网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.001

52份紫花苜蓿种质资源苗期耐盐碱性评价

王晓彤,马永龙,杨金辉,余冬雯,童玉花,李淑霞
(宁夏大学 林业与草业学院,宁夏 银川 750021)

[摘 要] 【目的】探究52份紫花苜蓿种质资源苗期耐盐碱性的差异,并筛选关键评价指标。【方法】对175 mmol/L盐碱胁迫(NaCl与Na_2SO_4物质的量比为9∶4),利用$NaHCO_3$调节pH为8.3)下52个紫花苜蓿种质资源的11个生长及生理指标进行测定,通过变异分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和逐步回归分析,综合评价52份紫花苜蓿种质资源苗期的耐盐碱性,并筛选关键评价指标。【结果】盐碱胁迫对紫花苜蓿各生长及生理指标影响显著,并且不同种质资源间存在较大差异。苗期各指标变异系数为7.30%~21.90%,其中干质量变异最大(21.90%),光系统Ⅱ最大光化学量子产量(F_v/F_m)变异最小(7.30%)。相关性分析显示,株高与茎粗、节数、叶面积、鲜质量呈极显著正相关($P<0.01$),鲜质量与干质量正相关性最强($r=0.842$),而相对电导率与F_v/F_m呈极显著负相关($r=-0.508$)。主成分分析提取到7个主成分(累计方差贡献率88.546%),其中株高、茎粗等形态指标及F_v/F_m等生理指标贡献突出。根据隶属函数和综合评价值(D)排序,通过聚类分析将52份种质资源分为5个耐盐碱等级,其中强耐盐碱品种2个,不耐盐碱品种1个。【结论】罗马尼亚和贝多叶为强耐盐碱品种;茎粗、干质量、F_v/F_m、株高、相对电导率、分枝数、鲜质量和SPAD等8个指标是评价紫花苜蓿苗期耐盐碱性的关键指标。

[关键词] 紫花苜蓿;耐盐碱性;种质筛选;隶属函数法;聚类分析
[中图分类号] S541+.14 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0001-10

Evaluation of salt-alkali tolerance in seedling stage of 52 alfalfa germplasm resources

WANG Xiaotong, MA Yonglong, YANG Jinhui, YU Dongwen,
TONG Yuhua, LI Shuxia
(*School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the variation in salt-alkali tolerance and select key evaluation indicators among 52 alfalfa germplasm resources at the seedling stage. 【Method】 Eleven growth and physiological indices of 52 alfalfa germplasm resources were measured under 175 mmol/L salt-alkali stress (molar ratio of NaCl∶Na_2SO_4=9∶4, with pH adjusted to 8.3 by $NaHCO_3$). The salt-alkali tolerance of these germplasms at the seedling stage was comprehensively evaluated using variation analysis, correlation analysis, principal component analysis, membership function analysis, and stepwise regression analysis, aiming to identify key evaluation indicators. 【Result】 Salt-alkali stress significantly affected the growth and physiological indices of alfalfa, and considerable variation was observed among different germplasm resources. Variation analysis of seedling indices showed that the coefficients of variation ranged from 7.30% to 21.90%, with dry weight exhibiting the highest variation (21.90%) and maximum photochemical quantum yield of photosystem Ⅱ (F_v/F_m) sho-

[收稿日期] 2025-10-27 [修回日期] 2025-12-15
[基金项目] 国家自然科学基金项目(U24A20426)
[作者简介] 王晓彤(2000-),女,辽宁盖州人,在读博士,主要从事牧草育种与栽培利用研究。E-mail:wxt2111511775@163.com
[通信作者] 李淑霞(1992-),女,甘肃会宁人,副教授,博士,博士生导师,主要从事牧草育种与栽培利用研究。
E-mail:Lishuxia620@163.com

wing the lowest (7.30%). Correlation analysis revealed that plant height was significantly and positively correlated with stem diameter, node number, leaf area, and fresh weight ($P<0.01$). The strongest positive correlation was found between fresh weight and dry weight ($r=0.842$), while relative electrical conductivity showed a highly significant negative correlation with F_v/F_m ($r=-0.508$). Principal component analysis extracted seven principal components with a cumulative contribution ratio of 88.546%, among which morphological indices such as plant height and stem diameter, as well as physiological indices including F_v/F_m, made prominent contributions. Based on the membership function values and *D*-value ranking, cluster analysis classified the 52 germplasm resources into five salt-alkali tolerance grades, including two with high tolerance and one susceptible type. 【Conclusion】 Romania and Beiduoye were identified as highly salt-alkali tolerant cultivars. Through comprehensive evaluation combined with stepwise regression analysis, stem diameter, dry weight, F_v/F_m, plant height, relative electrical conductivity, branch number, fresh weight, and SPAD were identified as key for evaluating salt-alkali tolerance in alfalfa at the seedling stage.

Key words: alfalfa; saline-alkali tolerance; germplasm screening; membership function method; cluster analysis

