

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.010

引用格式:苏力合,黄嵘峥,胡天宇,等.盐胁迫下不同紫花苜蓿品种萌发期和苗期的耐盐性综合评价[J].草地学报,2026,34(5):1664—1676

SU Li-he, HUANG Rong-zheng, HU Tian-yu, et al. Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance of different Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Cultivars during Germination and Seedling Stages under Salt Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1664—1676

盐胁迫下不同紫花苜蓿品种萌发期和苗期的耐盐性综合评价

苏力合,黄嵘峥,胡天宇,马春晖*

(石河子大学动物科技学院,新疆石河子832000)

摘要:为评价不同紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种盐胁迫下的耐盐性差异,筛选优质耐盐种质资源。本研究以25份苜蓿品种为材料,设置200 mmol·L⁻¹ NaCl盐胁迫和超纯水对照处理,测定萌发期(发芽势、发芽率等8项)及苗期(株高、分枝数等6项)参数,采用隶属函数、综合耐盐值D及聚类分析进行综合评价。结果显示:盐胁迫显著降低所有萌发参数,种子活力指数降幅最大(-92.26%),幼苗干重受影响最小(-11.76%);聚类分析将萌发期25份材料划分为5个耐盐等级,含2份强耐盐、4份较强耐盐、5份中等耐盐、10份弱耐盐及4份盐敏感品种。对12份代表性品种苗期评价发现,盐胁迫对株高、地上鲜重、叶片相对含水量及电导率影响极显著($P<0.01$),且品种间差异显著。整合萌发期与苗期指标,最终筛选出‘新牧4号’‘中苜4号’和‘Bara520YQ’3个强耐盐品种,可作为耐盐育种及盐碱地栽培的重要种质资源。

关键词:紫花苜蓿;种子萌发;苗期;耐盐性;综合评价

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1664-13

Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance of different Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Cultivars during Germination and Seedling Stages under Salt Stress

SU Li-he, HUANG Rong-zheng, HU Tian-yu, MA Chun-hui*

(College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To evaluate the differences in salt tolerance among different alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars under salt stress conditions and screen high-quality salt-tolerant germplasm resources, this study used 25 alfalfa cultivars as experimental materials, with two treatments of salt stress (200 mmol·L⁻¹ NaCl solution) and control (ultrapure water). Germination and growth parameters were measured during the germination period (eight indicators, such as germination energy and germination rate, etc.) and seedling stage (six indicators, such as plant height and branch number, etc.), and a comprehensive evaluation of salt tolerance was conducted using methods such as membership function value, comprehensive salt tolerance (D value), and cluster analyses. The results showed that salt stress significantly reduced all germination parameters, with the seed vigor index exhibiting the highest reduction rate (-92.26%), whereas the seedling dry weight was the least affected (-11.76%). Cluster analysis classified the 25 alfalfa cultivars into five salt tolerance grades at the germination stage: included 2 of the strongest salt-tolerant cultivars, 4 strong salt-tolerant cultivars, 5 moderate salt-tolerant cultivars, 10 weak salt-resistance cultivars, and 4 salt-sensitive cultivars. Further evaluation of salt tolerance of 12 representative alfalfa cultivars during the seedling stage revealed salt stress had extremely significant

收稿日期:2025-06-27;修回日期:2025-10-21

基金项目:国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:苏力合(1995-),女,蒙古族,新疆塔城人,博士,主要从事牧草生理及分子机制研究, E-mail: lihesu2025@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: chunhuima@126.com

effects on the plant height, above-ground fresh weight, relative water content, and electrical conductivity of alfalfa ($P < 0.01$), with significant differences between cultivars. By integrating the indicators of both germination and seedling stages, the three strongest salt-tolerant cultivars, namely 'Xinmu No. 4', 'Zhongmu No. 4', and 'Bara520YQ', were ultimately selected as important germplasm resources for salt-tolerant breeding and cultivation in saline-alkali soil regions.

Key words: *Medicago sativa* L.; Seed germination; Seedling stages; Salt tolerance; Comprehensive evaluation

土壤盐碱化是限制全球农作物生产的主要非生物胁迫之一。据不完全统计,目前全世界约有9.54亿 hm^2 土地受到盐碱化的影响^[1],而在中国,盐碱地总面积高达9913万 hm^2 ,约占世界盐碱地总面积的十分之一。除了自然因素(海平面上升、降雨量少、地表蒸发量大、地表水位浅)形成的盐碱化,灌溉不当、土壤排水不良以及过度施用化肥和农药也在加剧这一风险^[2]。盐渍化土壤会通过渗透胁迫、离子毒害及氧化损伤等多重机制,影响植物从萌发到衰老几乎所有的生长发育阶段。当植物根系遭遇盐胁迫后进入快速渗透胁迫阶段,表现为根系吸水困难,引起植物生理干旱;与此同时,毒性离子(主要是 Na^+ 和 Cl^-)在植物体内缓慢积累进入离子胁迫阶段^[3]。二者共同影响细胞功能和养分吸收,引发活性氧积累并抑制光合作用,最终导致植物生长减缓和产量下降^[4]。

植物耐盐能力存在显著的种间、地理分布以及生长发育阶段之间的差异。作为植物生命周期的起始阶段,种子萌发和幼苗建植过程不仅是植株后续生长发育的基础,更是决定作物产量的关键环节^[5]。然而,这两个阶段同时也是植物对盐胁迫最为敏感的时期。目前,国内外学者已围绕多种作物开展了萌发期和苗期耐盐性研究,证实盐胁迫会显著影响植物种子的萌发特性及幼苗的生长发育,萌发期表现出种子发芽迟缓、发芽率降低、胚根生长受阻、幼苗存活率下降等一系列负面效应^[6-7];而在幼苗生长阶段,盐胁迫会显著抑制植株的形态建成和生理代谢过程^[8-9]。鉴于这些关键生长阶段对盐胁迫的高度敏感性,非常有必要开展植物萌发期和苗期的耐盐性评价。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为苜蓿属(*Medicago*)多年生豆科牧草,因其营养价值高、适口性好而在全世界广泛种植,其高产潜力对农业生产有积极贡献^[10]。紫花苜蓿不仅对盐碱、干旱以及寒冷等非生物胁迫具有耐受性^[11-13],还具有改良盐碱土壤理化性质,减缓土壤盐渍化趋势的生态功能^[14-15]。在中高纬度盐碱地区种植苜蓿,既能有效利用和改良轻中度盐碱地,还能缓解与粮食作物争地的矛盾。然而,紫花苜蓿的遗传背景高度复杂,不同种质资源

(包括引进种、本地育成种和野生种)之间的耐盐性存在显著差异,且已有的研究多聚焦于单一生长阶段(萌发期或苗期)的耐盐性评价^[16-17]。此外,同一苜蓿品种在不同生长发育阶段对盐胁迫的耐受能力亦存在明显差异。这种复杂的耐盐特性为筛选适宜在盐碱地生长的苜蓿品种带来了挑战。基于此,本研究在前人研究基础上,以国内外引进的25份紫花苜蓿品种为试验材料,通过系统分析种子萌发相关指标并结合耐盐综合D值评价,筛选出在萌发期具有不同耐盐特性的苜蓿品种。在此基础上,进一步对代表性品种开展苗期耐盐性鉴定,最终筛选出高耐盐性的紫花苜蓿品种,以期为盐碱地的综合利用、盐碱地种植结构优化提供优质的品种资源,对推动盐碱地农业可持续发展具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料 with 处理

