

# 63 份谷子种质的耐盐综合评价及耐盐品种筛选

韩 飞<sup>1</sup>, 诸葛玉平<sup>1</sup>, 姜燕宏<sup>1</sup>, 王 会<sup>1</sup>, 张乃丹<sup>1</sup>, 何 伟<sup>1</sup>, 晁 赢<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 土壤资源高效利用国家工程实验室/山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018;

<sup>2</sup> 泰安高新技术产业开发区农业工作办公室, 山东泰安 271000)

**摘要:** 谷子是我国北方重要的粮食作物, 具有较强的耐盐抗旱能力。盐碱地是我国重要的后备耕地资源, 加强谷子种质耐盐评价, 筛选耐盐碱的谷子品种对促进盐碱地资源利用、保障国家粮食安全具有非常重要的作用。本试验以 63 份谷子种质资源为研究对象, 以 1.0% 质量浓度 NaCl 溶液进行盐胁迫, 用蒸馏水作为对照, 采用全营养培养基发芽法在人工气候培养箱 (昼/夜, 30 °C/20 °C, 光周期 14 h/d) 中进行谷子种质萌发期的耐盐性鉴定; 利用相关性分析和主成分分析明确 8 项耐盐指标在耐盐性评价中的权重; 通过模糊数学中的隶属函数法和聚类分析法对 63 份谷子种质的耐盐性进行综合评价和耐盐等级划分。结果表明: 谷子种质资源的耐盐性存在广泛的变异; 1.0% 质量浓度的盐胁迫下, 谷子的发芽率、发芽指数、根长、芽长、相对芽长、相对根长之间互成极显著正相关关系, 而与相对盐害率呈极显著负相关; 主成分分析结果表明, 发芽率、发芽指数、相对芽长、相对根长可作为谷子耐盐性评价的关键指标; 通过聚类分析可将 63 份谷子种质分为极端耐盐种质、耐盐种质、盐敏感种质和极端盐敏感种质 4 类; 基于模糊数学中的隶属函数得分进行综合评价, 筛选获得了济谷 16、汾特 11 号、峰红谷、晋谷 57、晋汾 106 号等 5 份耐盐谷子品种。

**关键词:** 谷子; 盐胁迫; 主成分分析; 聚类分析; 隶属函数

## Evaluation of Salt Tolerance and Screening for Salt Tolerant Accessions of 63 Foxtail Millet Germplasm

HAN Fei<sup>1</sup>, ZHUGE Yu-ping<sup>1</sup>, LOU Yan-hong<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, ZHANG Nai-dan<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, CHAO Ying<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/  
College of Resources and Environment of Shandong Agricultural University, Taian 271018;

<sup>2</sup> Office of Agricultural Work of Tai'an High and NewTech Development Zone, Taian Shandong 271000)

**Abstract:** Foxtail millet was an important grain crop in North part of China, with strong salt tolerance and drought resistance. It played an important role in ensuring the food security in arid and barren areas, especially in adjusting and optimizing the agricultural planting structure in saline and alkaline soil which is an important untouched arable land resources in China. In present study, 63 accessions of foxtail millet were employed as experimental material, and cultivated in 1.0% salinity regimes of all nutrient medium. The foxtail millets cultivated in all nutrient medium without salinity was designed as control subjects. During the test, all foxtail millets were kept in artificial climate incubator (day/night, 30 °C/20 °C, photoperiod 14 h/d). Correlation analysis and principal component analysis were employed to evaluate the eight salt tolerance indexes in salt tolerance evaluation. Membership function analysis and cluster analysis were also employed to identify the grade of salt tolerance of foxtail millet. The results showed that: grate variations of salt tolerance was observed among the germplasm of foxtail millet. Under 1% NaCl of salt stress, a significant positive correlation was detected between the germination rate, germination index,

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2017-12-29 网络出版日期: 2018-04-03

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20180403.1630.002.html>

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系杂粮创新团队栽培与土壤肥料岗位专家经费 (SDAIT-15-04); 山东省博士后创新项目 (201603052)

第一作者研究方向为土壤肥料科学与植物逆境生理。E-mail: hanfeiyanzhou@163.com

通信作者: 诸葛玉平, 研究方向为土壤肥料学。E-mail: zhugeyp@sdau.edu.cn

姜燕宏, 研究方向为植物逆境生理。E-mail: yanhonglou@sdau.edu.cn

root length, germinal length, relative germinal length and relative root length of plant, and the relative salt harm rate showed a significant negative correlation with the above 6 indexes. The results of principal component analysis showed that the percentage of germination rate, germination index, relative germinal length and relative root length were used as major indexes to evaluate salt tolerance of foxtail millet. Cluster analysis indicated that 63 foxtail millet accessions were divided into four groups (highly tolerant, tolerant, sensitive, extreme sensitive). Finally, Fenghonggu, Jinfen 106, Jingu57, Fente11, Jigu 16 were selected as excellent salt tolerant accessions by comprehensive evaluation with the score of membership function in fuzzy mathematics.

**Key words:** foxtail millet; salt stress; principal components analysis; cluster analysis; membership function

土壤盐碱化已成为全球范围内限制作物生产的主要逆境<sup>[1-3]</sup>。据不完全统计,世界盐碱地面积已达 9.54 亿  $\text{hm}^2$ , 占可耕地面积的 10%。其中我国拥有盐碱地 9913 万  $\text{hm}^2$ , 占耕地面积的 20%, 且具有开发利用潜力的盐碱地面积达到 1333.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[4]</sup>。盐碱地是我国重要的后备土地资源, 但因其土壤质量差、生产效率低而大面积荒芜, 导致当地农业生产不足, 严重制约了区域经济的发展<sup>[5]</sup>。究其原因耐盐作物品种相对缺乏和农业种植模式亟待优化。

