



基于主成分和隶属函数分析的大豆种质资源耐盐性综合评价

袁宇婷^{1,2}, 张晓燕², 吴谷丰², 黄璐², 袁星星², 陈新^{1,2}, 刘晓勇^{1*}, 薛晨晨^{1,2*}

(1. 江苏大学 生命科学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院 经济作物研究所, 江苏 南京 210014)

摘要:为筛选出耐盐性较强的大豆种质资源用于盐碱地开发利用, 本研究以 287 份大豆品种(系)为研究对象, 在 100 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液下进行萌发期和苗期耐盐性鉴定, 并利用主成分和隶属函数分析对大豆苗期的 7 个耐盐性相关指标(相对 SPAD 值、相对株高、相对根长、相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重和相对根干重)进行综合评价。结果表明: 萌发期依据盐害指数筛选出 1 级耐盐种质 69 份, 2 级耐盐种质 83 份。苗期利用主成分分析和隶属函数对大豆材料的耐盐性进行综合评价, 将 287 份材料分成 5 类: 高度耐盐种质 40 份, 耐盐种质 104 份, 中度耐盐种质 68 份, 盐敏感种质 72 份, 高度盐敏感种质 3 份。通过逐步回归分析法建立了大豆苗期耐盐性评价的数学模型, 筛选出相对地上部鲜重、相对根长、相对根干重以及相对 SPAD 值 4 个性状指标, 可作为大豆苗期耐盐性的评价指标, 进一步验证表明模型预测性较好($R^2 = 0.976, P < 0.001$)。通过对萌发期和苗期大豆耐盐性进行比较分析, 筛选出萌发期与苗期均为 1 级耐盐的材料 7 份: S39(铜山白荚壳)、S149(栖霞青豆)、S154(南京高香豆)、S228(徐 8107)、S262(贡豆 19)、S270(ZDD 23409)以及 S281(ZDD 3726)。

关键词:大豆; 耐盐性; 主成分分析; 隶属函数; 综合评价; 江苏省

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance of Soybean Germplasm Resources Based on Principal Component and Membership Function Analysis

YUAN Yuting^{1,2}, ZHANG Xiaoyan², WU Gufeng², HUANG Lu², YUAN Xingxing², CHEN Xin^{1,2}, LIU Xiaoyong^{1*}, XUE Chenchen^{1,2*}

(1. School of Life Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to screen out soybean germplasm resources with strong salt tolerance for saline-alkali land development and utilization, 287 soybean varieties (lines) were selected as the research objects, and salt tolerance at germination and seedling stage was identified under 100 mmol·L⁻¹ NaCl solution. Seven indices related to salt tolerance (relative SPAD value, relative plant height, relative root length, relative shoot fresh weight, relative root fresh weight, relative shoot dry weight and relative root dry weight) were evaluated by principal component and membership function analysis. The results showed that 69 accessions with salinity tolerance of grade 1 and 83 accessions with salinity tolerance of grade 2 were selected according to salinity damage index at the germination stage. In the seedling stage, principal component analysis and membership function analysis were used to comprehensively evaluate the salt tolerance of soybean materials. The 287 accessions were divided into five categories: 40 accessions with high salt tolerance, 104 accessions with salt tolerance, 68 accessions with moderate salt tolerance, 72 accessions with salt sensitive, and three accessions with high salt sensitive. A mathematical model for evaluating salt tolerance of soybean at seedling stage was established by stepwise regression analysis. Four identification indexes, relative ground fresh weight, relative root length, relative root dry weight and relative SPAD value, were selected as evaluation indexes for salt tolerance of soybean at seedling stage. The prediction of the model was further verified ($R^2 = 0.976, P < 0.001$). By comparing and analyzing the salt tolerance of soybean at germination and seedling stages, seven accessions with grade 1 salt tolerance at both seedling and germination stages were screened out, including S39 (Tongshan white pod-shell), S149 (Qixia green bean), S154 (Nanjing Gaokou bean), S228 (Xu 8107), S262 (Gongdou 19), S270 (ZDD 23409) and S281 (ZDD 3726).

Keywords: soybeans; salt tolerance; principal component analysis; membership function; comprehensive evaluation; Jiangsu province

随着全球土壤盐碱化面积的逐年增加, 盐胁迫已成为限制农作物生产的最主要因素之一^[1]。我国盐碱地分布范围较广、分布面积大, 约占总耕地

面积的 10%^[2]。江苏沿海滩涂总面积达 65.33 万 hm², 约占全国滩涂总面积的 1/4, 是亚洲最大的淤泥质沿海湿地^[3]。江苏省的盐碱地具有较好的农

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD23001); 江苏省种业振兴揭榜挂帅项目(JBGS-2021-014); 江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS[2023]025)。

第一作者: 袁宇婷, 女, 硕士研究生, 主要从事大豆耐盐性研究。E-mail: y18075079765@163.com。

通讯作者: 刘晓勇, 男, 博士, 副研究员, 主要从事昆虫分子生物学研究。E-mail: liuxiaoyong@ujs.edu.cn;

薛晨晨, 男, 博士, 副研究员, 主要从事大豆功能育种研究。E-mail: xuecc@jaas.ac.cn。

业开发价值,是重要的后备耕地资源^[4]。开展盐碱地的农业高效利用对解决耕地占补平衡问题和促进农业发展均具有重要意义。大量研究表明,土壤盐胁迫主要以离子胁迫、渗透胁迫及氧化胁迫等影响植物的生长发育,进而抑制植物生长,最终降低产量甚至导致死亡^[5,6]。因此,作物耐盐种质的挖掘和选育对因地制宜地利用盐碱地至关重要。

大豆是我国重要的粮、油、饲兼用作物,在国民经济发展和保障国家粮食安全中具有重要的战略作用。近年来,我国大豆进口量极大,对外依存度高^[7],因此发展国产大豆生产和保障大豆自给能力刻不容缓。利用盐碱地扩种大豆是提高我国大豆自给率的重要途径之一。然而,大豆属于中度耐盐植物,土壤盐胁迫严重影响大豆的萌发和生长发育^[8]。鉴于此,挖掘耐盐大豆种质资源可为当前盐碱地扩种大豆提供优良材料,也可为耐盐碱大豆新品种的选育提供材料和基因资源。

目前,国内外学者已对水稻^[9]、小麦^[10]、棉花^[11]、苜蓿^[12]、油菜^[13-15]、花生^[16]、玉米^[17]、高粱^[18]等作物开展了种质资源耐盐性的鉴定研究。近年来,在大豆耐盐种质资源筛选方面也取得了一定的进展,利用多元统计分析等方法对大豆耐盐性进行分级是鉴定耐盐种质的重要方法。如张兆宁等^[19]对 62 份大豆进行了萌发期耐盐性鉴定,在 75 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下鉴定出龙垦 310 等耐盐品种 7 份,在 150 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下鉴定出黑科 57 为耐盐品种。周秀文等^[20]对 107 份大豆的萌发期耐盐性进行了鉴定,筛选出 MC30 和沈农豆 20 等萌发期高度耐盐种质 14 个。林峰等^[21]对 372 份大豆苗期的耐盐性进行了鉴定,根据目测分级进行耐盐等级鉴定,筛选出铁丰 8 号等高耐种质资源 14 份。类似地,严勇亮等^[22]对 120 份大豆的苗期耐盐性进行鉴定,筛选出高耐种质 1 份,为日本品质 S11-5。Do 等^[23]对 255 份栽培大豆和 50 份野生大豆进行耐盐性鉴定,通过聚类分析筛选出 137 份耐盐大豆种质。然而,前人的研究存在一定的不足,对大豆耐盐性进行综合评价和分级的方法较多,所选择的单一或部分指标只能一定程度上反映大豆的耐盐性。此外,前人研究所建立的耐盐性评价指标的可靠性未进行进一步验证和推广。研究表明大豆萌发期和苗期等不同生育阶段的耐盐性没有明显相关性^[24],而在实际生产中,萌发期和苗期的耐盐性直接决定了在盐胁迫条件下能否全苗和壮苗^[25]。因此,需要开展大豆萌发期和苗期两个阶段的耐盐性鉴定评价,并建立一套全面精简的大豆苗期耐盐性鉴定评价方法。