供试紫花苜蓿品种的详细信息见表1。为了确定最适盐处理浓度,随机选取'WL358HQ'和'维多利亚'紫花苜蓿进行盐胁迫预试验(对照,100,150,200和250 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl),通过测定发芽势、发芽率和苗长,筛选出200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl作为评价紫花苜蓿品种间耐盐性的处理浓度。选择各品种中大小一致饱满的紫花苜蓿种子,用75%酒精消毒1 min,超纯水冲洗5次,将50粒种子置于铺有双层滤纸的9 cm培养皿中,4次重复。初始每个培养皿添加8 mL的200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl溶液,对照添加等量超纯水,称重后移入智能人工气候箱(RXZ-160B,江南仪器)中进行发芽试验,设置条件为:温度25℃/15℃、光周期14 h/10 h(光/暗)、相对湿度(50±2)%。每隔一天用称重法补充蒸发的水分,每天观察记录种子发芽及生长情况。

基于种子萌发试验筛选出12份具有不同耐盐性的紫花苜蓿品种,进一步在苗期进行盐胁迫处理。按照上述方法,将长出胚芽的种子单株点播于育苗盘(高10 cm),基质采用泥炭土:蛭石:珍珠岩=3:1:1的混合物,在温度20℃~26℃,湿度50%~60%的温

室内培养,额外补充光照,每3 d浇灌一次超纯水,每7 d浇灌一次1/2 Hoagland 营养液。待紫花苜蓿生长至3周龄,用 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl溶液进行浇灌处理。

每2 d浇灌1次盐溶液,对照组继续浇灌超纯水。盐胁迫处理10 d后对紫花苜蓿进行农艺性状测定,并采集紫花苜蓿叶片用于生理指标测定。

表1 紫花苜蓿品种信息

Table 1 Information of alfalfa cultivars

品种名称 Cultivar	来源 Origin	品种名称 Cultivar	来源 Origin
WL298HQ	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	Bara416WET	百绿(天津)国际种业有限公司 Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.
WL343HQ	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	Bara520YQ	百绿(天津)国际种业有限公司 Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.
WL354HQ	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	阿尔冈金 Algonquin	百绿(天津)国际种业有限公司 Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.
WL358HQ	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	威纳尔 Vinal	郑州华丰草业科技有限公司 Harvest Forage Agro Co., Ltd.
WL366HQ	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	拉迪诺 Ladino	郑州华丰草业科技有限公司 Harvest Forage Agro Co., Ltd.
惊喜 Surprise	北京正道种业有限公司 Beijing Rytway Seed Co., Ltd.	劲能 5030 Power5030	郑州华丰草业科技有限公司 Harvest Forage Agro Co., Ltd.
中苜1号	中国农业科学院北京畜牧兽医研究所	新牧4号	郑州华丰草业科技有限公司 Harvest Forage Agro Co., Ltd.
Zhong mu No.1	Institute of Animal Sciences of CAAS	Xin mu No.4	
三得利 Sanditi	百绿(天津)国际种业有限公司 Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.	康赛 I Octane	北京佰清源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Green Animal Husbandry S&T Development Co., LTD
维多利亚	百绿(天津)国际种业有限公司	瑞得 Reload	北京佰清源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Green Animal Husbandry S&T Development Co., Ltd.
Victoria	Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.	阿迪娜 Adrenalin	北京佰清源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Green Animal Husbandry S&T Development Co., Ltd.
中苜4号	中国农业科学院北京畜牧兽医研究所	骑士 T Stolkpile	北京佰清源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Green Animal Husbandry S&T Development Co., Ltd.
Zhong mu No.4	Institute of Animal Sciences of CAAS	标靶 Barricade	北京佰清源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Green Animal Husbandry S&T Development Co., Ltd.
金皇后	百绿(天津)国际种业有限公司		
Gold empress	Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.		
Bara210SC	百绿(天津)国际种业有限公司		
	Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.		
Bara310SC	百绿(天津)国际种业有限公司		
	Bailv (Tian jin) International Seed Co., Ltd.		

1.2 测定指标与方法

1.2.1 萌发期发芽指标测定 种子萌发参照国标 GB/T 2930.4-2017。指标包括发芽势(Germination energy, GE)、发芽率(Germination rate, GR)、子叶生长率(Cotyledon growth rate, CGR)、幼苗长度(Seedling length, SL)、发芽指数(Germination index, GI)、活力指数(Vitality index, VI)、幼苗鲜重(Seedling fresh weight, SFW)和幼苗干重(Seedling dry weight, SDW)。种子萌发以胚根长度超过种子长度的1/2为发芽标准。

发芽势(GE):第3天的发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽率(GR):第7天的发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

子叶生长率(CGR):第7天的子叶长出数/供试种子数 $\times 100\%$;

幼苗长度(SL):第7天用游标卡尺测定幼苗长度,每皿测定10株;

发芽指数(GI) $=\sum(Gt/Dt)$, Gt为第t日的发芽种子数, Dt为相应的发芽天数;

活力指数(VI) $=$ 发芽指数(GI) $\times$ SL, SL为第

7天的幼苗长度;

幼苗鲜重(SFW):每皿中随机挑选10株小幼苗,将水分擦干净后称重;

幼苗干重(SDW):将称重后的小幼苗在 105°C 下杀青30 min,然后 65°C 烘至恒重,再称重。

相对值 $=$ 各指标处理值/对照值。

1.2.2 苗期农艺性状及生理指标测定 分枝数(Branch number, BN):单株苜蓿地上部的分枝数量,每个处理测量10株。株高(Plant height, PH):用卷尺测量植株的绝对株高,每个处理测量10株。鲜重(Fresh weight, FW):测量完株高后,将苜蓿地上部刈割并称重,记为鲜重。干重(Dry weight, DW):将称重后的幼苗在 105°C 下杀青30 min,然后 65°C 烘至恒重,称重。

根据Wu等^[18]的方法测定电导率(Electrical conductivity, EC)并略作修改:称取0.1 g相同位置的紫花苜蓿叶片,使用超纯水清洗叶面的灰尘并擦除污物。将叶片剪成小细条后浸入装有25 mL超纯水的离心管中,先震荡30 min再静置6 h。使用电导率仪测定溶液电导率,记为E1。再将溶液沸水浴30 min,冷却至室温后再次测电导率,记为E2。计

算公式: $EC(\%) = E1/E2 \times 100$ 。

根据 Zhang 等^[19]的方法测定叶片相对含水量(Relative water content, RWC): $RWC = (FW - DW)/(TW - DW) \times 100\%$ 。其中,FW 为叶片样品的鲜重;TW 表示在暗处超纯水中浸泡 24 h 的叶片饱和重;DW 表示叶片在 65℃ 烘干 24 h 后的干重。

1.3 数据分析

用 Excel 2021 对数据进行初步分析,用 SPSS 26.0 进行方差分析、相关性分析及主成分分析(Principal components analysis, PCA);对照组与盐胁迫处理组的组间比较采用两独立样本 t 检验。通过隶属函数分析和 PCA 分析计算耐盐性综合评价值 D , D 值越高表明苜蓿耐盐性越好。

(1)耐盐系数(Salt tolerance coefficients, STC):

$STC = \text{盐胁迫下指标值} / \text{非盐胁迫下指标值} \times 100$;

(2)不同苜蓿品种各指标耐盐系数的隶属函数值(Membership function value, MFV):

$MFV1 = (STC_j - STC_{\min}) / (STC_{\max} - STC_{\min})$ $j=1, 2, 3, \dots, n$;

$MFV2 = 1 - (STC_j - STC_{\min}) / (STC_{\max} - STC_{\min})$ $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

式中 STC_j 表示特定品种第 j 个指标的 STC 值。 $STC_{\min}$ 与 $STC_{\max}$ 分别表示第 j 个指标 STC 值的在所有品种中的最小值与最大值。MFV2 用于与耐盐

性负相关的性状(值越低,耐盐性越高)。

(3)不同苜蓿品种各综合指标的权重(W_j)如下计算:

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n |P_j| \quad j=1, 2, 3, \dots, n;$$

式中 W_j 表示第 j 个指标在所有指标中的重要性,即权重; P_j 表示每个苜蓿品种第 j 个指标的贡献率。

(4)不同苜蓿品种的综合抗逆能力的大小:

$$D = \sum_{j=1}^n U(STC_j) \times W_j \quad j=1, 2, 3, \dots, n。$$

式中 D 为各苜蓿品种在盐胁迫下的抗逆性综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿品种萌发期的耐盐性差异