谷子 (*Setaria italica* (L.) P. Beauv), 作为我国特色的杂粮作物, 因须根粗壮、根系发达、具有较强的耐盐、耐旱能力, 成为应对未来水资源短缺的重要战略储备作物<sup>[6-8]</sup>, 在保障干旱、贫瘠地区的粮食安全中起着非常重要的作用<sup>[9-10]</sup>。尤其是近年来随着生活水平的不断提高和膳食结构需求的多样化, 人们对食品营养、健康和安全的意识不断提升, 社会和市场对谷子的需求逐步增大, 以谷子为主的杂粮越来越成为人们餐桌的必备食品, 使得谷子产业又一次面临难得的发展机遇<sup>[11]</sup>。但是, 谷子种植面积却不断萎缩, 这与持续增长的谷子消费需求不相适应。因此亟需扩大谷子种植面积, 提高谷子产量、品质来满足日益增长的消费需求。

我国具有丰富的谷子种质资源, 尤其是地方品种资源多, 具有广泛的遗传变异。目前虽然对谷子的耐盐基因和抗氧化酶活性已开始研究<sup>[12-16]</sup>, 但对来源于不同地区的谷子种质进行耐盐关键指标的筛选和谷子种质耐盐性的评价鲜有研究, 严重制约了谷子在盐碱地的推广应用。本试验以从我国不同谷子栽培区收集的 63 份种质资源为研究对象, 采用全营养培养基发芽试验, 进行盐胁迫处理, 筛选与谷子耐盐能力最相关的发芽指标, 利用主成分分析、聚类分析和模糊数学隶属函数法对谷子萌发特性进行综合评价, 构建谷子耐盐评价体系, 以期筛选出耐盐谷子种质, 为谷子在农业供给侧结构性改革、盐碱地的

三元种植结构调整提供优良品种, 同时为谷子的耐盐育种奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验谷子品种分别为收集于我国吉林、辽宁、山西、甘肃、内蒙古、河北、河南、北京、山东等 9 个省、自治区和直辖市谷子主产区的主推品种及育种单位选育的典型种质, 共 110 份, 通过培养箱发芽试验, 选出本底发芽率在 60% 以上的 63 份种质进行耐盐性鉴定, 包括 45 份育成品种, 18 份地方品种, 具体名称及来源见表 1。

### 1.2 耐盐性鉴定

选取饱满、均匀的谷种用蒸馏水清洗后, 用 75% 乙醇处理 30 s, 再用 3.5% 次氯酸钠溶液浸泡 20 min, 最后用无菌蒸馏水多次清洗, 在纱布上摊开, 置于无菌操作台上自然晾干备用。

分别取经过预处理的饱满、均一的 20 颗谷种, 置于盛有凝固的 MS 培养基 (50 mL) 的方形无菌培养皿 (10 cm × 10 cm × 3 cm) 中进行 1.0% 盐胁迫处理培养。所有培养皿随机置于人工气候培养箱中 (昼/夜, 30 °C/20 °C, 光周期 14 h/d) 竖直放置培养 8 d。当胚芽达到种子长度一半或胚根达到种子长度记为发芽, 每 2 d 记录种子发芽情况, 培养 8 d 后测量胚根与胚芽长度。每个处理 3 次重复。

发芽率 (%) = 8 d 发芽数 / 种子总数 × 100% ;

发芽指数 =  $\sum (Gt/Dt)$  (Gt 为第 t 天发芽数, Dt 为发芽天数);

发芽势 (%) = 萌发种子粒数 / 供试种子粒数 × 100% ;

发芽相对盐害率 (%) = (对照发芽率 - 处理发芽率) / 对照发芽率 × 100% ;

相对芽长 (%) = 处理芽长 / 对照芽长 × 100% ;

相对根长 (%) = 处理根长 / 对照根长 × 100% 。

表 1 供试材料的编号、品种名称及来源

Table 1 The code, name and origin of test materials

编号 Code	名称 Name	产地 Origin	编号 Code	名称 Name	产地 Origin
GZ01	金谷 2 号	吉林	GZ33	金谷 8 号	辽宁
GZ02	红谷 2000	辽宁	GZ34	菠菜被	辽宁
GZ03	沁州黄	山西	GZ35	红谷	辽宁
GZ04	吨谷	甘肃	GZ36	沁州黄	辽宁
GZ05	鸟不弹	甘肃	GZ37	柴尖	辽宁
GZ06	绿宝千金谷	山西	GZ38	济谷 19	山东
GZ07	黄金谷	辽宁	GZ39	济谷 20	山东
GZ08	峰红谷	内蒙古	GZ40	冀优金谷伏二	北京
GZ09	赤谷 16	辽宁	GZ41	精选吨谷一号	河北
GZ10	赤谷 10	辽宁	GZ42	T2SD	山东
GZ11	辽谷 4 号	辽宁	GZ43	T3SD	山东
GZ12	GE07	辽宁	GZ44	晋谷 54	山西
GZ13	辽谷 2 号	辽宁	GZ45	晋汾 106 号	山西
GZ14	辽凤谷 3	辽宁	GZ46	晋谷 57	山西
GZ15	长谷 1501	辽宁	GZ47	晋谷 40	山西
GZ16	GE1505	辽宁	GZ48	汾选 3 号	山西
GZ17	书香早干谷	河北	GZ49	晋珍珠	山西
GZ18	红吨谷	北京	GZ50	晋谷 29 号	山西
GZ19	冀谷 19	河北	GZ51	晋汾 02 号	山西
GZ20	冀谷 1860	河北	GZ52	汾特 11 号	山西
GZ21	鸟不叨粘香谷	河南	GZ53	T4SD	山东
GZ22	书香一号	河北	GZ54	T5SD	山东
GZ23	书香二号	河北	GZ55	T6SD	山东
GZ24	香粘鸟不啄	北京	GZ56	T7SD	山东
GZ25	特贡红香谷	河北	GZ57	红香状元	山东
GZ26	特早一号	河北	GZ58	T8SD	山东
GZ27	东昌一号	河北	GZ59	T9SD	山东
GZ28	吨香 3 号	山东	GZ60	T10 黄金贡谷	山东
GZ29	金谷王	北京	GZ61	T11SD	山东
GZ30	黄金吨谷	河北	GZ62	济谷 16	山东
GZ31	吨谷一号	吉林	GZ63	T12SD	山东
GZ32	T1NMG	内蒙古			