本研究对收集的 287 份大豆种质资源萌发期和苗期的耐盐性进行了鉴定,测定萌发期的发芽率并计算盐害指数,以此对萌发期的耐盐性进行分级和

鉴定;测定苗期的相对 SPAD 值、株高、根长、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重和根干重等指标,利用主成分和隶属函数分析对大豆苗期的耐盐性进行综合评价,以期筛选出苗期耐盐的大豆种质,研究结果可为适宜江苏省盐碱地大豆生产和品种改良提供材料基础。此外,本研究拟建立大豆种质资源苗期耐盐性的鉴定评价模型,为后续耐盐大豆种质资源的发掘提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以在中国不同地区收集的 287 份大豆品种(系)为试验材料,均由江苏省农业科学院经济作物研究所保存(附表 1)。

1.2 试验设计

1.2.1 适宜盐胁迫浓度筛选 在供试材料中随机选取 80 份大豆材料进行萌发期与苗期盐处理浓度的筛选。设置 4 种浓度梯度的 NaCl 溶液,分别是 50,100,150 和 200 mmol·L⁻¹,以不加 NaCl 的作为对照。每个品种每个浓度均设置 3 次重复。分别在萌发期和苗期测定统计发芽情况和生长情况,以确定后续试验的盐处理浓度。

1.2.2 萌发期耐盐性鉴定 参照那桂秋等^[26]和杜雨芊等^[27]的方法,选取籽粒饱满、大小一致、种皮完整的种子,用 1% (v/v) 次氯酸钠消毒 15 min,用自来水冲洗 3 次,超纯水冲洗 3 次后,置于 25 ℃ 下于黑暗中浸种 8 h,之后放入垫有两层滤纸的直径为 12 cm 的培养皿中,对照组与处理组分别添加去离子水和 100 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液各 10 mL,置于 25 ℃ 下于黑暗中催芽。每皿放置 30 粒大豆种子,每个品种对照与盐处理各 3 皿,作为 3 个重复,处理液每 1 d 更换 1 次。发芽 7 d,统计发芽种子数,发芽标准为胚根伸出种脐部分长度超过种子纵径 1/2,要求胚根发育正常,胚根弯曲并呈螺旋状盘绕者不予统计,计算发芽率,发芽率 = 第 7 天发芽种子数/种子总数 × 100%。最后计算得到萌发期相对盐害指数 = (对照发芽率 - 处理发芽率)/对照发芽率 × 100%,并参照表 1 确定各种质萌发期耐盐性等级。

表 1 大豆萌发期耐盐性分级标准
Table 1 Classification criteria for salt tolerance of soybean during germination

级别	盐害指数	耐盐性
Level	Salt injury index/%	Salt tolerance type
1	0 ~ 20.0	高度耐盐
2	20.1 ~ 40.0	耐盐
3	40.1 ~ 60.0	中度耐盐
4	60.1 ~ 80.0	敏感
5	80.1 ~ 100	高度敏感

1.2.3 苗期耐盐性鉴定 试验在江苏省农业科学院经济作物研究所人工气候室中进行,试验方案参照周秀文等^[20]和刘光宇等^[28]的方法并稍作修改,选取籽粒饱满、大小一致、种皮完整的种子,用 1% (v/v) 次氯酸钠消毒 15 min 后播种于无菌蛭石中进行避光催芽,待真叶完全展开后选取长势一致的大豆材料转移到水中适应 2 d,再转入 1/2 Hoagland 营养液中适应 2 d,而后处理组转移至含有 100 mmol·L⁻¹ NaCl 的营养液中进行处理,对照组继续用营养液培养。每个处理设 6 个重复。每 2 d 更换水 1 次,光周期 13 h/11 h (光照/黑暗),光强 600 μmol·m⁻²·s⁻¹,温度 25 ℃ (昼)/18 ℃ (夜)。苗期进行盐胁迫处理 20 d 后,用 SPAD-502 型叶绿素测定仪测定大豆植株叶片的相对 SPAD 值,并测量株高、地上部鲜重、根鲜重,将样品置于 80 ℃ 烘箱中烘干后测定地上部干重和根干重。株高用直尺测量,干重和鲜重用千分之一天平测量。计算各指标的相对值 = 盐处理测定值/对照测定值。并采用模糊隶属函数法对大豆苗期耐盐性进行综合评价与排序。

采用模糊数学隶属函数法对大豆耐盐能力进行综合评价,计算隶属函数值, $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。式中, $\mu(X_j)$ 表示第 j 个综合指标的隶属函数值, X_j 表示第 j 个综合指标值, X_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值, X_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小值。

$W_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中权重, P_j 为材料的第 j 个综合指标的贡献率, $\sum_{j=1}^m P_j$ 为材料主成分的累计贡献率。

$D = \sum_{j=1}^m [\mu(X_j) \times W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。式中, D 表示各材料耐盐能力的综合评价值。

1.3 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理与整理;采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析、相关性分析、隶属函数分析和聚类分析;采用 Origin 2021 作图。

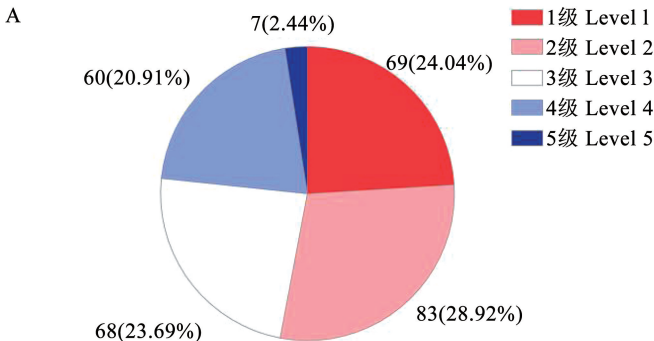
2 结果与分析

2.1 适宜盐胁迫浓度筛选

结果显示,在 50 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下,大豆萌发率较高且苗期生长情况较好,胁迫作用不显著。在 150 和 200 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下,大部分大豆材料不发芽或萌发受到明显抑制,并且部分种质在苗期盐处理下第 5 天就出现枯萎表型。以上结果表明低浓度 (50 mmol·L⁻¹) 和高浓度 (150 和 200 mmol·L⁻¹) 盐处理均不适合用作此试验大豆耐盐性鉴定的筛选浓度。在 100 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下,不同大豆材料在萌发期和苗期受盐胁迫影响的差异较为显著且有明显的分级现象,因此选择 100 mmol·L⁻¹ 盐浓度作为后续试验的盐处理浓度。