2.1.1 盐胁迫对不同紫花苜蓿品种萌发性状的影响 由图 1 可知,8 个萌发性状在 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐胁迫处理下受到明显抑制,并且苜蓿品种之间存在较大差异。对照组中各性状变异系数在 $6.62\% \sim 17.65\%$ 之间,盐处理组中各性状变异系数在 $11.45\% \sim 25.61\%$ 之间(表 2)。与对照相比,盐胁迫下 25 个品种的发芽势、发芽率、子叶生长率、苗长、发芽指数、活力指数、幼苗鲜重和幼苗干重分别下降 47.37% 、 21.48% 、 43.78% 、 72.29% 、 72.03% 、 92.26% 、 40% 和 11.76% (表 2)。种子活力指数受盐胁迫影响最大,而幼苗干重受盐胁迫影响最小(图 1f, 1h)。

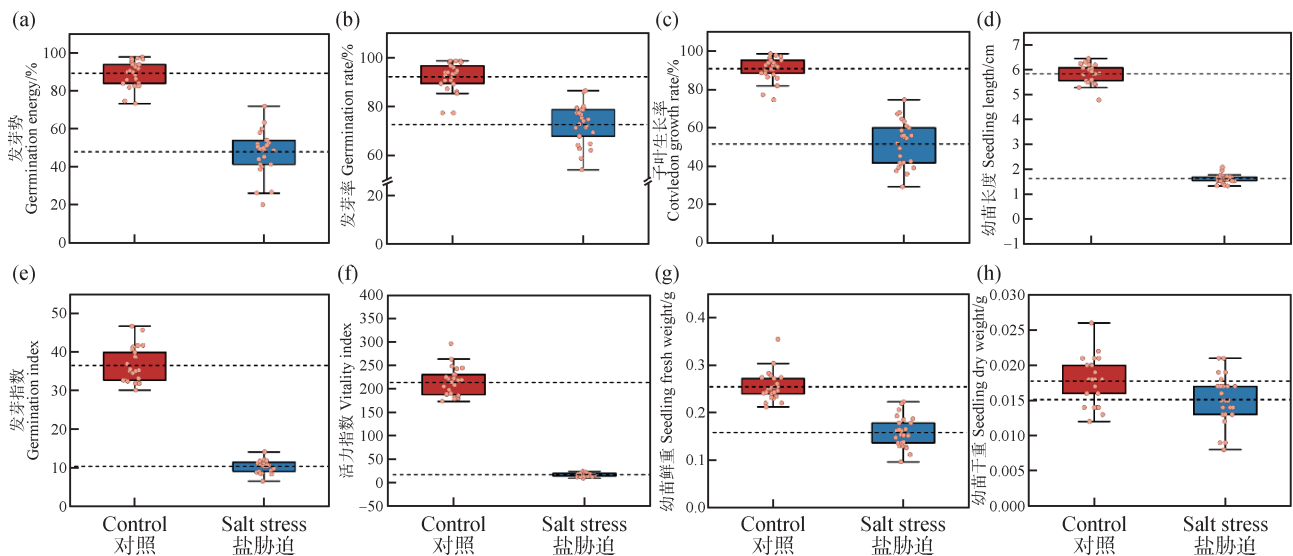


图 1 对照与盐胁迫处理下不同紫花苜蓿品种的萌发性状

Fig. 1 Germination traits of alfalfa cultivars under control and salt stress treatments

注:(a)发芽势;(b)发芽率;(c)子叶生长率;(d)幼苗长度;(e)发芽指数;(f)活力指数;(g)幼苗鲜重;(h)幼苗干重

Note: (a) Germination energy; (b) Germination rate; (c) Cotyledon growth rate; (d) Seedling length; (e) Germination index; (f) Vitality index; (g) Seedling fresh weight; (h) Seedling dry weight

表 2 对照与盐胁迫处理下 25 份紫花苜蓿品种的萌发性状比较

Table 2 Comparison of germination traits of 25 alfalfa cultivars under control and salt stress treatments

处理 Treatment	参数 Parameter	发芽势 Germination energy/%	发芽率 Germination rate/%	子叶生长率 Cotyledon growth rate/%	苗长 Seedling length/cm	发芽指数 Germination index	活力指数 Vitality index	鲜重 Fresh weight/ g	干重 Dry weight/ g
对照 Control	最大值 Max.	100.00	100.00	100.00	6.67	47.33	306.70	0.38	0.021
	最小值 Min.	72.00	76.00	72.00	4.69	28.95	159.32	0.20	0.012
	平均值 Average.	89.41	92.43	91.12	5.81	36.61	212.95	0.25	0.017
	标准差 SD	7.16	6.12	6.28	0.41	4.63	32.17	0.03	0.003
	变异系数 CV/%	8.01	6.62	6.89	7.06	12.65	15.11	12.00	17.650
盐处理 Salt treatment	最大值 Max.	74.00	91.30	76.00	2.29	15.27	27.46	0.24	0.024
	最小值 Min.	18.00	54.00	26.00	1.28	6.31	8.75	0.09	0.007
	平均值 Average	47.06	72.58	51.23	1.61	10.24	16.49	0.15	0.015
	标准差 SD	12.05	8.31	11.84	0.19	1.62	3.65	0.03	0.003
	变异系数 CV/%	25.61	11.45	23.11	11.80	15.82	22.13	20.00	20.000
较对照变化 Comparison with the control	变化百分比 Percentage of variation/%	-47.37	-21.48	-43.78	-72.29	-72.03	-92.26	-40.00	-11.76

2.1.2 紫花苜蓿品种萌发期的单项耐盐系数及相关性分析 为消除紫花苜蓿品种间存在的差异,使用各萌发性状的 STC 值对苜蓿耐盐性进行综合评价(图 2)。STC 值越高表示盐胁迫对种子萌发影响越小,STC 值越低则影响越大。25 份苜蓿品种的不同萌发性状具有显著的差异性,相对发芽势变化范围为 27.25%~75.52%,相对发芽率变化范围为 65.53%~87.74%,相对子叶生长率变化范围为 37.75%~77.24%,相对发芽指数变化范围为 20.08%~40.57%,相对活力指数变化范围为 5.06%~12.16%,相对苗长变化范围为 21.42%~35.07%,相对鲜重变化范围为 38.14%~92.86%,相对干重变化范围为 43.07%~107.43%。相对发芽势的变异系数最大(22.73%),相对发芽率的变异系数最小(8.86%)。‘惊喜’‘Bara520YQ’和‘新牧 4 号’相对发芽势的 STC 值显著高于其他品种($P<0.05$);‘惊喜’‘维多利亚’‘新牧 4 号’和‘阿迪娜’相对子叶生长率的 STC 值显著高于其他品种($P<0.05$);‘新牧 4 号’相对发芽指数和相对活力指数的 STC 值显著高于其他品种(‘阿迪娜’的相对发芽指数除外)($P<0.05$);‘WL358HQ’和‘惊喜’相对苗长的 STC 值显著高于其他品种($P<0.05$);‘中苜 1 号’相对鲜重的 STC 值显著高于其他品种(‘中苜 4 号’除外)($P<0.05$);‘威纳尔’相对发芽势、相对干重和相对活力指数的 STC 值在 25 个苜蓿品种中均

为最低。

进一步对苜蓿萌发性状的 STC 值进行相关性分析(表 3)。结果表明,相对发芽势与相对发芽率、相对子叶生长率、相对苗长、相对发芽指数和相对活力指数之间均呈极显著正相关($P<0.01$);相对鲜重与相对发芽率、相对发芽指数和相对干重呈极显著正相关($P<0.01$),与相对子叶生长率和相对活力指数呈显著正相关($P<0.05$);相对发芽指数和相对活力指数相关性最强($r=0.851^{**}$),相对活力指数与相对干重相关性最弱($r=-0.025$)。

