



41份木豆萌发期耐盐性综合评价

盛伟 吴欣池 梁浩 李慈云 马艳艳 张靖雪 丁西朋 李欣勇 刘国道

Evaluation of salt tolerance in 41 pigeon pea varieties during germination

SHENG Wei, WU Xinchu, LIANG Hao, LI Ciyun, MA Yanyan, ZHANG Jingxue, DING Xipeng, LI Xinyong, LIU Guodao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

21份引进BMR饲草高粱萌发期苗期耐旱耐盐性评价

Evaluation of drought and salt stress during the germination and seedling stages of 21 introduced brown midrib forage sorghum species

草业科学. 2018, 12(5): 1199 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0603>

多年生黑麦草种子萌发及苗期耐盐性的比较

Comparison of the salt tolerance of perennial ryegrass during seed germination and seedling growth

草业科学. 2017, 11(4): 724 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0228>

油菜素内酯对盐胁迫下黑麦草种子萌发及幼苗生长的生理调控作用

Physiological regulation of brassinosteroids on seed germination and seedling growth in *Lolium perenne* in response to salt stress

草业科学. 2021, 38(6): 1110 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629..2021-0034>

重度盐胁迫下12个地被草种萌发期的耐盐性比较

Comparison of salt tolerance during the germination period of 12 grass species under severe salt stress

草业科学. 2019, 36(11): 2806 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0002>

木豆种质资源质量评价

Study on the quality evaluation of pigeon pea accessions

草业科学. 2020, 37(11): 2293 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0254>

5个高羊茅品种萌发期的耐盐性比较

Salt tolerance of five varieties of tall fescue at the germination stage

草业科学. 2019, 36(5): 1344 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0262>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0040

盛伟, 吴欣池, 梁浩, 李慈云, 马艳艳, 张靖雪, 丁西朋, 李欣勇, 刘国道. 41 份木豆萌发期耐盐性综合评价. 草业科学, 2022, 39(8): 1607-1617.

SHENG W, WU X C, LIANG H, LI C Y, MA Y Y, ZHANG J X, DING X P, LI X Y, LIU G D. Evaluation of salt tolerance in 41 pigeon pea varieties during germination. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1607-1617.

41 份木豆萌发期耐盐性综合评价

盛伟¹, 吴欣池¹, 梁浩¹, 李慈云¹, 马艳艳¹, 张靖雪¹,
丁西朋², 李欣勇², 刘国道²

(1. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南儋州 571737)

摘要: 对 41 份木豆 (*Cajanus cajan*) 种质资源进行萌发期耐盐性综合评价, 测定发芽率、发芽指数、活力指数、根系表面积和根系体积等 10 项指标, 通过变异系数分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析, 对其进行萌发期耐盐性综合评价。同时, 对筛选出的不同耐盐性木豆种质, 测定幼苗的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性, 分析盐胁迫下不同耐盐性木豆的生理响应机理的差异。结果表明: 41 份木豆种子萌发期耐盐性存在显著差异, 筛选出相对根长、相对根冠比、相对发芽指数和相对根系平均直径可作为木豆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 41 份木豆种质资源划分成高耐盐型 (1 份)、耐盐型 (10 份)、中间型 (23 份) 和盐敏感型 (7 份) 4 个类别。不同耐盐性木豆在盐胁迫下的生理响应表明, 高耐盐型和耐盐型材料的细胞质膜透性和酶活能力优于盐敏感型。

关键词: 木豆; 种子萌发; 盐胁迫; 幼苗生长; 生理响应; 隶属函数法; 聚类分析

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)08-1607-11

Evaluation of salt tolerance in 41 pigeon pea varieties during germination

SHENG Wei¹, WU Xinchu¹, LIANG Hao¹, LI Ciyun¹, MA Yanyan¹, ZHANG Jingxue¹,
DING Xipeng², LI Xinyong², LIU Guodao²

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

2. Tropical Crop Germplasm Research Institute, Danzhou 571737, Hainan, China)

Abstract: In this study, we identified the salt tolerance of 41 pigeon pea (*Cajanus cajan*) germplasm varieties during the germination period. Furthermore, we identified 10 physiological response indicators, including germination rate, germination index, vigor index, root surface area, and root volume. Principal component, membership-function, and cluster analyses were used to comprehensively evaluate salt tolerance during the germination period. Concurrently, the superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) activities in the seedlings were determined, and the physiological response mechanisms of different salt-tolerant pigeon pea seedlings under salt stress were analyzed. The results revealed significant differences in the salt tolerance of 41 pigeon pea germplasm varieties during germination, with relative root length, crown ratio, germination index, and average diameter being selected as the key indices of germination salt tolerance. Cluster analysis based on membership-function values divided the 41 pigeon pea germplasm varieties into four categories, namely highly salt tolerant (1 variety), salt tolerant (10 varieties), intermediate tolerance (23 varieties), and salt-sensitive (7 varieties).

收稿日期: 2022-01-15 接受日期: 2022-02-25

基金项目: 海南省院士创新平台科研专项资助 (YSPTZX202020); 海南省自然科学基金项目资助 (320RC721、320RC729); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金 (1630032022028)

第一作者: 盛伟 (1998-), 男 (土家族), 湖南常德人, 在读硕士生, 研究方向为牧草种质资源研究。E-mail: swdw98@163.com

通信作者: 李欣勇 (1985-), 男, 甘肃兰州人, 副研究员, 博士, 研究方向为草类植物种子学。E-mail: lixy05@qq.com

Ultimately, using pigeon peas that exhibit varying levels of salt tolerance, we reveal that the cytoplasmic membrane permeability and enzyme viability of high-salt-resistant and salt-resistant varieties generate superior physiological responses compared to salt-sensitive varieties.