### 1.3 数据处理

所有数据均采用 Excel 和 SPSS 19.0 软件进行处理和统计分析。对于主成分分析,将谷种与发芽相关的主要性状标准化后形成相关矩阵用 Correlation Matrix 判定,得出特征值与相对贡献率,算出各品种各主成分的因子得分<sup>[17-18]</sup>。对于聚类分析,将发芽指标以欧式距离作为供试谷子种质间距离,以最短距离法为聚类方法,建立种质资源聚类树状图<sup>[17,19]</sup>。隶属函数采用公式  $X_{(ij)} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$  进行计算<sup>[20-21]</sup>。其中  $X_{ij}$  表示

$i$  种类  $j$  指标的测定值,  $X_{jmin}$  和  $X_{jmax}$  分别表示  $j$  指标的最小值和最大值,  $X_{(ij)}$  表示  $i$  种类  $j$  指标的隶属值。

## 2 结果与分析

### 2.1 发芽指标差异

在 1.0% 质量浓度 NaCl 胁迫下,63 份谷子种质的发芽率、发芽势、相对盐害率、根长与芽长表现出了极大的差异性,变异系数分别为 64.32%、69.32%、69.72%、115.66%、163.73%;其中 4 份种

质未发芽,相对盐害率达到100%,占总数的6.35%。

63份谷子种质间的发芽率与发芽势存在较大差异,如图1所示。有6份谷子种质的发芽率在80.00%以上,占总数的9.52%;有61.90%的谷子种质发芽率在50.00%以下,其中发芽率小于

30.00%的有18份,占总数的28.57%。发芽势在50.00%以下的种质占总数的71.43%,其中发芽势低于30.00%的有23份,占总数的36.51%,发芽整齐度差,谷种发芽受到严重阻碍。此外,有4份种质的发芽势在80%以上,占总数的6.35%,发芽整齐度高,对盐胁迫的抗性能力较强。

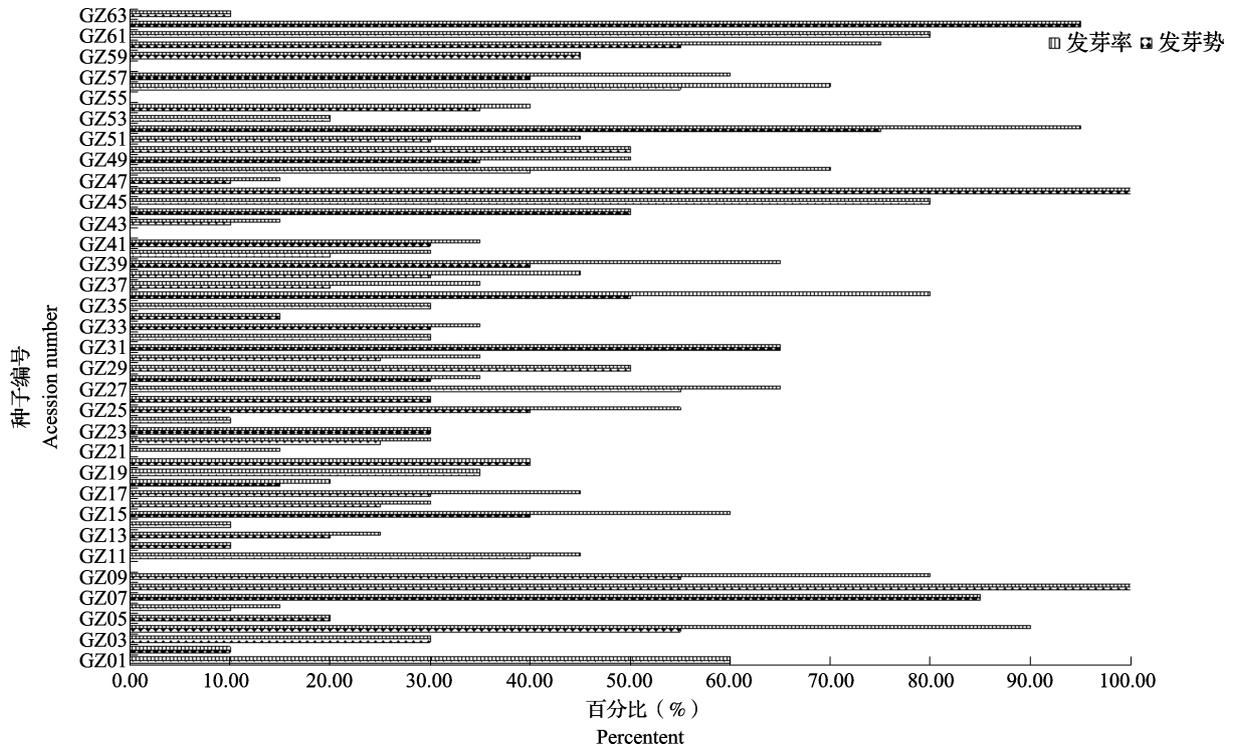


图1 1.0%质量浓度盐胁迫下谷子的发芽率和发芽势

Fig.1 Germination percentage and germination energy of foxtail millet exposed to 1.0% mass concentration NaCl regime

在1.0%质量浓度的盐胁迫下,萌发后的谷子根长与芽长也表现出了极大的差异(图2),其平均值分别为0.40 cm和0.48 cm,变异系数分别为115.66%和63.73%。63份种质中芽长和根长小于0.2 cm的种质分别占比53.96%和57.14%,表明盐胁迫严重抑制了根和芽的生长。除4份未发芽种质外,仍有25份种质能够萌发,但胚根、胚芽不能正常生长,不具备成苗能力。