2.1.3 紫花苜蓿萌发期耐盐系数的主成分分析及耐盐能力的综合评价 利用单一指标评价各苜蓿品种的耐盐性可能会影响结果的准确性,因此采用主成分降维的方法对苜蓿品种的 8 项萌发性状进行 PCA 分析。本研究中,PCA 分析将 8 个萌发性状转化为 3 个相对独立的综合指标,累计贡献率达到 83.14%(图 3)。综合指标 PC1 的特征值为 4.055,方差贡献率为 50.70%,相对发芽指数(0.923)在 PC1 中占有最高载荷,主要反映了苜蓿种子萌发情况;综合指标 PC2 的特征值为 1.625,方差贡献率为 20.32%,相对干重(0.913)在 PC2 中占有最高载荷,主要反映了苜蓿生物量积累;综合指标 PC3 的特征值为 0.971,方差贡献率为 12.14%,相对苗长(0.926)在 PC3 中占有最高载荷,主要反映了苜蓿的生长情况(表 4)。

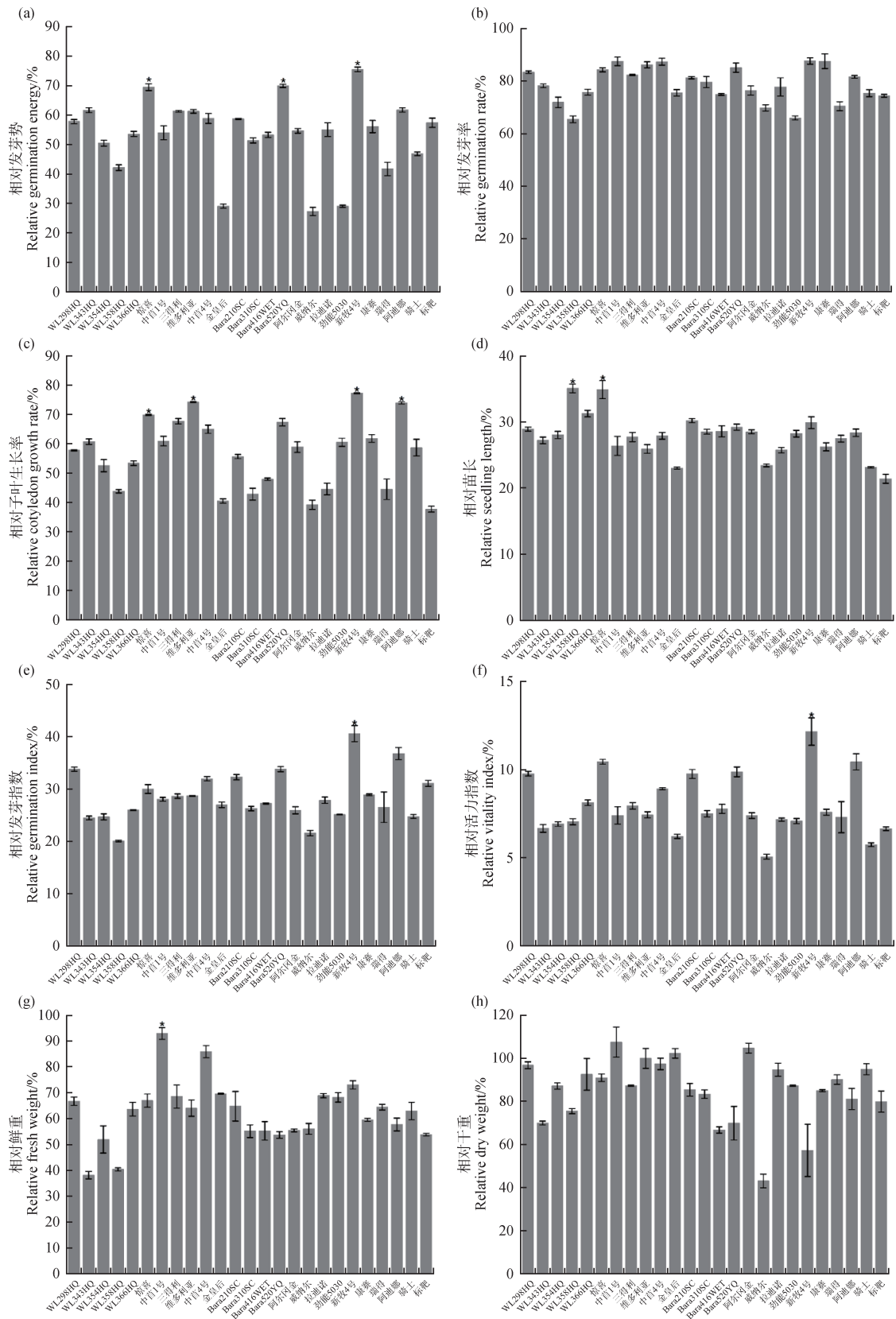


图2 紫花苜蓿品种萌发参数的单项耐盐系数

Fig. 2 Single salt tolerance coefficients for germination parameters of alfalfa cultivars

注:(a)相对发芽势;(b)相对发芽率;(c)相对子叶生长率;(d)相对苗长;(e)相对发芽指数;(f)相对活力指数;(g)相对幼苗鲜重;(h)相对幼苗干重。同一指标下不同苜蓿品种间标有*号,则表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

Note: (a) Relative germination energy; (b) Relative germination rate; (c) Relative cotyledon growth rate; (d) Relative seedling length; (e) Relative germination index; (f) Relative vitality index; (g) Relative seedling fresh weight; (h) Relative seedling dry weight. * indicates significant differences of the same index among alfalfa cultivars at the 0.05 level

表 3 紫花苜蓿品种萌发参数间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of germination parameters of alfalfa cultivars

指标 Index	相对发芽势 RGE	相对发芽率 RGR	相对子叶生长率 RCGR	相对苗长 RSL	相对发芽指数 RGI	相对活力指数 RVI	相对鲜重 RFW	相对干重 RDW
相对发芽势 RGE	1.000							
相对发芽率 RGR	0.708**	1.000						
相对子叶生长率 RCGR	0.694**	0.641**	1.000					
相对苗长 RSL	0.351**	0.034	0.304*	1.000				
相对发芽指数 RGI	0.697**	0.681**	0.556**	0.082	1.000			
相对活力指数 RVI	0.741**	0.575**	0.624**	0.585**	0.851**	1.000		
相对鲜重 RFW	0.089	0.440**	0.284*	−0.085	0.350**	0.255*	1.000	
相对干重 RDW	0.011	0.188	0.110	−0.026	0.001	0.025	0.443**	1.000

注:**和*分别表示极显著相关($P<0.01$)和显著相关($P<0.05$)
Note: **and * represent extremely significant correlation ($P<0.01$) and significant correlation ($P<0.05$), respectively