Keywords: pigeon pea; seed germination; salt stress; seedling growth; physiological response; membership function method; cluster analysis

Corresponding author: LI Xinyong E-mail: lixxy05@qq.com

土壤盐渍化是一种非生物胁迫,极大地限制了作物的种子萌发、产量及品质,给农业生产造成了诸多不便^[1]。我国盐碱化耕地面积已达到 $3.417 \times 10^7 \text{ hm}^2$,筛选和种植耐盐作物是合理利用盐碱土的有效措施之一^[2]。木豆 (*Cajanus cajan*) 为豆科牧草,用途广泛,可作粮食和饲料^[3],在药理活性^[4]方面也具有极大潜力,在我国热带和亚热带地区普遍栽培^[5]。因此,开展木豆耐盐种质资源的挖掘及耐盐机制研究,可为常规育种工作奠定基础,为急需改善的盐碱化耕地提供发展思路。

目前,关于木豆品种的筛选鉴定和耐盐机制的研究仍在起步阶段,李拴林等^[6]发现在不同盐胁迫浓度下木豆种子的发芽率、发芽指数、胚根和胚芽,随盐浓度的增大而降低。Garg 和 Sharma^[7]发现盐胁迫可降低植物生物量、增加对根的负面效应。不同木豆种质资源在形态指标和物候期方面存在较大变异^[8]。在对耐盐性关键指标的筛选中,已在扁蓿豆 (*Medicago ruthenica*)^[9]、偃麦草 (*Elytrigia repens*)^[10]、苜蓿 (*M. sativa*)^[11]、白三叶 (*Trifolium repens*)^[12] 和白花草木樨 (*Melilotus alba*)^[13] 中已经明确,但对不同基因型木豆种质耐盐性关键指标的筛选和耐盐性综合评价鲜见报道,严重影响了木豆在盐碱地的推广应用。

本研究以 41 份木豆种质资源为材料,利用 NaCl 模拟盐胁迫,运用变异系数分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析评价方法,确定木豆萌发期耐盐性评价指标,筛选萌发期耐盐种质,并探讨不同基因型木豆种质萌发期盐胁迫的生理耐受响应机制,旨在为木豆大规模耐盐性鉴定和耐盐机制研究,提供鉴定方法和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料 41 份木豆种质均由中国热带农业科学

院热带作物品种资源研究所种质资源库提供 (表 1)。

1.2 试验方法

为确定参试木豆材料萌发期耐盐性评价的适宜胁迫浓度,提前从参试材料中随机选取 6 份木豆种质材料,分别在 NaCl 质量分数梯度为 0 (CK)、0.15%、0.30%、0.60%、0.90%、1.20%、1.50% 时预试验。结果表明,NaCl 质量分数为 0.90% 时,6 份木豆材料发芽率和幼苗生长受到明显抑制,且材料间差异显著,因此最终选择 0.90% 的 NaCl 溶液用以评价 41 份木豆材料萌发期的耐盐性。

选取大小均匀一致、饱满、无病虫害的种子,利用无水乙醇进行浸泡消毒 (20 min),随后用蒸馏水将种子清洗干净待用。采用纸上发芽法,对照组和处理组各设 3 次重复,每重复 50 粒,每培养皿铺 2 层滤纸,分别施加 10 mL 对应溶液。将种子均匀置于培养皿内,在人工气候箱进行恒温培养 (25 °C),相对湿度为 50%,第 10 天发芽结束。

1.3 观测指标

1.3.1 形态指标的测定

每隔 24 h 观察记录发芽种子数,以胚根或胚芽突破种皮并长于种子长度为发芽标准,计算种子的发芽率 (%)、发芽指数和活力指数。计算公式如下:

$$\text{发芽率} = \frac{\text{试验结束时的发芽种子数}}{\text{总种子数}} \times 100\%; \quad (1)$$

$$\text{发芽指数} = \sum (G_t / D_t); \quad (2)$$

$$\text{活力指数} = \text{发芽指数} \times \text{鲜重}。 \quad (3)$$

公式 (2) 中, G_t 为第 t 日种子的发芽数, D_t 为相应的发芽试验天数。

试验结束时,每处理随机选取 10 株幼苗,用清水洗净,称量鲜重,随后利用 LA-S 根系扫描软件 (杭州万深检测科技有限公司) 进行扫描分析,获得

表 1 41 份木豆种质资源基本信息
Table 1 Basic information of the 41 pigeon pea varieties

编号 Code	材料名称 Variety	原产地 Origin	编号 Code	材料名称 Variety	原产地 Origin	编号 Code	材料名称 Variety	原产地 Origin
1	D21007	海南 Hainan	15	D21090	云南 Yunnan	29	D21134	广西 Guangxi
2	D21008	广西 Guangxi	16	D21030	海南 Hainan	30	D21010	海南 Hainan
3	D21009	广西 Guangxi	17	D21031	海南 Hainan	31	D21135	广西 Guangxi
4	D21128	广东 Guangdong	18	D21094	缅甸 Burma	32	D21015	江西 Jiangxi
5	D21129	广西 Guangxi	19	D21097	云南 Yunnan	33	D21014	江西 Jiangxi
6	D21021	广西 Guangxi	20	D21034	海南 Hainan	34	D21136	海南 Hainan
7	D21022	福建 Fujian	21	D21035	海南 Hainan	35	D21004	海南 Hainan
8	D21061	云南 Yunnan	22	D21027	海南 Hainan	36	D21019	印度 India
9	D21130	云南 Yunnan	23	D21001	海南 Hainan	37	D21006	广西 Guangxi
10	D21023	海南 Hainan	24	D21098	萨尔瓦多 El Salvador	38	D21016	广西 Guangxi
11	D21066	云南 Yunnan	25	D21131	海南 Hainan	39	D21017	广西 Guangxi
12	D21024	海南 Hainan	26	D21132	云南 Yunnan	40	D21119	海南 Hainan
13	D21080	云南 Yunnan	27	D21133	云南 Yunnan	41	D21005	广西 Guangxi
14	D21026	海南 Hainan	28	D21002	海南 Hainan			

编号下同。The code is applicable for the following tables and figures as well.