盐胁迫后,谷子种质的发芽率、芽长、根长下降(图3)。63份谷子的平均发芽率由无胁迫时的69.52%降至42.78%,平均发芽势由78.57%降至35.87%,平均相对盐害率为49.71%。其中有25.40%的谷子种质的相对盐害率高于70%,发芽受到严重的胁迫。63份谷子的平均芽长和平均根长分别从2.57 cm和1.96 cm降至0.52 cm和0.36 cm,其中有87.30%和84.13%的谷种相对芽长和相对根长小于50%,有

57.14%和50.79%的相对芽长和相对根长小于10.00%,根和芽的生长受到了严重的抑制。值得注意的是,7份种质的相对盐害率为0,表明其发芽率未受到盐胁迫的影响,但其相对根长与相对芽长表现差异较大,GZ04的相对芽长和相对根长分别为82.07%和67.84%,而GZ52的相对芽长和相对根长分别为18.21%和17.04%,均受到不同程度胁迫。

### 2.2 相关性分析

相关性分析表明(表2),发芽率、发芽指数、根长、芽长、相对芽长、相对根长6个指标间均呈极显著正相关,而发芽率、发芽指数、根长、芽长、相对芽长、相对根长均与相对盐害率呈极显著负相关。其中根长与芽长、根长与相对芽长、根长与相对根长之间的相对系数达到0.80以上,表明盐胁迫下谷子的根长与芽长受到胁迫的程度相互关联。

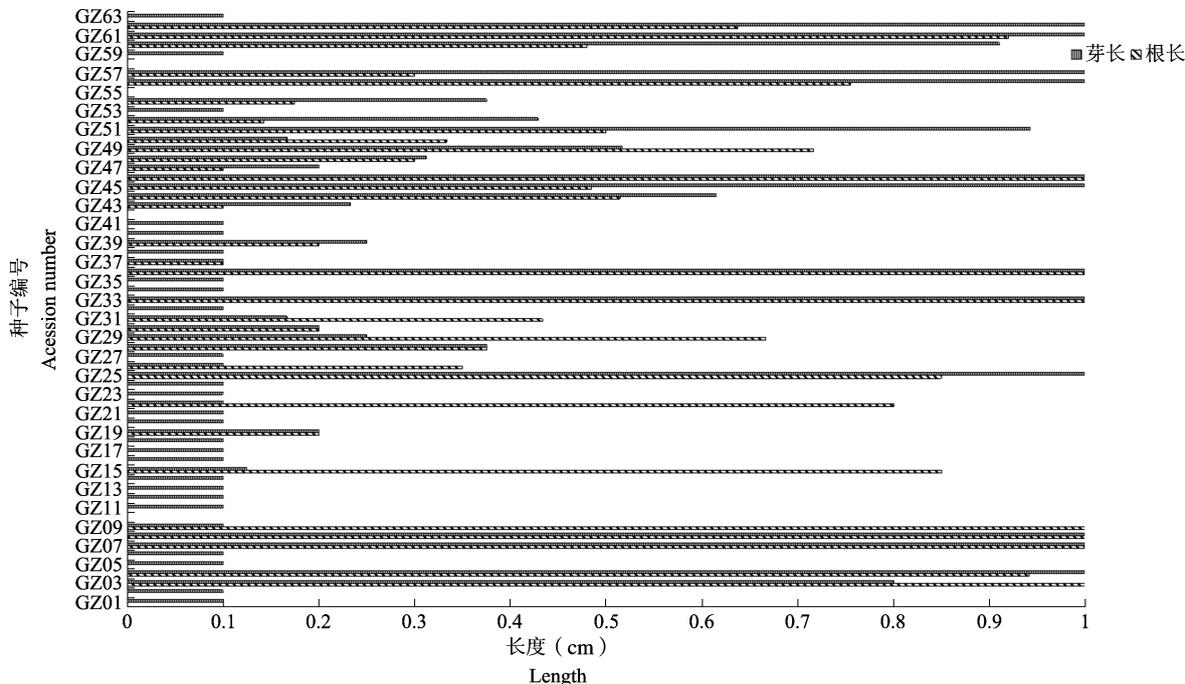


图 2 1.0%质量浓度盐胁迫下谷子的根长和芽长

Fig. 2 Root length and sprout length of foxtail millet exposed to 1.0% mass concentration NaCl regime