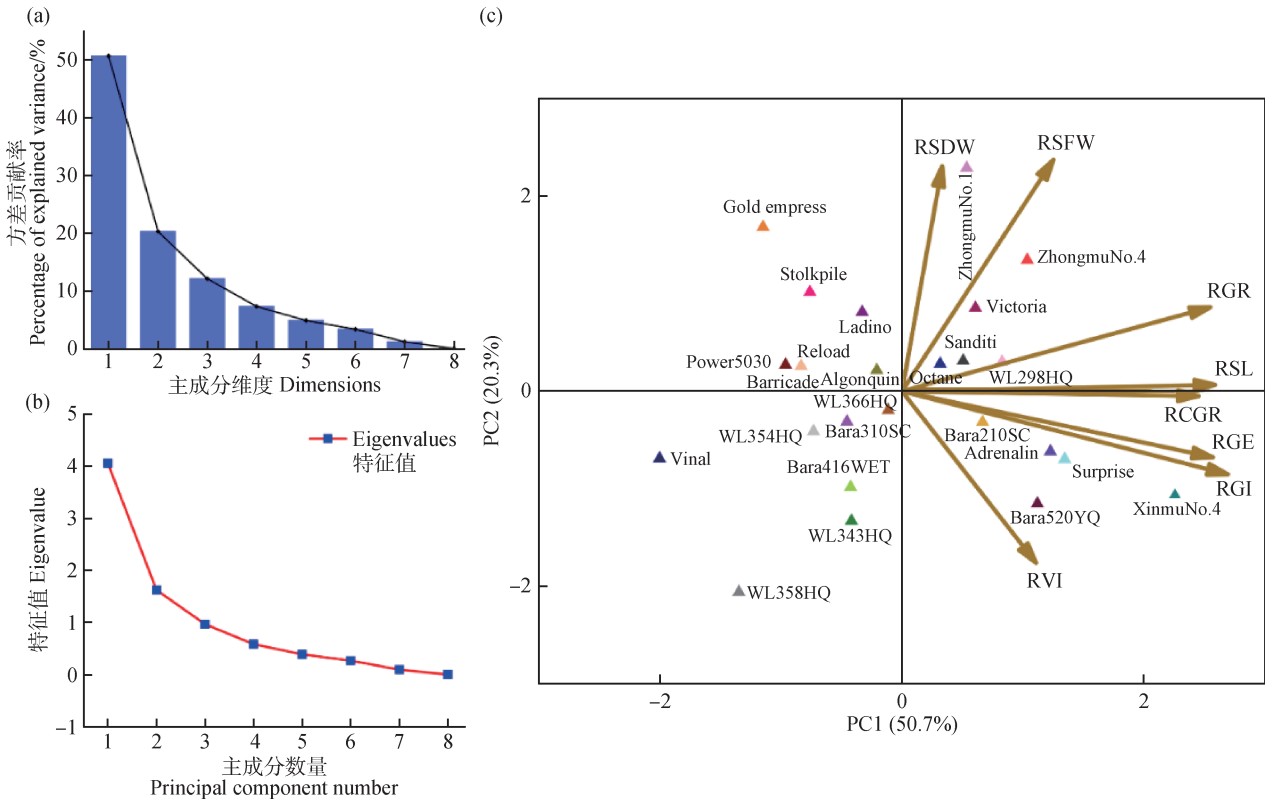


图 3 紫花苜蓿品种萌发参数的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of germination parameters of alfalfa cultivars

注:(a)每个主成分的方差贡献率;(b)每个主成分的特征值;(c)第一、第二主成分可视化
Note: (a) Percentage of explained variances. (b) eigenvalues. (c) Visualization of the first and second principal components

表 4 萌发参数主成分的特征向量

Table 4 Eigenvectors of principal components of germination parameters

参数 Parameter	PC1	PC2	PC3
相对发芽势 Relative germination energy	0.859	−0.059	0.236
相对发芽率 Relative germination rate	0.857	0.311	−0.102
相对子叶生长率 Relative cotyledon growth rate	0.765	0.182	0.255
相对发芽指数 Relative germination index	0.923	0.028	−0.084
相对活力指数 Relative vitality index	0.851	−0.013	0.420
相对苗长 Relative seedling length	0.177	−0.063	0.962
相对鲜重 Relative fresh weight	0.339	0.768	−0.228
相对干重 Relative dry weight	−0.088	0.913	0.093

为了综合评价紫花苜蓿品种在萌发期的耐盐性,采用隶属函数法对 25 份紫花苜蓿材料的耐盐能力进行综合评价。通过公式(2)计算出 25 个品种各萌发参数的 MFV。结合主成分分析中前 3 个因子的特征值和因子载荷,用公式(3)计算出各指标的权重系数,用公式(4)将 MFV 与权重系数复合计算获得 25 份苜蓿品种的耐盐性综合评价 D 值(表 5),以 D 值为基础进行聚类热图分析(图 4)。每个品种的这个指标的 MFV 在 0~1 之间变化, D 值范围为 0.108~0.897, D 值越高代表耐盐

性越强,反之亦然。按照 D 值排序及聚类分析,可将 25 个苜蓿品种划分为 5 个等级。第一类群包括‘新牧 4 号’和‘惊喜’2 个高耐盐苜蓿品种;第二类群包括‘阿迪娜’‘中苜 4 号’‘Bara520YQ’和‘WL298HQ’4 个耐盐苜蓿品种;第三类群包括 5 个中等耐盐品种;第四类群包括 10 个敏盐品种;第五类群包括 4 个强敏盐品种。将耐盐的前 6 份及敏盐的后 6 份苜蓿材料进一步在苗期进行盐胁迫处理,以探究紫花苜蓿材料在苗期应对盐胁迫时的差异表现。

表 5 紫花苜蓿品种萌发期耐盐性综合评价及排序

Table 5 Comprehensive evaluation value and ranking of salt tolerance of alfalfa cultivars under germination stage

品种 Cultivars	D 值 D value	排名 Rank	品种 Cultivars	D 值 D value	排名 Rank	品种 Cultivars	D 值 D value	排名 Rank
新牧 4 号 Xinmu No.4	0.897	1	三得利 Sanditi	0.626	10	WL354HQ	0.375	19
惊喜 Surprise	0.782	2	康赛 Octane	0.580	11	瑞得 Reload	0.366	20
阿迪娜 Adrenalin	0.720	3	WL366HQ	0.510	12	劲能 5030 Power5030	0.358	21
中苜 4 号 Zhongmu No.4	0.698	4	阿尔冈金 Algonquin	0.496	13	标靶 Barricade	0.344	22
Bara520YQ	0.690	5	拉迪诺 Ladino	0.466	14	金皇后 Gold empress	0.329	23
WL298HQ	0.675	6	Bara310SC	0.424	15	WL358HQ	0.247	24
维多利亚 Victoria	0.658	7	Bara416WET	0.409	16	威纳尔 Vinal	0.108	25
中苜 1 号 Zhongmu No.1	0.633	8	WL343HQ	0.407	17			
Bara210SC	0.633	9	骑士 Stolkipile	0.395	18			