幼苗的根长 (cm)、苗长 (cm)、根长/苗长、根系表面积 (cm²)、根系体积 (cm³)、根系平均直径 (mm)。

1.3.2 生理指标的测定

在萌发期耐盐性不同的各类别中, 挑选代表性材料在幼苗第 10 天时, 进行取样。超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性采用 NBT 光还原法测定^[14]; 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性采用愈创木酚法测定^[15]; 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性采用紫外吸收法测定^[16]。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2007 进行数据录入和作图表, SPSS 23 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, 对木豆萌发期耐盐性评价指标进行筛选; 根据隶属函数分析和聚类分析, 对 41 份木豆材料萌发期耐盐性综合评价。同时, 为减少各材料间指标性状固有性差异, 各指标值均使用相对值来进行分析。

$$\text{指标相对值} = \text{指标胁迫处理值} / \text{指标对照处理值}; \quad (4)$$

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (5)$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (6)$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (7)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j], \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (8)$$

公式 (5) 为正向隶属函数公式, 公式 (6) 为反向隶属函数公式, 式中: $R(X_i)$ 为各指标隶属函数值, X_i 为指标测定值, X_{\min} 、 X_{\max} 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值; W_j 为第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度及权重大小; P_j 表示各品种第 j 个综合指标的贡献率; 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 盐胁迫对木豆种子萌发与幼苗生长的影响

如表 2 所列, 盐胁迫下, 木豆种子萌发期 10 项观测指标的变异系数在 0.178~0.790, 说明 41 份木豆材料的各指标性状之间存在差异。其中, 相对根系表面积、相对根系体积、相对根长、相对苗长、相对根冠比的变异系数均在 0.500 以上, 分别为 0.790、0.645、0.621、0.551 和 0.580, 说明这 5 项指标在盐胁迫

表 2 盐胁迫下 41 份木豆材料的 10 项相对指标
 Table 2 Variation in 10 physiological response indices for 41 pigeon pea varieties under salt stress

编号 Code	相对根系 表面积 Relative root surface area	相对根系 平均直径 Relative average root diameter	相对根 系体积 Relative root volume	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vigor index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative shoot length	相对鲜重 Relative fresh weight	相对根冠比 Relative root-shoot ratio
1	0.439	1.476	0.600	0.891	0.582	0.310	0.717	0.203	0.533	3.533
2	0.411	2.085	0.800	1.237	1.097	0.249	0.249	0.152	0.228	1.633
3	0.198	2.623	0.519	0.983	0.959	0.226	0.303	0.163	0.236	1.863
4	0.223	1.249	0.327	0.884	0.806	0.257	0.500	0.113	0.319	4.422
5	0.466	2.009	0.944	0.784	0.797	0.253	0.188	0.118	0.317	1.590
6	0.150	2.547	0.400	0.833	0.915	0.348	0.235	0.211	0.381	1.111
7	0.231	1.603	0.400	0.967	0.957	0.256	0.347	0.189	0.268	1.840
8	0.149	1.848	0.316	0.876	0.665	0.218	0.623	0.153	0.327	4.077
9	0.193	2.895	0.600	1.250	0.793	0.323	0.304	0.158	0.407	1.916
10	0.240	1.734	0.402	1.119	1.053	0.336	0.371	0.168	0.319	2.208
11	0.539	1.360	0.706	1.082	1.023	0.438	0.483	0.323	0.429	1.497
12	0.369	1.318	0.560	0.982	0.972	0.312	0.610	0.232	0.321	2.631
13	0.206	1.325	0.300	0.792	0.755	0.286	0.215	0.173	0.379	1.244
14	0.342	1.157	1.846	1.000	0.884	0.479	0.430	0.285	0.542	1.507
15	0.153	2.007	0.309	0.543	0.387	0.124	0.113	0.223	0.321	0.506
16	0.506	1.735	0.857	0.934	0.841	0.381	0.507	0.168	0.453	3.026
17	0.437	1.177	0.500	0.877	0.885	0.218	0.837	0.388	0.246	2.155
18	0.130	1.843	0.232	0.659	0.709	0.151	0.235	0.128	0.214	1.840
19	0.437	2.178	0.900	0.986	1.208	0.539	0.454	0.241	0.446	1.881
20	0.302	2.443	0.716	0.800	0.778	0.264	0.244	0.152	0.339	1.608
21	0.550	1.511	0.964	0.600	1.031	0.217	0.222	0.041	0.211	5.463
22	0.206	1.689	0.378	0.746	0.582	0.291	0.286	0.114	0.500	2.512
23	0.201	1.605	0.333	1.029	0.872	0.245	0.398	0.236	0.281	1.687
24	0.417	2.332	0.952	0.750	0.707	0.270	0.371	0.130	0.382	2.855
25	0.193	1.986	0.375	0.838	0.606	0.217	0.209	0.394	0.358	0.531
26	0.274	1.792	0.480	0.938	0.778	0.338	0.707	0.626	0.434	1.129
27	0.126	1.590	0.188	0.825	0.955	0.318	0.202	0.141	0.333	1.427
28	0.321	1.829	0.500	1.014	0.952	0.308	0.411	0.132	0.324	3.110
29	0.273	2.422	0.607	0.682	0.635	0.190	0.430	0.187	0.300	2.297
30	0.170	2.056	0.379	0.877	0.683	0.257	0.120	0.281	0.377	0.428
31	0.184	1.777	0.323	1.086	1.086	0.263	0.197	0.175	0.242	1.123
32	0.169	1.419	0.242	0.917	0.827	0.419	0.224	0.375	0.507	0.598
33	0.389	1.224	0.304	0.620	0.686	0.368	0.628	0.577	0.536	1.087
34	1.047	1.762	1.904	0.937	0.614	0.395	1.478	0.333	0.643	4.435
35	0.106	1.952	0.190	0.646	0.752	0.172	0.255	0.073	0.228	3.469
36	0.190	2.070	0.378	1.000	0.923	0.290	0.233	0.216	0.314	1.080
37	0.276	1.812	0.486	0.941	0.834	0.315	0.258	0.382	0.378	0.677
38	0.215	2.400	0.500	0.870	0.718	0.213	0.154	0.195	0.297	0.791
39	0.208	2.526	0.510	0.877	0.686	0.427	0.406	0.457	0.623	0.888
40	0.201	2.324	0.340	0.905	0.962	0.354	0.384	0.142	0.368	2.695
41	1.559	0.715	1.071	1.119	0.795	0.276	0.521	0.186	0.347	2.798
均值 Mean value	0.327	1.839	0.577	0.895	0.823	0.295	0.392	0.228	0.366	2.028
变异系数 CV	0.790	0.253	0.645	0.178	0.202	0.293	0.621	0.551	0.293	0.580