2.2 大豆萌发期耐盐性鉴定

在 100 mmol·L⁻¹ 盐浓度处理下,根据盐害指数鉴定出萌发期 1 级高耐盐种质 69 份,占比 24.04%; 2 级耐盐种质 83 份,占比 28.92%; 3 级中度耐盐种质 68 份,占比 23.69%; 4 级盐敏感种质 60 份,占比 20.91%; 5 级高度盐敏感种质 7 份,占比 2.44% (图 1,附表 2)。通过盐害指数分析,萌发期耐盐性最强的前 10 个大豆品种依次为: S38 (沛县大白皮)、S170 (口岸破皮豆)、S32 (丰县大西河糙甲)、S179 (六合豆腐豆 2)、S277 (ZDD 4428)、S70 (东海石榴白花糙)、S43 (铜山大粒平顶黄)、S86 (如皋红花冬冬青 (1))、S103 (宜兴青黄豆) 和 S19 (如皋早日红)。萌发期耐盐性最弱的 10 个大豆品种依次为: S221 [73 (1,3)]、S45 (铜山牛毛黄)、S76 (盐城三仓子)、S172 (泰兴多枝王)、S204 (南京满仓金)、S272 (ZDD 4533)、S116 (启东紫豆)、S246 (M3A00102412)、S95 (宿迁土耳其墩) 和 S203 (南京仓波豆)。





注:A. 大豆萌发期耐盐等级比例图;B. 萌发期表型图(左)耐盐大豆材料 S106;(右)盐敏感大豆材料 S76 (bar = 2 cm)。

Note: A. Salt tolerance grade ratio map of soybean during germination; B. Germination phenotype (left) salt tolerance accession S106, (right) salt sensitivity accession S76 (bar = 2 cm).

图1 287 份大豆萌发期耐盐等级图

Fig. 1 Salt tolerance grade of 287 soybeans during germination

2.2 大豆苗期耐盐性鉴定

2.2.1 苗期各指标变异系数分析 对苗期的相对 SPAD 值、相对株高、相对根长、相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重及相对根干重 7 个可反映盐胁迫下大豆生长情况的指标进行分析,结果表明,287 份大豆种质资源的遗传变异十分丰富,相对 SPAD 值变化范围为 0.065 ~ 1.485、相对株高变化范围为 0.107 ~ 0.933、相对根长变化范围为 0.485 ~ 1.052、相对地上部鲜重变化范围为

0.059 ~ 0.981、相对根鲜重变化范围为 0.120 ~ 1.343、相对地上部干重变化范围为 0.057 ~ 1.134、相对根干重变化范围为 0.010 ~ 1.186。各指标的变异系数均较大,相对 SPAD 值、相对株高、相对根长、相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重、相对根干重的变异系数分别为 31.2%、26.5%、14.1%、51.9%、35.6%、42.8% 和 36.6%,其中相对地上部鲜重的变异系数最大,变异系数高达 51.9% (表 2)。

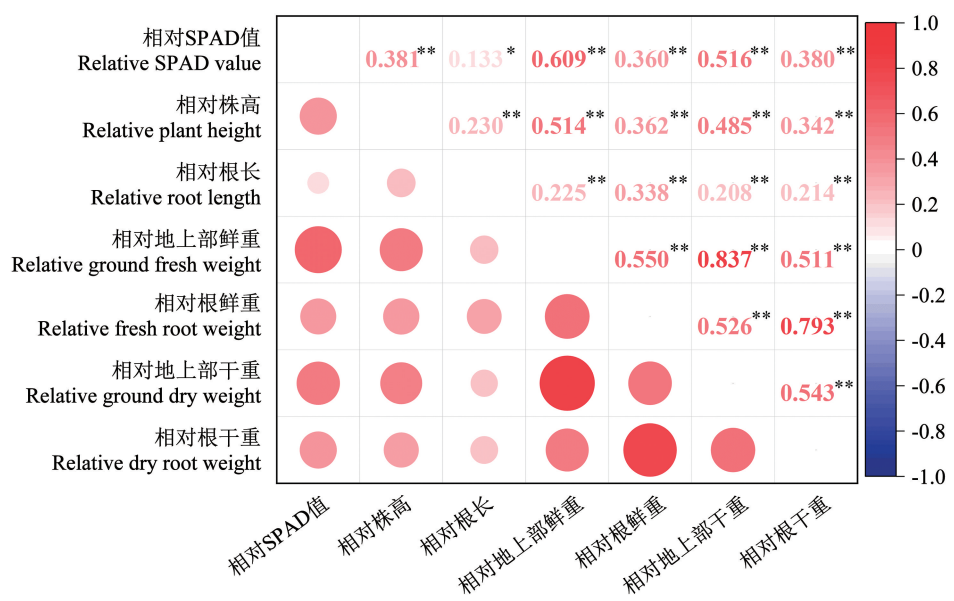
表 2 盐胁迫下大豆苗期各性状指标的变异分析

Table 2 Variation analysis of soybean seedling traits under salt stress

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient/%
相对 SPAD 值 Relative SPAD value	1.485	0.065	0.723	0.226	31.2
相对株高 Relative plant height	0.933	0.107	0.462	0.122	26.5
相对根长 Relative root length	1.052	0.485	0.765	0.108	14.1
相对地上部鲜重 Relative ground fresh weight	0.981	0.059	0.310	0.161	51.9
相对根鲜重 Relative fresh root weight	1.343	0.120	0.566	0.201	35.6
相对地上部干重 Relative ground dry weight	1.134	0.057	0.434	0.186	42.8
相对根干重 Relative dry root weight	1.186	0.010	0.601	0.220	36.6

2.2.2 苗期各指标相关性分析 对各指标的相对值进行相关性分析发现,各指标间均呈正相关,其中相对 SPAD 值与相对根长呈显著正相关,与其他指标均呈极显著正相关。相对株高与相对根长、相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重和相

对根干重均呈极显著正相关。相对根长与相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重和相对根干重呈极显著正相关。类似地,相对地上部鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重和相对根干重与其他指标呈极显著正相关(图 2)。



注：* 和 ** 分别表示在 $P\leq0.05$ 和 $P\leq0.01$ 水平上差异显著。
Note: * and ** indicated significant differences at $P\leq0.05$ and $P\leq0.01$ levels, respectively.

图2 盐胁迫下大豆苗期各性状指标的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of soybean seedling traits under salt stress

2.2.3 主成分分析 对各性状指标进行主成分分析结果表明,前4个主成分的贡献率分别为53.112%、14.174%、11.986%和8.670%,累计贡献率达到87.942%。根据主成分累计贡献率大于80%的原则提取前4个主成分以代表原来测定的7个指标的信息。前4个主成分的特征值分别为3.718,0.992,0.839和0.607。其中,第一主成分贡献率最大,代表了大豆耐盐特性原始信息的53.112%,对应的特征向量较大的有相对地上鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重和相对根干重,主要由大豆幼苗“生物量”因子决定;在第二主成分中,对应的特征向量较大的是相对根长和相对根鲜重,主要与大豆幼苗“根系生长”因子有关;在第三主成分中,对应的特征向量较大的是相对根长和相对株高,主要与大豆幼苗“植株大小”因子有关;在第四主成分中,对应的特征向量较大的是相对SPAD值,主要与大豆幼苗“光合作用”因子有关(表3)。

表3 盐胁迫下大豆苗期各性状指标主成分分析

Table 3 Principal component analysis of soybean seedling traits under salt stress