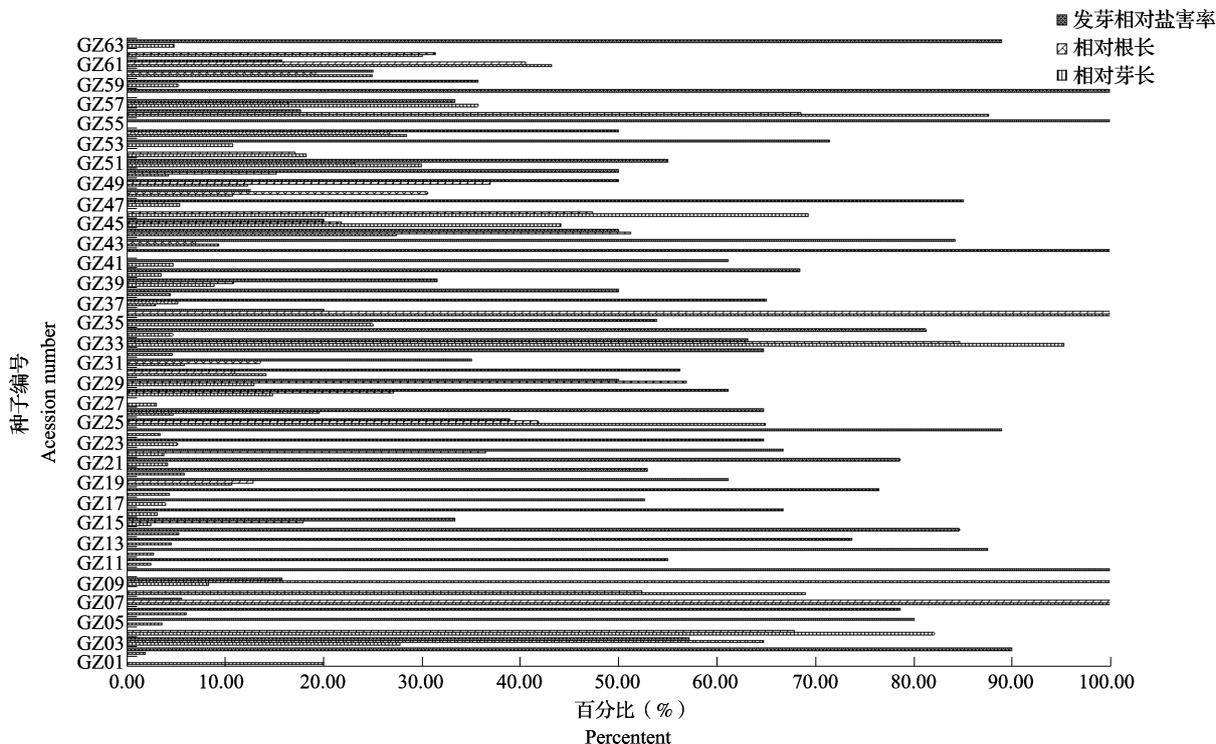


图 3 1.0%质量浓度盐胁迫下谷子的相对根长、相对芽长和相对盐害率

Fig. 3 Relative root length, relativesprout length and relative salt toxicity rate of foxtail millet exposed to 1.0% mass concentration NaCl regime

2.3 主成分分析与聚类分析

为减少指标之间的信息重叠,对谷子的 8 个萌发指标进行主成分分析。结果表明,第一主成分因

子(PC1)方差贡献率为 73.55%,特征值为 5.88;第二主成分因子(PC2)贡献率为 16.18%,特征值为 1.30。PC1 和 PC2 的累计贡献率为 89.73%,可代

表 2 盐胁迫下各发芽指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of all germination index of foxtail millet under salt stress

指标 Index	发芽率 Germination percentage	发芽势 Germination energy	发芽指数 Germination index	相对盐害率 Relative salt toxicity rate	芽长 Sprout length	根长 Root length	相对芽长 Relative sprout length	相对根长 Relative root length
发芽率	1							
发芽势	0.192	1						
发芽指数	0.943 **	0.174	1					
相对盐害率	-0.958 **	-0.207	-0.868 **	1				
芽长	0.623 **	0.118	0.661 **	-0.551 **	1			
根长	0.645 **	0.008	0.657 **	-0.562 **	0.805 **	1		
相对芽长	0.567 **	0.021	0.571 **	-0.525 **	0.897 **	0.808 **	1	
相对根长	0.556 **	-0.043	0.537 **	-0.494 **	0.627 **	0.874 **	0.727 **	1

\*\* . 在 0.01 水平上极显著相关

\*\* , values with different superscript indicate significant different at 1% level

替 8 个萌发指标判断谷子萌发期抗盐胁迫能力。PC1 中,发芽率、发芽势、发芽指数、芽长、根长、相对芽长、相对根长有 0.75 以上为正的较高载荷,正相关性强;相对盐害率有 -0.90 以下为负的较高载荷,负相关性强;发芽率和发芽指数为大于 0.90 的高载荷指标。PC2 中,相对盐害率、芽长、根长、相对

芽长、相对根长为正载荷,发芽率、发芽势、发芽指数为负载荷,相对芽长和相对根长为大于 0.40 的相对高载荷指标(图 4)。根据各指标的因子得分系数,得出各谷子种质的第一主成分得分(PC1)和第二主成分得分(PC2);对 PC1 和 PC2 进行加权,得到主成分总得分。

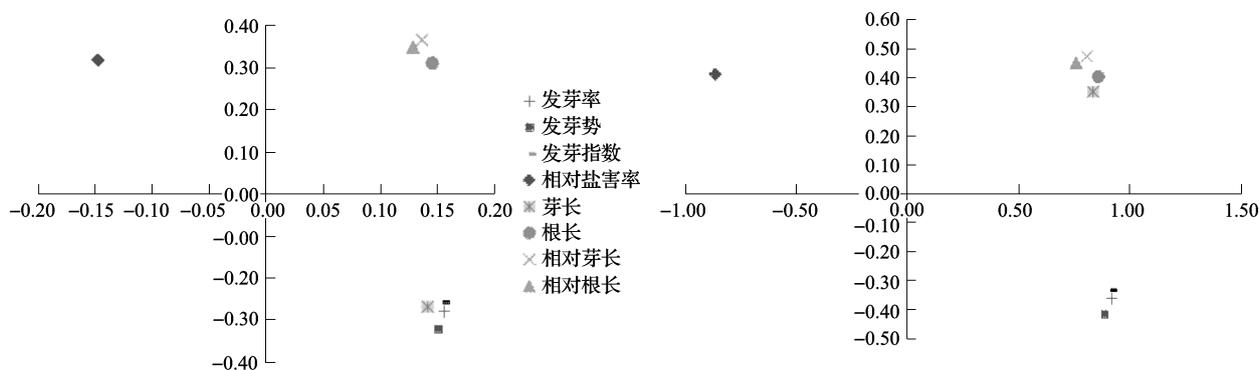


图 4 发芽指标在 PC1 和 PC2 的成分得分系数(左)和因子负荷分布(右)图

Fig. 4 Component scoring coefficient( Left) and Factor loading distribution( Right) of germination index in PC1 and PC2

运用软件 SPSS 19.0 的系统聚类进行聚类分析,以欧氏距离为品种间距离,以最短距离法为聚类方法,以 5 为截断距离,将 63 份谷子种质聚为 4 个类群(图 5)。

类群 I 为极端耐盐种质,包括 4 份种质,占比 6.35%,其平均发芽率、发芽势达到 90.00% 以上,发芽指数大于 18.91,相对盐害率低于 5.00%,其发芽受到抑制最小,平均芽长最高(1.87 cm)。类群 II 为耐盐种质,包括 7 份种质,占比 11.11%,平均发芽率、发芽势和发芽指数较高,所受相对盐害率较