盐碱地是全球农业可持续发展的主要障碍之一,世界盐碱地面积占陆地面积的6%,我国各类盐碱地面积之和大约为1亿hm^2,主要分布在北方干旱半干旱地区[1-2]。盐碱地分为以硫酸盐-氯化物为主的盐土、含有苏打的苏打盐土和pH>9、碱化度大于30%的碱土[3-4]。水文地质、气候、地形和植被等原因使易溶于水的盐在土壤表层聚集,导致土壤含盐量高于正常水平,这是盐碱地形成的自然因素;人类不合理的灌溉与自然资源的不合理利用使得土壤盐碱化是次生盐碱地形成的重要原因[5-6]。随着全球人口的增加,为了解决人多地少导致的粮食不足问题,合理利用盐碱化土地是非常必要的。但是盐碱混合胁迫引起的渗透胁迫、氧化胁迫、离子毒性和高pH值胁迫会破坏植物的细胞膜结构,使酶活性丧失,从而引起植物细胞中的离子失衡和代谢紊乱[7-9]。因此,筛选耐盐碱作物对培育耐盐碱品种和盐碱地的改良利用具有重要的意义。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)被誉为"牧草之王",蛋白含量高,适口性好,是家畜喜食的优质豆科牧草,也可作为生态修复草,兼具经济效益与环境效益[10]。紫花苜蓿的种植区域主要为干旱和半干旱地区,也是盐碱地分布区,虽然紫花苜蓿具有一定的耐盐碱能力,但日益加剧的土壤盐碱化严重影响了紫花苜蓿的生长发育及生理调控过程,降低了其产量和品质[11]。在萌发期,盐碱胁迫会使紫花苜蓿种子吸水困难从而引起生理性干旱,细胞膜透性改变,造成离子堆积烧伤种子从而导致种子停止萌发[12];在幼苗期,盐碱胁迫可显著降低紫花苜蓿的生长指标,造成渗透胁迫和氧化胁迫损伤,同时Na^+过度积累造成离子毒害[13]。有研究用100 mmol/L硫酸钠盐碱溶液对4种紫花苜蓿种子进行胁迫,结果发现WL343HQ品种的抗盐碱能力最强[14];高荣等[15]用75 mmol/L Na_2CO_3-$NaHCO_3$(Na_2CO_3与$NaHCO_3$物质的量比=1∶2)对5种紫花苜蓿进行盐碱胁迫,结果发现Magna-salt品种苗期耐盐碱能力最强;崔禄[16]采用m(NaCl)∶m($NaHCO_3$)∶m(Na_2SO_4)∶m(Na_2CO_3)=1∶9∶9∶1的混合盐碱溶液对23种苜蓿进行盐碱胁迫处理,结果发现新牧一号的耐盐碱性最强,阿尔冈金的耐盐碱性最弱。尽管紫花苜蓿的耐盐碱特性已有不少研究报道,但目前关于紫花苜蓿种质资源对复合盐碱胁迫的响应差异和耐盐碱性综合评价还不够全面。因此,本研究结合宁夏地区盐碱土地类型,以175 mmol/L NaCl-Na_2SO_4模拟盐碱胁迫,对52份紫花苜蓿种质资源进行处理,测定其生长指标与生理指标,利用相关性分析、主成分分析、聚类分析和逐步回归分析等方法,综合评价了紫花苜蓿苗期的耐盐碱性,并筛选了评价的关键指标,旨在为后续种质资源的合理利用、抗性基因挖掘和耐盐碱品种的培育提供重要的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

52份紫花苜蓿种质资源均由宁夏大学林业与草业学院种子库保存。其中,三得利来自北京百绿种业有限公司;贝多叶、金星、青塔、冰峰、泰山,来自北京赤锐达生态科技有限公司;中苜2号和中苜3号,来自北京畜牧兽医研究所;先行者,来自北京正

道种业有限公司；赤峰（地方种质资源）和扶风（地方种质资源）来自宁夏大学；渭南（地方种质资源）、罗马尼亚、拉达克、甘农6号、波兰、土库曼、甘农2号、东德、甘农8号、荷兰向阳、罗佑码、澳大利亚、礼县（地方种质资源）、雷纳伊、陕北子州、陕北（地方种质资源）和加拿大，来自甘肃农业大学；甘农5号，来自甘肃省农业科学院；阿尔冈金、雷达克之星、皇冠、金皇后、巨能6、巨能7、MF4020、耐盐之星、牧歌37CR和维多利亚，来自克劳沃生态科技有限公司；草原3号，来自内蒙古农业大学；康赛、骑士2和阿迪娜，来自宁夏草原站；中苜4号、赛沃5、牧歌耐盐和威龙，来自宁夏西贝农林牧生态科技有限公司；路特斯、秘鲁、印第安、伊犁（地方种质资源）和安斯塔，来自中国农科院草原研究所。

1.2　试验方法

基于前期预试验结果，本试验用175 mmo/L NaCl-Na_2SO_4（NaCl与Na_2SO_4物质的量比=9∶4），利用$NaHCO_3$调节pH为8.3）模拟盐碱胁迫，对苗期紫花苜蓿进行胁迫处理。选取饱满的紫花苜蓿种子，首先用75%（体积分数）的酒精消毒15 s，蒸馏水冲洗干净后再用5%（体积分数）的次氯酸钠溶液消毒6 min，用蒸馏水冲洗直至无味后均匀地点播在培养皿中，于4 ℃冰箱中倒置春化2 d，然后放于人工气候培养箱（昼/夜温度25 ℃/20 ℃，相对湿度60%，光照/黑暗时间16 h/8 h，光照强度5 000 lx）中倒置生长2 d。将发芽一致的种子去除种皮后移栽到蛭石中，其间浇灌霍格兰营养液，待其生长至30 d时开始进行盐碱处理，为了防止应激，第1天用50 mmol/L的盐碱胁迫，第2天用100 mmol/L的盐碱胁迫，第3天进行175 mmol/L盐碱胁迫处理，共计处理30 d，每份种质资源选取生长一致的植株进行指标测定。

1.3　指标测定

形态及生长指标测定：利用卷尺测量株高（plant height，PH），用游标卡尺测量茎粗（stem thickness，ST），利用叶面积仪测量叶面积（leaf area，LA）；使用万分之一分析天平称量52份紫花苜蓿地上部分的鲜质量（fresh weight，FW）；测量后将地上部分分别放入烘箱中，105 ℃杀青30 min，65 ℃烘干至恒质量，然后测量干质量（dry weight，DW），计算每份种质资源的相对含水量（relative water content，RWC）。对每份种质资源的节数（number of nodes，NN）和分枝数（number of branches，NB）进行记录。

生理指标测定：称取0.2 g叶片，剪碎后放入20 mL蒸馏水中过夜，利用电导率仪测量初始电导率（C_1），随后将其放入沸水浴锅中煮沸30 min测量煮沸后的电导率（C_2），计算相对电导率（relative electrical conductivity，REC）：$REC=C_1/C_2\times100\%$。将紫花苜蓿植株在黑暗处放置30 min，随后利用叶绿素荧光成像系统捕捉光合系统Ⅱ（PSⅡ）的最大量子产量（F_v/F_m）。利用手持叶绿素仪测量叶绿素含量（SPAD）。

1.4　数据分析

使用Excel 365软件对数据进行整理，使用SPSS 24进行分析。根据以下公式计算52份紫花苜蓿种质资源耐盐碱性的综合评价值（D），并结合聚类分析与逐步回归分析对紫花苜蓿种质资源的耐盐碱性进行归类，并筛选关键耐盐碱性指标。

（1）隶属函数值：

$$u(X_j)=\frac{(X_j-X_{min})}{(X_{max}-X_{min})}。$$

（2）各综合指标权重：

$$W_j=\frac{V_j}{\sum_{j=1}^{m}V_j}。$$

（3）综合评价值：

$$D=\sum_{i=1}^{n}[u(X_j)\times W_j]。$$

式中：$u(X_j)$为各指标隶属函数值，X_j为指标相对值，X_{max}和X_{min}为所有参试种质资源某一指标的最大值和最小值，W_j为第j个指标占所有指标的权重，V_j表示各种质资源第j个指标的贡献率，D表示在盐胁迫下各种质资源耐盐能力的综合评价值。

