

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.023

引用格式:李香,邹丽,杨巽喆,等.50份多花黑麦草种质耐盐性评价[J].草地学报,2026,34(1):239-253

LI Xiang, ZOU Li, YANG Xun-zhe, et al. Salt-tolerance Evaluation of 50 Germplasms of *Lolium multiflorum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):239-253

50份多花黑麦草种质耐盐性评价

李香¹, 邹丽², 杨巽喆², 张海琴^{1*}

(1. 四川农业大学草业科技学院, 四川成都 611130; 2. 四川农业大学小麦研究所, 四川成都 611130)

摘要:为筛选耐盐优质多花黑麦草种质资源,本研究对50份不同倍性多花黑麦草种质进行耐盐性鉴定。在0, 50, 100, 150, 200和250 mmol·L⁻¹ NaCl不同盐浓度处理下,对萌发后种子的根长、芽长、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数的测定,利用相关性分析等方法对试验材料进行耐盐性评价筛选。结果表明:50份材料的D值变化范围为0.037~0.972,在欧氏距离13.5处,50份多花黑麦草被划分成1份耐盐材料、9份中等耐盐材料、15份中等盐敏感材料和25份盐敏感材料。对筛选出的不同倍性的极端材料进行苗期盐胁迫处理发现,幼苗株高与生物量均受到抑制,相对含水量与叶绿素含量下降,表明在盐胁迫下,植株的生长与生理过程受到抑制。综合种子萌发期和苗期盐胁迫发现,四倍体多花黑麦草种质的耐盐性表现优于二倍体。本研究可为耐盐多花黑麦草材料选育提供理论支撑。

关键词:多花黑麦草;盐胁迫;萌发期;苗期;生理特性

中图分类号:S443+.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0239-15

Salt-tolerance Evaluation of 50 Germplasms of *Lolium multiflorum*

LI Xiang¹, ZOU Li², YANG Xun-zhe², ZHANG Hai-qin^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China;

2. Triticeae Research Institute, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China)

Abstract: To screen out high-quality salt-tolerant *Lolium multiflorum* germplasm resources, the salt tolerance of 50 accessions of *Lolium multiflorum* with different ploidy levels were evaluated in this study. Under different NaCl concentration treatments of 0, 50, 100, 150, 200 and 250 mmol·L⁻¹, the root length, shoot length, germination rate, germination potential, germination index, and vigor index after seed germination were measured. Salt tolerance of the experimental materials was assessed by using correlation analysis and other methods. The results showed that the D values of the 50 materials ranged from 0.037 to 0.972. At a Euclidean distance of 13.5, the 50 accessions were classified into 1 salt-tolerant accession, 9 moderately salt-tolerant accessions, 15 moderately salt-sensitive accessions, and 25 salt-sensitive accessions. Salt stress treatment of the screened extreme materials with different ploidy at the seedling stage showed that both plant height and biomass were inhibited, while relative water content and chlorophyll content were decreased, indicating that plant growth and physiological processes were suppressed under salt stress. Comprehensive comparison between the seed germination and seedling stages revealed that tetraploid *Lolium multiflorum* germplasm exhibited better salt tolerance than diploid materials. The findings provide theoretical support for breeding salt-tolerant *Lolium multiflorum* materials.

Key words: *Lolium multiflorum*; Salinity stress; Germination period; Seedling stage; Physiological characteristic

盐分在土壤中的积累对牧草的发育和产量构成了主要的生态限制,对我国农业持续性发展带来严

峻挑战^[1]。据统计,全球盐碱地面积大约为9.54亿公顷,而我国现有的可利用盐碱地总面积大约为

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(32573579,32270388)资助

作者简介:李香(2000-),女,汉族,湖南衡阳人,硕士研究生,主要从事饲草种质创新与育种研究,E-mail:3097706532@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: haiqinzhang@163.com

1233万公顷,主要集中在北方干旱半干旱地区和沿海地区^[2]。受气候变化、地貌特征和人类活动的影响,这些地区的盐碱化问题还在逐渐加剧。随着土地盐碱化问题的日益严重,挑选和培育出适应各种盐碱环境的植物品种变得尤为重要,既可以高效利用受影响的土地资源,还能提升农业产出的经济价值。

牧草是盐碱地生态植被的重要组成部分,对盐碱地生态修复有着重要的作用^[3]。多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)是禾本科黑麦草属(*Lolium*)的优良冷季型牧草,有二倍体和四倍体两种倍性。二倍体存在于自然界,四倍体为20世纪30年代以来人工创制所得^[4]。多花黑麦草生长速率快,营养丰富,消化率高,且各种家畜喜食,适于集约化栽培利用,在我国南方地区广为种植^[5]。除用于牧草生产之外,多花黑麦草可帮助降解土壤中残留的抗生素^[6],还可应用于磷、镉等重金属或有机物污染土壤的生物修复^[7]。不同倍性的植物在逆境胁迫中往往存在差异。Yang等^[8]用不同浓度梯度Cd处理41份不同倍性的多花黑麦草种子,结果表明四倍体多花黑麦草Cd耐受能力普遍优于二倍体多花黑麦草。程少波等^[9]用不同浓度PEG溶液模拟干旱胁迫处理23份不同倍性的多花黑麦草种子,结果表明四倍体多花黑麦草对于干旱环境的适应性普遍强于二倍体多花黑麦草。

随着土壤盐渍化的加重,培育与筛选耐盐的牧草品种意义重大。因此对多花黑麦草进行耐盐性的鉴定是选育耐盐品种的关键。目前,关于多花黑麦草的耐盐性研究多集中于不同钠盐胁迫下的耐受性、生理生化指标分析以及不同生长阶段的耐盐性。杨春桃等^[5]用不同浓度的NaCl对30个多花黑麦草品种的种子进行处理判定不同品种的耐盐情况,发现供试的30个多花黑麦草品种中,邦德等受不同浓度NaCl的影响小,具有较强的耐盐性。汪霞等^[10]用4种不同钠盐对6份多花黑麦草种子进行盐胁迫处理,运用标准差系数赋予权重法判定各材料对不同钠盐的耐受情况。Feng等^[11]用300 mmol·L⁻¹ NaCl处理邦德(耐盐)和安格斯(盐敏感)两个耐盐性不同的多花黑麦草品种,结果表明耐盐品种比敏感品种具有更高的光合效率,更低的丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)表达水平。Xie等^[12]对15个意大利黑麦草品种进行发芽与营养生长阶段耐盐性评价,在同一高浓度NaCl(255 mmol·L⁻¹)处理下,发芽阶段对盐胁迫变

化更明显,‘公牛’‘川农’‘杰威’和‘邦德’为最耐盐的品种。植物不同品种(品系)往往具有不同的特性,对盐的耐性也有所差异。此前,对植物耐盐性的探究,已经在大豆^[13]、谷子^[14]、燕麦^[15]、陆地棉^[16]、白榆^[17]中得到应用,而对不同倍性多花黑麦草苗期耐盐综合评价研究未见报道。

在植物的萌发期,根长和芽长最能够反映植物的生长特性,根长和芽长可随着胁迫处理的变化,从而反映该植物在发芽之后植物在胁迫下的适应性^[18]。此外,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数也是反映种子萌发表现的重要指标。故而在种子萌发期,常用根长、芽长、发芽率、发芽势、发芽指数等指标作为种子的抗逆基本指标。相对值能消除品种间的内在差异,因此,对各指标的相对值通过相关性分析、主成分分析、计算各指标权重,采用隶属函数法及聚类分析法综合评价供试材料的耐受性^[19]。王慧敏等^[14]曾采用隶属函数综合分析方法对24个谷子品种(系)进行萌发期耐盐碱性鉴定评价。张静等^[15]用NaCl, Na₂SO₄和NaHCO₃的混合盐碱溶液对485份燕麦种质采用隶属函数综合评价方法对其芽期进行耐盐碱鉴定评价,共将485份燕麦种质的耐盐碱性划分成5个等级。李媛媛等^[20]用NaCl模拟盐胁迫,对283份小麦种质资源进行萌发期耐盐胁迫试验,通过聚类分析,在283份小麦种质中筛选出10份耐盐材料。

为探讨不同倍性多花黑麦草耐盐水平差异,本研究通过不同浓度盐处理对来自国内外50份不同倍性的多花黑麦草进行萌发期耐盐性筛选评价。同时,对筛选出的不同倍性耐盐种质与盐敏感种质进行苗期水培实验,测定生长、生理等方面的指标,探究耐受、敏感材料盐胁迫下的生理特性,以期有多花黑麦草耐盐材料的筛选及耐盐品种的选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

来自世界各地的50份(23份二倍体,27份四倍体)多花黑麦草种质用于耐盐性评价,其中包括41份品种(系),5份野生材料及4份未知类型材料,材料具体信息见表1。PI编号材料由美国国家植物种质资源库(National Plant Germplasm System, Pullman, Washington, USA)提供。