低。类群 II 相对芽长(73.50%)和相对根长(89.85%)最高,在培育期内根和芽的生长受到的胁迫程度最小。类群 III 为盐敏感种质,占总种质数量 58.73%,其发芽率和发芽势分别为 43.11% 和 35.68%,平均芽长与平均根长小且相对值分别为 14.93% 和 16.80%,受到严重的盐胁迫。类群 IV 为极端盐敏感种质,发芽率和发芽势均低于 15.00%,相对盐害率大于 75.00%,并有多份种质出现不发芽或发芽后不生长现象,芽长、根长和相对芽长、相对根长极低。

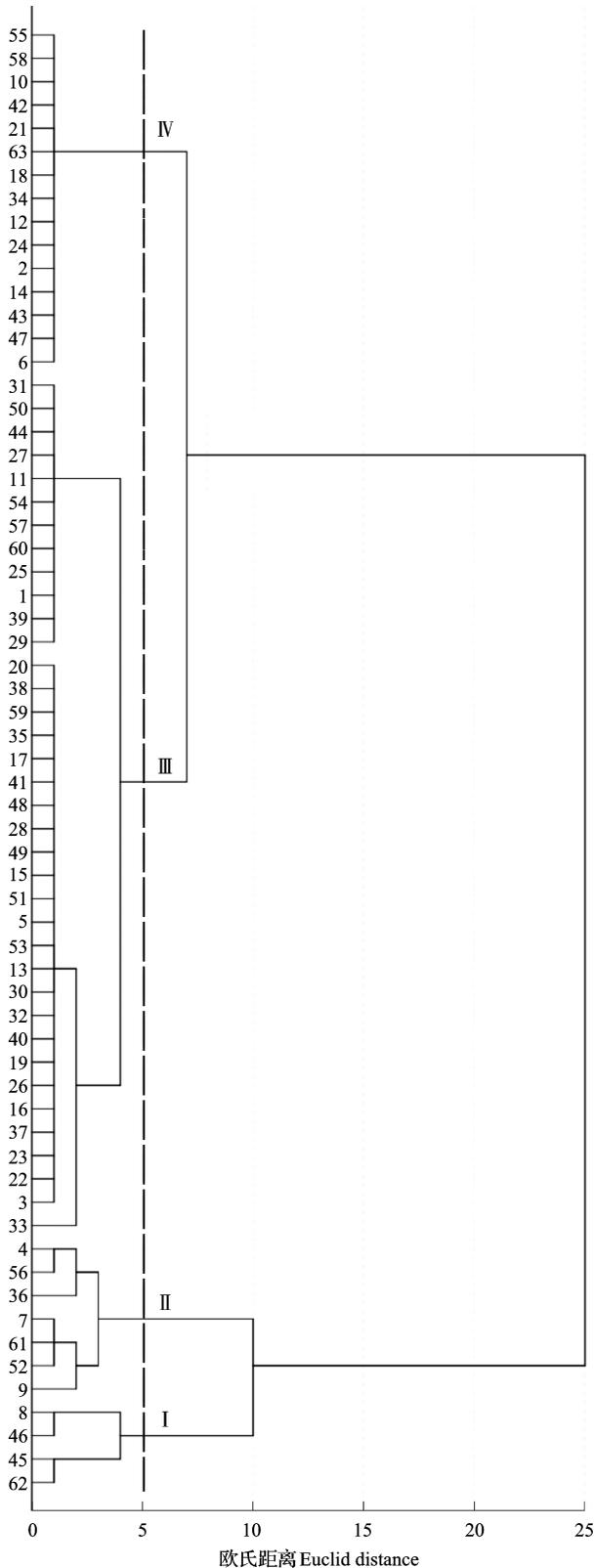


图 5 谷子种质的聚类分析树状图

Fig. 5 Dendrogram of cluster analysis for foxtail millet germplasm

### 2.4 谷子种质的耐盐性综合评价

根据主成分分析各指标在各主成分中的因子系数,得出各指标在 PC1 和 PC2 因子得分,计算隶属函数值,对其进行加权得出综合得分,并对 63 份谷子种质的耐盐性进行了综合评价(表 3)。依据排名,得到耐盐种质(选取得分  $\geq 0.75$ ):GZ08、GZ45、GZ46、GZ52 和 GZ62。

### 3 讨论

种质资源是品种选育的基础,在漫长历史的过程中积累了由自然因素和人为因素引起的极其丰富的遗传变异,蕴藏着各种性状的遗传基因<sup>[22-23]</sup>。旧品种的改良、新品种的培育和原有品种保护的关键是优异种质资源的发现与利用<sup>[24]</sup>。因此,具有丰富的抗盐胁迫能力的种质资源是选育在盐碱地推广种植谷子品种的重要基础。对于植物耐盐性的鉴定主要集中在苗期、孕穗期等,但萌发期的耐盐性能直接决定植物的出苗率和成苗力<sup>[25-26]</sup>。在萌发期,盐敏感种质则会受到抑制,种子的发芽能力严重降低或无法发芽<sup>[27]</sup>。因此,利用发芽率、发芽势等发芽指标来对谷子的萌发期耐盐能力进行鉴定是研究耐盐种质最基本的途径<sup>[24,27]</sup>。本试验从全国谷子主产区选取 63 份谷子种质,以 NaCl 作为胁迫盐分,以发芽率、发芽势、发芽指数、根长与芽长为测量指标,并与无盐下相同种植的测量指标的比值来对不同的谷子种质资源进行综合评判。研究发现,1.0% 质量浓度的 NaCl 胁迫下发芽率、发芽势、相对盐害率、根长与芽长的变异系数分别为 64.32%、69.32%、69.72%、115.66%、163.73%,谷子种质资源的耐盐性存在广泛的变异。