2　结果与分析

2.1　盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各指标变异分析

由表1可知，52种紫花苜蓿的株高为18.44～38.82 cm，平均为29.03 cm，变异系数为16.20%；茎粗为0.46～1.86 mm，平均为1.11 mm，变异系数为21.20%；节数为7.40～11.20节/株，平均为9.45节/株，变异系数为9.80%；分枝数为3.00～4.80枝/株，平均为3.81枝/株，变异系数为11.90%；叶面积为96.20～298.00 mm^2/片，平均为186.08 mm^2/片，变异系数为18.50%；鲜质量为1.30～3.28 g/株，平均为2.27 g/株，变异系数为18.70%；干质量为0.29～0.86 g/株，平均为0.60 g/株，变异

系数为21.90%;相对含水量为62%~89%,平均为76%,变异系数为7.80%;相对电导率为41%~92%,平均为66%,变异系数为18.10%;F_v/F_m为0.61~0.82,平均为0.71,变异系数为7.30%;SPAD为36.38~72.22,平均为60.07,变异系数为12.70%。11个指标的变异系数在7.30%~21.90%,其中F_v/F_m的变异系数最小(7.30%),干质量的变异系数最大(21.90%),表明盐碱胁迫处理对紫花苜蓿苗期各个指标产生的影响差异较大。

表1 盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各指标统计和变异分析

Table 1 Indices and their variation of alfalfa in seedling stage under saline-alkali stress

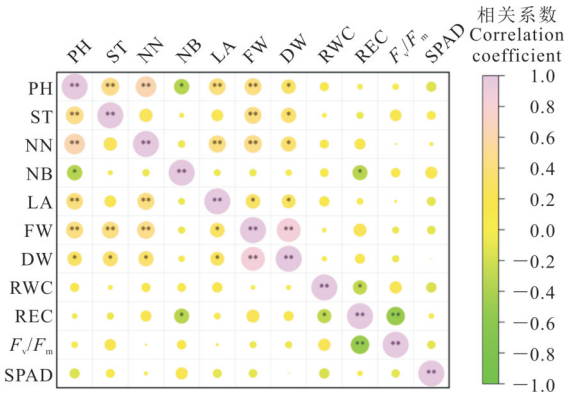
指标 Index	最大值 Maximum value	最小值 Minimumvalue	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
PH/cm	38.82	18.44	29.03	4.69	16.20
ST/mm	1.86	0.46	1.11	0.24	21.20
NN/(节·株$^{-1}$)	11.20	7.40	9.45	0.92	9.80
NB/(枝·株$^{-1}$)	4.80	3.00	3.81	0.45	11.90
LA/(mm^2·片$^{-1}$)	298.00	96.20	186.08	34.36	18.50
FW/(g·株$^{-1}$)	3.28	1.30	2.27	0.43	18.70
DW/(g·株$^{-1}$)	0.86	0.29	0.60	0.13	21.90
RWC/%	89.00	62.00	76.00	6.00	7.80
REC/%	92.00	41.00	66.00	12.00	18.10
F_v/F_m	0.82	0.61	0.71	0.05	7.30
SPAD	72.22	36.38	60.07	7.62	12.70

注:PH. 株高;ST. 茎粗;NN. 节数;NB. 分枝数;LA. 叶面积;FW. 鲜质量;DW. 干质量;RWC. 相对含水量;REC. 相对电导率;F_v/F_m. 光系统Ⅱ最大光化学量子产量;SPAD. 手持叶绿素仪测定的紫花苜蓿叶片叶绿素值。图1与表2同。

Note: PH. Plant height; ST. Stem diameter; NN. Number of nodes; NB. Number of branches; LA. Leaf area; FW. Fresh weight; DW. Dry weight; RWC. Relative water content; REC. Relative electrical conductivity; F_v/F_m. Optimal/maximal photochemical efficiency of PSⅡ in the dark; SPAD. Chlorophyll reading of alfalfa leaves measured by a handheld chlorophyll meter. The same as in Fig. 1 and Table 2.

2.2 盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各指标相关性分析

对盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期的11个指标进行相关性分析,结果见图1。



*代表显著相关($P<0.05$),**代表极显著相关($P<0.01$)。

The star marker * indicates significant correlation ($P<0.05$). The double star marker ** indicates highly significant correlation ($P<0.01$).

图1 盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各指标相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of indices of alfalfa in seedling stage under saline-alkali stress

由图1可知,株高与茎粗、节数、叶面积、鲜质量和干质量正相关,其中与茎粗、节数、叶面积、鲜质量的相关性达到极显著水平($P<0.01$),与干质量的相关性达显著水平($P<0.05$)。茎粗与干质量显著正相关($P<0.05$),与鲜质量极显著正相关($P<0.01$);节数与干质量显著正相关($P<0.05$),与叶面积和鲜质量极显著正相关($P<0.01$);分枝数与相对电导率显著负相关($P<0.05$);叶面积与鲜质量和干质量显著正相关($P<0.05$);鲜质量与干质量极显著正相关($P<0.01$);相对含水量与相对电导率显著负相关($P<0.05$);相对电导率与F_v/F_m极显著负相关($P<0.01$)。鲜质量与干质量的正相关系数最大(0.842),相对电导率与F_v/F_m的负相关系数最大(−0.508)。结果表明,盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各个指标之间存在一定的相关性,无法利用单独指标判断紫花苜蓿的耐盐碱性。

2.3 盐碱胁迫下紫花苜蓿苗期各指标主成分分析

以累计方差贡献率超过85%为标准,对盐碱胁迫下的紫花苜蓿苗期11个指标进行主成分(principal component,PC)分析,结果见表2。由表2可知,试验提取到PC1~PC7共7个主成分,其贡献率依次为28.889%,17.443%,12.463%,9.584%,8.667%,

6.158%和5.343%，累计贡献率达到88.546%。由表2可以看出，PC1中株高、茎粗、节数、叶面积、鲜质量和干质量的载荷系数较高，PC2中相对含水量和F_v/F_m的载荷系数较高，PC3中分枝数和SPAD的载荷系数较高，PC4中茎粗和SPAD的载荷系数较高，PC5中节数和叶面积的载荷系数较高，PC6中相对含水量的载荷系数较高，PC7中节数的载荷系数较高。