迫后的变化更大。相对根系平均直径、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数和相对鲜重的变异系数均未超过0.300,分别为0.253、0.178、0.202、0.293和0.293,说明这5项指标受盐胁迫的影响较小。

2.2 盐胁迫下木豆种子萌发期指标的相关性

如表3所列,相对根系表面积与相对根系平均直径极显著负相关($P < 0.01$),与相对根系体积、相对根长极显著正相关;相对根系平均直径与相对根长显著负相关($P < 0.05$);相对根系体积与相对活力指数、相对鲜重、相对根冠比显著正相关,与相对根长极显著正相关;相对发芽率与相对发芽指数、相对活力指数极显著正相关;相对发芽指数与相对活力指数显著正相关,与相对鲜重显著负相关;相对活力指数与相对根长、相对苗长显著正相关,与相对鲜重极显著正相关;相对根长与相对苗长显著正相关,与相对鲜重和相对根冠比则极显著正相关;相对苗长与相对鲜重极显著正相关,与相对根冠比极显著负相关。这说明10项观测指标间密切程度高,进一步通过主成分分析来确定木豆萌发期耐盐性评价指标。

2.3 耐盐性评价指标筛选

主成分分析(表4)表明,前4个主成分的累加贡献率达80.14%,特征值都大于1,因此将前4个成分作为41份木豆材料耐盐性评价的主要因子。第1主成分对应特征向量中载荷排名前3的指标是相对根长、相对根系体积和相对根系表面积,分别为0.790、0.738和0.718;第2主成分对应特征向量载荷排名前3的指标是相对根冠比、相对苗长和相对鲜重,分别为-0.811、0.736和0.512;第3主成分对应特征向量载荷排名前3的指标是相对发芽指数、相对发芽率和相对活力指数,分别为0.903、0.770和0.392;第4主成分对应特征向量载荷排名前3的指标是相对根系平均直径、相对根系体积和相对苗长,分别为0.795、0.365和-0.322。综合相关性分析和主成分分析结果,选择4个主成分中与其他指标存在极显著相关性且特征向量绝对值最大的指标(相对根长、相对根冠比、相对发芽指数和相对根系平均直径)作为木豆种子萌发期耐盐评价指标。

2.4 41份木豆耐盐性综合评价

综合隶属函数值结果(表5)表明,41份木豆材

料种子萌发期耐盐能力存在明显差异,排在前3位的耐盐综合隶属函数值分别为0.620、0.558和0.527,都在0.5以上,表明这3份材料耐盐性较强;排在最后3位的隶属函数值都在0.3以下,分别为0.292、0.289和0.259,表明耐盐性较弱。

聚类分析(图1)结果表明,在欧式距离5处可将41份木豆材料划分为4个类群:第1类群为高耐盐型种质,含有1份种质,约占总材料的2.44%;第2类群为耐盐型种质,含有10份种质,占总材料的24.39%;第3类群为中间型种质,含有23份种质,占总材料的56.10%;第4类群为盐敏感型种质,含有7份种质,占总材料的17.07%。

2.5 不同耐盐性木豆在盐胁迫下的生理响应分析

从耐盐性结果得到的4种不同耐盐性类群中,分别选择代表性材料(高耐盐型“34”、耐盐型“3”和“9”、中间型“37”和“8”、盐敏感型“35”和“22”)进行生理指标测定分析。结果表明,0.9%盐胁迫处理下不同耐盐性木豆的SOD活性均不同程度下降(除盐敏感型“35”外),其中,耐盐型“9”、中间型“8”和盐敏感型“22”显著低于对照($P < 0.05$),高耐盐型木豆的SOD活性高于盐敏感型(图2),表明高耐盐型木豆较盐敏感型清除活性氧的能力更强,对细胞膜系统损害的抵抗力更强。0.9%盐胁迫处理下的高耐盐型、中间型和盐敏感型木豆的POD活性均显著高于对照($P < 0.05$),分别为对照的3.80倍、1.91倍、2.05倍、4.36倍、2.91倍和4.57倍,高耐盐型木豆的POD活性高于耐盐型、中间型和盐敏感型;中间型和盐敏感型木豆在盐胁迫处理下,其POD活性呈上升趋势,表明植株对盐敏感的程度越高,对细胞损伤程度越高。在0.9%盐胁迫处理下,CAT活性与对照相比变化较小,仅高耐盐型“34”和耐盐型“3”显著高于对照($P < 0.05$),但高耐盐型、耐盐型同盐敏感型的CAT变化趋势有所不同;高耐盐型“34”和耐盐型木豆“3”和“9”的CAT分别较对照提升了37.02%、97.31%和11.58%,盐敏感型木豆“35”和“22”的CAT较对照降低了34.31%和11.67%。

3 讨论

3.1 木豆种子萌发期耐盐性评价

本研究发现,在0.9%盐胁迫下,41份木豆种子萌发期耐盐性具有明显差异,可分为高耐盐型

表 3 盐胁迫下 41 份木豆材料各指标间相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficients of 10 physiological response indices for 41 pigeon pea varieties under salt stress