项目 Item	第一主成分 CI_1	第二主成分 CI_2	第三主成分 CI_3	第四主成分 CI_4
相对 SPAD 值 Relative SPAD value	0.678	-0.388	0.117	0.416
相对株高 Relative plant height	0.646	-0.148	0.402	-0.601
相对根长 Relative root length	0.384	0.701	0.556	0.221
相对地上鲜重 Relative ground fresh weight	0.871	-0.257	0.081	0.106
相对根鲜重 Relative fresh root weight	0.789	0.376	-0.351	-0.058
相对地上部干重 Relative ground dry weight	0.848	-0.222	0.023	0.046
相对根干重 Relative dry root weight	0.770	0.268	-0.473	-0.084
特征值 Characteristic value	3.718	0.992	0.839	0.607
贡献率 Contribution/%	53.112	14.174	11.986	8.670
累计贡献率 Cumulative contribution/%	53.112	67.286	79.272	87.942

2.2.4 隶属函数综合分析 通过隶属函数分析,根据综合评价值 D 值对 287 份大豆种质耐盐性进行排名(附表 2)。苗期耐盐性较强的前 10 的品种(系)分别为:S39(铜山白荚壳)、S249(山宁 14)、S262(贡豆 19)、S221[73(1,3)]、S229(启东细十月)、S228(徐 8107)、S113(丹徒黄豆)、S135(南通矮脚黄)、S138(ND-5)和 S108(铜山西皮)。耐盐性较弱的品种为:S237(崇明大豆)、S24(南通黄油果

子)、S212(句容竹镇豆)、S207(镇江斜角豆)、S58(邳县狼子尾)、S25(兴化皂荚果子)、S65(新沂小白皮)、S75(射阳豌豆黄甲)、S272(ZDD 4533)和 S51(铜山大尖顶黄)。

2.2.5 综合评价 利用组间联接法对 287 份大豆的 *D* 值进行聚类分析,于平方欧氏距离为 4 处将其

分为 5 类:在 100 mmol·L⁻¹ 盐处理下,40 份为高耐种质,*D* 值分布在 0.750 ~0.610 之间;104 份为耐盐种质,*D* 值分布在 0.600 ~0.456 之间;68 份为中度耐盐种质,*D* 值分布在 0.455 ~0.364 之间;72 份为盐敏感种质,*D* 值分布于 0.360 ~0.231 之间;3 份高盐敏感种质,*D* 值分布于 0.231 ~0.190 之间(图 3)。

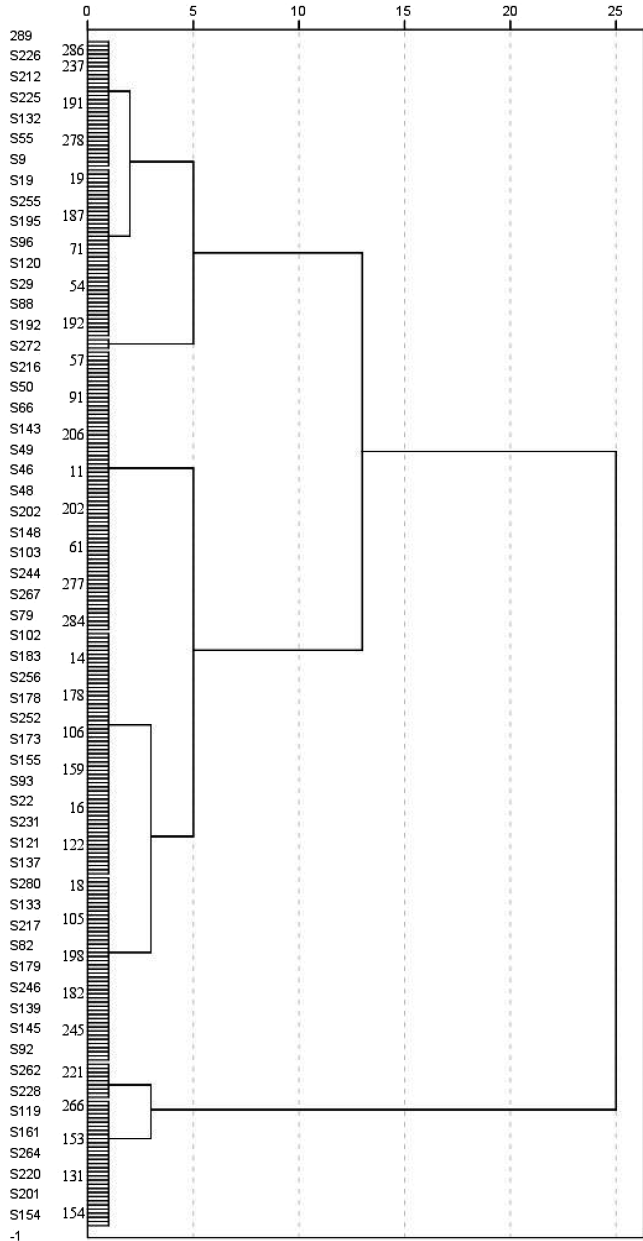


图 3 287 份大豆种质资源苗期耐盐性聚类分析结果

Fig. 3 Results of cluster analysis on salt tolerance of 287 soybean germplasms at seedling stage

2.2.6 回归分析及大豆苗期耐盐指标的选择 由于用于测定大豆苗期耐盐性的指标较多,为筛选出可靠、简便的用于鉴定苗期耐盐性的指标并建立评价大豆苗期耐盐性的数学模型,以隶属函数综合评价 *D* 值作为因变量,以测定的各项指标的相对值作为自变量,用随机选取的 257 份材料的各项指标建

立模型,余下 30 份材料用于验证模型的可靠性。用逐步回归法建立了最优方程: $Y = 0.322X_1 + 0.564X_2 + 0.171X_3 + 0.108X_4 - 0.258$ ($R^2 = 0.968, P < 0.001$),其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表了相对地上部鲜重、相对根长、相对根干重、相对叶绿素。由方程可知,相对地上部鲜重、相对根长、相对

根干重、相对叶绿素这4个指标对大豆苗期耐盐性具有显著影响,原本的7个指标可以简化为这4个指标进行计算,用于评估大豆幼苗期的耐盐性。通过对30份材料进行预测分析,模型的 $R^2=0.976$, $P<0.001$,标准误差为0.0085,预测性能优异(图4)。