表2　紫花苜蓿苗期各指标的主成分分析

Table 2　Principal component analysis of indices of alfalfa in seedling stage

指标 Index	主成分1 PC 1	主成分2 PC 2	主成分3 PC 3	主成分4 PC 4	主成分5 PC 5	主成分6 PC 6	主成分7 PC 7
PH	0.770	0.154	−0.325	0.318	0.063	0.032	0.086
ST	0.584	0.254	0.233	0.464	−0.257	0.117	−0.340
NN	0.740	0.020	−0.064	0.112	0.416	−0.050	0.455
NB	−0.226	0.391	0.682	−0.303	0.228	−0.230	0.085
LA	0.595	0.093	−0.171	−0.146	0.448	−0.409	−0.416
FW	0.831	−0.115	0.262	−0.253	−0.287	0.046	0.065
DW	0.727	−0.070	0.422	−0.335	−0.266	0.031	0.012
RWC	0.127	0.581	−0.186	−0.399	0.285	0.591	−0.091
REC	0.209	−0.834	−0.042	−0.072	0.065	0.097	0.067
F_v/F_m	−0.022	0.766	−0.053	0.190	−0.256	−0.173	0.240
SPAD	−0.114	−0.129	0.659	0.492	0.391	0.222	−0.026
特征值 Eigenvalue	3.178	1.919	1.371	1.054	0.953	0.677	0.588
方差贡献率/% Contribution rate	28.889	17.443	12.463	9.584	8.667	6.158	5.343
累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	28.889	46.332	58.795	68.379	77.045	83.204	88.546

2.4　紫花苜蓿苗期耐盐碱性综合评价

根据主成分分析的结果，进一步计算52份紫花苜蓿种质资源PC1～PC7的隶属函数值，进而计算D值，结果如表3所示。由表3可知，52份紫花苜蓿种质资源的D值为0.332～0.845。D值越大，表明紫花苜蓿种质资源的耐盐碱性越强，根据D值大小对52份紫花苜蓿种质资源的耐盐碱性进行排名和分级，结果表明，耐盐碱性强的前5个种质资源分别为罗马尼亚（D值为0.845）、贝多叶（D值为0.784）、康赛（D值为0.720）、中苜4号（D值为0.708）和巨能6号（D值为0.676）；最不耐盐碱的种质资源为加拿大（D值为0.332），其次是耐盐之星（D值为0.409）、扶风（D值为0.420）、安斯塔（D值为0.430）和牧歌37CR（D值为0.434）。

表3　52份紫花苜蓿种质资源苗期耐盐碱性综合评价

Table 3　Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance of 52 alfalfa germplasm resources in seedling stage

种质资源编号 NO. of germplasm resources	种质资源名称 Name of germplasm resources	隶属函数值 Membership function value							D值 D-value	排名 Rank
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7		
1	罗马尼亚 Romania	0.957	0.938	0.712	1.000	0.878	0.564	0.241	0.845	1
2	贝多叶 Beiduoye	0.826	1.000	0.662	0.538	0.931	0.695	0.440	0.784	2
3	康赛 Kangsai	0.930	0.825	0.753	0.344	0.679	0.259	0.447	0.720	3
4	中苜4号 Zhongmu No. 4	0.587	0.875	0.893	0.714	0.521	0.565	0.852	0.708	4
5	巨能6 Juneng 6	0.856	0.613	0.301	0.489	0.860	0.615	0.891	0.676	5
6	印第安 Indian	0.816	0.805	0.711	0.413	0.420	0.152	0.819	0.670	6
7	甘农6号 Gannong No. 6	0.850	0.357	0.835	0.722	0.537	0.549	0.507	0.665	7
8	土库曼 Turkmenistan	0.862	0.552	0.524	0.417	0.716	0.697	0.621	0.665	8
9	拉达克 Ladakh	0.942	0.212	0.825	0.309	0.860	0.680	0.428	0.656	9
10	骑士2 Knight 2	0.786	0.591	0.436	0.617	0.824	0.367	0.571	0.641	10
11	草原3号 Grassland No. 3	0.771	0.420	0.791	0.439	0.759	0.517	0.527	0.635	11
12	礼县 Lixian	0.559	0.520	0.628	0.905	1.000	0.388	0.618	0.633	12
13	渭南 Weinan	1.000	0.070	0.644	0.797	0.800	0.388	0.116	0.630	13
14	甘农2号 Gannong No. 2	0.789	0.274	0.694	0.496	0.894	0.601	0.518	0.623	14

表3(续) Table 3(continued)