观测指标 Index	相对根系 表面积 Relative root surface area	相对根系 平均直径 Relative average root diameter	相对根 系体积 Relative root volume	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vigor index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative shoot length	相对鲜重 Relative fresh weight
相对根系平均直径 Relative average root diameter	-0.431**								
相对根系体积 Relative root volume	0.660**	-0.123							
相对发芽率 Relative germination rate	0.225	-0.015	0.205						
相对发芽指数 Relative germination index	0.020	-0.063	0.054	0.553**					
相对活力指数 Relative vigor index	0.203	-0.127	0.396*	0.407**	0.379*				
相对根长 Relative root length	0.530**	-0.319*	0.493**	0.147	-0.122	0.313*			
相对苗长 Relative shoot length	0.051	-0.168	0.015	0.046	-0.175	0.397*	0.365*		
相对鲜重 Relative fresh weight	0.231	-0.085	0.396*	0.044	-0.327*	0.730**	0.470**	0.526**	
相对根冠比 Relative root-shoot ratio	0.371*	-0.221	0.319*	-0.093	0.045	-0.096	0.479**	-0.480**	-0.071

* 和 ** 分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表 4 4 个主成分的贡献率及载荷矩阵

Table 4 Principal component analysis coefficients and cumulative contributions of the 10 physiological response indices used for 41 pigeon pea varieties under salt stress

观测指标 Index	主成分 Principal component			
	I	II	III	IV
相对根长 Relative root length	0.790	-0.155	-0.272	-0.036
相对根系体积 Relative root volume	0.738	-0.270	0.010	0.365
相对根系表面积 Relative root surface area	0.718	-0.422	-0.066	-0.109
相对鲜重 Relative fresh weight	0.704	0.512	-0.258	0.257
相对活力指数 Relative vigor index	0.700	0.415	0.392	0.142
相对苗长 Relative shoot length	0.415	0.736	-0.174	-0.322
相对根冠比 Relative root-shoot ratio	0.282	-0.811	-0.183	0.144
相对发芽指数 Relative germination index	0.070	-0.181	0.903	-0.134
相对发芽率 Relative germination rate	0.351	0.024	0.770	-0.010
相对根系平均直径 Relative average root diameter	-0.423	0.235	0.112	0.795
特征值 Special value	3.228	1.998	1.782	1.006
累积贡献率 Cumulative contribution/%	32.276	52.255	70.078	80.140

(2.44%)、耐盐型 (24.39%)、中间型 (56.10%) 和盐敏感型 (17.07%)。通常情况下, 盐胁迫可显著降低植物种子发芽率 [9-10, 12, 17]。然而, 本研究发现, 0.9% 盐胁迫对木豆种子的发芽抑制不显著, 这可能是由于

木豆种子发芽速率快, 导致盐胁迫对其影响不显著, 但是盐胁迫可显著抑制木豆幼苗的生长。这一研究结果与低盐浓度胁迫能促进草木樨 [18]、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) [19] 种子发芽相似。作物的耐

表 5 41 份木豆材料耐盐隶属函数值
Table 5 Subordinate function value analysis of 41 pigeon pea varieties under salt stress

编号 Code	隶属函数值 Subordinate function value				D 值 D value	排序 Order
	相对根长 Relative root length	相对根冠比 Relative root-shoot ratio	相对发芽指数 Relative germination index	相对根系平均直径 Relative average root diameter		
1	0.442	0.383	0.237	0.349	0.374	29
2	0.099	0.761	0.864	0.628	0.466	9
3	0.139	0.715	0.697	0.875	0.495	5
4	0.284	0.207	0.511	0.245	0.306	38
5	0.055	0.769	0.499	0.593	0.372	30
6	0.089	0.864	0.643	0.840	0.481	7
7	0.172	0.720	0.694	0.407	0.413	21
8	0.373	0.275	0.339	0.520	0.380	27
9	0.140	0.705	0.494	1.000	0.480	8
10	0.189	0.646	0.812	0.467	0.442	13
11	0.271	0.788	0.774	0.296	0.460	11
12	0.364	0.562	0.713	0.276	0.446	12
13	0.075	0.838	0.448	0.280	0.318	35
14	0.232	0.786	0.605	0.203	0.391	26
15	0.000	0.985	0.000	0.592	0.289	40
16	0.289	0.484	0.553	0.468	0.409	23
17	0.530	0.657	0.606	0.212	0.501	4
18	0.089	0.720	0.392	0.518	0.342	34
19	0.250	0.711	1.000	0.671	0.558	2
20	0.096	0.766	0.476	0.793	0.425	18
21	0.080	0.000	0.784	0.365	0.259	41
22	0.127	0.586	0.237	0.447	0.292	39
23	0.209	0.750	0.591	0.408	0.415	20
24	0.189	0.518	0.390	0.742	0.397	25
25	0.071	0.980	0.267	0.583	0.368	31
26	0.435	0.861	0.476	0.494	0.527	3
27	0.065	0.802	0.692	0.402	0.379	28
28	0.218	0.467	0.688	0.511	0.410	22
29	0.232	0.629	0.302	0.783	0.426	17
30	0.005	1.000	0.361	0.615	0.368	33
31	0.061	0.862	0.852	0.487	0.435	15
32	0.081	0.966	0.535	0.323	0.368	32
33	0.377	0.869	0.365	0.233	0.429	16
34	1.000	0.204	0.276	0.480	0.620	1
35	0.104	0.396	0.445	0.567	0.314	37
36	0.088	0.871	0.653	0.621	0.438	14
37	0.106	0.951	0.544	0.503	0.415	19
38	0.030	0.928	0.404	0.773	0.407	24
39	0.214	0.909	0.364	0.831	0.488	6
40	0.198	0.550	0.700	0.738	0.464	10
41	0.299	0.529	0.497	0.000	0.314	36
权重 Weight	0.434	0.170	0.190	0.206		

