

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.009

引用格式:杨金辉,王晓彤,马永龙,等.不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性评价[J].草地学报,2026,34(5):1654—1663
YANG Jin-hui, WANG Xiao-tong, MA Yong-long, et al. Evaluation of Salt Tolerance of Different Alfalfa Germplasm Materials During the Germination Period[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1654—1663

不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性评价

杨金辉,王晓彤,马永龙,余冬雯,童玉花,马梦凡,李淑霞*

(宁夏大学林业与草业学院,宁夏银川750021)

摘要:为筛选出适宜在盐碱土壤上栽培的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)材料,本研究对59份紫花苜蓿种质的萌发期耐盐性进行了评价。通过测定发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长和苗长6项指标,并综合运用变异系数法、相关法、主成分法、隶属函数法及聚类法,评价其萌发期耐盐性。研究结果表明:59份紫花苜蓿种质的萌发期耐盐性存在显著差异,相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数和相对苗长适合用作紫花苜蓿萌发期耐盐性评价指标。基于隶属函数值进行聚类分析,可将59份紫花苜蓿种质资源划分成超强耐盐型(1份)、中强耐盐型(22份)、低强耐盐型(11份)、弱耐盐型(11份)和超弱耐盐型(14份)5个类别,筛选出强耐盐性种质材料为‘巨能6’‘宁苜1号’‘盐宝’‘冲击波’‘敖汉’‘猎人河’和‘挑战者’。研究结果为紫花苜蓿耐盐育种提供理论支撑。

关键词:紫花苜蓿;种子萌发;盐胁迫;隶属函数法;聚类分析

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1654-10

Evaluation of Salt Tolerance of Different Alfalfa Germplasm Materials During the Germination Period

YANG Jin-hui, WANG Xiao-tong, MA Yong-long, YU Dong-wen, TONG Yu-hua,
MA Meng-fan, LI Shu-xia*

(College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To screen alfalfa (*Medicago sativa* L.) germplasm suitable for cultivation on saline soils, this study evaluated the salt tolerance of 59 alfalfa germplasm accessions during the germination stage. Six parameters—germination potential (GP), germination rate (GR), germination index (GI), vigor index (VI), root length (RL), and shoot length (SL) were measured. A comprehensive evaluation was conducted using coefficient of variation analysis, correlation analysis, principal component analysis (PCA), subordinate function analysis (SFA), and cluster analysis. The results revealed significant variation in salt tolerance during germination among the 59 alfalfa accessions. Based on PCA and correlation analysis, four key indicators were selected for salt tolerance evaluation: relative germination potential (RGP), relative germination rate (RGR), relative germination index (RGI), and relative shoot length (RSL). Cluster analysis based on D-values derived from SFA classified the 59 germplasms into five salt tolerance categories: highly salt-tolerant (1 accession), moderately salt-tolerant (22 accessions), low salt-tolerant (11 accessions), salt-sensitive (11 accessions), and highly salt-sensitive (14 accessions). Seven accessions exhibiting strong salt tolerance were identified: ‘Juneng 6’ ‘Ningmu No. 1’ ‘Salt treasure’ ‘Shockwave’ ‘Aohan’ ‘Hunter River’ and ‘Challenger’. These findings provided a theoretical basis for alfalfa salt tolerance breeding.

Key words: Alfalfa; Seed germination; Salt stress; Affiliation function method; Cluster analysis

收稿日期:2025-07-08;修回日期:2025-08-29

基金项目:国家自然科学基金(U24A20426);宁夏自然科学基金(2023AAC05019)项目资助

作者简介:杨金辉(2000-),男,汉族,甘肃宁县人,硕士研究生,主要从事牧草育种与栽培利用研究,E-mail:1678026718@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:lishuxia620@163.com

土地盐渍化是全球农业生产的重要非生物胁迫,严重制约农业发展。全球盐碱地面积约10亿 hm^2 ,占陆地面积的6.7%^[1],中国盐碱地面积大,分布于东北、华北、西北内陆及北方沿海^[2],总面积约0.99亿 hm^2 ,占国土面积的1/3^[3]。土壤盐渍化会引发植物细胞内的渗透胁迫、氧化胁迫和离子毒性,同时高pH值会进一步加剧营养离子失衡、氧化损伤、代谢紊乱等问题,从而抑制作物生长和产量形成,加剧耕地资源短缺。不合理的开发和生态恶化,正导致盐碱地面积持续扩大。在耕地资源极度紧张的国情下,盐碱地作为重要的农业后备耕地资源,其改良与合理开发利用对可持续发展农业具有重要意义^[4]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)素有“牧草之王”的美誉,是豆科苜蓿属多年生草本植物,具有产量高、品质优、抗逆性强和适口性好等特点,在牧草生产中占据重要地位^[5]。然而,盐胁迫是限制其广泛种植的主要环境因素之一。该物种虽属于中等耐盐作物,并具备一定的离子调控机制,能在中轻度盐碱土壤中正常生长,但其萌发期和幼苗期对盐分较为敏感,耐盐性较弱^[6]。当土壤饱和泥浆提取液的电导率(Electrical conductivity of the saturated soil extract, ECE)超过 $5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,紫花苜蓿的生长即受到明显抑制,具体表现为萌发率、出苗率和生物量下降。其耐盐机制主要包括钠离子区隔化、渗透调节物质(如脯氨酸)的合成以及抗氧化酶活性的增强。然而,当土壤ECE上升至 $8\sim 10\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 或伴随碱胁迫时, Na^+ 引起的离子毒害与渗透胁迫协同效应加剧,导致植株成活率和产量显著降低^[7]。研究表明,干草产量随土壤ECE的增加而降低。当盐度达到重度盐碱化水平时,过高的盐分会导致干草失去经济栽培价值^[8]。若能通过遗传改良或栽培技术手段进一步提高紫花苜蓿的耐盐性,拓展其在更高盐碱度土壤中的适应能力,将有望显著扩大其适宜种植范围^[9]。这不仅有助于提升盐碱土地的利用效率,还可促进土壤盐渍化的改良,降低可溶性盐分及特定离子含量,提高土壤有机质水平^[10],对培肥土壤、改善土壤生态环境具有重要作用。