种质资源编号 NO. of germplasm resources	种质资源名称 Name of germplasm resources	隶属函数值 Membership function value							D值 D-value	排名 Rank
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7		
15	波兰 Poland	0.761	0.382	0.746	0.545	0.832	0.525	0.294	0.623	15
16	甘农8号 Gannong No. 8	0.728	0.622	0.719	0.387	0.696	0.363	0.330	0.616	16
17	阿尔冈金 Algonquin	0.828	0.613	0.639	0.392	0.564	0.297	0.259	0.615	17
18	路特斯 Lotus	0.816	0.338	0.544	0.646	0.851	0.335	0.392	0.610	18
19	维多利亚 Victoria	0.602	0.821	0.524	0.776	0.780	0.000	0.162	0.602	19
20	先行者 Pioneer	0.943	0.321	0.283	0.260	0.792	0.578	0.691	0.598	20
21	青塔 Qingta	0.693	0.629	0.411	0.135	0.851	0.484	0.972	0.597	21
22	中苜2号 Zhongmu No. 2	0.950	0.270	0.588	0.615	0.000	1.000	0.239	0.597	22
23	中苜3号 Zhongmu No. 3	0.714	0.369	0.354	0.861	0.760	0.385	0.622	0.588	23
24	阿迪娜 Adina	0.633	0.728	0.416	0.559	0.552	0.530	0.407	0.584	24
25	罗佑码 Luoyouma	0.718	0.630	0.683	0.386	0.530	0.090	0.378	0.577	25
26	MF4020	0.674	0.672	0.437	0.390	0.532	0.302	0.580	0.564	26
27	秘鲁 Peru	0.577	0.276	1.000	0.316	0.723	0.707	0.318	0.557	27
28	陕北子州 Northern Shaanxi Zizhou	0.444	0.528	1.000	0.358	0.586	0.498	0.569	0.555	28
29	赤峰 Chifeng	0.725	0.180	0.961	0.165	0.828	0.456	0.227	0.552	29
30	金星 Venus	0.963	0.457	0.028	0.587	0.400	0.249	0.344	0.549	30
31	冰峰 Ice Peak	0.603	0.940	0.061	0.393	0.522	0.753	0.165	0.546	31
32	陕北 Northern Shaanxi	0.367	0.461	0.624	0.961	0.569	0.575	0.581	0.534	32
33	皇冠 Crown	0.844	0.502	0.539	0.360	0.047	0.224	0.337	0.529	33
34	牧歌耐盐 Muge Salt Tolerant	0.695	0.287	0.424	0.552	0.760	0.322	0.473	0.528	34
35	澳大利亚 Australia	0.733	0.205	0.408	0.575	0.433	0.316	1.000	0.524	35
36	甘农5号 Gannong No. 5	0.515	0.412	0.628	0.593	0.644	0.301	0.475	0.514	36
37	雷达克之星 Radac Star	0.753	0.102	0.410	0.457	0.902	0.305	0.321	0.502	37
38	金皇后 Golden Empress	0.763	0.036	0.424	0.528	0.684	0.199	0.683	0.495	38
39	巨能7 Juneng 7	0.688	0.095	0.529	0.281	0.807	0.557	0.445	0.493	39
40	赛沃5 Saivo 5	0.697	0.240	0.227	0.606	0.947	0.275	0.000	0.485	40
41	荷兰向阳 Netherlands Sunny	0.741	0.196	0.437	0.314	0.534	0.373	0.499	0.484	41
42	威龙 Weilong	0.405	0.727	0.451	0.218	0.731	0.253	0.484	0.480	42
43	东德 East Germany	0.771	0.000	0.224	0.638	0.621	0.330	0.643	0.475	43
44	伊犁 Yili	0.454	0.438	0.840	0.324	0.486	0.293	0.202	0.468	44
45	三得利 Sandeti	0.404	0.469	0.224	0.347	0.958	0.553	0.655	0.465	45
46	雷纳伊 Lenaiyi	0.552	0.248	0.446	0.660	0.362	0.527	0.260	0.452	46
47	泰山 Taishan	0.496	0.606	0.353	0.000	0.777	0.399	0.143	0.443	47
48	牧歌37CR Muge 37CR	0.341	0.344	0.628	0.513	0.768	0.460	0.061	0.434	48
49	安斯塔 Ansta	0.271	0.738	0.000	0.553	0.690	0.767	0.256	0.430	49
50	扶风 Fufeng	0.203	0.421	0.717	0.629	0.644	0.305	0.278	0.420	50
51	耐盐之星 Salt tolerant star	0.482	0.225	0.258	0.476	0.552	0.661	0.308	0.409	51
52	加拿大 Canada	0.000	0.102	0.732	0.630	0.551	0.463	0.891	0.332	52

2.5 紫花苜蓿苗期耐盐碱性聚类分析

通过系统聚类分析方法,在欧氏距离为3.0处,可以将52份紫花苜蓿种质资源分为5个耐盐碱级别,结合耐盐碱性D值排序结果,第1级别为强耐盐碱级别,包括2份种质资源,分别为罗马尼亚和贝多叶;第2级别为较强耐盐碱级别,包括7份种质资源,分别为康赛、中苜4号、巨能6、印第安、甘农6号、土库曼和拉达克;第3级别为中等耐盐碱级别,包括27份种质资源;第4级别为弱耐盐碱级别,包括15份种质资源;第5级别为不耐盐碱级别,共1份种质资源,为加拿大(图2)。同时根据D值的大小结合聚类分析结果,将52份紫花苜蓿种质资源划分成5个耐盐碱等级,D值在0.784~0.845的种质资源为强耐盐碱品种,在0.656~0.720的为较强耐盐碱品种,在0.514~0.641的为中等耐盐碱品种,在0.409~0.502的为弱耐盐碱品种,$D\leqslant 0.332$的为不耐盐碱品种。

2.6 逐步回归分析

以D值作为因变量,将各个种质资源的指标平均值归一化处理后作为自变量,采用逐步回归分析进一步探究各指标与耐盐碱性的关系,根据$R^2>0.9$和P值无限接近于0,建立最优回归方程:$D=$

$0.246+0.222X_1+0.103X_2+0.111X_3+0.079X_4-0.092X_5+0.055X_6+0.118X_7+0.034X_8$（$R^2=0.990$，$F=610.958$，$P=0.000$），式中$X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$、$X_5$、$X_6$、$X_7$、$X_8$分别代表茎粗、干质量、$F_v/F_m$、株高、相对电导率、分枝数、鲜质量和SPAD，表明这8个指标对紫花苜蓿种质资源的耐盐碱性影响显著。接着利用最优回归方程计算52份种质资源各自的回归D值，结果见表4。由表4可以看出，回归方程计算的回归D值在0.379～0.809，拟合误差在0.000～0.023，估计精度平均为0.987，证明逐步回归分析能准确地描述各指标与D值间的关系，实现精准预测。结果表明，茎粗、干质量、F_v/F_m、株高、相对电导率、分枝数、鲜质量和SPAD等8个指标可作为评价紫花苜蓿种质资源耐盐碱性的关键指标。