表 1 供试材料
Table 1 Materials used in this study

编号 Number	材料编号 Material number	倍性* Ploidy*	来源 Origin	材料类型 Type
1	PI 238886	2x	法国	品种‘Rita’
2	PI 255172	2x	波兰	品种‘Skzeszowicki’
3	PI 266111	2x	乌拉圭	品种‘LA Estanzula’
4	PI 272119	2x	波兰	品种‘Westarwoldicum Jasick’
5	PI 283610	2x	瑞典	未知类型 Unknown
6	PI 283612	2x	前苏联	未知类型 Unknown
7	PI 343155	2x	埃及	未知类型 Unknown
8	PI 420020	2x	日本	品种‘Hoool’
9	PI 478508	2x	厄瓜多尔	品种‘R-271’
10	PI 517948	2x	美国	品种‘Tift 86’
11	PI 537260	2x	美国	品种‘Jackson’
12	PI 577241	2x	意大利	野生材料 The wild material
13	PI 596625	2x	美国	品种‘TXR91-SR6EI’
14	PI 598939	2x	意大利	野生材料 The wild material
15	PI 619470	2x	法国	品种‘Ruten’
16	PI 619472	2x	法国	品种‘Energy’
17	PI 619473	2x	法国	品种‘Vertyl’
18	PI 632537	2x	美国	野生材料 The wild material
19	PI 634251	2x	美国	未知类型 Unknown
20	PI 636508	2x	意大利	野生材料 The wild material
21	PI 648355	2x	美国	品种‘Floreagon’
22	W6 9271	2x	比利时	野生材料 The wild material
23	PI 636509	2x	意大利	野生材料 The wild material
24	PI 578751	4x	美国	品种‘Stoneville No.3’
25	PI 600748	4x	英格兰	品种‘Deltop’
26	PI 611146	4x	匈牙利	品种‘Billion’
27	PI 619468	4x	法国	品种‘Ansyl’
28	PI 619469	4x	法国	品种‘Idyl’
29	阿伯德	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
30	阿德纳	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
31	安第斯	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
32	安格斯	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
33	邦德	4x	丹农种子子公司	引进品种 The introduced variety
34	川农 1 号	4x	四川农业大学	育成品种 The bred variety
35	赣饲 3 号	4x	江苏蓝天种业	育成品种 The bred variety
36	赣选 1 号	4x	江苏蓝天种业	育成品种 The bred variety
37	剑宝	4x	丹农种子子公司	引进品种 The introduced variety
38	杰特	4x	四川华丰种业	引进品种 The introduced variety
39	杰威	4x	丹农种子子公司	引进品种 The introduced variety
40	蓝天堂	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
41	勒普	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
42	上农四倍体	4x	江苏蓝天种业	育成品种 The bred variety
43	特宝	4x	北京百斯特草业	引进品种 The introduced variety
44	特高	4x	丹农种子子公司	引进品种 The introduced variety
45	绚彩	4x	北京百斯特草业	引进品种 The introduced variety
46	盐城	4x	江苏蓝天种业	地方品种 Local varieties
47	长江 2 号	4x	丹农种子子公司	育成品种 The bred variety
48	钻石 T	4x	江苏蓝天种业	引进品种 The introduced variety
49	川饲 1 号	4x	四川农业大学	育成品种 The bred variety
50	929-3	4x	四川农业大学	新品系 The new line

注:倍性*,倍性资料来自 Rios 等^[21]. 其中 2x 代表二倍体,4x 代表四倍体
Note:Ploidy*, Ploidy was cited by Rios et al^[21]. 2x means diploids; 4x means tetraploids

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发期处理 以蒸馏水(CK)处理为对照组,根据预试验结果,对 50 份不同倍性多花黑麦

草种子进行萌发期盐胁迫处理,设 50(S1),100(S2),150(S3),200(S4),250 mmol·L⁻¹(S5)NaCl 共 5 个浓度梯度模拟盐胁迫,种子萌发 7 d 结束后,

测定胚根长和胚芽长。选大小均匀、籽粒饱满的完整多花黑麦草种子,用10%的 H_2O_2 消毒10 min,再用超纯水冲洗20 min。取30粒多花黑麦草种子均匀放于铺有两层滤纸、直径9 cm的细菌培养皿中,将4 mL不同浓度的盐溶液注入培养皿中。每个处理设3个重复。培养皿放于温室(温度22℃,光照周期16 h·d⁻¹)培养7 d,每天补充溶液维持水势的稳定。

1.2.2 幼苗水培处理 根据萌发期的综合评价体系对材料进行筛选,将筛选后的极端敏感和极端耐受材料进行水培处理。具体方法如下:种子消毒后,放入铺有双层滤纸的细菌培养皿中,置于4℃冰箱中催芽3 d,取出后放在光照培养室进行培养。光照培养室相对湿度65%~75%,温度为22℃,光照周期16 h/d。每天进行适度浇水,待长出第1片新叶时,挑选长势较一致的幼苗移至水培箱,采用1/2浓度的霍格兰营养液进行第2阶段的培养,1周更换1次营养液。水培3周之后,将幼苗分为对照组和处理组,盐处理组施加150 mmol·L⁻¹ NaCl,处理7 d。每组3次重复,每次重复处理9株幼苗。处理完成后,漂洗根系并和地上部一起收集,测量相关生长和生理指标后,将材料置于105℃的烘箱中杀青30 min,再置于70℃的烘箱中将材料烘干至恒重,用于测量其它指标。

1.3 形态和生理指标测定方法

用直尺测定鲜样的根长和株高,天平测定植株地上部和地下部的鲜重和干重。相对含水量根据Tambussi等^[22]的方法测定,相对电导率用电导率仪测定,叶绿素含量采用改良版的直接浸提法^[23],丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定^[24]。各项指标重复测定3次,取平均值。

1.4 数据分析

使用Microsoft Excel, SPSS 26.0等统计分析平均值、方差、显著性、相关性、耐盐系数、主成分分析、隶属函数、聚类及逐步回归等多元分析。

$$\text{发芽率}(GR) = \frac{\text{前7天发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽势}(GE) = \frac{\text{前3天发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数}(GI) = \sum \left(\frac{G_t}{D_t} \right)$$

$$\text{活力指数}(VI) = GI \times S$$

同时基于各鉴定指标(发芽势、发芽率、根长、芽长、发芽指数、活力指数)计算其相对值表示耐盐系数。

指标相对值=(不同盐浓度胁迫指标值/对照指标值)×100%

耐盐系数=盐胁迫的测定值/对照的测定值。其中, G_t 为第 t 日的发芽数, D_t 为相对应的发芽时间, S 为胚芽长。

测定的萌发期指标通过隶属函数法、主成分分析、系统聚类法进行数据分析,具体公式如下:

(1)加权隶属函数分析:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$$

X_{ij} 为不同浓度下的耐盐指数, $\bar{X}_j$ 为平均耐盐指数,如ARRL为胚根长的平均耐盐指数。

$$F(X_j) = a_{1j} \times X_{1j} + a_{2j} \times X_{2j} + \dots + a_{ij} \times X_{kj} \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

$F(X_j)$ 为综合指标的得分, a_{ij} 为特征向量, X_{kj} 为每个指标经标准化处理后的值。

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

W_j 表示第 j 个综合指标的权重, P_j 为主成分分析后第 j 个指标的综合贡献率。

$$\mu(X_j) = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

$\mu(X_j)$ 为综合指标的隶属函数值, $X_{\min}$ 为第 i 个综合指标的最小值, $X_{\max}$ 为第 i 个综合指标的最大值。

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

D 值为不同品种的多花黑麦草的耐盐能力的综合评价值,根据 D 值聚类分析分组分析相对指标值。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对多花黑麦草种子萌发的影响

由图1可知,在盐胁迫处理下,随着盐浓度升高,二倍体和四倍体多花黑麦草种子的萌发均受到了不同程度的抑制。不同倍性多花黑麦草胚根长和胚芽长的平均值如表2所示。在0,50,100,150,200,250 mmol·L⁻¹ NaCl处理下,50份多花黑麦草种质资源的平均胚根长分别为6.33,4.23,1.75,0.71,0.40和0.16 cm,平均胚芽长分别为6.54,5.60,2.92,1.15,0.43和0.08 cm。由表2可知随着盐浓度增加,50份多花黑麦草种质资源的胚根长与胚芽长均呈下降趋势。低浓度NaCl处理促进多花黑麦草发芽,100 mmol·L⁻¹ NaCl处理下发芽率开始显著下降,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著抑制多花黑麦草的萌发。

表 2 不同盐浓度对多花黑麦草根长和芽长的影响

Table 2 Effects of different salt concentrations on root length and shoot length of *Lolium multiflorum*