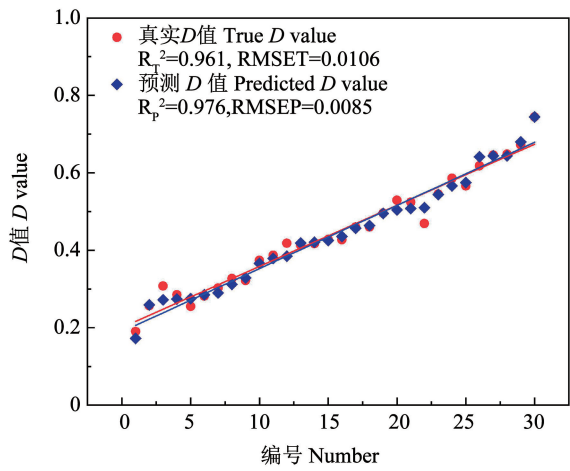
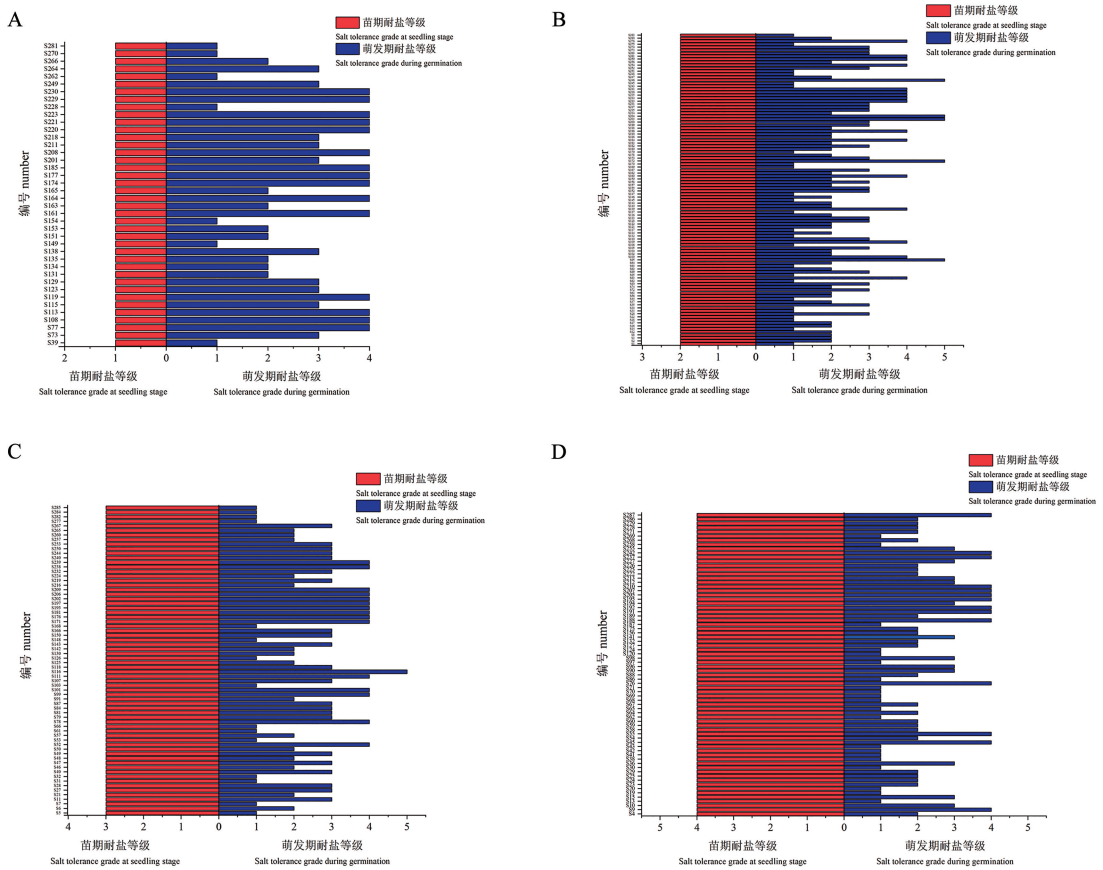


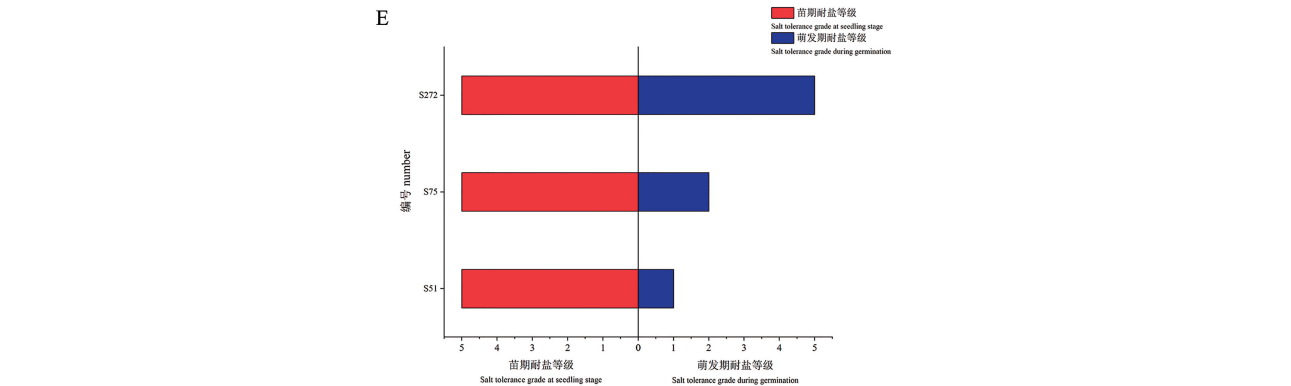
图4 D值的真实值与模型预测值的比较

Fig.4 The comparison between the true value and the predicted value of D

2.2.2.7 大豆萌发期与苗期耐盐性的比较 通过对萌发期和苗期耐盐品种的比较,发现萌发期与苗期

的相关性并不大,萌发期耐盐并不代表苗期耐盐,苗期耐盐也不能代表萌发期一定耐盐。在苗期为1级高度耐盐种质中,有7个萌发期1级高耐种质,8个萌发期2级耐盐种质,10个萌发期3级中度耐盐种质以及15个萌发期4级盐敏感种质。其中苗期与萌发期均为1级耐盐的品种为:S39(铜山白菜壳)、S149(栖霞青豆)、S154(南京高香豆)、S228(徐8107)、S262(贡豆19)、S270(ZDD 23409)和S281(ZDD 3726)。在苗期为2级耐盐种质中,有24个萌发期1级高耐种质,34个萌发期2级耐盐种质,24个萌发期3级中度耐盐种质,16个萌发期4级盐敏感种质以及5个萌发期5级高度盐敏感种质。在苗期为3级中度耐盐种质中,有14个萌发期1级高耐种质,15个萌发期2级耐盐种质,22个萌发期3级中度耐盐种质、15个萌发期4级盐敏感种质以及1个萌发期5级高度盐敏感种质。在苗期为4级盐敏感种质中,有21个萌发期1级高耐种质,24个萌发期2级耐盐种质,12个萌发期3级中度耐盐种质以及14个萌发期4级盐敏感种质。在苗期为5级高度盐敏感种质中,有1个萌发期1级高耐种质,1个萌发期2级耐盐种质,1个萌发期5级高度盐敏感种质(图5)。





注:A. 苗期 1 级种质与萌发期比较;B. 苗期 2 级种质与萌发期比较;C. 苗期 3 级种质与萌发期比较;D. 苗期 4 级种质与萌发期比较;E. 苗期 5 级种质与萌发期比较。

Note: A. Comparison of grade 1 germplasm at seedling stage and germination stage; B. Comparison of germplasm at seedling stage 2 and germination stage; C. Comparison of germplasm of grade 3 seedling stage and germination stage; D. Comparison of germplasm of grade 4 seedling stage and germination stage; E. Comparison of germplasm at seedling stage 5 and germination stage.