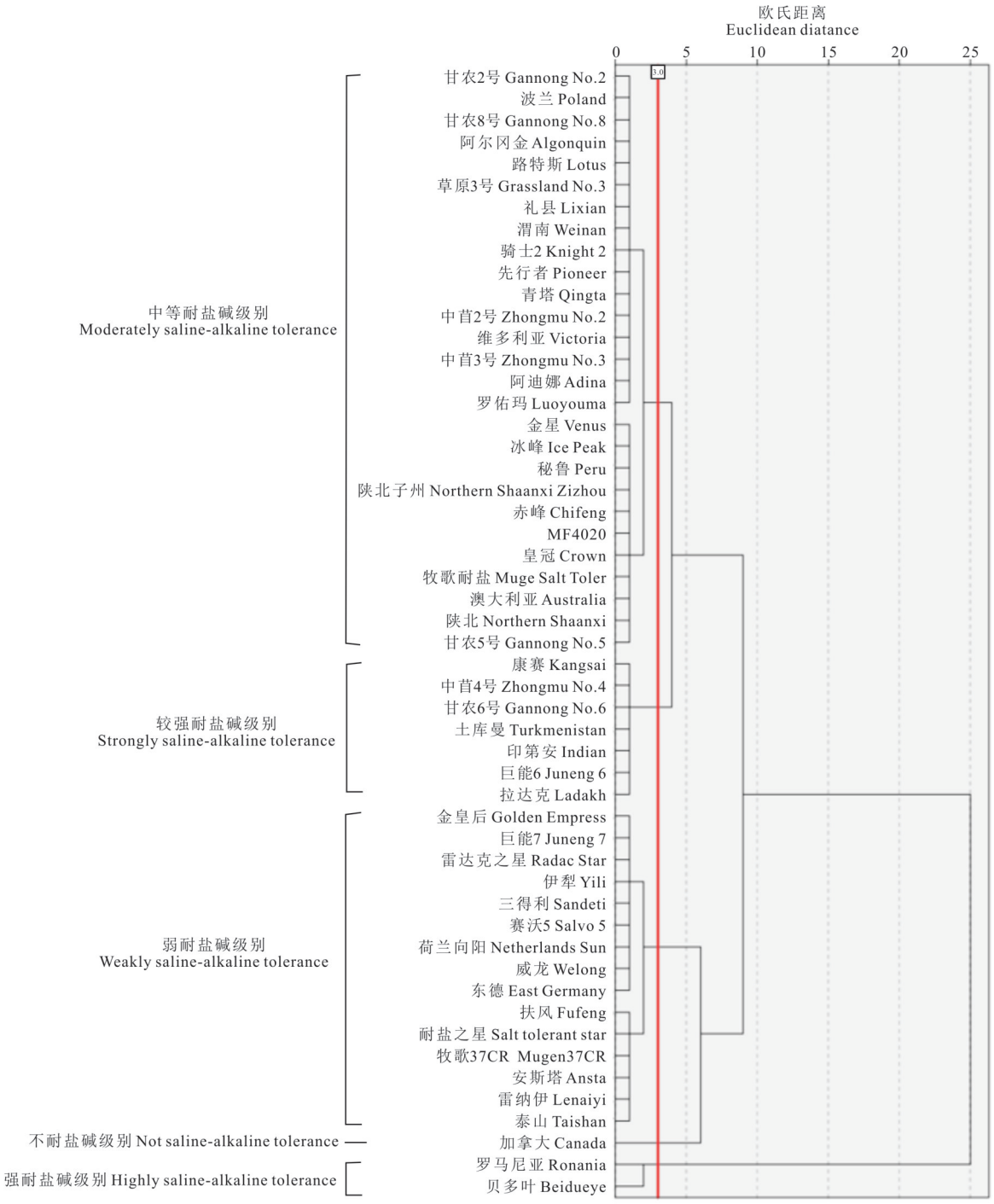


图2　52份紫花苜蓿种质资源耐盐碱性系统聚类图

Fig. 2　Hierarchical clustering dendrogram of saline-alkaline tolerance in 52 alfalfa germplasm resources

表4 52份紫花苜蓿种质资源耐盐碱性回归方程的估计精度分析

Table 4 Analysis of estimation accuracy of regression equations for saline-alkali tolerance in 52 alfalfa germplasm resources

种质资源编号 NO. of germplasm resources	D值 D-value	回归D值 Regression D-value	拟合误差 Fitting error	估计精度 Evaluation accuracy	种质资源编号 NO. of germplasm resources	D值 D-value	回归D值 Regression D-value	拟合误差 Fitting error	估计精度 Evaluation accuracy
1	0.845	0.809	0.015	0.983	27	0.557	0.563	0.009	0.983
2	0.784	0.754	0.000	0.999	28	0.555	0.548	0.004	0.993
3	0.720	0.728	0.006	0.992	29	0.552	0.523	0.001	0.999
4	0.708	0.682	0.012	0.983	30	0.549	0.540	0.001	0.999
5	0.676	0.660	0.008	0.989	31	0.546	0.565	0.023	0.959
6	0.670	0.650	0.016	0.977	32	0.534	0.520	0.001	0.997
7	0.665	0.742	0.002	0.997	33	0.529	0.529	0.007	0.986
8	0.665	0.645	0.008	0.987	34	0.528	0.488	0.007	0.987
9	0.656	0.696	0.006	0.991	35	0.524	0.502	0.021	0.961
10	0.641	0.641	0.009	0.986	36	0.514	0.492	0.001	0.998
11	0.635	0.650	0.000	0.999	37	0.502	0.486	0.008	0.985
12	0.633	0.638	0.001	0.999	38	0.495	0.463	0.011	0.979
13	0.630	0.655	0.009	0.986	39	0.493	0.491	0.002	0.997
14	0.623	0.575	0.006	0.991	40	0.485	0.483	0.004	0.991
15	0.623	0.607	0.004	0.993	41	0.484	0.508	0.002	0.997
16	0.616	0.635	0.003	0.995	42	0.480	0.484	0.007	0.987
17	0.615	0.636	0.002	0.996	43	0.475	0.484	0.008	0.984
18	0.610	0.620	0.002	0.998	44	0.468	0.517	0.008	0.984
19	0.602	0.599	0.001	0.999	45	0.465	0.457	0.007	0.986
20	0.598	0.602	0.000	0.999	46	0.452	0.445	0.008	0.982
21	0.597	0.588	0.016	0.973	47	0.443	0.451	0.009	0.980
22	0.597	0.630	0.021	0.966	48	0.434	0.447	0.005	0.989
23	0.588	0.533	0.008	0.987	49	0.430	0.459	0.019	0.956
24	0.584	0.605	0.001	0.999	50	0.420	0.416	0.001	0.999
25	0.577	0.582	0.009	0.985	51	0.409	0.442	0.016	0.963
26	0.564	0.554	0.005	0.992	52	0.332	0.379	0.007	0.980

注:编号对应的种质资源名称同表3。

Note: Codes for germplasm resource names are given as in table 3.