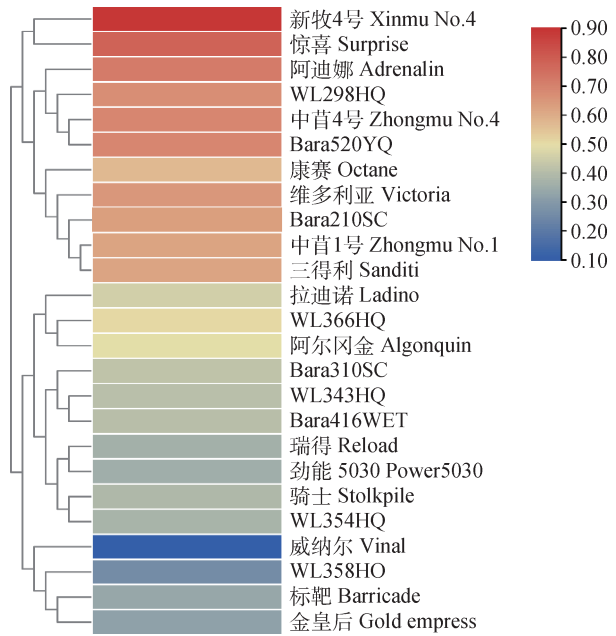


图 4 25 个紫花苜蓿品种耐盐性聚类热图分析

Fig. 4 Cluster heatmap analysis of salt tolerance in 25 alfalfa cultivars

2.2 紫花苜蓿品种苗期的耐盐性差异

2.2.1 盐胁迫对苗期紫花苜蓿农艺性状及叶片生理的影响 对萌发期盐胁迫处理中筛选出的 12 份具有耐盐差异性的苜蓿,进一步在苗期进行耐盐性鉴

定。盐胁迫下,12 个苜蓿品种的生长发育均受到不同程度的抑制(图 5)。与对照组相比,盐胁迫处理极显著降低了所有苜蓿品种的株高和地上鲜重(图 5a, 5c) ($P<0.01$),株高和地上鲜重分别下降了 18.36%~41.38% 和 27.81%~50.38%(表 6)。在这之中,‘中苜 4 号’株高的相对变化率最小,‘WL358HQ’株高的相对变化率最大;‘新牧 4 号’地上鲜重的相对变化率最小,‘劲能 5030’地上鲜重的相对变化率最大(表 6)。盐胁迫下,除‘阿迪娜’‘中苜 4 号’‘Bara520YQ’和‘劲能 5030’品种外,其余 8 个苜蓿品种的分枝数显著降低(图 5b) ($P<0.05$),分枝数相对变化率范围为 0.35%~29.07%,‘WL358HQ’品种的分枝数下降幅度最大(表 6)。与对照组相比,盐胁迫显著降低了除‘新牧 4 号’和‘Bara520YQ’品种外的其他苜蓿品种的地上干重(图 5d) ($P<0.05$),‘Bara520YQ’品种的地上干重较对照升高了 13.51%,而‘劲能 5030’较对照下降了 40.38%,表现出了极高的差异性(表 6)。

盐胁迫处理极显著影响苜蓿叶片的相对含水量和电导率($P<0.01$)。与对照组相比,盐胁迫处理极显著降低了所有苜蓿品种的叶片相对含水量(图 5e) ($P<0.01$),含水量相对变化率介于

16.95%~31.08%，其中‘新牧4号’和‘Bara520YQ’品种表现出了较小幅度的降低，而‘WL358HQ’品种的下降幅度最大(表6)。就电导率而言，盐胁迫处理极显著升高了所有苜蓿品种的电导率(图

5f)($P<0.01$)，电导率相对变化率范围为66.26%~201.71%，‘Bara520YQ’品种的电导率上升幅度最小，而‘劲能5030’品种则产生了最大幅度的上升(表6)。

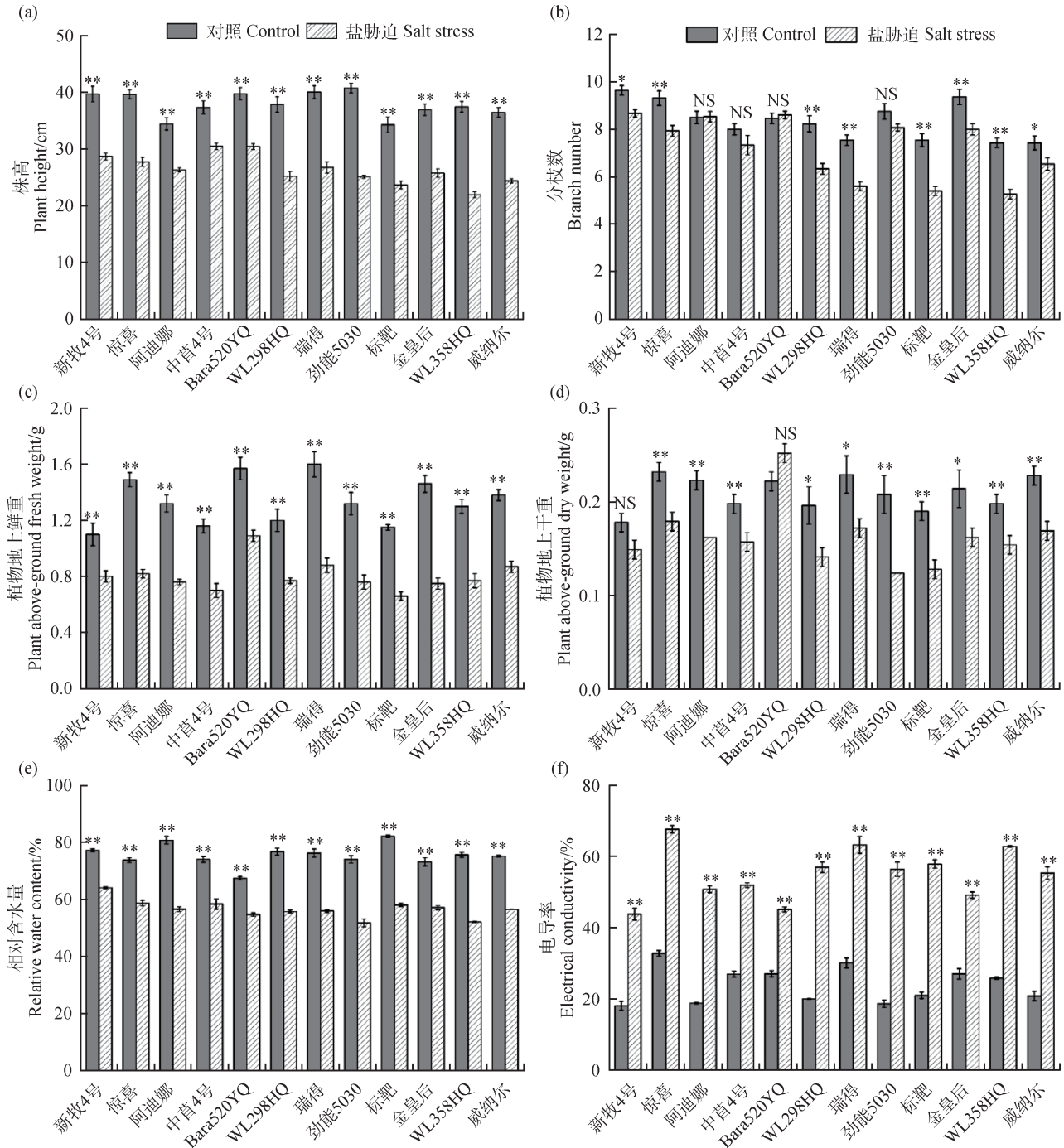


图5 盐胁迫下不同紫花苜蓿品种农艺性状、叶片相对含水量和电导率的变化

Fig. 5 Changes in agronomical traits, leaf relative water content and electrical conductivity of different alfalfa cultivars under salt stress
注: (a) 株高; (b) 分枝数; (c) 植物地上鲜重; (d) 植物地上干重; (e) 叶片相对含水量; (f) 电导率. **表示差异极显著 ($P<0.01$), *表示差异显著 ($P<0.05$), NS表示差异不显著

Note: (a) plant height; (b) branch number; (c) plant above-ground fresh weight; (d) plant above-ground dry weight; (e) leaf relative water content; (f) electrical conductivity. ** indicated extremely significant difference ($P<0.01$), * indicates significant difference ($P<0.05$), NS indicates no significant difference

表 6 盐胁迫下紫花苜蓿品种农艺和生理性状的相对变化率

Table 6 Relative change rates in agronomical and physiology traits of alfalfa cultivars under salt stress

品种 Cultivars	相对变化率 Relative change rates / %					
	株高 PH	分枝数 BN	地上部鲜重 FW	地上部干重 DW	相对含水量 RWC	电导率 EC
新牧 4 号 Xinmu No.4	−27.70	−9.97	−27.81	−16.29	−16.95	141.11
惊喜 Surprise	−30.09	−14.82	−45.15	−22.84	−20.37	105.80
阿迪娜 Adrenalin	−23.52	0.35	−39.09	−27.35	−29.95	169.36
中苜 4 号 Zhongmu No.4	−18.36	−9.63	−39.47	−20.71	−21.15	92.43
Bara520YQ	−23.41	1.65	−30.60	13.51	−18.91	66.26
WL298HQ	−32.66	−23.09	−35.51	−28.06	−27.31	184.24
瑞得 Reload	−33.23	−25.73	−45.13	−24.89	−26.53	109.72
劲能 5030Power5030	−38.35	−7.77	−50.38	−40.38	−30.05	201.71
标靶 Barricade	−31.00	−28.38	−42.46	−32.63	−29.25	175.08
金皇后 Gold empress	−30.28	−14.53	−48.29	−24.30	−21.99	81.24
WL358HQ	−41.38	−29.07	−40.79	−22.22	−31.08	142.80
威纳尔 Vinal	−33.09	−11.99	−36.53	−25.88	−24.85	165.16