图 5 苗期耐盐等级与萌发期耐盐等级比较

Fig. 5 Comparison between tolerance grade at seedling stage and germination stage

3 讨论

土壤盐碱化严重制约着农业的发展。大豆为中度耐盐作物,但大部分品种在 3‰ 的盐碱土中就难以生存,因此筛选耐盐大豆品种对耐盐大豆新品种的培育和盐碱地扩种大豆具有重要意义。江苏沿海滩涂的盐以氯化钠为主,本研究用氯化钠模拟盐胁迫,进行大豆萌发期和苗期耐盐性鉴定,以期筛选出耐盐种质,为大豆耐盐性的改良提供材料基础。

耐盐种质资源的筛选需要简单可靠而高效的筛选技术。前人大量研究表明,对于萌发期耐盐种质的筛选方法较为一致,普遍采用培养皿法进行^[29,30],但也有人提出培养皿法盐溶液浓度影响显著且工作量较大,王珊珊等^[31]提出了苗床水培萌发法用于油菜萌发的耐盐性鉴定,但该方法存在与盐溶液接触不均的弊端。在借鉴前期研究的基础上,本研究采用培养皿法筛选萌发期耐盐大豆种质,筛选出 1 级耐盐种质 69 份,2 级耐盐种质 83 份。

目前在苗期耐盐进行鉴定的方法较多,主要有土培法、水培法以及田间试验三大类。其中土培法是在幼苗一定时期浇灌盐水以模拟盐环境,如李雪等^[32]利用盆栽浇灌不同处理液的方法,筛选出了日引黄秋葵、JK9 和 JK13 3 个耐盐碱秋葵品种,土培法操作相对简单,但存在土壤或蛭石吸附盐分、导致鉴定结果不准确的缺陷。水培法操作较为复杂,涉及蛭石出苗、移栽及换水等操作,但是可以控制盐环境的一致性,如刘青松等^[33]利用水培法,以在 150 mmol·L⁻¹ 盐浓度下生长 15 d 后苜蓿成活率超

过 60% 为筛选鉴定标准,成活率超过 60% 的认定为苗期耐盐苜蓿品种,筛选出 9 个耐盐性苜蓿品种。大田试验能够更贴近生产的要求,如林海波^[34]利用 pH8.6 的盐碱地进行大豆的耐盐性筛选,并对 50 份不同种质形态性状和产量进行测定,发现盐碱地下各指标较对照均减少,并且产量下降,最终筛选出 4 个相对耐盐碱的品种。但盐碱地筛选并不能保证实验条件的一致,大田各点的土壤盐碱含量不同,可能会有较大误差。目前大豆苗期的耐盐性筛选工作大多在温室恒定条件下进行,这种方法快速、简单且受环境影响小。综合考虑,本研究采用 100 mmol·L⁻¹ 盐浓度的水培法对大豆苗期耐盐性进行了鉴定,并筛选出苗期 1 级高耐盐种质 40 份,2 级耐盐种质 104 份,3 级中度耐盐种质 68 份,4 级盐敏感种质 72 份,5 级高敏感种质 3 份。

研究者们大都通过测定不同指标来进行耐盐性鉴定,萌发期中,大多研究者通过测定发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数以及胚根长,计算盐害指数等来判定萌发期耐盐性^[35-37]。本研究主要用萌发期盐害指数来评价大豆萌发期的耐盐性,与李娜娜等^[38]的评价方式相同。苗期中,研究者们通常通过目测进行耐盐等级的评定,如孔令功^[39]用目测法判断耐盐等级,筛选出青皮平顶香、文丰 1 号、鲁豆 10 号、冀豆 19、晋豆 29、齐茶豆 2 号、邯豆 3 号、水里站、美国 Lee 品种和 Osage 品种为耐盐级别为 1 级的高耐品种。或是测定株高、根长、地上部及根部干鲜重、叶绿素含量、离子含量、酶活性等指标进行隶属函数分析用于筛选耐盐种质^[40-42]。本研究测定相对 SPAD 值、相对株高、相对根长、相对地上部

鲜重、相对根鲜重、相对地上部干重以及相对根干重用于评价大豆的耐盐性,与刘谢香等^[24]和石广成等^[43]在大豆耐盐性评价测定的指标相似。本研究发现,绝大部分大豆种质资源苗期的各项耐盐评价指标均受到抑制(耐盐评价指标相对值小于1),但小部分大豆材料的某一项耐盐评价指标受到一定程度的促进(耐盐评价指标相对值大于1)。如S151和S230的相对根长略高于1,分别为1.000和1.052,而其他耐盐评价指标的相对值均小于1;S39和S161的地上部干重高于对照,相对值分别为1.134和1.009,而其他耐盐评价指标的相对值均小于1。以上结果表明盐胁迫下不同大豆品种在同一个耐盐评价指标上存在差异,这可能与不同大豆品种的耐盐机制不同有关。此外,大豆耐盐是多因素共同作用的结果,利用某个单项耐盐评价指标对大豆的耐盐性进行评价不尽合理,因此需要利用测得的指标建立一种客观、科学和全面的大豆耐盐性综合评价体系。

目前针对大豆苗期耐盐性评价的指标众多,但是少有人对其进行建模,筛选出能够快速有效评价苗期耐盐性的指标,在其他作物耐盐性评价中已常见模型建立用于预测,如田小霞等^[44]以耐盐性综合评价值(D)作为因变量,以幼苗存活率、幼苗生长速率、叶片叶绿素含量、苗高、叶片相对电导率、单株干质量和单株绿叶数7个指标的耐盐系数作自变量进行逐步回归分析,获得的回归方程表明叶片叶绿素含量、单株绿叶数、苗高和叶片相对电导率4个指标对132份样本的耐盐性有显著影响。本研究通过以257份大豆综合评价 D 值为因变量,以各项指标相对值作为自变量,用逐步回归法建立了最优方程 $Y=0.322X_1+0.564X_2+0.171X_3+0.108X_4-0.258$ ($R^2=0.968, P<0.001$),简化为相对地上部鲜重、相对根长、相对根干重和相对叶绿素这4个指标用于对大豆耐盐性的预测,且预测性能优异($R^2=0.976, P<0.001$)。

生产上大豆萌发期和苗期的耐盐性直接关乎出苗和壮苗,因此在大豆生长发育早期进行耐盐性鉴定能较好地评价大豆的耐盐水平。本研究通过在 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐处理下对大豆萌发期和苗期进行耐盐性鉴定,发现287份大豆种质在萌发期与苗期的耐盐性不完全一致。有些品种在萌发期表现较强的耐盐性但在苗期表现得较敏感,如S51、S13、S19等;也不乏品种在萌发期盐敏感但在苗期表现出较强的耐盐性,如S77、S108和S113等。以上结果表明大豆在不同生育阶段的耐盐性可能没有一定的相关性,前人的研究中也得到了类似的结果,比如,周秀文等^[20]对107份大豆萌发期与苗期的耐