种子萌发期是植物生育期的环境最敏感期,植物萌发期耐盐性越强越利于生长,种子能否正常萌芽是耐盐植物选择的基础^[11]。紫花苜蓿萌发期对盐分敏感^[12],在早期进行耐盐性选择最为经济^[13]。张寒等^[14]对120个苜蓿种质材料作萌发期耐盐性综合评价与筛选,用加权隶属函数法评价得到11个高

耐盐种质材料;李雪等^[15]对59份紫花苜蓿种质资源进行筛选评价,确定发芽率等为耐盐性评价指标,筛选出5份耐盐种质。研究表明,轻度盐胁迫在一定程度上可促进紫花苜蓿种子萌发生长,中重度则显著抑制^[16]。目前,尽管对紫花苜蓿种子萌发及幼苗耐盐性的研究已较丰富,盐浓度效应也较为明确,但不同研究间在盐类型、浓度及环境条件上存在显著差异,导致结果难以直接比较;加之传统评价往往过度依赖萌发率等表型指标,难以捕捉早期生理响应,致使实验室筛选结果与田间实际抗性之间存在较大差距,品种在萌发期对盐胁迫的响应差异仍缺乏系统综合评价。

为此,本研究选取59份紫花苜蓿种质资源作为试验材料,通过单一NaCl溶液模拟盐胁迫环境,联用变异系数、相关、主成分(Principal component analysis, PCA)、隶属函数及聚类分析法,确定紫花苜蓿萌发期耐盐性评价指标,建立紫花苜蓿萌发期耐盐性评价指标体系,筛选出强耐盐种质资源,为开展紫花苜蓿盐胁迫耐受性鉴定工作、深入解析其耐盐分子机理提供关键评价参数,同时为紫花苜蓿耐盐育种提供优异种质与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验供试材料为宁夏大学种子库的59份紫花苜蓿种质材料,详情见表1。

1.2 试验设计

为确定紫花苜蓿萌发期耐盐性评价的适宜盐胁迫浓度,预实验选取两份供试种质,分别在NaCl浓度为0(CK),25,50,75,100,125和150 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下进行预试验。由于75 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaCl胁迫能够明显抑制两份预试紫花苜蓿材料的发芽与生长,且该浓度下二者耐盐性差异显著,具有良好的区分度,故研究选用此浓度对59份紫花苜蓿种质进行萌发期耐盐性评价。在每份种质中挑选大小均匀一致、颗粒饱满的种子,种子经75%乙醇消毒30 s、蒸馏水冲洗5次后,4%次氯酸钠消毒10 min。复以蒸馏水冲洗至无味,滤纸吸干,均匀置入铺双层滤纸的培养皿(每皿50粒)。每份种质分别设置对照组和处理组,对照组加5 mL的蒸馏水,处理组加5 mL的盐溶液,每个处理做3次重复。培养皿置

表 1 供试苜蓿种质信息
Table 1 Information of alfalfa germplasm for testing

材料编号 Material number	名称 Name	材料来源 Source of material	材料编号 Material number	名称 Name	材料来源 Source of material
M ₁	龙牧 801 Longmu 801	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₁	匈牙利 Hungary	宁夏大学 Ningxia University
M ₂	金皇后 Golden Empress	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₂	00049	宁夏大学 Ningxia University
M ₃	甘农 6 号 Gannong No.6	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₃	SPYDER	宁夏大学 Ningxia University
M ₄	盐宝 Salt treasure	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₄	A(5322)	宁夏大学 Ningxia University
M ₅	甘农 8 号 Gannong No.8	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₅	WL-168HQ	宁夏大学 Ningxia University
M ₆	4020	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₆	熊岳 Xiongyue	宁夏大学 Ningxia University
M ₇	赛迪 5 Saidi 5	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₇	耐盐之星 SaltResistant Star	宁夏大学 Ningxia University
M ₈	巨能 7 号 Juneng 7	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₈	甘农 3 号 Gannong No.3	宁夏大学 Ningxia University
M ₉	维多利亚 Victoria	宁夏大学 Ningxia University	M ₃₉	勇士 Warrior	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₀	巨能 551 Juneng 551	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₀	挑战者 Challenger	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₁	宁苜 1 号 Ningmu No.1	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₁	Magna Graze 2	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₂	巨能 2 Juneng 2	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₂	雷达克之星 Radar Star	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₃	冲击波 Shockwave	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₃	418Q	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₄	中苜 3 号 Zhongmu No.3	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₄	岩石 Rock	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₅	草原 3 号 Grassland No. 3	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₅	WL-363HQ	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₆	三得利 Suntory	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₆	I(6728)	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₇	敖汉 Aohan	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₇	D5271	宁夏大学 Ningxia University
M ₁₈	冰驰 Ice Rush	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₈	沃苜 1 号 Womu No.1	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₁₉	驯鹿 Reindeer	宁夏大学 Ningxia University	M ₄₉	牧歌 301 Pastoral 301	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₀	中苜 1 号 Zhongmu No.1	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₀	蕴能 Energy Reserve	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₁	甘农 7 号 Gannong No.7	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₁	3010	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₂	阿迪娜 Adina	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₂	飞跃 Leap	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₃	标靶 Target	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₃	牧歌 401 Pastoral 401	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₄	阿尔冈金 Algonquin	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₄	4030	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₅	超音速 Supersonic	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₅	皇冠 Crown	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₆	克山 Keshan	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₆	巨能 401 Juneng 401	克劳沃生态科技有限公司 Clover (Beijing) Ecological TechnologyCo., Ltd
M ₂₇	标杆 Benchmark	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₇	新疆大叶 Xinjiang Large-Leaf	宁夏大学 Ningxia University
M ₂₈	猎人河 Hunter River	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₈	惊喜 Surprise	宁夏大学 Ningxia University
M ₂₉	巨能 6 Juneng 6	宁夏大学 Ningxia University	M ₅₉	中苜 6 号 Zhongmu No.6	宁夏大学 Ningxia University
M ₃₀	旱地 Handi	宁夏大学 Ningxia University			

于 RXZ-1000B 人工气候箱,条件为 25/20℃(昼/夜),60% 湿度,16/8 h(光/暗),5000 lx 光照强度。每天定时补充散失的水分,且每 2 d 更换一次滤纸,并加入相应浓度的盐溶液,观测记录发芽进程直到第 8 d 结束发芽试验。

1.3 测定指标

逐日观测记录发芽数(以胚根≥2mm 或胚芽≥1/2 种子长为标准),计算发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长及苗长。方法如下:

发芽势:第 3 d 时发芽的种子数占供试种子总数的百分比。

发芽率:第 8 d 时发芽的种子数占供试种子总数的百分比。

发芽指数(GI): $GI = \sum_{i=1}^n G_i / D_i$,其中: G_i 为第 i 天的发芽数, D_i 为相应的发芽天数。 n 为发芽试验的总天数。

活力指数(VI): $VI = GI \times S$, S 为平均苗长。

根苗长测定:第 8 d,每处理随机取 10 株正常幼苗,用游标卡尺同步测定根长与苗长。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2021 进行数据录入和作图表,利用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。使用变异系数分析、相关性分析和因子主成分分析,筛选紫花苜蓿萌发期耐盐性评价指标;根据隶属函数分析和聚类分析,对 59 份紫花苜蓿材料萌发期进行耐盐性综合评价。同时,为消除材料间指标固有差异,均采用相对值分析。公式如下:

指标相对值=处理组指标/对照组指标 (1)

$$\text{综合耐盐系数} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{相对指标 } i \times \text{权重 } i)}{\sum_{i=1}^n \text{权重 } i} \quad (2)$$

正向隶属函数:

$$U_i=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{3}$$

反向隶属函数:
$$U_i=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{4}$$

权重:
$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^m P_i, i=1,2,3,\cdots,n \tag{5}$$

综合评价:
$$D=U_i\times W_i, i=1,2,3,\cdots,n \tag{6}$$

式中: U_i 为各指标隶属函数值, X_i 为指标相对值, $X_{\max}, X_{\min}$ 为指标在所有材料中的最大值、最小值; W_i 为第*i*个指标占有所有指标的权重; P_i 表示各品种第*i*个指标的贡献率; D 值表示在盐胁迫下各品种耐盐能力的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响

根据表 2 数据统计,盐胁迫处理下的各指标最小值都为 0,表明有个别种子在盐胁迫下完全受到抑制。最大值差异较大,相对活力指数最大值为

2.545,相对发芽指数最大值为 1.548,相对根长最大值为 2.738,说明不同种子在耐盐性表现上具有较大差异。相对发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长及苗长的平均值分别为 0.500,0.535,0.590,0.653,0.577 和 0.616,反映出整体种子在盐胁迫下各指标的平均水平,其中相对活力指数和相对苗长的平均值相对较高。

盐胁迫处理下 59 份紫花苜蓿种质在萌发期的六项发芽指标呈现显著的离散特征。各指标变异系数范围介于 0.512~0.801 之间,反映出不同种质间性状差异明显(表 2)。具体而言,相对发芽势、发芽率、根长、苗长、活力指数及发芽指数的变异系数分别为 0.547,0.516,0.558,0.801,0.741 和 0.512,均表现出超过 0.500 的变异幅度,其中相对活力指数变异程度最为突出(CV=0.801)。这些数据表明,盐胁迫一致且显著地改变了种子的各项萌发指标。

表 2 盐胁迫下 59 份紫花苜蓿材料萌发期的相对指标差异性分析

Table 2 Differential analysis of relative indexes of 59 alfalfa materials during germination period under salt stress

指标 Indicator	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
相对发芽势 Relative germination potential	0.000	0.938	0.500	0.274	0.547
相对发芽率 Relative germination rate	0.000	1.014	0.535	0.276	0.516
相对发芽指数 Relative germination index	0.000	1.548	0.590	0.329	0.558
相对活力指数 Relative vitality index	0.000	2.545	0.653	0.523	0.801
相对根长 Relative root length	0.000	2.738	0.577	0.428	0.741
相对苗长 Relative length of seedlings	0.000	1.760	0.616	0.315	0.512

2.2 盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发期指标的相关性分析

由表 3 可知,在紫花苜蓿萌发期耐盐性相关检测指标中,相对发芽势与相对发芽率、相对发芽率与相对发芽指数、相对发芽势与相对发芽指数之间的相关系数均高于 0.900,呈极显著正相关($P<0.01$)。同样,相对活力指数与相对发芽势、相对发芽率、发芽指数之间的相关系数介于 0.763 至 0.802 之间,呈现极显著的正相关关系($P<0.01$)。此外,相对根长和相对苗长之间的相关系数高达 0.963,二者呈现极显著的正相关关系($P<0.01$),这充分说明在紫花苜蓿的生长过程中,根和苗的生长态势基本保持一致,两者的生长变化密切相关。相对根长、相对苗长与相对活力指数的相关系数分别为 0.901 和 0.914,而与发芽相关指标的相关系数在 0.545 至 0.641 之间,均极显著相关($P<0.01$)。以上结果表明,紫花苜蓿的这 6 项萌发期指标之间具

有密切的相关性。

2.3 紫花苜蓿萌发期各指标的耐盐系数分析

根据对照组与胁迫组的各单项指标测定值的平均值,计算得出不同种质紫花苜蓿的相对指标和综合耐盐系数(表 4)。结果显示,不同紫花苜蓿种质耐盐性具有差异性。其中,‘耐盐之星’‘牧歌 401’‘盐宝’‘宁苜 1 号’‘阿迪娜’‘匈牙利’‘SPYDER’和‘挑战者’的综合耐盐系数较高,分别为 1.498,1.863,0.937,0.954,0.960,0.953,0.914 和 0.918,表明 75 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下这 8 种紫花苜蓿种质的耐受性较高。然而,‘WL-363HQ’‘金皇后’‘甘农 7 号’‘克山’‘00049’‘A(5322)’和‘WL-168HQ’的综合耐盐系数最低,分别为 0,0.114,0.164,0.018,0.160,0.075 和 0.157,表明 75 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫对这 7 种紫花苜蓿种质种子萌发与幼苗生长的影响最大。

表 3 盐胁迫下紫花苜蓿材料各指标间相关系数

Table 3 Correlation coefficients between indicators of alfalfa material under salt stress

观测指标 Norm	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index (RGI)	相对活力指数 Relative vitality index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative length of seedlings
相对发芽势 Relative germination potential	1.000					
相对发芽率 Relative germination rate	0.989**	1.000				
相对发芽指数 Relative germination index	0.916**	0.906**	1.000			
相对活力指数 Relative vitality index	0.790**	0.802**	0.763**	1.000		
相对根长 Relative root length	0.562**	0.587**	0.496**	0.901**	1.000	
相对苗长 Relative length of seedlings	0.619**	0.641**	0.545**	0.914**	0.963**	1.000