材料编号 Material number	根长 Root length/cm					
	CK	S1	S2	S3	S4	S5
PI 238886	6.02±0.45 ^a	3.84±0.29 ^b	1.19±0.36 ^c	0.16±0.06 ^d	0.03±0.03 ^d	0.03±0.03 ^d
PI 255172	6.00±0.30 ^a	4.11±0.40 ^b	1.31±0.31 ^c	0.65±0.15 ^d	0.05±0 ^e	0.05±0 ^e
PI 266111	4.44±0.40 ^a	4.12±0.30 ^a	1.37±0.36 ^b	0.66±0.24 ^c	0.12±0.09 ^d	0 ^d
PI 272119	4.89±0.64 ^a	3.92±0.39 ^b	1.30±0.27 ^c	0.67±0.16 ^d	0.12±0.08 ^{de}	0.05±0 ^e
PI 283610	4.41±0.73 ^a	3.82±0.29 ^a	1.22±0.26 ^b	0.59±0.17 ^c	0.11±0.04 ^c	0.05±0 ^c
PI 283612	6.35±1.16 ^a	5.12±0.49 ^b	1.52±0.30 ^c	0.64±0.15 ^{cd}	0.13±0.06 ^d	0 ^d
PI 343155	6.91±0.90 ^a	4.60±0.49 ^b	1.53±0.22 ^c	0.82±0.22 ^{cd}	0.08±0.03 ^{de}	0 ^e
PI 420020	6.93±0.72 ^a	4.39±0.25 ^b	1.33±0.28 ^c	0.74±0.25 ^c	0.12±0.08 ^d	0 ^d
PI 478508	5.98±0.88 ^a	4.34±0.31 ^b	1.53±0.23 ^c	0.82±0.18 ^d	0.61±0.11 ^{de}	0.05±0 ^e
PI 517948	7.44±1.07 ^a	4.31±0.48 ^b	3.91±0.27 ^b	0.79±0.20 ^c	0.63±0.15 ^c	0.05±0 ^c
PI 537260	5.94±0.83 ^a	4.08±0.39 ^b	1.53±0.23 ^c	0.67±0.15 ^d	0.51±0.22 ^d	0.05±0 ^d
PI 577241	7.43±1.12 ^a	5.11±0.47 ^b	1.31±0.28 ^c	0.64±0.16 ^{cd}	0.12±0.08 ^d	0.08±0.03 ^d
PI 596625	3.93±0.37 ^a	3.55±0.47 ^a	1.42±0.19 ^b	0.08±0.03 ^c	0.05±0 ^c	0 ^c
PI 598939	5.95±0.75 ^a	4.06±0.49 ^b	1.45±0.34 ^c	0.64±0.16 ^d	0.50±0.21 ^d	0.07±0.03 ^d
PI 619470	5.98±0.88 ^a	3.74±0.34 ^b	0.17±0.06 ^c	0.08±0.03 ^c	0.05±0 ^c	0 ^c
PI 619472	6.50±0.99 ^a	4.10±0.32 ^b	1.22±0.22 ^c	0.66±0.13 ^{cd}	0.08±0.03 ^d	0 ^d
PI 619473	6.41±0.97 ^a	4.03±0.39 ^b	1.31±0.32 ^c	0.61±0.12 ^{cd}	0.10±0 ^d	0 ^d
PI 632537	7.43±1.11 ^a	4.21±0.44 ^b	1.54±0.28 ^c	0.93±0.29 ^{cd}	0.12±0.08 ^d	0 ^d
PI 634251	7.94±1.17 ^a	5.10±0.57 ^b	1.34±0.20 ^c	0.73±0.30 ^{cd}	0.33±0.21 ^{cd}	0.05±0.05 ^d
PI 636508	4.45±0.46 ^a	4.11±0.30 ^a	1.32±0.31 ^b	0.93±0.30 ^b	0.07±0.03 ^c	0 ^c
PI 648355	6.44±0.89 ^a	3.91±0.56 ^b	1.33±0.21 ^b	0.63±0.15 ^{cd}	0.33±0.15 ^d	0.05±0 ^d
W6 9271	4.44±0.69 ^a	3.83±0.38 ^b	1.33±0.18 ^c	0.52±0.20 ^d	0.08±0.03 ^d	0 ^d
PI 636509	6.43±1.11 ^a	3.91±0.36 ^b	1.44±0.21 ^c	0.91±0.24 ^{cd}	0.81±0.19 ^{cd}	0.37±0.15 ^d
PI 578751	6.34±0.79 ^a	3.84±0.42 ^b	1.43±0.29 ^c	0.65±0.15 ^d	0.51±0.20 ^d	0.43±0.21 ^d
PI 600748	4.42±0.45 ^a	3.82±0.39 ^b	1.50±0.30 ^c	0.59±0.19 ^d	0.08±0.03 ^e	0 ^e
PI 611146	6.44±0.89 ^a	4.21±0.44 ^b	1.56±0.27 ^c	1.21±0.22 ^c	1.01±0.22 ^c	0.17±0.06 ^d
PI 619468	7.98±1.22 ^a	4.27±0.45 ^b	1.42±0.30 ^c	0.61±0.19 ^{cd}	0.05±0 ^d	0 ^d
PI 619469	6.01±1.08 ^a	4.16±0.47 ^b	1.54±0.14 ^c	1.01±0.22 ^c	0.82±0.18 ^{cd}	0 ^d
阿伯德	6.22±0.99 ^a	4.48±0.33 ^b	1.52±0.17 ^c	0.62±0.18 ^d	0.32±0.13 ^d	0.20±0.10 ^d
阿德纳	6.44±1.09 ^a	4.21±0.46 ^b	1.42±0.31 ^c	0.94±0.24 ^{cd}	0.51±0.11 ^{cd}	0.17±0.06 ^d
安第斯	8.01±1.18 ^a	4.21±0.45 ^b	1.40±0.29 ^c	0.92±0.20 ^{cd}	0.83±0.19 ^{cd}	0.05±0 ^d
安格斯	6.43±0.92 ^a	4.23±0.48 ^b	1.43±0.41 ^c	0.93±0.28 ^{cd}	0.80±0.20 ^{cd}	0.17±0.06 ^d
邦德	6.44±0.78 ^a	4.21±0.44 ^b	4.01±0.31 ^b	1.00±0.20 ^c	0.82±0.18 ^c	0.05±0 ^d
川农 1 号	6.43±0.92 ^a	4.22±0.32 ^b	4.04±0.18 ^b	1.21±0.22 ^c	0.99±0.19 ^c	0.82±0.18 ^c
赣饲 3 号	6.44±0.82 ^a	6.24±0.52 ^a	1.44±0.41 ^b	1.11±0.32 ^b	0.81±0.21 ^{bc}	0.18±0.07 ^c
赣选 1 号	6.96±1.25 ^a	3.93±0.27 ^b	1.31±0.26 ^c	0.61±0.19 ^{cd}	0.20±0.10 ^d	0.17±0.06 ^d
剑宝	6.40±0.96 ^a	3.93±0.43 ^b	1.51±0.28 ^c	0.70±0.20 ^d	0.18±0.03 ^d	0 ^d
杰特	6.44±0.79 ^a	3.88±0.51 ^b	1.49±0.25 ^c	0.44±0.15 ^d	0.08±0.03 ^d	0 ^d
杰威	6.31±1.03 ^a	4.31±0.47 ^b	4.02±0.38 ^b	1.12±0.31 ^c	0.70±0.20 ^{cd}	0 ^d
蓝天堂	6.43±1.11 ^a	4.23±0.52 ^b	1.41±0.38 ^c	1.01±0.32 ^{cd}	0.60±0.20 ^{cd}	0.17±0.05 ^d
勒普	7.98±1.23 ^a	5.92±0.81 ^b	1.42±0.31 ^c	0.65±0.15 ^{cd}	0.50±0.20 ^{cd}	0.17±0.06 ^d
上农四倍体	6.42±1.09 ^a	4.21±0.44 ^b	1.34±0.28 ^c	0.70±0.20 ^{cd}	0.50±0.20 ^{cd}	0 ^d
特宝	6.99±1.19 ^a	4.02±0.51 ^b	1.43±0.21 ^c	0.67±0.19 ^{cd}	0.51±0.18 ^{cd}	0.17±0.06 ^d
特高	7.40±1.17 ^a	3.92±0.50 ^b	1.29±0.24 ^c	0.60±0.20 ^{cd}	0.44±0.16 ^{cd}	0.03±0.03 ^d
绚彩	8.00±1.22 ^a	4.23±0.41 ^b	4.00±0.39 ^b	0.71±0.19 ^c	0.51±0.21 ^c	0.18±0.03 ^c
盐城	7.44±1.22 ^a	4.21±0.43 ^b	1.42±0.21 ^c	0.72±0.18 ^{cd}	0.59±0.19 ^{cd}	0 ^d
长江 2 号	4.45±0.59 ^a	4.13±0.42 ^a	1.41±0.30 ^b	0.72±0.18 ^c	0.60±0.21 ^c	0.51±0.18 ^c
钻石 T	7.44±1.11 ^a	4.24±0.39 ^b	4.02±0.31 ^b	1.10±0.24 ^c	0.91±0.16 ^c	0.71±0.19 ^c
川饲 1 号	7.88±1.12 ^a	4.33±0.39 ^b	4.11±0.30 ^b	1.10±0.22 ^c	1.01±0.22 ^c	0.82±0.19 ^c
929-3	4.43±0.68 ^a	4.22±0.53 ^a	1.43±0.31 ^b	0.61±0.22 ^c	0.53±0.13 ^c	0.09±0.01 ^c
材料编号 Material number	芽长 Shoot length/cm					
	CK	S1	S2	S3	S4	S5
PI 238886	6.78±1.31 ^a	5.40±0.38 ^b	1.82±0.31 ^c	0.81±0.19 ^{cd}	0 ^d	0 ^d