3 讨 论

紫花苜蓿是多年生豆科牧草,其优势众多,不仅生态适应性强,而且营养价值高、适口性好,同时还具备固氮能力,是畜牧业优质饲料来源,目前已得到广泛栽培,但紫花苜蓿的产量和质量受到一系列因素的影响,包括各种非生物胁迫等外部环境因素[17]。盐胁迫和碱胁迫在自然界中经常同时发生,盐碱胁迫会造成紫花苜蓿离子毒害、渗透胁迫以及抗氧化系统损伤,但目前大多数研究停留在盐或碱单一胁迫上,关于高盐与高pH伴随的盐碱混合胁迫对紫花苜蓿生长发育和品质影响的研究较少[7]。紫花苜蓿是一种具有复杂的基因组和自交不亲和性的多年生杂交豆科植物,难以获得纯合自交系,对其进行耐盐碱性综合评价并筛选关键评价指标,可为耐盐碱苜蓿品种的选育及推广应用提供科学的理论依据和实践指导[17-18]。

植物的外部形态和生长状况是其是否具有耐盐碱性最直观的表现,例如生物量以及地上部形态。混合盐碱胁迫下,植物株高、叶片数、茎长及地上部分干质量等均有所下降[19],本研究也有类似的发现。对苗期各指标的变异分析发现,干质量的变异系数最大(21.90%),茎粗(21.20%)和鲜质量(18.70%)次之。同时,王宁等[20]和张会丽等[21]的研究也证实,盐胁迫会极显著抑制苜蓿的鲜质量、干质量及根长,这些发现均表明,植物生物量积累与形态建成过程对盐碱胁迫高度敏感。此外,盐碱胁迫还会减弱植物的光合作用、扰乱植物体内离子的动态平衡并造成细胞膜透性增加[22]。本研究也对相关指标进行了分析,发现盐碱胁迫下紫花苜蓿的光合与水分代谢指标(F_v/F_m、SPAD、相对含水量)变异系数较小,总体来看这些生理功能在胁迫下比较稳定,这可能与紫花苜蓿固有的渗透调节能力有关[23],但相对电导率的变异较大,表明盐碱胁

迫会影响紫花苜蓿的细胞膜透性。相关性分析结果表明，鲜质量与干质量呈极显著正相关（r=0.842），且二者均与株高、茎粗、叶面积显著关联，表明形态发育与生物量积累协同响应盐碱胁迫，这与李雪等[24]的研究结果相符。值得注意的是，相对电导率与F_v/F_m呈极显著负相关（r=−0.508），说明膜脂过氧化加剧直接损伤光系统Ⅱ反应中心，这为利用电导率快速鉴定耐盐碱性提供了生理依据[25]。

通过主成分分析将11个指标转换为7个独立的综合指标变量，接着利用隶属函数法和聚类分析综合评价52份紫花苜蓿种质资源的耐盐碱性，得到2份强耐盐碱（罗马尼亚、康赛）和1份不耐盐碱（加拿大）的种质资源。这种多维指标降维方法有效地避免了单一指标的片面性，与姚兴洁等[23]对61个苜蓿品种萌发期耐盐性评价的策略一致。吕艳贞等[26]研究发现，在紫花苜蓿种子萌发期，根长、成苗率等指标在碱胁迫下对D值贡献最大，而本研究发现苗期的干质量和茎粗等指标对D值影响较大，说明不同生育期需采用差异化的评价体系[21]。本研究将52份紫花苜蓿种质资源分为5个耐盐碱等级，其中强耐盐碱等级的种质资源仅占3.8%（2份），而中等及以下级别的种质资源占82.7%，说明多数引进种质资源的耐盐碱能力有限。张莹莹[27]利用隶属函数法对130份紫花苜蓿种质资源进行综合评价时发现，加拿大为碱敏感性材料，本研究也发现加拿大为不耐盐碱种质材料，未来研究可将其作为解析盐碱敏感机制的对照材料[25]，可结合转录组学和代谢组学等多组学技术联合挖掘耐盐碱基因。本研究也对各个指标进行了逐步回归分析，发现茎粗、干质量、F_v/F_m、株高、相对电导率、分枝数、鲜质量和SPAD为评价紫花苜蓿苗期耐盐碱性的关键指标。已有研究发现，下调*SPL8*基因可促进苜蓿的分枝数增多，显著提高苜蓿的生物量以及耐盐性[28]，表明分枝数和生物量与植物的耐盐性息息相关，这与本研究的结果一致；过表达*MsSPL12*基因作为正调节因子可提高紫花苜蓿的耐盐性，同时使转基因紫花苜蓿的相对电导率降低[29]，同样表明相对电导率也可作为评价植物耐盐碱性的关键指标之一。除此之外，植物遭受盐碱胁迫时，光合作用效率会下降[22]，本研究也发现耐盐碱等级越低的紫花苜蓿，F_v/F_m和SPAD的平均值也较低。综上，对紫花苜蓿种质资源进行耐盐碱胁迫评价时，不能根据单一的指标进行主观评价，需要根据各个指标的权重以及与耐盐碱性的相关程度进行综合评价，以构建合适且科学的评价体系。

4　结　论

本研究对52个紫花苜蓿种质资源苗期的耐盐碱性进行了综合评价，揭示了紫花苜蓿苗期耐盐碱性的显著差异。从52份紫花苜蓿种质资源中筛选出2份强耐盐碱种质资源（罗马尼亚和贝多叶），7份耐盐碱性较强的种质资源，27份中等耐盐碱的种质资源，15份耐盐碱性较弱的种质资源，1份不耐盐碱的种质资源（加拿大）。茎粗、干质量、F_v/F_m、株高、相对电导率、分枝数、鲜质量和SPAD等8个指标是评价紫花苜蓿苗期耐盐碱性的关键指标。

[参考文献]

[1] 王宝山. 盐碱地利用、耐盐作物育种及栽培技术的现状、问题与建议[J]. 山东师范大学学报（自然科学版），2025，40（2）：123-132.
WANG B S. Current status, challenges and suggestions for saline soil utilization, salt-tolerant crop breeding and cultivation techniques[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Sciences Edition), 2025, 40(2): 123-132.

[2] ZHANG Y M, LI Y M, REN X, et al. Comparative study on the nutritional quality of peanut in saline and non-saline land[J]. Foods, 2024, 13(23): 3751.

[3] 赵耕毛，杨梦圆，陈硕，等. 我国盐碱地治理：现状、问题与展望[J]. 南京农业大学学报，2025，48（1）：14-26.
ZHAO G M, YANG M Y, CHEN S, et al. Saline-alkali land management in China: current situation, problems and prospects[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1): 14-26.

[4] REN H L, ZHANG F Y, ZHU X, et al. Manipulating rhizosphere microorganisms to improve crop yield in saline-alkali soil: a study on soybean growth and development[J]. Frontiers in Microbiolog, 2023, 14: 1233351.

[5] ZHANG B Q, WANG N. Study on the harm of saline alkali land and its improvement technology in China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 692(4): 042053.