注:**表示在 0.01 水平上显著相关

Note:** indicate significant correlation at the 0.01 level

2.4 紫花苜蓿萌发期耐盐性评价指标筛选

由 59 份紫花苜蓿种质的六项指标主成分分析结果可知(表 5),对于这 59 份紫花苜蓿材料的耐盐性评价,前两个主成分(相对发芽势、相对发芽率)起到了决定性作用,其累计贡献率高达 96.617%。综合累计贡献率和特征值两方面因素,确定相对发芽势和相对发芽率为 59 份苜蓿种质耐盐性评价的主因子。在第一个主成分中,与相对发芽势、相对发芽率和相对发芽指数相关性最大,载荷值分别为 0.927,0.913 和 0.927。而在第二个主成分中,与相对活力指数、相对苗长和相对根长相关性最高,载荷值分别为 0.797,0.958 和 0.935。基于在两个主成分中与其他指标呈现极显著相关性且特征向量绝对值最大的原则,最终选取发芽相关参数(相对发芽率、发芽指数、活力指数)及相对苗长作为评价指标。这些指标能够较为全面地反映紫花苜蓿种子在萌发期对盐胁迫的响应,适用于评价紫花苜蓿种子萌发期的耐盐性。

2.5 紫花苜蓿萌发期耐盐性综合评价

基于隶属函数值综合评价 59 份紫花苜蓿的耐盐性(表 6)。结果表明,59 份紫花苜蓿材料在种子萌发期的耐盐能力呈现出显著的异质性。耐盐综合隶属函数值排名前 7 位的材料,其数值依次为 0.834,0.695,0.672,0.653,0.650,0.622 和 0.602,均大于 0.6。按照耐盐性评价的量化标准,该数值范围表明这 7 份材料在种子萌发期具备较强的耐盐能力。与之相对,排名末尾的 13 份材料,其综合隶属函数值均低于 0.2,具体数值为 0.196,0.184,0.179,0.144,0.142,0.130,0.091,0.059,0.053,0.049,0.047,0.046 和 0.044,表明这些材料在种子萌发期对盐胁迫的耐受性较弱。

2.6 紫花苜蓿萌发期耐盐性聚类分析

基于欧式距离度量方法,对 59 份紫花苜蓿材料萌发期耐盐性的 D 值进行聚类分析。如图 1 和表 7 所示,当欧式距离设定为 4 时,59 份紫花苜蓿材料可清晰地划分为 5 个不同的类群。第 I 类群定义为超强耐盐型种质,包含 1 份种质材料,约占总材料数的 2%,它是‘巨能 6’。第 II 类群为中强耐盐型种质,包含 22 份种质,占总材料的 37%,分别为‘宁苜 1 号’‘敖汉’‘猎人河’‘冲击波’‘匈牙利’‘牧歌 301’‘甘农 6 号’‘巨能 551’‘蕴能’‘中苜 1 号’‘新疆大叶’‘挑战者’‘盐宝’‘龙牧 801’‘阿迪娜’‘草原 3 号’‘牧歌 401’‘SPYDER’‘飞跃’‘巨能 2’‘Magna Graze2’和‘岩石’。第 III 类群为低强耐盐型种质,包含 11 份种质,占总材料的 19%,分别为‘维多利亚’‘中苜 6 号’‘皇冠’‘冰驰’‘甘农 8 号’‘418Q’‘赛迪 5’‘耐盐之星’‘三得利’‘雷达克之星’和‘沃苜 1 号’。第 IV 类群为弱耐盐型种质,包含 11 份种质,占总材料的 19%,分别为‘中苜 3 号’‘4030’‘勇士’‘巨能 401’‘巨能 7 号’‘4020’‘超音速’‘标靶’‘3010’‘熊岳’和‘惊喜’。第 V 类群为超弱耐盐型种质,包含 14 份种质,占总材料的 24%,分别为‘甘农 7 号’‘克山’‘WL-363HQ’‘标杆’‘00049’‘A(5322)’‘金皇后’‘阿尔冈金’‘I(6728)’‘WL-168HQ’‘甘农 3 号’‘D5271’‘驯鹿’和‘旱地’。

2.7 耐盐等级划分

根据不同紫花苜蓿种质材料种子萌发期耐盐性综合评价 D 值和系统聚类分析将供试紫花苜蓿种子萌发期的耐盐性等级划分为 5 级,分别为超强耐盐性、中强耐盐性、低强耐盐性、弱耐盐性和超弱耐盐性(表 7)。

表 4 不同种质紫花苜蓿种子萌发期相对指标及综合耐盐系数

Table 4 Relative indexes of germination period and comprehensive salt tolerance coefficient of alfalfa seeds of different germplasm