续表 2

材料编号 Material number	根长 Root length/cm					
	CK	S1	S2	S3	S4	S5
PI 255172	6.23±0.81 ^a	5.43±0.53 ^a	2.33±0.51 ^b	0.91±0.20 ^c	0 ^d	0 ^d
PI 266111	6.72±1.10 ^a	5.55±0.55 ^b	2.62±0.41 ^c	0.85±0.22 ^d	0.04±0.02 ^d	0 ^d
PI 272119	6.71±0.98 ^a	5.43±0.48 ^b	1.82±0.28 ^c	0.87±0.33 ^d	0 ^d	0 ^d
PI 283610	4.75±0.79 ^a	3.74±0.48 ^b	1.81±0.36 ^c	0.86±0.34 ^d	0.09±0.01 ^{de}	0 ^e
PI 283612	7.84±1.18 ^a	7.40±0.98 ^a	5.21±0.79 ^b	3.64±0.42 ^c	0.50±0.20 ^d	0 ^d
PI 343155	6.70±0.97 ^a	5.60±0.49 ^b	2.30±0.28 ^c	0.88±0.23 ^d	0 ^e	0 ^e
PI 420020	7.73±1.09 ^a	6.70±0.69 ^b	2.51±0.40 ^c	0.85±0.15 ^d	0 ^d	0 ^d
PI 478508	6.70±1.03 ^a	5.50±0.53 ^b	2.41±0.37 ^c	1.60±0.29 ^{cd}	0.86±0.18 ^{de}	0 ^e
PI 517948	6.72±0.91 ^a	5.52±0.55 ^b	2.51±0.31 ^c	1.82±0.21 ^{cd}	1.10±0.23 ^d	0 ^e
PI 537260	6.52±0.81 ^a	5.52±0.52 ^b	3.64±0.41 ^c	1.10±0.24 ^d	0.61±0.19 ^{de}	0 ^e
PI 577241	6.54±1.20 ^a	5.64±0.62 ^a	2.83±0.43 ^b	0.85±0.23 ^c	0 ^c	0 ^c
PI 596625	3.72±0.61 ^a	3.72±0.52 ^a	3.63±0.41 ^a	0.83±0.31 ^b	0.51±0.11 ^{bc}	0 ^c
PI 598939	6.24±1.08 ^a	5.62±0.61 ^a	2.63±0.42 ^b	0.84±0.22 ^c	0.61±0.09 ^c	0 ^c
PI 619470	6.23±1.19 ^a	5.62±0.62 ^a	1.83±0.42 ^b	1.21±0.31 ^b	0.81±0.19 ^{bc}	0 ^c
PI 619472	6.24±1.07 ^a	5.63±0.43 ^a	1.78±0.41 ^b	0.87±0.23 ^c	0 ^c	0 ^c
PI 619473	6.22±0.97 ^a	6.03±0.82 ^a	2.33±0.38 ^b	1.10±0.21 ^c	0 ^d	0 ^d
PI 632537	6.26±1.24 ^a	5.07±1.10 ^a	2.82±0.51 ^b	0.81±0.18 ^c	0 ^c	0 ^c
PI 634251	6.76±1.57 ^a	6.22±1.05 ^a	3.61±0.47 ^b	0.82±0.28 ^c	0 ^c	0 ^c
PI 636508	5.56±0.77 ^a	4.81±0.61 ^a	2.34±0.42 ^b	0.86±0.27 ^c	0 ^d	0 ^d
PI 648355	6.72±1.31 ^a	5.36±0.45 ^b	1.81±0.33 ^c	0.81±0.19 ^{cd}	0 ^d	0 ^d
W6 9271	5.20±1.02 ^a	3.73±0.71 ^b	1.72±0.53 ^c	0.82±0.21 ^{cd}	0 ^d	0 ^d
PI 636509	6.52±1.12 ^a	4.91±0.81 ^b	2.34±0.32 ^c	1.10±0.24 ^d	0.51±0.19 ^d	0 ^d
PI 578751	6.48±1.09 ^a	4.73±0.61 ^b	1.74±0.45 ^c	0.93±0.33 ^{cd}	0.60±0.10 ^d	0 ^d
PI 600748	5.22±0.81 ^a	4.73±0.51 ^a	1.72±0.36 ^b	0.97±0.28 ^b	0 ^c	0 ^c
PI 611146	7.70±1.17 ^a	6.22±0.82 ^b	3.63±0.48 ^c	1.10±0.23 ^d	0.51±0.19 ^d	0 ^d
PI 619468	6.50±0.97 ^a	4.93±0.79 ^b	1.70±0.33 ^c	0.81±0.19 ^{cd}	0 ^d	0 ^d
PI 619469	7.24±0.98 ^a	5.23±0.59 ^b	2.72±0.39 ^c	1.08±0.24 ^d	0.52±0.18 ^{de}	0 ^e
阿伯德	6.71±1.06 ^a	5.21±0.71 ^b	1.73±0.43 ^c	0.82±0.21 ^{cd}	0 ^d	0 ^d
阿德纳	6.72±0.90 ^a	8.69±0.92 ^b	3.32±0.51 ^c	1.02±0.23 ^d	0.80±0.20 ^d	0 ^d
安第斯	6.71±1.09 ^a	6.22±0.92 ^{ab}	5.24±0.71 ^b	0.84±0.24 ^c	0 ^c	0 ^c
安格斯	6.70±0.99 ^a	6.02±0.81 ^a	2.33±0.51 ^b	0.87±0.23 ^c	0.08±0.03 ^c	0 ^c
邦德	7.22±1.2 ^a	6.49±0.74 ^{ab}	5.82±0.63 ^b	3.64±0.40 ^c	1.61±0.28 ^d	1.01±0.22 ^d
川农 1 号	7.24±1.12 ^a	6.04±0.83 ^{ab}	5.22±0.78 ^b	2.62±0.41 ^c	0.83±0.29 ^d	0.52±0.19 ^d
赣饲 3 号	7.23±1.09 ^a	6.02±0.82 ^b	5.01±0.53 ^b	2.14±0.29 ^c	0.82±0.23 ^d	0 ^d
赣选 1 号	7.24±1.20 ^a	6.03±0.82 ^b	2.31±0.36 ^c	0.88±0.22 ^d	0.81±0.19 ^d	0 ^d
剑宝	6.71±1.03 ^a	5.21±0.79 ^b	2.83±0.43 ^c	0.96±0.26 ^d	0 ^d	0 ^d
杰特	7.23±1.12 ^a	5.52±0.59 ^b	1.72±0.42 ^c	0.87±0.38 ^{cd}	0 ^d	0 ^d
杰威	6.74±1.01 ^a	5.72±0.71 ^b	5.06±0.48 ^b	2.13±0.28 ^c	0.82±0.18 ^d	0 ^d
蓝天堂	6.71±1.12 ^a	5.70±0.71 ^a	3.62±0.39 ^b	2.09±0.27 ^c	0.07±0.03 ^d	0 ^d
勒普	6.72±1.1 ^a	5.92±0.82 ^a	2.96±0.97 ^b	1.01±0.22 ^c	0.80±0.20 ^c	0 ^c
上农四倍体	7.71±1.19 ^a	5.73±0.68 ^b	2.51±0.43 ^c	2.14±0.29 ^c	0.81±0.19 ^d	0 ^d
特宝	6.70±1.17 ^a	5.53±0.59 ^b	2.82±0.38 ^c	0.99±0.29 ^d	0.81±0.22 ^d	0 ^d
特高	6.50±0.99 ^a	3.73±0.58 ^b	1.72±0.41 ^c	0.61±0.22 ^d	0 ^d	0 ^d
绚彩	6.59±0.97 ^a	5.83±0.79 ^a	5.55±0.59 ^a	1.01±0.31 ^b	0.81±0.18 ^b	0 ^b
盐城	6.72±1.09 ^a	5.92±0.79 ^a	1.73±0.39 ^b	1.01±0.31 ^{bc}	0.82±0.19 ^{bc}	0 ^c
长江 2 号	6.72±1.19 ^a	5.92±0.82 ^a	3.63±0.43 ^b	1.20±0.33 ^c	1.02±0.23 ^{cd}	0 ^d
钻石 T	6.91±1.01 ^a	6.22±0.79 ^a	2.80±0.46 ^b	1.23±0.32 ^c	1.01±0.22 ^c	0.61±0.22 ^c
川饲 1 号	7.23±1.09 ^a	6.53±0.80 ^a	5.23±0.58 ^b	2.12±0.28 ^c	1.62±0.29 ^{cd}	0.60±0.10 ^d
929-3	7.00±1.24 ^a	6.46±1.02 ^a	5.01±0.71 ^b	0.99±0.29 ^c	0.82±0.23 ^c	0 ^c

注:表中数据为平均值±标准差,对于同一种材料编号的数据,不同的小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下同

Note: The data in the table are mean±standard deviation, and for data with the same material number, different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level, the same as below

选用相对指标进行耐盐性评价可以更准确地反映多花黑麦草在不同盐胁迫条件下的表型。50份多花黑麦草相对胚根长(RRL)变幅为0%~89.23%、相对胚芽长(RSL)变幅为0%~117.83%、相对发芽率(RGR)变幅为0%~136.67%、相对发芽势(RGE)变幅为0%~250%、相对发芽指数(RGI)变幅为0%~144.59%、相对活力指数(RVI)变幅为0%~131.26%(表3)。6个萌发指标的相对变化情况表明:在一定浓度范围内,盐浓度的增加显著抑制多花黑麦草的萌发,甚至杀死种子。在50 mmol·L⁻¹ NaCl处理下,50份多花黑麦草材料的6项指标都保持较高的水平。随着NaCl处理浓度的提高,对多花黑麦草生长的抑制作用增加,6项指标之间都存在极显著差异($P < 0.01$)。RRL, RSL, RGR, RGE, RGI和RVI的结果均显示:随着盐浓度的增加,多花黑麦草的相对胚根长、相对胚芽长、相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数和相对活力指数均呈下降趋势。

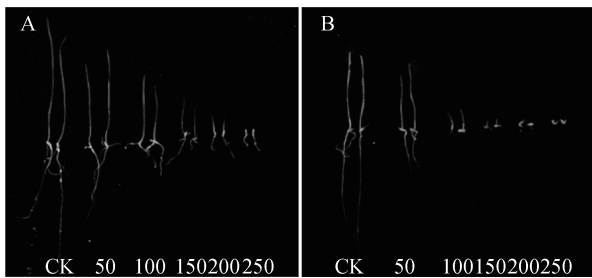


图1 不同盐浓度对多花黑麦草种子萌发的影响

Fig. 1 Effects of different salt concentrations on seed germination of *Lolium multiflorum*

注:A表示四倍体材料‘PI 619469’;B表示二倍体材料‘PI 272119’

Note: A represents the tetraploid material ‘PI 619469’, B represents the diploid material ‘PI 272119’

二倍体材料中,13号‘PI 596625’在RSL, RGR, RGI和RVI上均表现出较慢的变化速率,13号‘PI 596626’在200 mmol·L⁻¹的盐浓度下,其RSL值为13.97%,而在150 mmol·L⁻¹下,其RGR值为70.00%,显示出较强的耐盐性。相比之下,4号‘PI 272119’在RGR, RGI和RVI上的变化速率较快,4号‘PI 272119’在100 mmol·L⁻¹下的RRL值为6.22%,在150 mmol·L⁻¹下其RGR值为19.7%,

在100 mmol·L⁻¹下其RGI值为28.55%,表现出较差的耐盐性(表3)。

在四倍体材料中,28号‘PI 619469’在RGR, RGE, RGI和RVI上均表现出较慢的变化速率,28号‘PI 619469’在200 mmol·L⁻¹的盐浓度下,其RGR, RGE和RGI值分别为39.13%, 37.29%和33.35%,显示出较强的耐盐性。48号‘钻石T’在200 mmol·L⁻¹下RRL值为20.30%,在150 mmol·L⁻¹下RSL值为26.71%,显示出较强的耐盐性。而24号‘PI 578751’在RRL, RGI和RVI上的变化速率较快,在100 mmol·L⁻¹下其RRL值为9.48%, RGI值为24.13%,在50 mmol·L⁻¹下其RVI值为30.85%,表现出较差的耐盐性(表3)。

2.2 多花黑麦草萌发期耐盐综合评价

将RRL, RSL, RGR, RGE, RGI, RVI这6个萌发指标平均耐盐系数进行主成分分析,得到两个主成分PC₁和PC₂(表4)。第一主成分的特征根为4.381,贡献率为73.01%,发芽率、发芽指数和活力指数有较高的载荷,反映了多花黑麦草的萌发情况,所以第一主成分可归纳为“萌发因子”;第二主成分特征根为0.835,贡献率为13.92%,发芽势有较高的载荷(0.817),反映了多花黑麦草种子发芽能力状况。

因子载荷值除以该成分特征根的平方根得到该因子的特征向量,将6个萌发指标的平均耐盐系数数据标准化后,得到两个主成分的综合指标值,即F1和F2。

$$F1 = 0.19ARRL + 0.178ARSL + 0.211ARGR + 0.152ARGP + 0.218ARGI + 0.213ARVI$$

$$F2 = -0.119ARRL - 0.652ARSL + 0.034ARGR + 0.817ARGP + 0.226ARGI - 0.195ARVI$$

根据公式得出权重系数与隶属函数值 μ ,计算出耐盐综合评价值(D值)。D值越大,说明材料抗盐胁迫的能力越强,反之越弱。本研究D值的变化范围为0.037~0.972,二倍体材料13号‘PI 596625’耐盐性最强,4号‘PI 272119’耐盐性最弱;四倍体材料28号‘PI 619469’耐盐性最强,38号‘杰特’耐盐性最弱(表5)。