盐性鉴定中也发现萌发期与苗期的耐盐种质不完全一致。韩毅强等^[25]将萌发期筛选出的296份高耐和耐盐碱种质进行芽苗期耐盐性筛选,结果表明芽苗期高耐大豆资源有123份、耐91份、中耐10份、敏感2份和极敏感70份。在大豆萌发期,耐盐品种可以较好地降低细胞内盐浓度、维持细胞内外离子平衡和渗透平衡,从而减少盐胁迫对细胞的毒害和种子萌发的抑制作用。在大豆苗期,盐胁迫不仅会造成离子毒害、活性氧损伤,还会产生渗透胁迫和营养缺乏等不利影响,并会抑制同化产物的积累。因此同一份大豆材料在萌发期和苗期的耐盐性差异可能与不同生长发育阶段的耐盐机制不同有关。仅根据某一个生长发育阶段的耐盐性筛选耐盐大豆种质可能导致筛选结果的偏差。因此,本研究综合分析了大豆萌发期与苗期的耐盐性,筛选出S39(铜山白荚壳)、S149(栖霞青豆)、S154(南京高香豆)、S228(徐8107)、S262(贡豆19)、S270(ZDD 23409)、S281(ZDD 3726)等7份在萌发期与苗期的耐盐等级均为1级的材料。大豆萌发期与苗期的耐盐性与体内离子吸收转运、渗透调节机制和活性氧调节机制等密切相关,以上优质耐盐品种的耐盐机制目前尚不明确,需要进一步深入研究,以为大豆耐盐相关候选基因的挖掘和耐盐大豆新品种的选育提供优异材料。此外,目前耐盐性鉴定的研究方法存在费时费力、周期长、有损、精度低等问题,后续研究可通过与表型组学联合分析,开发大豆耐盐表型的高通量精准鉴定技术,来简单有效地鉴定大豆的耐盐性。目前对于大豆的筛选工作大量进行中,但是大豆品种的耐盐性评价最终要应用于生产实际,因此后期有必要在田间进行大豆全生育期的耐盐性鉴定。

4 结论

通过对287份大豆萌发期和苗期的耐盐性筛选,根据盐害指数筛选出萌发期1级高耐盐种质69份,2级耐盐种质83份,3级中度耐盐种质68份,4级盐敏感种质60份,5级高敏感种质7份;采用隶属函数综合分析,根据聚类分析结果,筛选出苗期1级高耐盐种质40份,2级耐盐种质104份,3级中度耐盐种质68份,4级盐敏感种质72份,5级高敏感种质3份。综合比较萌发期和苗期的耐盐性,发现S39(铜山白荚壳)、S149(栖霞青豆)、S154(南京高香豆)、S228(徐8107)、S262(贡豆19)、S270(ZDD 23409)和S281(ZDD 3726)这7个品种在萌发期和苗期都为高耐盐品种。通过逐步回归法建立了大豆苗期耐盐性评价的最优方程,且相对地上部鲜重、相对根长、相对根干重、相对叶绿素这4个

指标可以用于评估大豆苗期的耐盐性。本研究筛选出的大豆耐盐资源和建立的综合评价方法可为耐盐大豆的选育研究提供材料基础和方法依据。

参考文献

[1] ZHANG M X, BAI R, NAN M, et al. Evaluation of salt tolerance of oat cultivars and the mechanism of adaptation to salinity[J]. Journal of Plant Physiology, 2022, 273: 153708.

[2] 范王涛. 土壤盐碱化危害及改良方法研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(23): 114-116.

FAN W T. Study on the harm of soil salinization and its improvement methods[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40 (23): 114-116.

[3] 赵宝泉, 王茂文, 丁海荣, 等. 江苏沿海滩涂盐生药用植物资源研究[J]. 中国野生植物资源, 2015, 34(6): 44-50.

ZHAO B Q, WANG M W, DING H R, et al. Study on resources of medical halophytes in coastal area of Jiangsu Province[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2015, 34(6): 44-50.

[4] 王鹏, 徐国华. 江苏省沿海滩涂生态环境面临的主要问题与对策[J]. 水利规划与设计, 2009(4): 15-20.

WANG P, XU G H. Major problems encountered in ecological beach reclamation of coastal areas in Jiangsu Province and solutions to them[J]. Water Resources Planning and Design, 2009(4): 15-20.

[5] PHANG T H, SHAO G, LAM H M. Salt tolerance in soybean [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50 (10): 1196-1212.

[6] ZHAO S, ZHANG Q, LIU M, et al. Regulation of plant responses to salt stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(9): 4609.

[7] 杨京. 2017 年中国大豆及豆油市场分析[N]. 粮油市场报, 2018-02-24(B02).

YANG J. China soybean and soybean oil market analysis in 2017 [N]. Grain and Oil Market Report, 2018-02-24(B02).

[8] WANG Y, YANG Y, ZHAO D, et al. Ensifer sp. GMS14 enhances soybean salt tolerance for potential application in saline soil reclamation[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119488.

[9] 陶维旭, 程生海, 冀俊超, 等. 水稻品种资源耐盐性综合评价及耐盐指标筛选[J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (18): 180-187.

TAO W X, CHENG S H, JI J C, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of rice variety resources and screening of salt tolerance indexes[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50 (18): 180-187.

[10] 王萌, 鲁雪莉, 王菊英, 等. 小黑麦种质萌发期苗期耐盐资源评价与筛选[J]. 草业学报, 2024, 33(5): 58-68.

WANG M, LU X L, WANG J Y, et al. Evaluation and screening of the salt tolerance of triticale germplasm at the germination and seedling stages[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33 (5): 58-68.

[11] 宋冰梅, 姜岩, 陈鑫, 等. 新型转基因高产棉花萌发期和苗期耐盐性与耐碱性评价[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(9): 2239-2247.

SONG B M, JIANG Y, CHEN X, et al. Evaluation of saline/alkali tolerance of new transgenic high-yield cotton at germination and seedling stages[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60 (9): 2239-2247.

[12] 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 Y 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.

[13] 薛天源, 鲁金春子, 何思晓, 等. 286 份甘蓝型油菜种质苗期耐盐碱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25 (3): 356-372.

XUE T Y, LU J C Z, HE S X, et al. Comprehensive evaluation of 286 accessions of *Brassica napus* germplasm at seedling stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 356-372.

[14] WU H, GUO J, WANG C, 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, 10: 530.

[15] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 等. 146 份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价[J]. 西北农业学报, 2021, 30(6): 848-859.

LI P, YAN J Q, ZHANG H, et al. Screening and evaluation of salt tolerance for 146 *Brassica napus* germplasms at germination stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30 (6): 848-859.

[16] 李晓婷, 胡畅丽, 李鑫, 等. 花生萌发期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选[J]. 花生学报, 2022, 51(4): 35-43.

LI X T, HU C L, LI X, et al. Identification and screening of salt-tolerance peanut cultivars during germination stage[J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51(4): 35-43.

[17] 吕庆雪, 李穆, 孙蕾, 等. 高产优质耐盐碱玉米新品种富民 105 的选育及苗期盐碱胁迫浓度筛选[J]. 黑龙江农业科学, 2023(12): 153-156.

LÜ Q X, LI M, SUN L, et al. Breeding of new maize variety Fumin 105 and concentration screening of saline-alkali tolerance at seedling stage[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023 (12): 153-156.

[18] DING T, YANG Z, WEI X, et al. Evaluation of salt-tolerant germplasm and screening of the salt-tolerance traits of sweet sorghum in the germination stage[J]. Functional Plant Biology, 2018, 45(10): 1073-1081.

[19] 张兆宁, 李江辉, 赵怡宇, 等. 不同程度盐胁迫下大豆萌发期耐盐性鉴定[J]. 大豆科学, 2023, 42(3): 335-343.

ZHANG Z N, LI J H, ZHAO Y Y, et al. Salt tolerance identification of soybean at germination stage under different salt stress degrees[J]. Soybean Science, 2023, 42(3): 335-343.

[20] 周秀文, 张晓蕊, 孙贺祥, 等. 大豆种质萌发期和苗期耐盐性评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(3): 257-264.