编号 Number	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vitality index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative length of seedlings	综合耐盐系数 Combined salt tolerance coefficient	排序 Order
M ₁	0.527	0.573	0.805	0.499	0.277	0.413	0.489	35
M ₂	0.081	0.116	0.073	0.034	0.145	0.233	0.114	56
M ₃	0.748	0.782	0.924	1.084	0.772	0.835	0.875	10
M ₄	0.853	0.875	0.919	1.135	0.885	0.856	0.937	6
M ₅	0.567	0.615	0.679	0.631	0.510	0.562	0.589	29
M ₆	0.417	0.428	0.464	0.392	0.531	0.495	0.458	37
M ₇	0.550	0.669	0.611	0.481	0.385	0.447	0.501	33
M ₈	0.362	0.471	0.447	0.602	0.781	0.763	0.605	28
M ₉	0.464	0.464	0.657	0.204	0.124	0.205	0.310	44
M ₁₀	0.836	0.871	0.710	0.913	0.755	0.813	0.818	16
M ₁₁	0.938	0.880	0.935	1.154	0.872	0.870	0.954	4
M ₁₂	0.567	0.578	0.949	0.387	0.220	0.283	0.453	38
M ₁₃	0.864	0.864	0.981	0.602	0.396	0.432	0.639	27
M ₁₄	0.296	0.343	0.320	0.293	0.413	0.504	0.367	40
M ₁₅	0.671	0.660	0.736	0.683	0.557	0.650	0.653	26
M ₁₆	0.418	0.573	0.489	0.271	0.236	0.325	0.354	41
M ₁₇	0.857	0.870	0.891	0.835	0.521	0.634	0.744	24
M ₁₈	0.623	0.659	0.658	0.771	0.796	0.805	0.737	25
M ₁₉	0.218	0.241	0.287	0.168	0.260	0.366	0.255	51
M ₂₀	0.833	0.903	0.770	0.928	0.773	0.784	0.832	12
M ₂₁	0.011	0.011	0.159	0.056	0.282	0.355	0.164	53
M ₂₂	0.651	0.651	0.914	1.291	0.983	0.941	0.960	3
M ₂₃	0.366	0.355	0.424	0.253	0.263	0.363	0.324	43
M ₂₄	0.208	0.266	0.194	0.226	0.485	0.601	0.348	42
M ₂₅	0.382	0.406	0.359	0.165	0.170	0.251	0.261	50
M ₂₆	0.000	0.012	0.006	0.001	0.014	0.070	0.018	58
M ₂₇	0.085	0.122	0.064	0.060	0.464	0.543	0.246	52
M ₂₈	0.859	0.871	0.990	0.979	0.570	0.693	0.813	17
M ₂₉	0.833	0.880	1.548	0.984	0.388	0.450	0.806	19
M ₃₀	0.272	0.272	0.276	0.209	0.340	0.435	0.302	45
M ₃₁	0.752	0.808	0.902	1.349	0.788	0.913	0.953	5
M ₃₂	0.071	0.071	0.077	0.048	0.251	0.370	0.160	54
M ₃₃	0.741	0.775	0.830	1.214	0.839	0.887	0.914	8
M ₃₄	0.024	0.048	0.035	0.015	0.080	0.228	0.075	57
M ₃₅	0.121	0.193	0.127	0.073	0.159	0.287	0.157	55
M ₃₆	0.366	0.476	0.418	0.429	0.568	0.581	0.483	36
M ₃₇	0.733	0.813	0.931	2.272	1.783	1.529	1.498	2
M ₃₈	0.220	0.220	0.266	0.218	0.295	0.444	0.283	48
M ₃₉	0.317	0.340	0.330	0.204	0.270	0.363	0.293	46
M ₄₀	0.763	0.853	0.919	1.216	0.803	0.818	0.918	7
M ₄₁	0.709	0.827	0.690	0.862	0.765	0.804	0.784	22
M ₄₂	0.463	0.463	0.708	0.555	0.511	0.532	0.541	31
M ₄₃	0.597	0.681	0.743	1.028	0.848	0.836	0.824	13
M ₄₄	0.688	0.713	0.837	1.126	0.696	0.817	0.837	11
M ₄₅	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	59
M ₄₆	0.172	0.241	0.198	0.168	0.425	0.474	0.292	47
M ₄₇	0.266	0.347	0.298	0.419	0.652	0.783	0.493	34
M ₄₈	0.533	0.522	0.543	0.596	0.545	0.638	0.569	30
M ₄₉	0.696	0.707	0.974	0.928	0.602	0.652	0.761	23
M ₅₀	0.863	0.804	0.725	0.923	0.763	0.817	0.821	14
M ₅₁	0.451	0.521	0.550	0.959	0.996	1.064	0.820	15
M ₅₂	0.669	0.729	0.898	1.015	0.718	0.721	0.807	18
M ₅₃	0.930	1.014	0.967	2.545	2.738	1.760	1.863	1
M ₅₄	0.366	0.366	0.546	0.877	1.123	1.060	0.800	20
M ₅₅	0.527	0.573	0.550	0.392	0.356	0.412	0.446	39
M ₅₆	0.266	0.289	0.377	0.193	0.216	0.330	0.268	49
M ₅₇	0.805	0.805	0.885	1.221	0.722	0.823	0.897	9
M ₅₈	0.426	0.438	0.759	0.958	0.942	0.899	0.795	21
M ₅₉	0.603	0.638	0.490	0.439	0.433	0.521	0.501	32

表5 2个主成分的贡献率及载荷矩阵

Table 5 Contribution and loading matrix of the 2 principal components

指标 Indicator	主成分 Principal component	
	F ₁	F ₂
相对发芽势 Relative germination potential	0.927	0.340
相对发芽率 Relative germination rate	0.913	0.368
相对发芽指数 Relative germination index	0.927	0.270
相对活力指数 Relative vitality index	0.575	0.797
相对根长 Relative root length	0.254	0.958
相对苗长 Relative length of seedlings	0.320	0.935
特征值 Special value	4.808	0.992
累计贡献率 Cumulative contribution/%	80.140	96.671

3 讨论

盐胁迫是制约植物生长发育、影响产量及农业可持续发展的主要环境因素之一^[17]。种子萌发期是植物生命周期的关键阶段,直接影响其对环境胁迫的适应性。因此,研究植物种子萌发期的耐盐性,不仅能深化对幼苗形态建成、生理代谢^[18]及抗逆基因表达^[19]等内在机制的认识,也对保障作物后续生长、提高田间成活率^[20]、拓展生态适应性和有效利用盐碱地具有关键的指导价值。

植物耐盐性的强弱受多基因、多途径调控^[21],不同种质间的耐盐机制不同,仅用单一评价指标具有局限性,应综合多个指标进行评价^[22]。发芽势体现萌发速度,发芽率反映耐盐差异^[23]。本研究中,59份紫花苜蓿种质材料的相对发芽势和相对发芽率都受到盐胁迫的影响呈现下降趋势,与李京蓉等^[24]的研究结果一致,盐胁迫显著抑制种子萌发,降低发芽势及发芽率。发芽指数与活力指数可以反映出种子萌发速度、整齐度和幼苗的生长潜力,在盐胁迫下,发芽指数与活力指数越高,耐盐性越好^[25]。蒋优等^[26]对盐胁迫下94份苏丹草种质的萌发期耐盐性综合评价表明,相对发芽指数与相对发芽率可作为核心评价指标,该结果与本研究结论一致。此外,盛伟等^[27]研究表明,相对根长、相对根冠比、相对发芽指数可作为木豆种质资源萌发期耐盐性主要的评价指标。本研究选用紫花苜蓿萌发期耐盐指标较为常用的6个指标来进一步筛选,结果表明,相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数及相对苗长与紫花苜蓿萌发期耐盐性关系密切,可作为