表 3 不同盐浓度对 50 份多花黑麦草相对胚根长、相对胚芽长、相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数、相对活力指数的影响
Table 3 Effects of different salt concentrations on the relative root length, relative shoot length, relative germination rate, relative germination energy, relative germination index, and relative vigor index of *Lolium multiflorum*

指标 Index	处理 Treatment	分组 Group			
		I (耐盐)	II (中等耐盐)	III (中等盐敏感)	IV (盐敏感)
编号 No.		28	6, 13, 33~35, 39, 48~50	23, 26, 30~32, 36, 37, 40~47	1~5, 7~12, 14, 15~22, 24, 25, 27, 29, 38
相对胚根长 Relative root length/%	S1	79.49±1.50	79.26±5.46	64.21±12.49	64.40±11.00
	S2	33.33±0.47	45.35±9.77	31.55±8.77	18.76±7.85
	S3	17.41±0.19	20.44±9.89	13.54±5.11	6.37±3.27
	S4	14.99±0.19	12.30±6.58	8.66±3.07	2.11±3.01
	S5	2.28±0.08	5.71±6.10	3.43±2.19	0.57±1.94
相对胚芽长 Relative shoot length/%	S1	82.58±1.22	90.33±7.44	87.64±13.50	82.69±8.70
	S2	49.71±0.70	64.89±12.85	43.32±11.73	38.14±9.70
	S3	23.34±0.32	29.09±9.78	14.06±7.01	15.49±8.33
	S4	11.08±0.11	13.65±3.86	5.80±3.68	3.93±5.73
	S5	3.39±0.12	3.58±3.54	0.62±1.20	0.49±1.55
相对发芽率 Relative germination rate/%	S1	114.49±1.04	94.34±6.65	93.75±10.07	88.34±14.69
	S2	114.48±1.05	95.05±17.51	76.02±17.57	55.76±18.43
	S3	76.86±0.24	67.29±14.17	28.35±13.78	17.67±10.10
	S4	39.15±0.15	21.49±12.37	6.88±5.53	2.27±4.75
	S5	1.45±0.12	3.32±4.03	0.32±0.71	0.25±1.02
相对发芽势 Relative germination energy/%	S1	127.15±1.93	83.22±26.22	104.91±45.31	48.42±18.81
	S2	122.00±1.47	69.14±19.31	46.17±22.45	13.87±12.52
	S3	72.84±1.07	33.06±17.62	11.88±11.32	2.23±4.31
	S4	37.27±0.81	8.82±9.06	1.82±2.74	0.88±3.84
	S5	1.67±0.32	0.47±0.71	0	0.24±1.18
相对发芽指数 Relative germination index/%	S1	121.32±2.31	92.19±9.05	93.71±7.12	80.25±15.51
	S2	116.82±1.81	90.70±22.49	62.79±13.36	41.13±13.50
	S3	75.96±0.93	51.47±11.90	20.92±11.14	10.55±5.72
	S4	38.42±0.38	14.34±10.12	4.61±3.82	1.57±4.12
	S5	1.49±0.16	1.76±2.05	0.08±0.19	0.23±1.07
相对活力指数 Relative vigor index/%	S1	100.17±1.44	83.25±10.67	81.99±13.33	66.89±16.58
	S2	58.07±0.96	60.22±27.38	27.90±11.94	15.85±6.87
	S3	17.71±0.29	15.30±6.66	3.37±2.50	1.72±1.45
	S4	4.22±0.09	2.22±1.99	0.27±0.27	0.15±0.44
	S5	0.05±0.02	0.12±0.17	0	0.02±0.08

表 4 50 份多花黑麦草萌发期耐盐性主成分分析

Table 4 Principal component analysis of salt tolerance during germination of 50 *Lolium multiflorum* germplasms

指标 Index	特征根 Eigen value	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Accumulated contribution rate/%	载荷因子 Factor loading					
				ARRL	ARSL	ARGR	ARGP	ARGI	ARVI
第一主成分 PC ₁	4.381	73.01	73.01	0.190	0.178	0.211	0.152	0.218	0.213
第二主成分 PC ₂	0.835	13.92	86.93	-0.119	-0.652	0.034	0.817	0.226	-0.195

表 5 盐胁迫下多花黑麦草的综合评价(D 值)

Table 5 Comprehensive evaluation values (D-values) of *Lolium multiflorum* under salt stress

材料 Material	倍性 Ploidy	综合指标值 Comprehensive index value		隶属函数值 Membership function value		D 值 D value	排序 Rank
		F1	F2	μ_1	μ_2		
PI 238886	2x	0.294	−0.026	0.222	0.306	0.235	31
PI 255172	2x	0.272	−0.076	0.166	0.227	0.176	38
PI 266111	2x	0.298	−0.047	0.232	0.273	0.238	29
PI 272119	2x	0.210	−0.106	0.010	0.180	0.037	50
PI 283610	2x	0.260	−0.142	0.136	0.121	0.133	41
PI 283612	2x	0.457	−0.084	0.635	0.214	0.568	9
PI 343155	2x	0.254	−0.136	0.122	0.132	0.124	43
PI 420020	2x	0.295	−0.105	0.225	0.180	0.218	34
PI 478508	2x	0.264	−0.123	0.146	0.152	0.147	39
PI 517948	2x	0.320	−0.186	0.287	0.051	0.249	28
PI 537260	2x	0.328	−0.168	0.307	0.080	0.271	27
PI 577241	2x	0.290	−0.165	0.212	0.085	0.191	36
PI 596625	2x	0.487	−0.196	0.710	0.035	0.602	7
PI 598939	2x	0.306	−0.161	0.253	0.091	0.227	32
PI 619470	2x	0.289	−0.065	0.209	0.245	0.215	35
PI 619472	2x	0.233	−0.105	0.068	0.181	0.086	45
PI 619473	2x	0.280	−0.096	0.187	0.194	0.188	37
PI 632537	2x	0.228	−0.218	0.054	0.000	0.046	49
PI 634251	2x	0.255	−0.124	0.125	0.151	0.129	42
PI 636508	2x	0.316	−0.200	0.278	0.028	0.238	30
PI 648355	2x	0.251	−0.027	0.114	0.306	0.144	40
W6 9271	2x	0.284	−0.002	0.197	0.344	0.220	33
PI 636509	2x	0.348	0.035	0.358	0.404	0.365	20
PI 578751	4x	0.226	−0.021	0.049	0.314	0.092	44
PI 600748	4x	0.309	0.003	0.260	0.354	0.275	26
PI 611146	4x	0.363	−0.020	0.396	0.317	0.384	18
PI 619468	4x	0.228	−0.121	0.055	0.154	0.070	46
PI 619469	4x	0.602	0.300	1.000	0.827	0.972	1
阿伯德	4x	0.214	−0.075	0.019	0.228	0.053	47
阿德纳	4x	0.396	0.012	0.481	0.367	0.462	13
安第斯	4x	0.394	0.060	0.474	0.444	0.469	12
安格斯	4x	0.352	−0.031	0.368	0.299	0.357	22
邦德	4x	0.512	0.023	0.773	0.385	0.711	4
川农 1 号	4x	0.488	−0.040	0.713	0.284	0.644	6
赣饲 3 号	4x	0.525	0.123	0.806	0.544	0.764	3
赣选 1 号	4x	0.339	0.050	0.336	0.428	0.351	23
剑宝	4x	0.367	0.034	0.408	0.403	0.407	16
杰特	4x	0.206	−0.034	−0.001	0.293	0.046	48
杰威	4x	0.478	0.063	0.686	0.450	0.648	5
蓝天堂	4x	0.407	0.023	0.507	0.385	0.488	11
勒普	4x	0.345	−0.105	0.350	0.180	0.323	25
上农四倍体	4x	0.379	0.103	0.436	0.513	0.448	15
特宝	4x	0.358	0.009	0.385	0.362	0.381	19
特高	4x	0.290	0.408	0.211	1.000	0.338	24
绚彩	4x	0.357	−0.058	0.381	0.255	0.361	21
盐城	4x	0.362	0.072	0.393	0.464	0.405	17
长江 2 号	4x	0.402	−0.038	0.495	0.288	0.462	14
钻石 T	4x	0.562	0.160	0.900	0.604	0.853	2
川饲 1 号	4x	0.443	−0.015	0.598	0.324	0.554	10
929-3	4x	0.445	0.061	0.604	0.446	0.579	8

对耐盐评价的6个萌发指标进行相关性分析表明,在50份多花黑麦草中,除平均相对胚芽长与平均相对发芽势不相关之外,其余指标均呈现极显著的相关性,其中平均相对发芽率与平均相对发芽指数的相关性最高($r=0.947, P<0.01$)(表6)。6个

萌发指标与D值均呈现极显著的正相关,相关程度依次为平均相对发芽指数、平均相对发芽率、平均相对活力指数、平均相对发芽势、平均相对胚根长和平均相对胚芽长。因此,这些指标可以作为多花黑麦草萌发期耐盐初步筛选的指标。

表6 50份多花黑麦草材料耐盐指标的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of salt resistance indicators of 50 *Lolium multiflorum* germplasms

指标 Index	ARRL	ARSL	ARGR	ARGP	ARGI	ARVI	D值 D value
ARRL	1						
ARSL	0.678**	1					
ARGR	0.715**	0.627**	1				
ARGP	0.498**	0.234	0.537**	1			
ARGI	0.706**	0.601**	0.947**	0.706**	1		
ARVI	0.661**	0.824**	0.845**	0.515**	0.876**	1	
D值 D value	0.774**	0.642**	0.901**	0.813**	0.967**	0.874**	1

注:**表示在 $P<0.01$ 时差异显著

Note:** Indicates a significant difference at $P<0.01$

2.3 聚类分析

根据耐盐综合评价值(D值),采用欧氏距离中的组间连接法进行聚类分析。结果表明:在欧氏距离13.5处,50份材料可以分为四类,第I类为耐盐材料1份‘PI 619469’;第II类为‘钻石T’‘赣饲3号’和‘邦德’等中等耐盐材料9份,D值范围为0.554~0.853;第III类为‘特高’‘勒普’和‘赣选1号’等中等盐敏感材料15份,D值范围为0.323~0.488;第IV类包括‘PI 343155’‘PI 634251’和‘PI 283610’等盐敏感材料25份,D值范围为0.037~0.275(图2)。