ZHOU X W, ZHANG X R, SUN H X, et al. Evaluation of salt tolerance of soybean germplasms at germination and seedling stages[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(3): 257-264.

[21] 林峰, 赵慧艳, 史飞飞, 等. 大豆种质资源苗期耐盐鉴定及遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(6): 945-956.

LI F, ZHAO H Y, SHI F F, et al. Identification of salt-tolerant germplasm resources in soybean seedlings and genetic diversity analysis[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(6): 945-956.

[22] 严勇亮, 张金波, 路子峰, 等. 大豆种质资源耐盐性鉴定与评价[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 65-71.

YAN Y L, ZHANG J B, LU Z F, et al. Salt tolerance evaluation of soybean germplasm[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(1): 65-71.

[23] DO T D, VUONG T D, DUNN D, et al. Identification of new loci for salt tolerance in soybean by high-resolution genome-wide association mapping[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 318.

[24] 刘谢香, 常汝镇, 关荣霞, 等. 大豆出苗期耐盐性鉴定方法建立及耐盐种质筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 1-8.

LIU X X, CHANG R Z, GUAN R X, et al. Establishment of screening method for salt tolerant soybean at emergence stage and screening of tolerant germplasm [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1): 1-8.

[25] 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.

[26] 那桂秋, 寇贺, 曹敏建. 不同大豆品种种子萌发期耐盐碱性鉴定[J]. *大豆科学*, 2009, 28(2): 352-356.

NA G Q, KOU H, CAO M J. Salt and alkaline tolerance evaluation of different soybean varieties at germination stage[J]. *Soybean Science*, 2009, 28(2): 352-356.

[27] 杜雨芊, 王明玖, 索荣臻, 等. 栽培大豆与野生大豆杂交饲用大豆品种(系)萌发期和苗期耐盐性比较[J]. *大豆科学*, 2022, 41(4): 405-412.

DU Y Q, WANG M J, SUO R Z, et al. Comparison of salt tolerance of forage soybean varieties(lines) hybridized by cultivated soybean and wild soybean at germination and seedling stages[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(4): 405-412.

[28] 刘光宇, 关荣霞, 常汝镇, 等. 大豆不同器官 Na⁺ 含量与苗期耐盐性的相关分析[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1266-1273.

LIU G Y, GUAN R X, CHANG R Z, et al. Correlation between Na⁺ contents in different organs of soybean and salt tolerance at the seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1266-1273.

[29] 王佳敏, 柴润东, 陈璐云, 等. 29 个紫花苜蓿品种种子萌发期耐盐性评价[J]. *草地学报*, 2023, 31(9): 2722-2729.

WANG J M, CHAI R D, CHEN L Y, et al. Evaluation on salt tolerance of 29 alfalfa cultivars during germination [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 31(9): 2722-2729.

[30] 张天翔, 邹龙运, 郑涛, 等. 盐胁迫对不同甜椒种子萌发的影响[J]. *福建热作科技*, 2023, 48(2): 1-4.

ZHANG T X, ZOU L Y, ZHENG T, et al. Effects of salt stress on seed germination of different sweet pepper[J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 2023, 48(2): 1-4.

[31] 王珊珊, 钟雪梅, 文莎, 等. 甘蓝型油菜萌发期耐盐碱性高效鉴定及抗性资源筛选[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(6): 1166-1173.

WANG S S, ZHONG X M, WEN S, et al. Efficient identification and screening of salt and alkaline tolerance in rapeseeds(*Brassica napus* L.) during germination stage[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(6): 1166-1173.

[32] 李雪, 赵泰然, 郑毅, 等. 利用隶属函数法对不同基因型秋葵耐盐碱性的分析与评价[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(20): 6860-6865.

LI X, ZHAO T R, ZHENG Y, et al. Analysis and evaluation of salt and alkaline tolerance of different genotypes of okra by membership function method [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(20): 6860-6865.

[33] 刘青松, 贾艳丽, 肖宇, 等. 苜蓿种质资源筛选及育种目标群体构建研究[J]. *天津农业科学*, 2021, 27(8): 9-16.

LIU Q S, JIA Y L, XIAO Y, et al. Study on the selection of alfalfa germplasm resources and the establishment of breeding target groups [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(8): 9-16.

[34] 林海波. 大豆品种耐盐碱鉴定与筛选研究[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(16): 22-25.

LIN H B. Identification and screening of salt and alkali tolerance of soybean varieties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(16): 22-25.

[35] 江建霞, 张俊英, 杨立勇, 等. 盐胁迫对甘蓝型油菜种子萌发的影响[J/OL]. *分子植物育种*, 1-12 [2024-10-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230615.1538.014.html>.

JIANG J X, ZHANG J Y, YANG L Y, et al. Effects of salt stress on germination of rapeseed seeds [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 1-12 [2024-10-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230615.1538.014.html>.

[36] 林泉祥, 宋远辉, 花芹, 等. 水稻芽期耐盐性综合评价与筛选[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(3): 381-387.

LIN Q X, SONG Y H, HUA Q, et al. Comprehensive evaluation and selection of salt-tolerant varieties at rice germination stage[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, 49(3): 381-387.

[37] 李诗晴, 张鹏, 公丹, 等. 绿豆新品种的芽期耐盐性评价[J]. *作物杂志*, 2024(4): 188-193.

LI S Q, ZHANG P, GONG D, et al. Salt tolerance evaluation of different mung bean new varieties at germination stage[J]. *Crops*, 2024(4): 188-193.

[38] 李娜娜, 蒲艳艳, 宫永超, 等. 大豆农家品种资源芽期耐盐性鉴定及耐盐品种筛选[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(9): 15-23.

LI N N, PU Y Y, GONG Y C, et al. Identification and selection of salt tolerant varieties in germination stage of native soybean varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(9): 15-23.

[39] 孔令功. 大豆种质资源苗期耐盐性鉴定与耐盐材料筛选[J]. *大豆科技*, 2019(5): 4-9.

KONG L G. Identification of salt tolerance in seedling stage of soybean germplasm resources screening of salt tolerant materials [J]. *Soybean Science & Technology*, 2019(5): 4-9.

[40] 段文学, 张海燕, 解备涛, 等. 甘薯苗期耐盐性鉴定及其指标筛选[J]. *作物学报*, 2018, 44(8): 1237-1247.

DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, et al. Identification of salt tolerance and screening for its indicators in sweet potato varieties during seedling stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(8): 1237-1247.

[41] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1290-1300.

DAI H F, WU H, AMANGULI MMTAL, et al. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerant evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes [J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2014, 47(7): 1290-1300.

[42] 李玉骁, 汪磊, 汪魏, 等. 向日葵种质资源的耐盐性评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(9): 1480-1492.

LI Y X, WANG L, WANG W, et al. Salt tolerance evaluation of sunflower germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(9): 1480-1492.

[43] 石广成, 杨万明, 杜维俊, 等. 大豆耐盐种质的筛选及其耐盐生理特性分析[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(4): 174-183.

SHI G C, YANG W M, DU W J, et al. Screening of salt-tolerant soybean germplasm and physiological characteristics analysis of its salt tolerance [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(4): 174-183.

[44] 田小霞, 毛培春, 张琳, 等. 苜蓿属植物苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价[J]. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(2): 46-56.

TIAN X X, MAO P C, ZHANG L, et al. Screening on salt tolerance index and comprehensive evaluation of salt tolerance of *Medicago* Linn. plants at seedling stage [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, 27(2): 46-56.