* colonization in *Medicago truncatula* [J]. *Microbiological Bulletin*, 2015, 42 (8): 1492-1500
- [9] 吴振振,张旭龙,马森. 栽培甘草对盐碱地土壤理化性质及微生物功能多样性的影响[J]. *农学学报*, 2016, 6(7):24-29
WU Z Z, ZHANG X L, MA M. Effects of licorice planting on physical, chemical properties and microbial function diversity of saline soil [J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(7):24-29
- [10] 张婷婷,刘宇乐,陈红,等. 不同外源物质对盐、碱及干旱胁迫下草木樨种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(8):122-132
ZHANG T T, LIU Y L, CHEN H, et al. Effects of different exogenous substances on the seed germination, seedling growth, and physiology of *Melilotus suaveolens* under salt, alkali, and drought stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(8):122-132
- [11] 喻望晨,朱依晗,徐倩,等. 镉胁迫对不同繁穗苋种质萌发和生长的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(9):1815-1822
YU W C, ZHU Y H, XU Q, et al. Effect of cadmium stress on seed germination and growth of *Amaranthus cruentus* germplasms from different locations [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(9):1815-1822
- [12] 古丽内尔·亚森,杨瑞瑞,曾幼玲. 混合盐碱胁迫对灰绿藜 (*Chenopodium glaucum* L.) 种子萌发的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(1):76-82
Gulineier·Yasen, YANG R R, ZENG Y L. Effects of salt-alkali mixed stresses on seed germination of the halophyte *Chenopodium glaucum* L. [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(1):76-82
- [13] 沈彦. 盐碱环境胁迫对吸胀萌发期玉米种子SOD活性的影响[J]. *绿色科技*, 2022, 24(13):121-122, 126
SHEN Y. Effect of saline alkali environmental stresses on sod antioxidant enzymes in maize seeds during germination [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(13): 121-122, 126
- [14] 李波,陈雪梅,于海龙,等. 混合盐碱胁迫对苜蓿种子萌发特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(8):221-225
LI B, CHEN X M, YU H L, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on germination characteristics of alfalfa seeds [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(8):221-225
- [15] 陈忠林,张学勇,张绵,等. 碱胁迫对结缕草、高羊茅种子萌发及其胚生长的影响[J]. *种子*, 2010, 29(12):27-30
CHEN Z L, ZHANG X Y, ZHANG M, et al. Effects of alkaline stress on seeds germination and embryo growth of *zoysia japonica* and *festuca arundinacea* [J]. *Seed*, 2010, 29(12):27-30
- [16] 戴凌燕,张立军,张成才. 苏打盐碱胁迫对甜高粱种子萌发的影响及品种耐性综合评价[J]. *种子*, 2011, 30(10):28-32
DAI L Y, ZHANG L J, ZHANG C C. Effect of saline-sodic stress on the sweet sorghum germination and evaluation of salt tolerance on the different varieties [J]. *Seed*, 2011, 30 (10): 28-32
- [17] WANG Z, YOU J, XU X, et al. Physiological and biochemical responses of *Melilotus albus* to saline and alkaline stresses [J]. *Horticulturae*, 2024, 10(3):297
- [18] Gao Z W, Mu Y G, Di J J, et al. The effects of salinity stress on *Amorpha fruticosa* L. seed germination, physiological and biochemical mechanisms [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2024, 52(1):13552-13552
- [19] 聂婷宇,朱依晗,刘霄霏,等. 16份尾穗苋种质萌发期耐镉性综合评价[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(5):66-72
NIE T Y, ZHU Y H, LIU X F, et al. Comprehensive evaluation of cadmium tolerance at germination stage of 16 *amaranthus caudatus* germplasms [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(5):66-72
- [20] 陈新,张宗文,吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(10):2038-2046
CHEN X, ZHANG Z W, WU B. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked oat (*Avena nuda* L.) at germination stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10):2038-2046
- [21] 陈志彤,何水林,黄毅斌. 狼尾草属牧草研究进展[J]. *草地学报*, 2010, 18(5):740-748