2.4 不同倍性多花黑麦草萌发期耐盐性的差异

为明确不同倍性的多花黑麦草种质的耐盐差异,将23份二倍体多花黑麦草归为一个整体,27份四倍体多花黑麦草归为一个整体,探究盐胁迫下不同倍性多花黑麦草的根长、芽长和6个萌发指标的相对参数的变化差异(图3)。

在二倍体中,13号‘PI 596625’的RGR,RGI和RVI的值最高,为0.627,0.532和0.444;6号‘PI 283612’的相对胚芽长最高,为0.484;20号‘PI 636508’的相对胚根长最高,为0.253;23号‘PI 636509’的相对发芽势最高,为0.324。4号‘PI 272119’的相对发芽率、相对发芽指数和相对活力指数值最低,为0.242,0.204和0.11;19号‘PI 632537’的相对发芽势最低,为0.017;17号‘PI 619470’的相对胚根长最低,为0.131;23号‘W 69271’的相对胚芽长最低,为0.213(表7)。以上结果表明:二倍体材料中的‘PI 596625’‘PI 283612’

耐盐性相对较强,而‘PI 272119’‘PI 632537’的耐盐性相对较弱。

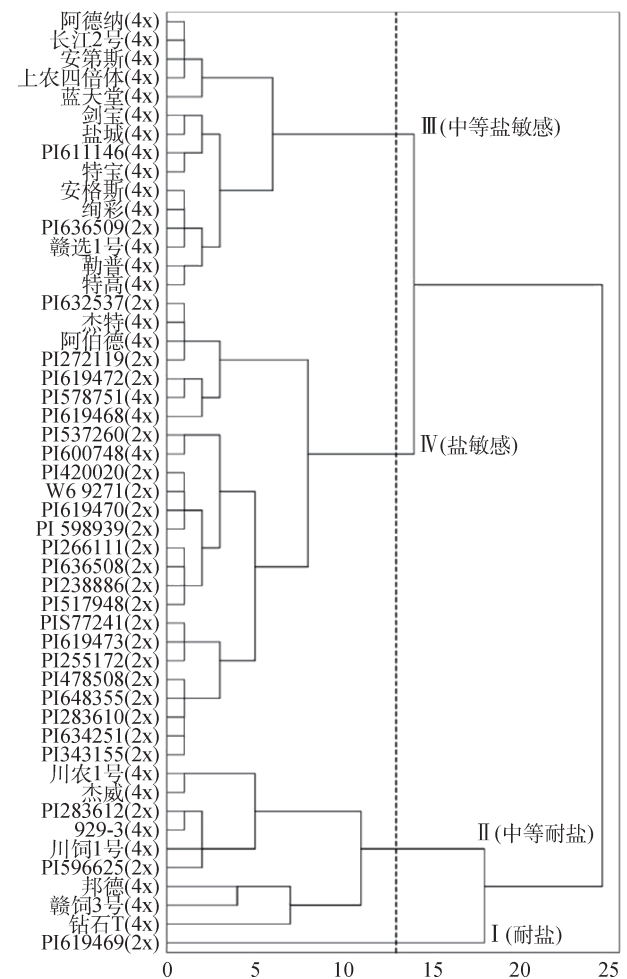


图2 基于综合评价体系值(D)的50份多花黑麦草聚类图
Fig. 2 Cluster analysis of 50 *Lolium multiflorum* populations based on the integrated value(D)

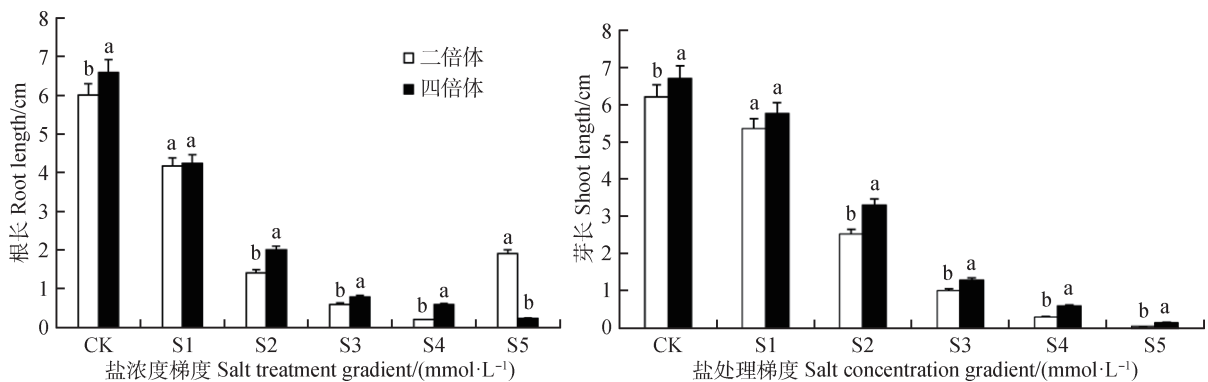


图 3 盐胁迫下不同倍性多花黑麦草的根长和芽长

Fig. 3 Root length and shoot length of different ploidy *Lolium multiflorum* under salt stress

注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著
Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

在四倍体中,28 号‘PI 619469’的 RGR, RGE, RGI 和 RVI 的值最高,分别为 0.693, 0.722, 0.708 和 0.361;33 号‘邦德’的相对胚芽长最高,为 0.435;48 号‘钻石 T’的相对胚根长最高,为 0.377。38 号‘杰特’的相对胚芽长和相对发芽指数值最低,为 0.215 和 0.193;25 号‘PI 600748’的相对胚根长最低(0.142);24 号‘PI 578751’的相对活力指数最低(0.084);27 号‘PI 619468’的相对发芽势最低(0.083);44 号‘特高’的相对发芽率最低(0.179)(表 8)。以上结果表明:四倍体材料中的‘PI 619469’和‘钻石 T’耐盐性相对较强,而‘杰特’和‘特高’的耐盐性相对较弱。

不同倍性萌发指标相对参数平均值表明:在盐胁迫下,四倍体各指标平均值均高于二倍体(表 7, 表 8)。不同盐浓度胁迫下,不同倍性多花黑麦草的根长和芽长均与对照差异显著($P<0.05$),且随着盐浓度的提高,都显著下降;同时任一盐浓度处理下四倍体的根长与芽长均高于二倍体(图 3)。因此,四倍体耐盐能力优于二倍体。

2.5 极端基因型多花黑麦草苗期盐胁迫的表型和生理响应

萌发期盐胁迫处理下得到四倍体极端耐受材料为‘PI 619469’和二倍体极端敏感材料为‘PI 272119’。用 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 胁迫处理(无 NaCl 为对照)盐敏感和盐耐受材料的幼苗,调查株高、根长、生物量结果见表 9。盐处理组的株高、地上重、地下重均低于对照组。二倍体材料‘PI 272119’株高减少最小,为 0.33 cm;除二倍体材料‘PI 272119’的处理组的根长高于对照组之外,其余

材料的根长也均低于对照组;四倍体材料‘PI 619469’地下重减少最大,减少 0.20 g。

表 7 二倍体多花黑麦草平均耐盐系数

Table 7 Average salt tolerance coefficient of diploid *Lolium multiflorum*

材料名称 Material	ARRL	ARSL	ARGR	ARGP	ARGI	ARVI
PI 238886	0.136	0.234	0.411	0.188	0.338	0.179
PI 255172	0.180	0.286	0.309	0.164	0.271	0.179
PI 266111	0.227	0.289	0.339	0.206	0.276	0.191
PI 272119	0.172	0.246	0.242	0.100	0.204	0.110
PI 283610	0.162	0.268	0.351	0.074	0.287	0.159
PI 283612	0.241	0.484	0.513	0.306	0.444	0.350
PI 343155	0.219	0.274	0.310	0.080	0.232	0.170
PI 420020	0.184	0.267	0.403	0.115	0.315	0.197
PI 478508	0.253	0.325	0.261	0.148	0.227	0.148
PI 517948	0.242	0.304	0.438	0.055	0.341	0.213
PI 537260	0.225	0.374	0.428	0.126	0.306	0.200
PI 577241	0.197	0.333	0.359	0.083	0.273	0.215
PI 596625	0.230	0.453	0.627	0.133	0.532	0.444
PI 598939	0.227	0.323	0.400	0.095	0.300	0.196
PI 619470	0.131	0.285	0.347	0.167	0.312	0.221
PI 619472	0.176	0.262	0.272	0.107	0.221	0.149
PI 619473	0.177	0.273	0.367	0.129	0.287	0.182
PI 632537	0.205	0.316	0.276	0.017	0.205	0.128
PI 634251	0.185	0.318	0.282	0.126	0.228	0.167
PI 636508	0.253	0.402	0.306	0.100	0.290	0.251
PI 648355	0.154	0.238	0.298	0.188	0.260	0.150
W6 9271	0.147	0.213	0.447	0.200	0.291	0.143
PI 636509	0.192	0.304	0.391	0.324	0.367	0.218
最大值 Maximum value	0.253	0.484	0.627	0.324	0.532	0.444
最小值 Minimum value	0.131	0.213	0.242	0.017	0.204	0.110
平均值 Average value	0.196	0.307	0.364	0.140	0.296	0.198
标准差 Standard deviation	0.037	0.067	0.090	0.073	0.076	0.072

表8 四倍体多花黑麦草平均耐盐系数
Table 8 Average salt tolerance coefficient of tetraploid
Lolium multiflorum