59份紫花苜蓿种质萌发期耐盐性主要评价指标。相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数及相对苗长等指标构成了一套植物抗逆性鉴定体系。该体系通过标准化处理实现了不同材料间的公平比较,具有较强的推广价值。在实际应用中,只需根据目标植物的生物学特性优化实验条件,并结合多项指标进行综合评估,即可将该方法广泛应用于多种植物的耐盐性或其他抗逆性研究。

植物耐盐性受多因素调控,其评价结果除取决于所选指标外,还受其他因素影响,选用的分析方法也是关键所在。选用多种统计分析方法对植物耐盐性进行评价,是构建更系统、便捷、科学的耐盐评价系统的有效途径^[28]。植物耐盐性评价多采用综合分析方法,例如,陈雅慧等^[29]对40份谷子进行耐盐性相关性分析、主成分法、隶属函数法及聚类法分析,将40份谷子品种划分为4类。张则宇等^[30]采用加权隶属函数法对120个紫花苜蓿种质进行综合评价,分析表明,加权隶属函数法可以综合评价苜蓿萌发期耐盐性,并将120个种质分为耐盐性不同的5个级别。荆瑞勇等^[31]基于主成分法与隶属函数法,综合评价11份水稻材料的耐盐性,将11份水稻材料耐盐性分为三类。刘彤彤等^[32]探究40份小麦品种芽期和苗期的耐盐性,利用 D 值进行评价,筛选出芽期耐盐型品种9份。隶属函数法通过数学归一化,消除了量纲和绝对值差异,能够兼容与耐盐性正负相关的不同指标,并更敏锐地反映材料在所有指标上的均衡表现。而综合耐盐系数法仅是各指标耐盐系数的简单算术平均,易受指标量纲和极端值干扰。因此,隶属函数法抗干扰性更强,是一种更准确、可靠的综合评价方法。本研究基于隶属函数法计算 D 值,对59份紫花苜蓿种质进行耐盐性排序评价。根据 D 值排名结果,耐盐性强的分别为‘巨能6’‘宁苜1号’‘敖汉’‘猎人河’‘冲击波’‘匈牙利’‘牧歌301’‘甘农6号’‘巨能551’‘蕴能’‘中苜1号’‘新疆大叶’‘挑战者’‘盐宝’‘龙牧801’‘阿迪娜’‘草原3号’‘牧歌401’‘SPYDER’‘飞跃’‘巨能2’‘Magna Graze 2’和‘岩石’。为了保证筛选出的材料准确可靠,后期还将对筛选出的品种进行苗期耐盐性评价。

4 结论

盐胁迫对59份供试紫花苜蓿材料萌发期的影

表 6 59 份紫花苜蓿材料耐盐隶属函数值
Table 6 Values of salt tolerance affiliation function of 59 alfalfa materials

编号 Code	隶属函数值 Value of the affiliation function				D 值 D value	排序 Order
	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对苗长 Relative length of seedlings		
M ₁	0.562	0.565	0.520	0.235	0.493	23
M ₂	0.086	0.114	0.047	0.132	0.091	53
M ₃	0.797	0.771	0.597	0.474	0.579	12
M ₄	0.909	0.863	0.594	0.486	0.622	6
M ₅	0.604	0.607	0.439	0.319	0.459	27
M ₆	0.445	0.422	0.300	0.281	0.316	37
M ₇	0.586	0.660	0.395	0.254	0.467	25
M ₈	0.386	0.464	0.289	0.434	0.273	41
M ₉	0.495	0.458	0.424	0.116	0.433	30
M ₁₀	0.891	0.859	0.459	0.462	0.574	13
M ₁₁	1.000	0.868	0.604	0.494	0.650	5
M ₁₂	0.604	0.570	0.613	0.161	0.552	15
M ₁₃	0.921	0.852	0.634	0.245	0.695	2
M ₁₄	0.316	0.338	0.207	0.286	0.233	44
M ₁₅	0.715	0.651	0.475	0.369	0.503	21
M ₁₆	0.446	0.565	0.316	0.185	0.393	33
M ₁₇	0.914	0.858	0.576	0.360	0.653	4
M ₁₈	0.664	0.650	0.425	0.457	0.443	28
M ₁₉	0.232	0.238	0.185	0.208	0.196	47
M ₂₀	0.888	0.891	0.497	0.445	0.597	9
M ₂₁	0.012	0.011	0.103	0.202	0.046	58
M ₂₂	0.694	0.642	0.590	0.535	0.497	22
M ₂₃	0.390	0.350	0.274	0.206	0.301	39
M ₂₄	0.222	0.262	0.125	0.341	0.144	50
M ₂₅	0.407	0.400	0.232	0.143	0.317	36
M ₂₆	0.000	0.012	0.004	0.040	0.047	57
M ₂₇	0.091	0.120	0.041	0.309	0.044	59
M ₂₈	0.916	0.859	0.640	0.394	0.672	3
M ₂₉	0.888	0.868	1.000	0.256	0.834	1
M ₃₀	0.290	0.268	0.178	0.247	0.206	46
M ₃₁	0.802	0.797	0.583	0.519	0.580	11
M ₃₂	0.076	0.070	0.050	0.210	0.059	54
M ₃₃	0.790	0.764	0.536	0.504	0.547	17
M ₃₄	0.026	0.047	0.023	0.130	0.053	55
M ₃₅	0.129	0.190	0.082	0.163	0.130	52
M ₃₆	0.390	0.469	0.270	0.330	0.295	40
M ₃₇	0.781	0.802	0.601	0.869	0.480	24
M ₃₈	0.235	0.217	0.172	0.252	0.179	49
M ₃₉	0.338	0.335	0.213	0.206	0.260	42
M ₄₀	0.813	0.841	0.594	0.465	0.602	7
M ₄₁	0.756	0.816	0.446	0.457	0.522	19
M ₄₂	0.494	0.457	0.457	0.302	0.398	32
M ₄₃	0.636	0.672	0.480	0.475	0.461	26
M ₄₄	0.733	0.703	0.541	0.464	0.532	18
M ₄₅	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	56
M ₄₆	0.183	0.238	0.128	0.269	0.142	51
M ₄₇	0.284	0.342	0.193	0.445	0.184	48
M ₄₈	0.568	0.515	0.351	0.363	0.383	34
M ₄₉	0.742	0.697	0.629	0.370	0.581	10
M ₅₀	0.920	0.793	0.468	0.464	0.567	14
M ₅₁	0.481	0.514	0.355	0.605	0.304	38
M ₅₂	0.713	0.719	0.580	0.410	0.549	16
M ₅₃	0.991	1.000	0.625	1.000	0.511	20
M ₅₄	0.390	0.361	0.353	0.602	0.228	45
M ₅₅	0.562	0.565	0.355	0.234	0.424	31
M ₅₆	0.284	0.285	0.244	0.188	0.250	43
M ₅₇	0.858	0.794	0.572	0.468	0.599	8
M ₅₈	0.454	0.432	0.490	0.511	0.342	35
M ₅₉	0.643	0.629	0.317	0.296	0.434	29