2.2.2 盐胁迫下不同紫花苜蓿品种苗期各指标的相关性分析 进一步对幼苗期苜蓿的农艺及生理性状进行相关性分析(表 7)。株高与分枝数、相对含水量呈显著正相关($P<0.05$);地上部鲜重和地

上部干重之间呈显著正相关($P<0.05$);地上部干重与相对含水量呈显著正相关($P<0.05$),与电导率呈极显著负相关($P<0.01$);相对含水量与电导率之间呈显著负相关($P<0.05$)。

表 7 紫花苜蓿品种苗期各指标耐盐系数的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of salt tolerance coefficient of alfalfa cultivars under seedling stage

指标 Index	株高 PH	分枝数 BN	鲜重 FW	干重 DW	相对含水量 RWC	电导率 EC
株高 PH	1.000					
分枝数 BN	0.631*	1.000				
鲜重 FW	0.249	0.343	1.000			
干重 DW	0.474	0.426	0.566*	1.000		
相对含水量 RWC	0.577*	0.419	0.443	0.640*	1.000	
电导率 EC	−0.496	−0.219	0.037	−0.712**	−0.688*	1.000

2.2.3 12个紫花苜蓿品种苗期耐盐性的综合评价 以株高、分枝数、地上部的鲜/干重、电导率和叶片相对含水量为评价依据,利用加权隶属函数法得到了 12

份紫花苜蓿品种的隶属函数值(表 8)。根据平均 MFV 对不同紫花苜蓿品种在苗期的耐盐性进行排序,‘Bara520YQ’的平均 MFV 最高,说明其耐盐性最

表 8 紫花苜蓿品种苗期耐盐性隶属函数值及排序

Table 8 Membership function values and ranking of salt tolerance of alfalfa cultivars under seedling stage

品种 Cultivars	各指标隶属函数值 Membership function values of each indicator						平均值 Mean MFV	排名 Ranking
	株高 PH	分枝数 BN	鲜重 FW	干重 DW	相对含水量 RWC	电导率 EC		
Bara520YQ	0.781	1.000	0.867	1.000	0.863	1.000	0.918	1
新牧 4 号 Xinmu No.4	0.594	0.619	1.000	0.447	1.000	0.447	0.685	2
中苜 4 号 Zhongmu No.4	1.000	0.674	0.431	0.365	0.703	0.807	0.663	3
惊喜 Surprise	0.490	0.464	0.176	0.325	0.758	0.708	0.487	4
金皇后 Gold empress	0.482	0.473	0.000	0.298	0.643	0.889	0.464	5
阿迪娜 Adrenalin	0.776	0.958	0.316	0.242	0.080	0.239	0.435	6
威纳尔 Vinal	0.360	0.556	0.581	0.269	0.442	0.270	0.413	7
瑞得 Reload	0.354	0.109	0.174	0.287	0.322	0.679	0.321	8
WL298HQ	0.344	0.195	0.615	0.229	0.267	0.129	0.296	9
标靶 Barricade	0.451	0.022	0.289	0.144	0.130	0.197	0.205	10
劲能 5030 Power5030	0.132	0.693	0.298	0.000	0.073	0.000	0.199	11
WL358HQ	0.000	0.000	0.378	0.337	0.000	0.435	0.192	12

强, WL358HQ的平均MFV最低, 耐盐性最弱。此外, 对比萌发期和苗期这12份紫花苜蓿的耐盐性可知, ‘Bara520YQ’‘新牧4号’和‘中苜4号’在两个时期均表现出较强的盐胁迫耐受性, 而‘WL358HQ’‘劲能5030’和‘标靶’苜蓿则对盐胁迫最为敏感。

3 讨论

种子萌发期是植物对盐胁迫最敏感的时期之一^[5]。作为盐渍土中的主要盐分, 氯化钠会通过破坏离子稳态和细胞渗透平衡, 对种子代谢造成严重损害。本研究中, 所有紫花苜蓿品种的萌发指标在盐胁迫条件下($200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$)显著下降(图1), 表明盐胁迫处理对萌发具有抑制作用, 这种抑制作用主要源于盐分通过渗透胁迫、离子胁迫和氧化胁迫三重机制, 干扰种子的吸胀萌动阶段并延长萌发时间^[3,20]。从25个紫花苜蓿品种的8个萌发参数分布可知(图1), 盐胁迫处理下发芽势、发芽率和子叶生长率存在更长更宽的范围值, 表明在种子萌发阶段不同苜蓿品种间具有耐盐差异性, 根据这些参数变化可将品种划分为不同的耐盐等级。此外, 发芽指数、活力指数和相对苗长的变化范围值较小(图1, 表2), 这一现象也说明了尽管多数苜蓿品种在盐胁迫下能正常萌发并形成子叶, 但由于胚根生长受阻和幼苗活力下降, 对盐敏感的品种往往难以成功建苗^[5,17]。进一步分析STC发现(图2), 不同苜蓿品种在各萌发指标上存在很大的耐盐差异性, 其中‘新牧4号’品种的相对发芽势、相对发芽率、相对子叶生长率、相对发芽指数和相对活力指数的STC值均为最高, 表明该品种具有突出的萌发速度和种子活力。然而, 苜蓿萌发期耐盐性的强弱是受多重因素控制与影响的结果, 用单项指标难以量化反映苜蓿耐盐性的动态变化过程, 更不能全面准确地反映品种的耐盐能力^[21-23]。因此, 本研究通过综合评价值 D 结合聚类分析, 最终将25份苜蓿材料划分为5个耐盐等级, 高耐盐至中等耐盐品种共11份, 敏盐品种14份, 这一耐盐等级分类与张则宇等^[24]、王宁等^[7]的研究结果相似。此外, 主成分分析结果显示(图3), 11个耐盐品种主要分布在 x 轴正半轴, 而对盐敏感的14份苜蓿品种则集中于 x 轴负半轴, 两个类群间存在明显的分离趋势。这种多方法相互印证的综合评价体系, 为苜蓿萌发期耐盐性鉴定提供了更全面的分析依据。

植物在幼苗期出现第一片子叶后, 其营养获取方式发生了转变, 从完全依赖种子胚乳储存的营养物质逐渐过渡到进行光合作用制造有机物质^[25], 但由于该发育阶段的植物组织柔嫩, 根系发育尚浅, 对盐胁迫仍表现出显著敏感性^[9]。基于这一特性, 通过分析盐胁迫条件下幼苗的生长及生理响应, 已成为评估植物耐盐性的重要手段^[26-27]。本研究系统测定了12个紫花苜蓿品种在苗期的6项关键指标。结果显示(图5), 盐胁迫处理下所有苜蓿品种的株高和地上鲜重均显著下降, 这与熊雪等^[28]的研究结果相一致, 表明盐胁迫对苜蓿植株生长和鲜重生物量的积累具有普遍抑制作用; 而比较分枝数和地上干重发现, 部分品种的分枝数(‘阿迪娜’‘中苜4号’‘Bara520YQ’和‘劲能5030’)以及干重(‘新牧4号’‘Bara520YQ’)未受到盐胁迫的显著影响, 这也从侧面表现出苜蓿品种对相关农艺性状呈现的特异性响应; 此外, ‘新牧4号’的叶片相对含水量和‘Bara520YQ’的电导率在盐胁迫下变化幅度最小, 结合其农艺性状表现, 证实这两个品种具有突出的耐盐性, 且与萌发期的耐盐性表现高度一致。值得注意的是, 吕艳贞等人^[29]的研究亦表明, ‘Bara520YQ’在种子萌发期表现出较强的耐盐碱能力, 与本研究结果相吻合。