材料名称 Material	ARRL	ARSL	ARGR	ARGP	ARGI	ARVI
PI 578751	0.146	0.241	0.263	0.209	0.232	0.084
PI 600748	0.142	0.264	0.335	0.250	0.371	0.216
PI 611146	0.263	0.344	0.381	0.293	0.356	0.234
PI 619468	0.172	0.263	0.263	0.083	0.215	0.157
PI 619469	0.295	0.340	0.693	0.722	0.708	0.361
阿伯德	0.157	0.225	0.267	0.119	0.211	0.113
阿德纳	0.256	0.374	0.398	0.340	0.376	0.300
安第斯	0.220	0.312	0.447	0.362	0.417	0.267
安格斯	0.292	0.273	0.414	0.234	0.367	0.213
邦德	0.339	0.435	0.585	0.436	0.520	0.320
川农1号	0.370	0.392	0.613	0.328	0.492	0.294
赣饲3号	0.337	0.365	0.604	0.517	0.574	0.310
赣选1号	0.172	0.268	0.421	0.315	0.368	0.199
剑宝	0.215	0.285	0.447	0.317	0.401	0.220
杰特	0.143	0.215	0.242	0.155	0.193	0.112
杰威	0.327	0.363	0.544	0.429	0.498	0.299
蓝天堂	0.260	0.340	0.474	0.344	0.411	0.262
勒普	0.254	0.335	0.442	0.175	0.327	0.217
上农四倍体	0.269	0.230	0.480	0.380	0.418	0.177
特宝	0.271	0.266	0.436	0.274	0.372	0.214
特高	0.143	0.218	0.179	0.700	0.225	0.146
绚彩	0.252	0.343	0.405	0.234	0.338	0.251
盐城	0.238	0.317	0.384	0.370	0.327	0.244
长江2号	0.345	0.335	0.462	0.279	0.394	0.244
钻石T	0.377	0.392	0.638	0.579	0.577	0.347
川饲1号	0.371	0.392	0.495	0.361	0.420	0.246
929-3	0.344	0.352	0.449	0.416	0.451	0.289
最大值	0.377	0.435	0.693	0.722	0.708	0.361
Maximum value						
最小值	0.142	0.215	0.179	0.083	0.193	0.084
Minimum value						
平均值	0.258	0.314	0.436	0.342	0.391	0.235
Average value						
标准差	0.077	0.061	0.127	0.155	0.121	0.071
Standard deviation						

通过测定分析 150 mmol·L⁻¹ NaCl 盐胁迫下极端基因型多花黑麦草盐胁迫下生理指标,结果表明:盐胁迫处理下两种极端基因型多花黑麦草叶片

相对含水量均呈下降趋势,四倍体‘PI 619469’的差异不显著,‘PI 272119’差异显著(图 4a),‘PI 619469’的叶片相对电导率均呈下降趋势,而‘PI 272119’呈上升趋势(图 4b),四倍体‘PI 619469’叶绿素含量升高,二倍体‘PI 272119’叶绿素含量显著降低(图 4c),两种不同极端基因型材料的丙二醛含量均显著升高(图 4d)。150 mmol·L⁻¹ NaCl 盐胁迫对极端基因型多花黑麦草的生理指标有显著影响。

3 讨论

3.1 多花黑麦草萌发期耐盐性评价

植物的耐盐能力是由多基因控制的复杂数量性状,所以单一指标无法客观反映植物的耐盐能力,需要多个指标综合体现。在逆境条件下常用根长、芽长、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数作为评价种子抗逆的基本参数来全面反映种子的抗逆能力^[25]。指标相对值能够消除品种间的内在差异,较绝对值更能准确反映植物耐盐能力的大小,将萌发指标采用隶属函数结合主成分分析来综合判定种子萌发期的耐盐性更加科学合理^[26]。本研究中,我们选择根长、芽长、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数这6个指标作为多花黑麦草耐盐性评价的基本指标。盐胁迫导致土壤溶液渗透势降低,种子因吸水困难而难以萌发,进而使幼苗形态建成和成功出土受到抑制^[27]。根长和芽长能直接反映在逆境下的生长情况,在 50 mmol·L⁻¹ NaCl 的处理下,二倍体材料6号和四倍体材料30号、41号、46号的芽长高于对照,所有材料根长低于对照,随着盐浓度上升,各指标都呈下降趋势;在 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下,9份二倍体材料在实验处理时间内未萌发,说明高盐浓度抑制黑麦草种子萌发,在芝麻^[28]、水稻^[29]、亚麻^[30]等盐胁迫处理中也发现了这种现象。一般认为,高盐对植物的损害主要是由渗

表9 极端基因型多花黑麦草盐胁迫下生长指标
Table 9 Growth indicators of extreme genotype *Lolium multiflorum* under salt stress

材料名称 Material	分组 Group	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	地上重 Aboveground weight/g	地下重 Underground weight/g
PI 619469 (4x)	CK	36.41±1.01 ^c	25.72±0.62 ^c	1.80±0.03 ^c	0.45±0.01 ^a
	T	34.44±1.36 ^c	24.70±0.90 ^c	1.03±0.09 ^d	0.25±0.01 ^f
PI 272119 (2x)	CK	42.52±1.46 ^b	21.68±2.02 ^d	1.14±0.02 ^d	0.37±0.01 ^b
	T	42.19±0.83 ^b	30.24±2.86 ^b	0.67±0.01 ^e	0.24±0.01 ^d

注:CK表示对照组,T表示150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫处理组;同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著

Note:CK indicates control group and T indicates 150 mmol·L⁻¹ NaCl stress treatment group. Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level

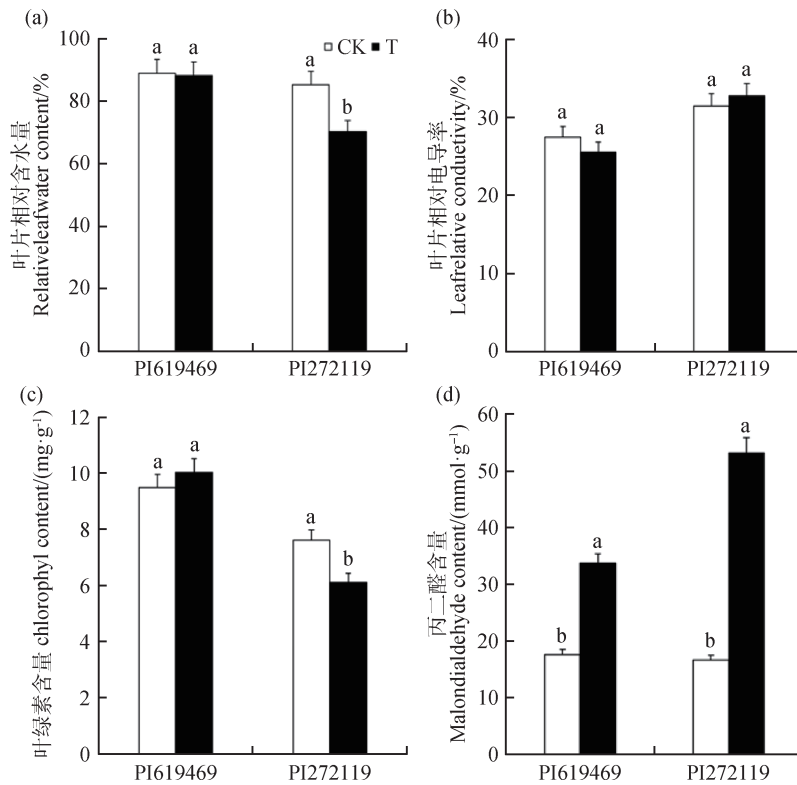


图 4 极端基因型多花黑麦草盐胁迫下生理指标

Fig. 4 Physiological indicators of extreme genotype *Lolium multiflorum* under salt stress

注:CK 表示对照组,T 表示 150 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫处理组;不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note:CK indicates control group and T indicates 150 mmol·L⁻¹ NaCl stress treatment group, Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level

透胁迫和离子毒性引起的^[31]。外部环境中高离子浓度形成的低水势抑制了种子的吸收,从而抑制了种子发芽^[32],而幼苗胚根和胚芽的生长受到渗透胁迫和离子毒性的协同作用的影响。

本研究中将 6 项萌发指标结合隶属函数、主成分分析和综合评价 D 值计算,进行萌发期耐盐性综合评价,发现四倍体 28 号材料‘PI 619469’、四倍体 48 号材料‘钻石 T’、35 号材料‘赣饲 3 号’为 D 值最大的三份材料,耐盐性最强;四倍体 38 号材料‘杰特’、二倍体 18 号材料‘PI 632537’、4 号材料‘PI 272119’为 D 值最小的三份材料,耐盐性最弱。二倍体材料中‘PI 596625’的 D 值最高,‘PI 272119’的 D 值最低;四倍体中‘PI 619469’的 D 值最高,‘杰特’的 D 值最低。李孔晨等^[33]研究中,对 10 个一年生多花黑麦草品种在 150 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下进行耐盐性聚类,材料‘邦德’聚到耐盐组,‘杰威’‘特高’和‘长江 2 号’等耐盐性低于‘邦德’,分别聚到中等耐盐组与盐敏感组中。本研究的综合评价 D 值结果表明:‘钻石 T’的耐盐性高于‘邦德’‘杰威’‘长江 2 号’和‘特高’聚为中等耐盐组;‘安格斯’‘特

高’和‘长江 2 号’聚到中等盐敏感组。Feng 等^[11]研究结果表明‘邦德’耐盐性强于‘安格斯’,在本研究中得到了同样的结果。但更为关键的是四倍体材料‘PI 619469’的耐盐性远超其它种质,为 50 份多花黑麦草种质中耐盐性最好的材料。

3.2 不同倍性多花黑麦草盐胁迫下的生理特性

一般来说,作物对环境胁迫的反应主要表现在两个方面:生长特性和生理特性的变化,当植物受到盐胁迫时,它们会抵抗胁迫并启动一系列应激反应,以维持其生理代谢的正常^[26]。株高和生物量作为胁迫下反映生长的直接指标,其根系与枝叶生长随胁迫强度的增加受到直接且严重的抑制。叶片相对含水量是反映植物体内水分含量的重要指标,它与植物耐盐性紧密相关。叶绿素是光合作用的基础物质,盐胁迫可通过增强植株体内的叶绿素酶活性来促进叶绿素的降解,使得植株叶绿素含量降低。叶片相对电导率和丙二醛含量分别为膜结构损伤和膜脂过氧化的指征。朱天奇等^[34]发现经盐胁迫处理后叶片可溶性糖和脯氨酸含量会大量积