响显著,相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数和相对苗长可作为后期紫花苜蓿种质筛选的核心评估参数。通过隶属函数和聚类综合分析,将 59 份

紫花苜蓿种质资源分为超强耐盐型、中强耐盐型、低强耐盐型、弱耐盐型和超弱耐盐型五种不同的类别。筛选出的萌发期耐盐性强的紫花苜蓿品种为

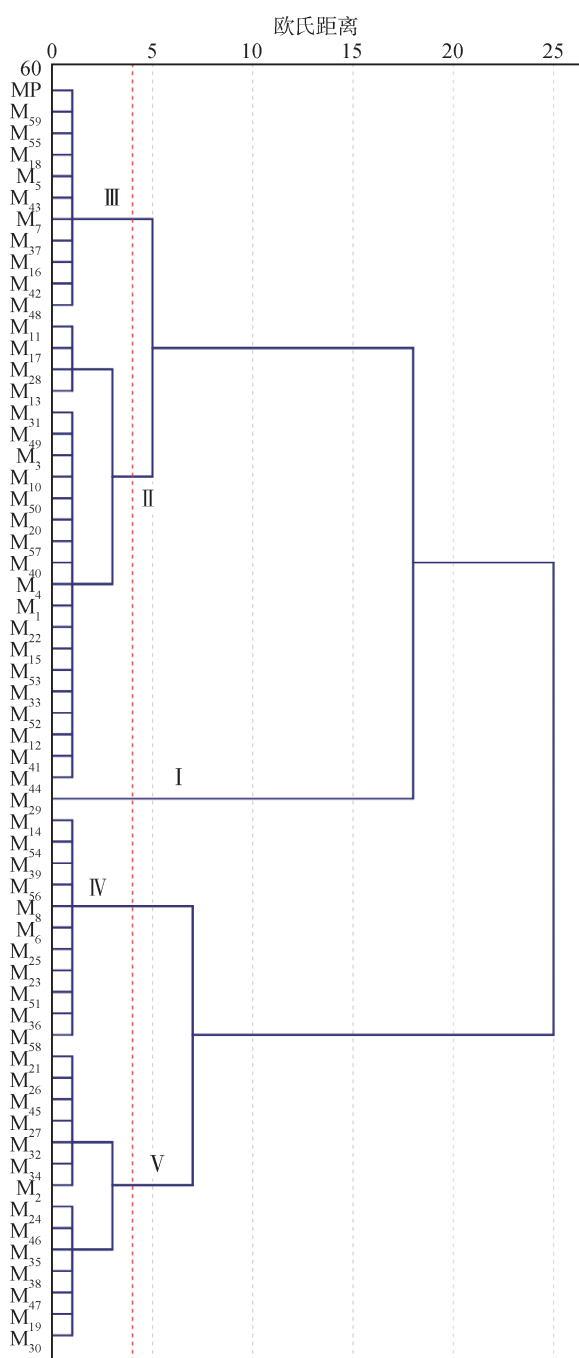


图1 59份紫花苜蓿材料耐盐性聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis of salt tolerance of 59 alfalfa materials

表7 59份紫花苜蓿种质材料萌发期相对耐盐性等级划分

Table 7 Classification of 59 alfalfa germplasm materials into relative salt tolerance classes at germination stage

相对耐盐性等级 Relative salt tolerance grade	D值 D value
超强耐盐性 Super strong salt tolerance	$D \geq 0.834$
中强耐盐性 Medium strong salt tolerance	$0.532 \leq D \leq 0.695$
低强耐盐性 Low strong salt tolerance	$0.383 \leq D \leq 0.433$
弱耐盐性 Weak salt tolerance	$0.233 \leq D \leq 0.342$
超弱耐盐性 Super weak salt tolerance	$D \leq 0.206$

‘巨能6’‘宁苜1号’‘盐宝’‘冲击波’‘敖汉’‘猎人河’和‘挑战者’。本研究为紫花苜蓿耐盐性评价和优异新品种选育提供了重要的理论支撑。

参考文献

- [1] 邢军武. 盐碱环境与盐碱农业[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 257-266
XING J W. Saline environment and saline agriculture [J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(2): 257-266
- [2] 姜雪, 郭丽琢, 牛济军, 等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1086-1098
JIANG X, GUO L Z, NIU J J, et al. Improvement effect of different amendments on soil fertility status of saline alkali soil in Hexi Irrigation Area [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1086-1098
- [3] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684
WANG J L, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673-684
- [4] 徐成龙, 董奕岑, 卢家磊, 等. 我国滨海盐碱地土壤改良及资源化利用研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 68-73
XU C L, DONG Y C, LU J L, et al. Research progress of soil improvement and soil resources utilization of coastal saline-alkaline land in China [J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 68-73
- [5] 徐静怡, 石昕岚, 李勋, 等. 国内紫花苜蓿混播研究现状分析[J]. 现代农业研究, 2024, 30(5): 107-111
XU J Y, SHI X L, LI X, et al. Analysis of domestic current situation of *Medicago sativa* L. mixed planting [J]. Modern Agriculture Research, 2024, 30(5): 107-111
- [6] 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
ZENG Y, YUAN J M, YANG J, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 23 alfalfa materials during seeds germination stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2249-2261
- [7] KARGAS G, LONDRA P, SOTIRAKOGLU K. The effect of soil texture on the conversion factor of 1:5 soil/water extract electrical conductivity ($EC_{1:5}$) to soil saturated paste extract electrical conductivity (EC_e) [J]. Water, 2022, 14(4): 642
- [8] CHENG Y, XU X, ZHANG Y, et al. Intercropping of *Echinochloa frumentacea* with leguminous forages improves hay yields, arbuscular mycorrhizal fungi diversity, and soil enzyme activities in saline-alkali soil [J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2356
- [9] 洪级曾. 苜蓿科学[M]. 北京: 农业出版社, 2009: 13-23
HONG F Z. Alfalfa science [M]. Beijing: Agricultural Press, China, 2009: 13-23
- [10] BEKKI A, TRINCHANT J C, RIGAUD J. Nitrogen fixation (C_2H_2 reduction) by *Medicago* nodules and bacteroids under sodium chloride stress [J]. Physiologia Plantarum, 1987, 71(1): 61-67
- [11] 阎南南, 崔国文, 张茜, 等. 覆盖秸秆和补播牧草对松嫩退化盐碱草地土壤盐离子含量的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(2): 112-116
YAN N N, CUI G W, ZHANG X, et al. The influence of straw covering and reseeding on soil ion content in saline and alkaline grassland in Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(2): 112-116