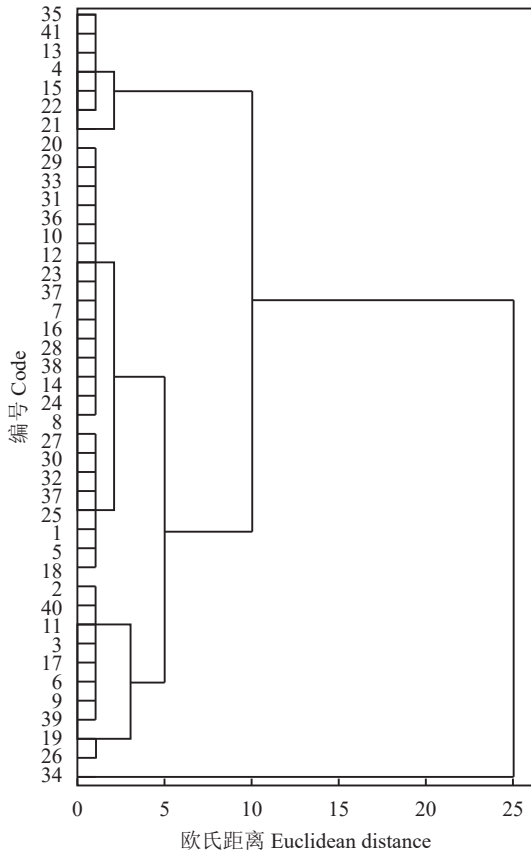


图 1 41 份木豆材料耐盐性聚类分析图

Figure 1 Cluster analysis plot of 41 pigeon pea varieties under salt stress

盐性,在不同的生长发育阶段存在差异,木豆在萌发期表现出较好的耐盐性种质,在苗期是否具有相同的特性有待进一步研究。

3.2 木豆种子萌发期耐盐性指标筛选

作物种质资源对环境的可塑性是培育品种的基

础^[20],在逆境条件下表现出稳定性和优异性的特点,是培育优良品种的关键^[21]。在作物的萌发期进行耐盐性鉴定,具有周期性短、效率性高和可操作性强的特点,是鉴定作物出苗率和成苗率的关键时期^[22]。作物材料间具有差异,一般发芽率、发芽势、根长、苗长作为作物萌发期耐盐鉴定的重要指标^[23]。

已有研究表明,发芽指数和活力指数可作为紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 种质资源萌发期耐盐性评价指标^[24]。此外,地上部鲜重、根鲜重、根干重、根长、根体积和根分枝数可作为绿豆 (*Vigna radiata*) 苗期耐盐性评价指标^[25];同时,叶面积、叶绿素荧光、根冠比和 SPAD 可作为苜蓿苗期耐盐性鉴定指标^[26]。本研究结果表明,相对根长、相对根冠比、相对发芽指数和相对根系平均直径可作为 41 份木豆材料耐盐性评价指标。通过隶属函数分析和聚类分析得到 41 份木豆材料的耐盐性排序。目前该方法已在大豆 (*Glycine max*)^[27]、水稻 (*Oryza sativa*)^[28] 等作物中应用。

本研究表明,盐胁迫对木豆种子萌发的影响主要在表观形态方面,体现在幼苗地上部与地下部的生长差异,未来可进一步对木豆苗期进行耐盐性评价,和耐盐性评价指标的筛选。

3.3 木豆幼苗耐盐性生理响应评价

抗氧化酶系统是植物体内重要的酶促防御系统,可有效清除植物在非生物胁迫下,积累过多的活性氧和维持氧化还原系统动态平衡^[29]。SOD 主要通过降低氧自由基,清除活性氧,达到缓解细胞膜系统损害^[30]。POD 和 CAT 则是降低细胞内过氧

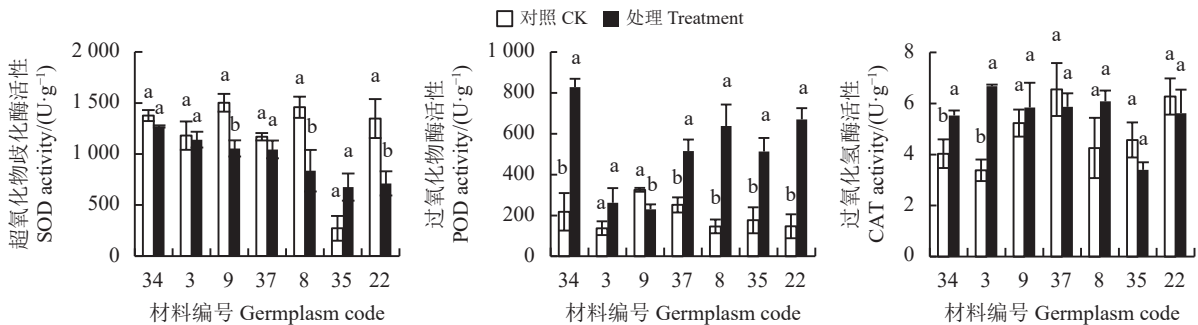


图 2 不同耐盐性木豆在盐胁迫下的超氧化物歧化、过氧化物酶和过氧化氢酶活性

Figure 2 Superoxide dismutase (SOD), peroxisome (POD), and catalase (CAT) activities of the different salt-tolerant pigeon pea varieties under salt stress

不同小写字母表示同一种质不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments within the same germplasm at the 0.05 level.