相关性分析与主成分分析在棉花(*Gossypium* spp. L.)、高粱(*Sorghum bicolor*(L.) Moench)、花生(*Arachis hypogaea* L.)等作物的耐盐筛选与鉴定上得到了广泛的应用,得到了科学系统的筛选鉴定体系<sup>[28-31]</sup>,但对谷子的耐盐研究多停留在数量分布或差异与显著性分析,不仅难得到全面、客观的种质耐盐鉴定,更无法适应品质育种日益增加的需求。本试验对 63 份谷子种质 8 个耐盐指标进行相关性分析,发现谷子种质的发芽率、发芽指数、根长、芽长、相对芽长、相对根长之间相互呈极显著正相关,而与相对盐害率呈极显著负相关,且部分相关系数达到 0.9 以上,相关性极为明显。为对数据进行简化与整合,进一步进行了主成分分析,得到两个主成分因子代替 8 个指标变量,这两个主成分因子能够反映

表 3 63 份谷子种质耐盐性的综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of salt tolerance of 63 foxtail millet accessions

编号 Code	得分 Score	排名 Rank	编号 Code	得分 Score	排名 Rank	编号 Code	得分 Score	排名 Rank
GZ01	0.68	8	GZ22	0.26	44	GZ43	0.15	54
GZ02	0.14	57	GZ23	0.34	34	GZ44	0.44	22
GZ03	0.20	48	GZ24	0.14	56	GZ45	0.75	5
GZ04	0.57	12	GZ25	0.37	30	GZ46	0.82	4
GZ05	0.24	46	GZ26	0.31	40	GZ47	0.16	51
GZ06	0.18	50	GZ27	0.72	6	GZ48	0.57	13
GZ07	0.60	11	GZ28	0.32	37	GZ49	0.39	29
GZ08	0.83	3	GZ29	0.43	23	GZ50	0.50	17
GZ09	0.54	15	GZ30	0.35	33	GZ51	0.33	35
GZ10	0.04	63	GZ31	0.62	9	GZ52	0.84	2
GZ11	0.46	21	GZ32	0.33	36	GZ53	0.27	42
GZ12	0.14	55	GZ33	0.09	59	GZ54	0.39	27
GZ13	0.26	43	GZ34	0.20	49	GZ55	0.04	61
GZ14	0.15	52	GZ35	0.36	32	GZ56	0.51	16
GZ15	0.49	19	GZ36	0.24	45	GZ57	0.47	20
GZ16	0.32	38	GZ37	0.31	39	GZ58	0.04	60
GZ17	0.41	26	GZ38	0.42	25	GZ59	0.49	18
GZ18	0.22	47	GZ39	0.55	14	GZ60	0.61	10
GZ19	0.36	31	GZ40	0.30	41	GZ61	0.69	7
GZ20	0.43	24	GZ41	0.39	28	GZ62	0.89	1
GZ21	0.15	53	GZ42	0.04	62	GZ63	0.12	58

原来变量的信息量的 89.73%。其中,发芽率、发芽指数与第一主成分相关系数极高,相对芽长、相对根长与第二主成分相关系数高,可作为评判谷子种质耐盐能力的指标,这与在其他作物上的研究结果类似<sup>[27,29-31]</sup>。在谷子的耐旱性鉴定中,发芽率、根长与相对根长、相对芽长也被筛选确定为评判谷子种质耐旱能力的重要指标<sup>[32-34]</sup>。在对新品种的谷子种质进行耐盐鉴定时,应着重测量这 4 个指标,从而进一步筛选并发现具有耐盐能力的新的种质资源。

为寻求谷子耐盐能力的相似程度,来对谷子抗盐胁迫能力进行更科学的评估与分析,为谷子耐盐的机理进一步分析奠定基础,用最短距离法以 5 为截断距离对谷子种质进行了聚类分析。在聚类分析中,63 份谷子种子被分为极端耐盐种质(6.35%)、耐盐种质(11.11%)、盐敏感种质(58.73%)和极端盐敏感种质(23.81%) 4 个类群。其中,极端耐盐种质全为育成品种,耐盐种质也多为育成品种,表明育成品种耐盐性大于地方品种。模糊数学上的隶属函数分析因其能较好地

解决模糊的、难以量化的各种非确定问题,得到系统性强的清晰结果,广泛被用于做种质耐盐性鉴定的综合评价。本研究亦采用隶属函数法,通过赋值给 8 个耐盐指标以权重,通过综合矩阵运算与排序,得到 63 份谷子种质耐盐性的综合评价,选出峰红谷、晋汾 106 号、晋谷 57、汾特 11 号、济谷 16 共 5 份耐盐种质,这与聚类分析结果一致。5 份种质在 1.0% 质量浓度的盐胁迫下发芽率均大于 80%,发芽势大于 75%,发芽指数大于 13,成苗率高且均匀整齐。其中峰红谷和晋谷 57 发芽率与发芽势高达 100%,发芽指数大于 20,萌发成苗未受到影响。对于 5 份耐盐种质根芽生长情况,除汾特 11 号外,谷子的平均芽长和平均根长分别大于 1.00 cm 和 0.45 cm,生长速度快。其中峰红谷相对芽长和相对根长分别为 68.95% 和 52.37%,受到盐胁迫影响较小。对于排名第一的济谷 16,发芽率、发芽势、发芽指数、芽长、根长均保持较高水平。