CHEN Z T, HE S L, HUANG Y B. Research progress of *pennisetum rich.* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(5):740-748
- [22] 王净洁,阿布都沙拉木,祝诗词,等. 美洲狼尾草CCD基因家族全基因组鉴定及分析[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(3):11-21
WANG J J, Abudushalamu, ZHU S C, et al. Genome-wide identification and analysis of the carotenoid cleavage dioxygenase(ccd) gene family in *Pennisetum glaucum* [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3):11-21
- [23] 钟小仙,白淑娟,顾洪如,等. 美洲狼尾草不育系、恢复系及杂种F₁的RAPD分析[J]. *草业学报*, 2001, 10(3):28-32
ZHONG X X, BAI S J, GU H R, et al. RAPD analysis for male-sterile line, R-line and F₁ hybrid of *Pennisetum americanum* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(3):28-32
- [24] 范欲航,许悦,祝诗词,等. 美洲狼尾草组织培养再生体系的建立[J]. *草地学报*, 2023, 31(1):89-95
FAN Y H, XU Y, ZHU S C, et al. Construction of tissue culture regeneration system of *Pennisetum glaucum* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1):89-95
- [25] 钟小仙,顾洪如,周卫星,等. 美洲狼尾草种质资源遗传多样

- 性聚类分析与综合评价[J]. 江苏农业科学, 2001(5): 63-66
ZHONG X X, GU H R, ZHOU W X, et al. Cluster analysis and comprehensive evaluation on genetic diversity of germplasm resources in *Pennisetum americanum* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2001(5): 63-66
- [26] 覃广泉, 陈平, 苏东海. 盐胁迫对4种禾本科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 205-206, 232
QIN G Q, CHEN, SU D H. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of 4 graminaceous pasture cultivars [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3): 205-206, 232
- [27] 吴凤萍, 韩清芳, 贾志宽. 4个白花苜蓿品系种子萌发期耐盐性研究[J]. 草业科学, 2008, 25(8): 57-62
WU F P, HAN Q F, JIA Z K. Preliminary study on the salt tolerance of four alfalfa lines in seed germination period [J]. Prata-cultural Science, 2008, 25(8): 57-62
- [28] 贾秀峰. 苏打盐碱胁迫对两种苜蓿种子萌发影响及品种耐性综合分析[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1511-1517
JIA X F. Effect of soda salt-alkaline stress on seed germination and salt tolerance evaluation analysis of two *Medicago sativa* varieties [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1511-1517
- [29] 蔺吉祥, 高战武, 王颖, 等. 盐碱胁迫对紫花苜蓿种子发芽的协同影响[J]. 草地学报, 2014, 22(2): 312-318
LIN J X, GAO Z W, WANG Y, et al. Synergistic effects of salt and alkaline stresses on the seed germination of *Medicago sativa* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(2): 312-318
- [30] 王波, 宋凤斌. 燕麦对盐碱胁迫的反应和适应性[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 625-629
WANG B, SONG F B. Physiological responses and adaptive capacity of oats to saline-alkali stress [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 625-629
- [31] 王跳霞. 盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发吸水及萌发特性影响的差异性 [EB/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250313.1326.008.html>, 2025-03-13/2025-04-10
WANG T X. Differential effects of saline and alkaline stress on water uptake and germination characteristics of alfalfa seed germination [EB/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250313.1326.008.html>, 2025-03-13/2025-04-10
- [32] 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及Na⁺、K⁺代谢的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1148-1152
LIN J X, LI X Y, TANG J H, et al. Effects of salt and alkali stresses on seed germination, early seedling growth and the metabolize of Na⁺ and K⁺ in shoots of wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(6): 1148-1152
- [33] 张金东, 王成, 卢环, 等. 盐碱胁迫下不同基因型绿豆对外源BR的响应[J]. 作物杂志, 2025, (5): 54-60
ZHANG J D, WANG C, LU H, et al. Response of mung bean genotypes to exogenous brassinosteroids under saline-alkali stress [J]. Crops, 2025, (5): 54-60

(责任编辑 付 宸)