化氢的积累,从而保护细胞膜的完整性,提高逆境耐受能力^[31]。本研究结果表明,在盐胁迫处理下,随着木豆种子对盐敏感的增加,SOD活性呈下降趋势,POD活性则呈上升趋势;CAT活性与对照相比变化较小,但高耐盐型、耐盐型同盐敏感型的变化趋势有所不同,较对照呈下降趋势。总的来说,高耐盐型和耐盐型木豆幼苗在盐胁迫下生理响应中,能够及时促发体内酶促防御系统,而中间型和盐敏感型木豆更能受到盐离子的侵害。这一研究结果与盐胁迫下耐盐型谷子(*Setaria italica*)^[32]和燕

麦(*Avena sativa*)^[33]较盐敏感型种质生理耐受性更强一致。

4 结论

对 41 份木豆种质资源萌发期耐盐性评价,根据耐盐性的强弱可分为高耐盐型、耐盐型、中间型和盐敏感型 4 种不同类型。其中,相对根长、相对根冠比、相对发芽指数和相对根系平均直径可作为后期木豆种质筛选主要评价指标。本研究为木豆耐盐种质评价和耐盐育种提供理论依据。

参考文献 References:

- [1] CHINNUSAMY V, JAGENDORF A, ZHU J K. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 2005, 45(2): 437-448.
- [2] MUNNS R. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 2005, 167(3): 645-663.
- [3] 蓝芙宁, 蒋忠诚, 谢运球, 张敏. 岩溶峰丛山地几种植物营养价值及饲喂效果研究. *草业科学*, 2008, 25(11): 84-87.
LAN F N, JIANG Z C, XIE Y Q, ZHANG M. Studies on the nutrition value and feeding effect of several forage cultivars in karst mountainous region. *Pratacultural Science*, 2008, 25(11): 84-87.
- [4] 蔡佳仲, 戴湾, 张嫩玲. 木豆化学成分和药理活性研究进展. *天然产物研究与开发*, 2020, 32(3): 515-524, 506.
CAI J Z, DAI W, ZHANG N L. Advance on chemical constituents and pharmacological pigeonpea. *Natural Product Research and Development*, 2020, 32(3): 515-524, 506.
- [5] 唐军, 王文强, 黄春琼, 白昌军. 木豆育种及分子生物学研究进展. *热带农业科学*, 2013, 33(8): 36-41.
TANG J, WANG W Q, HUANG C Q, BAI C J. Advances in breeding and molecular biology research of pigeon pea. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2013, 33(8): 36-41.
- [6] 李拴林, 罗小燕, 陈志祥, 吴如月, 廖丽, 丁西朋. NaCl 胁迫对不同来源木豆种子发芽及幼苗生长的影响. *热带生物学报*, 2021, 12(3): 296-304.
LI S L, LUO X Y, CHEN Z X, WU Y Y, LIAO L, DING X P. Effect of NaCl stress on the germination and seedling growth of wood pigeon pea seeds from different sources. *Journal of Tropical Biology*, 2021, 12(3): 296-304.
- [7] GARG N, SHARMA A. Role of putrescine (Put) in imparting salt tolerance through modulation of put metabolism, mycorrhizal and rhizobial symbioses in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. *Symbiosis*, 2019, 79 (1): 59-74.
- [8] 高桂娟, 李志丹. 45 份木豆种质资源物候期及形态多样性分析. *生态科学*, 2017, 36(2): 100-106.
GAO G J, LI Z D. Study on morphological features diversity and phenological period of pigeon pea germplasm materials. *Ecological Science*, 2017, 36(2): 100-106.
- [9] 于洁, 米福贵, 李鸿雁, 蔡丽艳, 解永凤, 黄帆, 戴军. 五份扁蓿豆种质材料种子萌发期耐盐性鉴定. *中国草地学报*, 2014, 36(5): 71-75.
YU J, MI F G, LI H Y, CAI L Y, XIE Y F, HUANG F, DAI J. Evaluation of salt resistance of 5 *Medicago ruthenica* Accessions during Seed Germination. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(5): 71-75.
- [10] 王瑞, 李培英, 孙宗玖, 李聪. 水培下 42 份偃麦草种质苗期耐盐性评价. *中国草地学报*, 2020, 42(5): 22-30.
WANG R, LI P Y, SUN Z J, LI C. Evaluation of salt tolerance of 42 *Elytrigia repens* at seeding stage under hydroponic condition. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(5): 22-30.
- [11] 杨紫贻, 唐芳, 王亚文, 米福贵. 30 份苜蓿种质萌发期耐盐性评价. *草原与草业*, 2021, 33(2): 6-14.
YANG Z Y, TANG F, WANG Y W, MI F G. Evaluation of 30 alfalfa germplasms during the germination period. *Grassland and*