累。本研究中,盐胁迫下除二倍体材料‘PI 272119’的根长大于对照组外,在盐胁迫的处理组中不同倍性的多花黑麦草材料的株高、根长和生物量较对照低,这可能是因为二倍体材料‘PI 272119’存在一些调控盐耐受的途径使其对盐更有抗性。表明一定强度的盐胁迫对不同倍性多花黑麦草的生长具有明显抑制作用。叶片相对含水量、叶绿素含量在不同胁迫下总体低于对照,四倍体中处理组与对照组的差异比二倍体小;叶片相对电导率、丙二醛含量在不同胁迫下均高于对照,表明在胁迫下,四倍体材料保持着更好的生理保水能力与叶片光合能力,但各个材料在盐的胁迫下,细胞均受到逆境损伤。从生理学的角度来看,植物对盐的反应是复杂的,因为它随物种^[35]、浓度^[21]、环境因素^[36]和生长阶段^[37]的变化而变化。此外,由于植物的盐耐性在不同生长期可能存在差异,故在萌发期筛选得到的其他材料在苗期是否同样耐受或敏感,需进一步的实验验证。

4 结论

本研究通过对50份不同倍性多花黑麦草耐盐性的探究,筛选出耐盐材料1份(‘PI 619469’)、中等耐盐材料9份(‘钻石T’‘赣饲3号’和‘邦德’等)、中等盐敏感材料15份(‘特高’‘勒普’和‘赣选1号’等)和盐敏感材料25份(‘PI 343155’‘PI 634251’和‘PI 283610’等)。(‘PI 596625’和‘PI 272119’分别是二倍体中对盐最耐受和最敏感的材料,而材料‘PI 619469’和‘杰特’分别是四倍体中对盐最耐受和最敏感的材料。其中,‘PI 619469’的综合表现良好,适宜在盐化土壤环境中种植生产,且可作为耐盐饲草育种的优先材料。

参考文献

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 防止土壤盐渍化,提高土壤生产力[J]. 科学,2021,73(6):30-34,2,4
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Halt soil salinization, boost soil productivity [J]. Science, 2021, 73 (6) : 30-34,2,4
- [2] MYERS W M. Colchicine induced tetraploidy in perennial ryegrass: *Lolium perenne* L [J]. Journal of Heredity, 1939, 30 (11):499-504
- [3] 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
- [4] 王绍飞,罗永聪,张新全,等. 14个多花黑麦草品种(系)在川西南地区生产性能综合评价[J]. 草业学报,2014,23(6):87-94
WANG S F, LUO Y C, ZHANG X Q, et al. The production performance of 14 annual ryegrass varieties in the southwest of Sichuan Province [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6):87-94
- [5] 杨春桃,王梦寒,陈艳宇. 盐胁迫下30个多花黑麦草品种的种子萌发特性及耐盐性评价[J]. 四川农业科技,2021(5):23-25
YANG C T, WANG M H, CHEN Y Y. Seed germination characteristics and salt tolerance evaluation of 30 *Lolium multiflorum* varieties under salt stress [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2021(5):23-25
- [6] 裴孟,梁玉婷,易良银,等. 黑麦草对土壤中残留抗生素的降解及其对微生物活性的影响[J]. 环境工程学报,2017,11(5):3179-3186
PEI M, LIANG Y T, YI L Y, et al. Degradation of residual antibiotics in soils by ryegrass and its effect on microbial activity [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (5) : 3179-3186
- [7] SHI G Y, HU J Y, DING F Q, et al. Exogenous *Pseudomonas aeruginosa* application improved the phytoremediation efficiency of *Lolium multiflorum* Lam on Cu - Cd co-contaminated soil [J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 27:102489
- [8] YANG X Z, CHENG S B, LUO Y C, et al. Cadmium tolerance of *Lolium multiflorum* Lam. with different ploidy levels [J]. Range Management and Agroforestry, 2021, 42(2):212-221
- [9] 程少波,杨巽喆,邹丽,等. 23份多花黑麦草萌发期抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(2):1-8,16
CHENG S B, YANG X Z, ZOU L, et al. Drought resistance evaluation of 23 ryegrass germplasms at germination stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2):1-8,16
- [10] 汪霞. 多花黑麦草耐盐评价及相关抗氧化酶基因表达分析[D]. 雅安:四川农业大学,2015:9-10
WANG X. Evaluation of salt tolerance of *Lolium multiflorum* and analysis of related antioxidant enzyme gene expression [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015:9-10
- [11] FENG Q J, SONG S R, YANG Y, et al. Comparative physiological and metabolic analyzes of two Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) cultivars with contrasting salinity tolerance [J]. Physiologia Plantarum, 2021, 172(3):1688-1699
- [12] XIE Y, LIU X Y, AMEE M, et al. Evaluation of salt tolerance in Italian ryegrass at different developmental stages [J]. Agronomy, 2021, 11(8):1487
- [13] 韩毅强,高亚梅,杜艳丽,等. 大豆耐盐碱种质资源鉴定[J]. 中国油料作物学报,2021,43(6):1016-1024
HAN Y Q, GAO Y M, DU Y L, et al. Identification of saline-alkali tolerant germplasm resources of soybean during the whole growth stage [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(6):1016-1024
- [14] 王慧敏,李明昊,李云,等. 谷子品种(系)萌发期耐盐碱性鉴定及评价[J]. 作物杂志,2023(2):57-66

- WANG H M, LI M H, LI Y, et al. Identification and evaluation of salt-alkali tolerance of foxtail millet cultivars (lines) at germination stage[J]. *Crops*, 2023(2):57-66
- [15] 张静,高文博,晏林,等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J]. *作物学报*, 2023, 49(6):1551-1561
- ZHANG J, GAO W B, YAN L, et al. Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2023, 49(6):1551-1561
- [16] 黄雅婕,任丹,李生梅,等. 陆地棉苗期的耐盐碱性评价及鉴定指标筛选[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(5):46-55
- HUANG Y J, REN D, LIS M, et al. Evaluation and screening of salt and alkali tolerance indices of upland cotton seedlings[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(5):46-55
- [17] 朱建峰,张会龙,杨秀艳,等. 35个白榆优良家系种子萌发期耐盐碱性评价[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(9):1417-1429
- ZHU J F, ZHANG H L, YANG X Y, et al. Comprehensive evaluation of saline-alkali resistance in seed germination period of 35 *Ulmus pumila* families [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(9):1417-1429
- [18] 郭秀秀,李照君,樊守金,等. 大豆种质资源芽期耐盐性鉴定及耐盐品种筛选[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(6):47-51
- GUO X X, LI Z J, FAN S J, et al. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant varieties of soybean germplasm at germination stage [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(6):47-51
- [19] SUN F L, CHEN Q, CHEN Q J, et al. Screening of key drought tolerance indices for cotton at the flowering and boll setting stage using the dimension reduction method [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:619926
- [20] 李媛媛,陈博,姚立蓉,等. 283份小麦品种(系)萌发期耐盐碱性评价及种质筛选[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(3):25-33
- LI Y Y, CHEN B, YAO L R, et al. Evaluation of salt and alkali tolerance and germplasm screening of 283 wheat varieties (lines) during germination [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(3):25-33
- [21] RIOS F E, KENWORTHY E K, MUNOZ R P. Association of Phenotypic Traits with Ploidy and Genome Size in Annual Ryegrass [J]. *Crop Science*, 2015, 55(5):2078-2090
- [22] TAMBUSSI E A, NOGUÉS S, ARAUS J L. Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism [J]. *Planta*, 2005, 221(3):446-458
- [23] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006:10-20
- GAO J F. *Experimental Guide to Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:10-20
- [24] 李班,吕莹,杨明焯,等. 盐碱胁迫对甘蓝型油菜生理及分子机制的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37(3):86-93
- LI B, LÜ Y, YANG M X, et al. Effects of saline-alkali stress on physiology and molecular mechanism of *Brassica napus* L [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(3):86-93
- [25] ZHANG R, HUSSAIN S, WANG Y, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) germplasm at the germination stage [J]. *Agronomy*, 2021, 11(8):1569
- [26] 张萍萍,胡龙兴,傅金民. 内生真菌感染对盐胁迫下黑麦草种子萌发的影响[J]. *草业科学*, 2012, 29(7):1094-1099
- ZHANG P P, HU L X, FU J M. Effects of endophytic fungi on seed germination of perennial ryegrass under salt stress [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(7):1094-1099
- [27] 苏立娜,麻冬梅,李嘉文,等. 外源褪黑素对盐胁迫下两种紫花苜蓿生理及光合特性的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3):726-732
- SU L N, MA D M, LI J W, et al. Implications of exogenous melatonin on the physiological and photosynthetic characteristics of the seedlings of two alfalfa varieties [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3):726-732
- [28] EL HARFI M, HANINE H, RIZKI H, et al. Effect of drought and salt stresses on germination and early seedling growth of different color-seeds of sesame (*Sesamum indicum*) [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(6):1088-1094
- [29] LI X, GUO D L, XUE M, et al. Genome-wide association study of salt tolerance at the seed germination stage in flax (*Linum usitatissimum* L.) [J]. *Genes*, 2022, 13(3):486
- [30] LIANG W J, MA X L, WAN P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: a review [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2018, 495(1):286-291
- [31] LI Y. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of three salinity plants [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, 11(9):1268-1272
- [32] XIAO B B, LU H Y, LI C Y, et al. Carbohydrate and plant hormone regulate the alkali stress response of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 175:104053
- [33] 李孔晨,皇甫江云,卢欣石. 一年生黑麦草萌发期耐盐性综合评价[J]. *草地学报*, 2010, 18(3):388-393, 398
- LI K C, HUANGFU J Y, LU X S. Salt tolerance evaluation of 10 varieties of *Lolium multiflorum* lam. at germination period [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(3):388-393, 398
- [34] 朱天奇,鲁泽宇,胡桑源,等. 盐胁迫对两个高羊茅品种幼苗生长及生理特性的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(8):2082-2088
- ZHU T Q, LU Z Y, HU S Y, et al. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of two tall fescue seedlings [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8):2082-2088
- [35] SNAPP S S, SHENNAN C. Effects of salinity on root growth and death dynamics of tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill [J]. *New Phytologist*, 1992, 121(1):71-79
- [36] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59(1):651-681
- [37] WEI Y Y, XU Y C, LU P, et al. Salt stress responsiveness of a wild cotton species (*Gossypium klotzschianum*) based on transcriptomic analysis [J]. *Plos One*, 2017, 12(5):e0178313