综合分析不同苜蓿品种在种子萌发期和苗期的隶属函数值(表5, 表8)可知, ‘新牧4号’‘Bara520YQ’和‘中苜4号’在萌发期表现出较强的耐盐性, 层次聚类分析将其分别归类为高耐盐型和耐盐型苜蓿。进一步的苗期盐胁迫处理结果显示, 与其他品种相比, ‘新牧4号’‘Bara520YQ’和‘中苜4号’依旧具备较强的胁迫耐受性, 且苗期隶属函数值排名均居前三位, 表现出在两个生育阶段均较为稳定的耐盐性。这一结果为紫花苜蓿耐盐品种的筛选与选育提供了重要的理论依据。

4 结论

本研究通过分析比较盐胁迫下不同苜蓿品种在萌发期及幼苗期的耐盐性差异, 并运用隶属函数法结合耐盐值 D 进行耐盐性评价, 初步筛选出‘新牧4号’‘Bara520YQ’和‘中苜4号’3个具有高耐盐性的紫花苜蓿品种。这种综合萌发期和幼苗期的评估方法, 能够更全面地评价苜蓿品种间的耐盐能力, 筛选出的耐盐种质资源对盐碱地改良和牧草耐盐育种具有重要应用价值。

参考文献

- [1] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses [J]. *The New Phytologist*, 2018, 217(2): 523-539
- [2] QUAMRUZZAMAN M, NURUZZAMAN MANIK S M N, LIVERMORE M, et al. Multidimensional screening and evaluation of morpho-physiological indices for salinity stress tolerance in wheat [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, 208(4): 454-471
- [3] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681
- [4] VAN ZELM E, ZHANG Y, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2020, 71: 403-433
- [5] GYANAGOUDAR H S, HATIYA S T, GUHEY A, et al. A comprehensive approach for evaluating salinity stress tolerance in brinjal (*Solanum melongena* L.) germplasm using membership function value [J]. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(2): e14239
- [6] WU H, GUO J R, WANG C F, et al. An effective screening method and a reliable screening trait for salt tolerance of *brassica napus* at the germination stage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 26(10): 530
- [7] 王宁, 万畅, 高山, 等. 80份紫花苜蓿引进品种萌发期耐盐性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2): 17-25, 52
- WANG N, WAN C, GAO S, et al. Evaluation of salt tolerance of 80 introduced alfalfa varieties during germination [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(2): 17-25, 52
- [8] 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
- [9] CHOUDHARY A, KAUR N, SHARMA A, et al. Evaluation and screening of elite wheat germplasm for salinity stress at the seedling phase [J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 173(4): 2207-2215
- [10] 苏力合, 张凡凡, 王旭哲, 等. 积雪覆盖对不同秋眠型紫花苜蓿产草量及营养品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(2): 356-363
- SU L H, ZHANG F F, WANG X Z, et al. Effects of snow cover on the yield and nutritional quality of alfalfa with different fall-dormancy levels [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 356-363
- [11] 苏力合, 张凡凡, 王旭哲, 等. 覆雪对不同秋眠型紫花苜蓿生理特性及抗寒基因表达的影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(5): 18-26
- SU L H, ZHANG F F, WANG X Z, et al. Effects of snow cover on physiological characteristics and cold resistance related gene expression of alfalfa varieties with different fall dormancy levels [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(5): 18-26
- [12] 朱晨晨, 史昆, 何沁坤, 等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理和基因表达的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(4): 1044-1054
- ZHU C C, SHI K, HE Q K, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on physiology and gene expression of alfalfa seedlings [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1044-1054
- [13] 陈彩锦, 马琳, 包明芳, 等. 111份紫花苜蓿种质资源萌发期抗旱性鉴定评价[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(10): 1896-1907
- CHEN C J, MA L, BAO M F, et al. Identification and evaluation of drought resistance for 111 germplasm resources of alfalfa during germination stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(10): 1896-1907
- [14] 鄂继芳, 杨树青, 张万锋, 等. 暗管条件下牧草种植对农牧交错区盐渍土的改土效应[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(9): 402-410
- E J F, YANG S Q, ZHANG W F, et al. Effect of forage planting on improvement of saline soil under subsurface pipe in agro-pastoral intertwined zones [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(9): 402-410
- [15] 吕悦齐, 胡娟, 高东雪, 等. 饲草种植及牛粪施用对松嫩平原盐碱土养分及腐殖质组成的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(1): 169-176
- LV Y Q, HU J, GAO D X, et al. Effects of forage cultivation and cattle manure application on nutrient and humus composition of saline alkali soil in the Songnen Plain [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(1): 169-176
- [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 in 16 alfalfa varieties during germination under different salt concentration stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 472-480
- [17] 朱琨, 刘骅峻, 冯成龙, 等. 盐胁迫对不同苜蓿品种种子萌发的耐盐性综合评价[J]. *草地学报*, 2023, 31(12): 3724-3733
- ZHU K, LIU H J, FENG C L, et al. Comprehensive evaluation on the salt tolerance of seed germination of different alfalfa varieties under salt stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3724-3733
- [18] WU M M, XU J Y, NIE Z J, et al. Physiological, biochemical and transcriptomic insights into the mechanisms by which molybdenum mitigates cadmium toxicity in *Triticum aestivum* L [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 472: 134516
- [19] ZHANG X Y, LI S H, TANG T, et al. Comparison of morphological, physiological, and related-gene expression responses to saline-alkali stress in eight apple rootstock genotypes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 306: 111455
- [20] WANG M, DING Y, WANG Q, et al. NaCl treatment on physio-biochemical metabolism and phenolics accumulation in barley seedlings [J]. *Food chemistry*, 2020, 331: 127282
- [21] 李航, 刘丽, 黄乾, 等. 棉花种质资源萌发期耐盐性鉴定及筛选[J]. *作物学报*, 2024, 50(5): 1147-1157
- LI H, LIU L, HUANG Q, et al. Identification and screening of salt tolerance of cotton germplasm resources at germination

- stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5):1147-1157
- [22] 王娅琳,魏琳,李娜,等. 3种牧草种子萌发期耐盐性综合评价[J]. *草业科学*, 2023, 40(12):3104-3113
- WANG Y L, WEI L, LI N, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of three forage seed varieties during germination[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12):3104-3113
- [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
- YANG 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] 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
- [25] 王英男,彭晓媛,华晓雨,等. 植物子叶生理功能的研究进展[J]. *草业科学*, 2018, 35(12):2988-2997
- WANG Y N, PENG X Y, HUA X Y, et al. Research progress on the physiological function of plant cotyledons[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12):2988-2997
- [26] 张晓澎,邓焱天,杨蕊,等. 饲用燕麦种质资源萌发期及苗期耐盐性鉴定评价[J]. *草地学报*, 2025, 33(1):3741-3755
- ZHANG X P, DENG Y T, YANG R, et al. Evaluation of salt tolerance of forage oat germplasm resources at germination and seedling stages[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(1):3741-3755
- [27] 闫聚辉,李小聪,宋文学,等. 57份无芒雀麦种质萌发期与苗期耐盐性评价[J/OL]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250528.1345.002.html>
- YAN J H, LI X C, SONG W X, et al. Evaluation of salt tolerance of 57 *Bromus inermis* germplasm at the germination and seedling stages [J]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250528.1345.002.html>
- [28] 熊雪,桂维阳,刘沫含,等. 不同紫花苜蓿品种在均匀与不均匀盐胁迫下的耐盐性评价[J]. *草业学报*, 2018, 27(9):67-76
- XIONG X, GUI W Y, LIU M H, et al. Evaluation of salt tolerance in different alfalfa varieties under uniform and non-uniform salt stress[J]. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2018, 27(9):67-76
- [29] 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, Y 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

(责任编辑 刘婷婷)