- [12] AL-KHATIB M, MCNEILLY T, COLLINS J C. The potential of selection and breeding for improved salt tolerance in lucerne (*Medicago sativa* L.) [J]. Euphytica, 1992, 65: 43-51
- [13] 刘卓. 不同苜蓿品种耐盐性、抗旱性比较的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008: 58-40
LIU Z. Comparison of salt tolerance and drought resistance of different alfalfa varieties [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008: 58-40
- [14] 张寒, 潘香逾, 王秀华, 等. 苜蓿萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 666-672
ZHANG H, PAN X Y, WANG X H, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant germplasm of alfalfa (*Medicago*) at germination stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 666-672.
- [15] 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.
- [16] 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
- [17] 蒋宇杰. 植物耐盐生理机制及耐盐性研究进展[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(7): 20-22
JIANG Y J. Advance in physiological mechanisms and salt tolerance of plants [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2023, 13(7): 20-22
- [18] 闫阁. 盐碱胁迫影响幼苗期与成株期羊草生长的生理代谢机制及其差异[D]. 长春: 东北师范大学, 2024: 181
Yan G. Physiological and metabolic mechanisms and their differences between seedling and adult goatgrass growth as affected by saline and alkaline stress [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2024: 181
- [19] 张纯, 唐承晨, 王吉永, 等. 转录组学在植物应答逆境胁迫中的研究进展[J]. 生物学杂志, 2017, 34(2): 86-90
ZHANG C, TANG C C, WANG J Y, et al. Advances on transcriptome of plants under stresses [J]. Journal of Biology, 2017, 34(2): 86-90
- [20] 魏天娇. 紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)品种耐盐碱性田间鉴定与抗逆生理机制的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2021: 133-149
WEI T J. Field characterization of salinity tolerance of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties and research on physiological mechanisms of stress tolerance [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences), 2021: 133-149
- [21] LIU T Y, YE N H, WANG X Y, et al. Drought stress and plant ecotype drive microbiome recruitment in switchgrass rhizosphere [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(10): 1753-1774
- [22] 张彦威, 张礼凤, 李伟, 等. 大豆发芽期和苗期耐盐性的隶属函数分析[J]. 山东农业科学, 2016, 48(1): 21-25
ZHANG Y W, ZHANG L F, LI W, et al. Evaluation on salt tolerance of soybean at germination and seedling stages using membership function [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(1): 21-25
- [23] 杨迎月, 毛桂莲, 麻冬梅, 等. 四种牧草种子在不同浓度NaCl或NaHCO₃胁迫下的萌发特性[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 637-645
YANG Y Y, MAO G L, MA D M, et al. Germination characteristics of four forage seeds under different concentrations of NaCl or NaHCO₃ stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3): 637-645
- [24] 李京蓉, 马真, 刘泽华, 等. 青海省6种高寒禾本科牧草的耐盐性[J]. 草业科学, 2019, 36(2): 442-449
LI J R, MA Z, LIU Z H, et al. Salt tolerance of six alpine grasses in Qinghai Province [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(2): 442-449.
- [25] 季波, 徐金鹏, 时龙, 等. 10种禾本科牧草种子萌发期耐盐性[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(2): 342-351
JI B, XU J P, SHI L, et al. Salt resistance of 10 grasses at germination stage [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(2): 342-351
- [26] 蒋优, 马雪融, 张博, 等. 苏丹草种子萌发期耐盐性评价及耐盐种质筛选[J]. 作物学报, 2025, 51(3): 835-844
JIANG Y, MA X R, ZHANG B, et al. Evaluation of salt tolerance and screening of salt-tolerant germplasm of Sorghum sudanese during seed germination period [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(3): 835-844
- [27] 盛伟, 吴欣池, 梁浩, 等. 41份木豆萌发期耐盐性综合评价[J]. 草业科学, 2022, 39(8): 1607-1617
SHENG W, WU X C, LIANG H, et al. Evaluation of salt tolerance in 41 pigeon pea varieties during germination [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1607-1617
- [28] 高利英, 邓永胜, 韩宗福, 等. 黄淮棉区棉花品种种子萌发期低温耐受性评价[J]. 棉花学报, 2018, 30(6): 455-463
GAO L Y, DENG Y S, HAN Z F, et al. Evaluation of the low-temperature tolerance of cotton varieties in the Huang-Huai Region during seed germination [J]. Cotton Science, 2018, 30(6): 455-463
- [29] 陈雅慧, 史慎奎, 李美仪, 等. 40份谷子栽培品种萌发期耐盐性鉴定[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(1): 33-38
CHEN Y H, SHI S K, LI M Y, et al. Identification of salt resistance during germination of 40 cultivated foxtail millet varieties [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2025, 31(1): 33-38
- [30] 张则宇, 李雪, 王焱, 等. 59份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112-121
ZHANG Z Y, LI X, WANG Y, et al. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59 alfalfa germplasm materials at seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 112-121
- [31] 荆瑞勇, 王丽艳, 郑桂萍, 等. 水稻萌发期和幼苗期耐盐性鉴定指标筛选及综合评价[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(6): 1-6, 19
JING R Y, WANG L Y, ZHENG G P, et al. Comprehensive assessment and selection of identification index of rice salt tolerance at germination stage and seedling stage [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019, 31(6): 1-6, 19
- [32] 刘彤彤, 李宁, 魏良迪, 等. 山西省主推小麦品种芽期及苗期耐盐性的综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 22-33
LIU T T, LI N, WEI L D, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of wheat varieties in Shanxi Province during germination and seedling stage [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(2): 22-33