- Prataculture*, 2021, 33(2): 6-14.
- [12] 张志飞, 武建新, 曾宁波, 穆麟, 张鹤山, 文昭竹. 66份白三叶种质资源萌发期耐盐性综合评价. *草业科学*, 2018, 35(9): 2157-2165.
ZHANG Z F, WU J X, ZENG N B, MU L, ZHANG H S, WEN Z Z. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 66 white clover germplasm resources at the germination stage. *Pratacultural Science*, 2018, 35(9): 2157-2165.
- [13] 田小霞, 毛培春, 郑明利, 郭强, 孟林. 白花草木樨种质苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价. *中国草地学报*, 2019, 41(6): 7-14.
TIAN X X, MAO P C, ZHENG M L, GUO Q, MENG L. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant indexes of *Melilotus alba* germplasm at seeding stage. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(6): 7-14.
- [14] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: II. purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 315-318.
- [15] KOCHBA J, LAVEE S, SPIEGELROY P. Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic "hamouti" orange ovular callus lines. *Plant Cell Physiol*, 1977, 18(2): 413-417.
- [16] 张远兵, 汪建飞, 刘爱荣, 夏海东. 模拟酸雨对吊竹梅生长及抗氧化能力的影响. *草业学报*, 2014, 23(5): 338-344.
ZHANG Y B, WANG J F, LIU A R, XIA H D. Effects of simulated acid rain on the growth and antioxidant activity of *Zebrina pendula*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 338-344.
- [17] 火旭堂, 贾昊, 曹兵. NaCl处理对4种牧草植物种子萌发的影响. *草地学报*, 2019, 27(4): 1096-1101.
HUO X T, JIA H, CAO B. Effects of NaCl treatment on seed germination of 4 herbage plants. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 1096-1101.
- [18] 汪永平, 骆凯, 胡小文, 马福成, 田小飞, 张宝林, 塔拉腾, 刘晓燕, 张吉宇. PEG和NaCl胁迫对草木樨种子萌发和幼苗生长的影响. *草业科学*, 2016, 33(6): 1174-1182.
WANG Y P, LUO K, HU X W, MA F C, TIAN X F, ZHANG B L, TA L T, LIU X Y, ZHANG J Y. Effects of PEG and NaCl stress on seed germination seedling growth of *Melilotus* accession. *Pratacultural Science*, 2016, 33(6): 1174-1182.
- [19] 陈花, 王建武, 王建军, 王富刚. 外源NO对盐胁迫下沙打旺种子萌发和幼苗生长的影响. *草业科学*, 2017, 34(7): 1459-1468.
CHEN H, WANG J W, WANG J J, WANG F G. Effect of nitric oxide on seed germination and seedling growth of *Astragalus adsurgens* under NaCl stress. *Pratacultural Science*, 2017, 34(7): 1459-1468.
- [20] LAITINEN R A E, NIKOLOSKI Z. Genetic basis of plasticity in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(3): 739-745.
- [21] 卢新雄, 尹广鹏, 辛霞, 陈晓玲, 张金梅, 何娟娟. 作物种质资源库的设计与建设要求. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(4): 873-880.
LU X X, YIN G K, XIN X, CHEN X L, ZHANG J M, HE J J. Design and construction of crop germplasm genebank. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(4): 873-880.
- [22] 阎志红, 刘文革, 赵胜杰, 何楠, 王俊良. NaCl胁迫对不同西瓜种质资源发芽的影响. *植物遗传资源学报*, 2006, 7(2): 220-225.
YAN Z H, LIU W G, ZHAO S J, HE N, WANG J L. Effect of NaCl stress on germination of different watermelon varieties. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(2): 220-225.
- [23] 彭智, 李龙, 柳玉平, 刘惠民, 景蕊莲. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(4): 638-645.
PENG Z, LI L, LIU Y P, LIU H M, JING R L. Evaluation of salinity tolerance in wheat genotypes at germination and seedling stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 638-645.
- [24] 李雪, 沙栢平, 高雪芹, 王焱, 伏兵哲. 不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性鉴定与综合评价. *草地学报*, 2020, 28(2): 437-445.
LI X, SHA B P, GAO X Q, WANG Y, FU B Z. Identification and comprehensive evaluation of salt tolerance of alfalfa germplasm materials at germination stage. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 437-445.
- [25] 胡亮亮, 王素华, 王丽侠, 程须珍, 陈红霖. 绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选. *作物学报*, 2022, 48(2): 367-379.
HU L L, WANG S H, WANG L X, CHENG X Z, CHEN H L. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 367-379.
- [26] 张则宇, 李雪, 王焱, 常巍, 高雪芹, 伏兵哲. 59份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选. *草地学报*, 2020, 28(1): 112-121.
ZHANG Z Y, LI X, WANG Y, CHANG W, GAO X Q, FU B Z. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59

- alfalfa germplasm materials at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 28(1): 112-121.
- [27] 严勇亮, 张金波, 路子峰, 赵晓玲, 刘海军, 赵康, 丛花. 大豆种质资源耐盐性鉴定与评价. *新疆农业科学*, 2021, 58(1): 65-71.
YAN Y L, ZHANG J B, LU Z F, ZHAO X L, LIU H J, ZHAO K, CONG H. Salt tolerance evaluation of soybean germplasm. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(1): 65-71.
- [28] 袁杰, 王学强, 贾春平, 张燕红, 赵志强, 王奉斌, 李自超. 水稻苗期耐盐性的综合鉴定及评价. *分子植物育种*, 2020, 18(19): 6474-6482.
YUAN J, WANG X Q, JIA C P, ZHANG Y H, ZHAO Z Q, WANG F B, LI Z C. Comprehensive identification and evaluation of rice salt tolerance at seedling stage. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(19): 6474-6482.
- [29] 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展. *分子植物育种*, 2020, 18(8): 2741-2746.
QI Q, MA S R, XU W D. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(8): 2741-2746.
- [30] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [31] JIANG L, YANG H. Prometryne-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(6): 1687-1693.
- [32] 秦岭, 张艳亭, 陈二影, 杨延兵, 黎飞飞, 管延安. 谷子萌发期耐盐种质筛选及其保护酶系统对盐胁迫的响应. *中国农业科学*, 2019, 52(22): 4027-4040.
QIN L, ZHANG Y T, CHEN E Y, YANG Y B, LI F F, GUAN Y A. Screening for germplasms tolerant to salt at germination stage and response of protective enzymes to salt stress in foxtail millet. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22): 4027-4040.
- [33] 白菜. 燕麦种质耐盐性评价及其耐盐机理初探. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2020.
BAI R. Salt tolerance evaluation of oat germplasm materials and their salt tolerance mechanism. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

(责任编辑 张瑾)

2022 年第 8 期《草业科学》审稿专家

安沙舟 包爱科 曹阳春 常生华 钞振华 陈 功 陈丽娟 陈丽娟 樊小莉
范树高 付娟娟 高金龙 高 鹏 郭 强 郭旭生 郭彦军 韩云华 侯扶江
花立民 黄菊莹 贾婷婷 李惠霞 李君风 李胜利 李志华 林慧龙 刘长仲
刘志鹏 娄燕宏 马红媛 马 啸 马志良 牛克昌 彭 君 曲家鹏 尚占环
苏军虎 唐德富 王丽佳 魏彦强 武艳培 辛良杰 许庆方 薛艳林 杨培志
于应文 鱼小军 袁建立 原现军 张 程 张 攀 张志飞 章 武 朱 慧

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!