本研究仅对不同地理来源的 63 份谷子种质资源的萌发期进行了分析评价,若要更加全面、客观地

评价谷子种质资源抗盐胁迫,还需进一步研究其遗传特性,探究根本差异。所选出的耐盐谷子品种也需要在不同盐碱地区域进行田间栽培试验,以验证其引种的适宜性。

#### 参考文献

- [1] 王合云,李红丽,董智,陈新闻,邵水仙.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征.土壤学报,2015,52(3):706-712
- [2] Tavakkoli E, Rengasamy P, McDonald G K. High concentrations of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(15):4449-4459
- [3] Ghollara M, Raiesi F. The adverse effects of soil salinization on the growth of *Trifolium alexandrinum* L. and associated microbial and biochemical properties in a soil from Iraq. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7):1699-1702
- [4] 徐鹏程,冷翔鹏,刘更森,宋长年,房经贵.盐碱土改良利用研究进展.江苏农业科学,2014,42(5):293-298
- [5] Liu Z X, Zhang H X, Yang X Y, Hairong W. Effects of soil salinity on growth, ion relations, and compatible solute accumulation of two xumac species: *Rhus glabra* and *Rhus trilobata*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(21):3187-3204
- [6] 管延安,杨延兵,秦岭,王海莲,张华文.山东省谷子生产现状与技术需求对策.山东农业科学,2009(9):119-122
- [7] 李顺国,刘斐,刘猛,赵宇,王慧军.我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议.农业现代化研究,2014,35(5):531-535
- [8] 李玉勤.杂粮种植农户生产行为分析-以山西省谷子种植农户为例.农业技术经济,2010(12):44-53
- [9] 刘晓东,白丽,于树会,张黎明.河北省谷子生产现状调查研究.江西农业学报,2011,23(10):199-201
- [10] 刘旭,黎裕,曹永生,董玉琛,方涛,陆平.中国禾谷类作物种质资源地理分布及其富集中心研究.植物遗传资源学报,2009,10(1):1-8
- [11] 张雪峰.中国谷子产业发展问题研究.哈尔滨:东北农业大学,2013
- [12] Sharma P C, Sehgal D, Singh D, Singh G, Yadav R S. A major terminal drought tolerance QTL of Pearl Millet is also associated with reduced salt uptake and enhanced growth under salt stress. *Molecular Breeding*, 2011, 27(2):207-222
- [13] Anjaneyulu E, Reddy P S, Sunita M S, Kishor P B, Meriga B. Salt tolerance and activity of antioxidative enzymes of transgenic finger millet overexpressing a vacuolar  $\text{H}^+$ -pyrophosphatase gene (*Sbvpase*) from sorghum bicolor. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(10):789-798
- [14] Sreenivasulu N, Ramanjulu S, Ramachandra-kini K, Prakash H S, Shekar-Shetty H, Savithri H S, Sudhakar C. Total peroxidase activity and peroxidase isoforms as modified by salt stress in two cultivars of foxtail millet with differential salt tolerance. *Plant Science*, 1999, 141(1):1-9
- [15] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U, Weschke W. Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*). *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(4):435-442
- [16] 田伯红,王素英,李雅静,王建广,张立新,梁凤芹,翟玉柱,刘金荣.谷子地方品种发芽期和苗期对 NaCl 胁迫的反应和耐盐品种筛选.作物学报,2008,34(12):2218-2222
- [17] 殷冬梅,张苹果,王允,崔党群.花生主要品质性状的主成分分析与综合评价.植物遗传资源学报,2011,12(4):507-512,518
- [18] 徐永杰,吴代坤,罗治建,李双龙,谭学春,谭志红,马林江,戴应金.主成分分析法在核桃选优中的应用.中国农学通报,2011,27(25):45-48
- [19] Songcan C, Yulian Z. Subpattern-based principle component analysis. *Pattern Recognition*, 2004, 37(5):1081-1083
- [20] 付晓萍,曾冠文,徐位力,牛志刚,马文卿.隶属函数法对 5 种岭南乡土植物耐阴性的综合评价.安徽农业科学,2014,42(32):11390-11391
- [21] 张朝阳,许桂芳.利用隶属函数法对 4 种地被植物的耐热性综合评价.草业科学,2009,26(2):57-60
- [22] Zhang J Q. Biological and ecological characteristics of *tiigonella foenumgraecum* and research advances in germplasm resources. *Journal of Lanzhou University*, 2012, 48(6):94-101
- [23] 万述伟,宋风景,郝俊杰,张晓艳,李红卫,邵阳,赵爱鸿.271 份豌豆种质资源农艺性状遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2017,18(1):10-18
- [24] 陈学森,李宪利,张艳敏,吴树敬,沈洪波,束怀瑞.杏种质资源评价及遗传育种研究进展.果树学报,2001,18(3):178-181
- [25] 孙东雷,卞能飞,陈志德,邢兴华,徐泽俊,齐玉军,王晓军,王幸.花生萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选.植物遗传资源学报,2017,18(6):1079-1087
- [26] 刘永惠,沈一,陈志德,王州飞,颜伟.不同花生品种(系)萌发期耐盐性的鉴定与评价.中国油料作物学报,2012,34(2):168-173
- [27] 智慧,刁现民,吕芑, Zoya Akolavo.人工盐胁迫法鉴定谷子及狗尾草物种耐盐基因型.河北农业科学,2004,8(4):15-18
- [28] Vijayan K, Chakraborti S P, Ghosh P D. Screening of mulberry (*Morus* spp.) for salinity tolerance through in vitro seed germination. *Indian Journal of Biotechnology*, 2004, 3(1):47-51
- [29] 刘金,关建平,徐东旭,张晓艳,顾竟,宗绪晓.小扁豆种质资源形态标记遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2008,9(2):173-179
- [30] 刘祎,张海娜,钱玉源,韩轩,崔淑芳,王燕,王广恩,金卫平,李俊兰. NaCl 水培胁迫下棉花苗期耐盐指标筛选与分析.河北农业科学,2017,21(3):30-34
- [31] 孙璐,周宇飞,汪澈,肖木辑,陶冶,许文娟,黄瑞冬.高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定.中国农业科学,2012,45(9):1714-1722
- [32] 张文英,智慧,柳斌辉,彭海成,李伟,王永芳,李海权,栗雨勤,刁现民.谷子全生育期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选.植物遗传资源学报,2010,11(5):560-565
- [33] 秦岭,杨延兵,管延安,张华文,王海莲,刘宾,陈二影.不同生态区主要育成谷子品种芽期耐旱性鉴定.植物遗传资源学报,2013,14(1):146-151
- [34] 刘桂红,王珏,杜金哲,管延安.谷子萌芽期抗旱性鉴定研究.中国农学通报,2013,29(3):86-91