[6] SHARMA D P, GUPTA S K. Subsurface drainage for reversing degradation of waterlogged saline lands[J]. Land Degradation and Development, 2006, 17(6): 605-614.

[7] FANG S M, HOU X, LIANG X L. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 667458.

[8] WANG H Q, WANG F F, QIN W R, et al. A critical review on the use of flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkali soils and its prospect for reducing carbon emissions[J]. Science of the Total Environment, 2024, 945: 174053.

[9] PIAO J L, CHE W K, LI X, et al. Application of peanut shell biochar increases rice yield in saline-alkali paddy fields by regulating leaf ion concentrations and photosynthesis rate[J]. Plant and Soil, 2023, 483(1): 589-606.

[10] GUO S Q, WANG X T, LI X H, et al. Melatonin and calcium synergistically improve salt tolerance in alfalfa (*Medicago sativa*. L)[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 224: 120322.

[11] AN Y M, SONG L L, LIU Y R, et al. De novo transcriptional analysis of alfalfa in response to saline-alkaline stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 931.

[12] 王跳霞,张政,刘美君,等. 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[J]. 草业科学, 2025, 12(12): 3108-3119.
WANG T X, ZHANG Z, LIU M J, et al. Differential effects of saline and alkaline stress on water uptake and germination of alfalfa seeds[J]. Pratacultural Science, 2025, 12(12): 3108-3119.

[13] 朱晨晨,史昆,何沁坤,等. 中苜一号紫花苜蓿幼苗对混合盐碱胁迫的响应[J]. 中国草地学报, 2024, 46(8): 1-9.
ZHU C C, SHI K, HE Q K, et al. Response of 'Zhongmu No. 1' alfalfa seedlings to mixed saline-alkali stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(8): 1-9.

[14] 陈雪梅,刘骅峻,杨婴,等. 盐碱胁迫对苜蓿种子萌发性状的影响及耐盐碱性评价[J]. 黑龙江农业科学, 2024(3): 64-70.
CHEN X M, LIU H J, YANG Z, et al. Effects of salt-alkali stress on seed germination traits of alfalfa and its salt tolerance evaluation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(3): 64-70.

[15] 高荣,陈丽娟,马晖玲. 5份紫花苜蓿种质苗期耐盐碱性综合评价[J/OL]. 草原与草坪, 2025(2024-07-11)[2025-05-03]. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20240709.0924.002.
GAO R, CHEN L J, MA H L. Comprehensive evaluation of saline-alkaline tolerance for 5 alfalfa resources seedling [J/OL]. Grassland and Turf, 2025(2024-07-11)[2025-05-03]. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20240709.0924.002.

[16] 崔禄. 紫花苜蓿抗盐碱能力综合评价及生理适应机制的研究[D]. 内蒙古通辽:内蒙古民族大学, 2024.
CUI L. Comprhensive evalution of saline-alkali resistance and research of physiological adaption mechanism of alfalfa[D]. Tongliao, Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2024.

[17] ZHANG Y Y, WANG L. Advances in basic biology of alfalfa (*Medicago sativa* L.): a comprehensive overview[J]. Horticulture Research, 2025, 12(7): uhaf081.

[18] AHMAD A, BLASCO B, MARTOS V. Combating salinity through natural plant extracts based biostimulants: a review [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 862034.

[19] LIU B S, KANG C L, WANG X, et al. Physiological and morphological responses of L*eymus chinensis* to saline-alkali stress [J]. Grassland Science, 2015, 61(4): 217-226.

[20] 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[J]. 草业科学, 2024, 41(3): 684-699.
WANG N, WAN C, GAO S, et al. Screening and evaluation of salt tolerance of 80 alfalfa varieties at the seedling stage[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(3): 684-699.

[21] 张会丽,袁闯,朱林,等. 利用隶属函数值法对玉米成熟期耐盐性的综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 47-55.
ZHANG H L, YUAN C, ZHU L, et al. Comprehensive evaluation of salt-tolerance of maize at mature period using subordinate function value analysis [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2018, 46(2): 47-55.

[22] 刘新宇,武沛然,李彩凤,等. 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 108-116.
LIU X Y, WU P R, LI C F, et al. Effects of biochar and reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics of sugar beet under saline-alkali stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 108-116.

[23] 姚兴洁,孙庆赢,张昭,等. 61个品种紫花苜蓿种子萌发期耐盐性综合评价[J]. 草地学报, 2025, 33(4): 1181-1191.
YAO X J, SUN Q Y, ZHANG Z, et al. Comprehensive evaluation on salt tolerance of 61 alfalfa cultivars during seed germination[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1181-1191.

[24] 李雪,沙栢平,高雪芹,等. 不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性鉴定与综合评价[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 437-445.
LI X, SHA B P, GAO X Q, et al. Identification and comprehensive evaluation of salt tolerance of alfalfa germplasm materials at germination stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 437-445.

[25] 石嘉琦,谢楠,崔素倩,等. 不同盐浓度胁迫下16个紫花苜蓿品种萌发期耐盐性评价[J]. 草地学报, 2025, 33(2): 472-480.
SHI J Q, XIE N, CUI S Q, et al. Evaluation of salt tolerance of 16 alfalfa varieties under different salt concentration stress at germination stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 472-480.

[26] 吕艳贞,姚兴洁,张昭,等. 不同品种紫花苜蓿种子萌发期耐碱性评价与关键指标筛选[J]. 草地学报, 2025, 33(6): 1852-1861.
LÜ Y Z, YAO X J, ZHANG Z, et al. Evaluation of alkali tolerance and key indicators screening during seed germination of different alfalfa cultivars [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1852-1861.

[27] 张莹莹. 130份紫花苜蓿资源耐碱性评价及耐碱紫花苜蓿的转录组分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2023.
ZHANG Y Y. Evaluation of alkali tolerance of 130 alfalfa resources and transcriptome analysis of alkali-tolerant alfalfa [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2023

[28] GUO J Q, DEBNATH S, SUN L, et al. From model to crop: functional characterization of SPL8 in M. truncatula led to genetic improvement of biomass yield and abiotic stress tolerance in alfalfa[J]. Plant Biotechnology Journal, 2018, 16(4): 951-962.

[29] LIN S W, YANG J, LIU Y R, et al. *MsSPL12* is a positive regulator in alfalfa (*Medicago sativa* L.) salt tolerance [J]. Plant Cell Reports, 2024, 43(4): 101.

(责任编辑:马秋明)