

65 个高粱种质萌芽期的耐盐指标比较及其耐盐性综合评价

何晓兰¹, 徐照龙¹, 张大勇¹, 黄益洪¹, 彭 陈¹, 邵宏波^{1,①}, 王 为², 郭士伟^{1,①}

(1. 江苏省农业科学院农业生物技术研究所 江苏省盐土生物资源重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏 盐城 224002)

摘要: 为筛选出适合在盐渍土壤中生长的高粱[*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench]种质,对 10 g·L⁻¹ NaCl 胁迫条件下 65 个高粱种质萌芽期的 6 项耐盐指标进行比较,并通过相关性分析和主成分分析比较了各指标在耐盐性评价中的作用;在此基础上,通过综合得分排序和聚类分析对供试 65 个种质的耐盐性进行排序及评价。结果显示:供试 65 个种质的相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对苗高和相对根冠比变幅较大,分别为 0.00%~140.56%、31.61%~124.81%、10.45%~154.30%、12.80%~124.95%和 22.09%~380.84%;而相对盐害率变幅较小,仅为-8.27%~22.80%。在 6 个耐盐指标间,相对苗高与相对发芽率和相对盐害率的相关性以及相对根冠比与相对发芽势、相对发芽率和相对盐害率的相关性均不显著,其余指标间均有显著或极显著相关性。主成分分析中,前 2 个主成分的累计贡献率为 75.1213%,其中,相对发芽势、相对发芽率和相对盐害率为第 1 主成分的主要因子,相对苗高为第 2 主成分的主要因子。供试 65 个种质耐盐性的综合得分为 7.18~65.11;其中,甜选 35 耐盐性的综合得分最高(65.11),耐盐性排序第一;黑穗芦稷耐盐性的综合得分最低(7.18),耐盐性排序最末。聚类分析结果显示:在欧氏距离 5.5 处,供试 65 个种质可被分为 7 类,其中,第 I、第 II 和第 III 类共包含 12 个种质,其中 9 个为耐盐性排序前 9 位的种质,属于高耐盐种质;第 IV、第 V 和第 VI 类共包含 31 个种质,属于中等耐盐种质;第 VII 类包含 22 个种质,其中 10 个为耐盐性排序后 10 位的种质,属于高盐敏感种质。综合分析结果表明:供试 65 个高粱种质的耐盐性差异很大,其中,甜选 35、Rio、宁甜选 10、宁甜选 11、甜选 107、宁甜选 17、甜选 148、辽甜 8 号及盐甜选 10 等为高耐盐种质,适合在盐渍土壤中生长。此外,耐盐性综合得分排序结果与聚类分析结果基本一致,表明用萌芽期的耐盐指标可以初步评价高粱种质的耐盐性。

关键词: 高粱种质; 萌芽期; 耐盐指标; 主成分分析; 聚类分析; 耐盐性排序

中图分类号: Q945.78; S514.034 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)04-0052-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.04.07

Comparison on salt tolerance indexes of 65 germplasms of *Sorghum bicolor* at germination stage and comprehensive evaluation on their salt tolerance HE Xiaolan¹, XU Zhaolong¹, ZHANG Dayong¹, HUANG Yihong¹, PENG Chen¹, SHAO Hongbo^{1,①}, WANG Wei², GUO Shiwei^{1,①} (1. The Key Laboratory for Salt Soil Bioresources of Jiangsu Province, Institute of Agri-Biotechnology, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Agricultural Sciences Institute of Coastal Area of Jiangsu, Yancheng 224002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(4): 52-60

Abstract: In order to select germplasms of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench suitable for growing in saline soil, six salt tolerance indexes at germination stage of 65 germplasms of *S. bicolor* under condition of 10 g·L⁻¹ NaCl stress were compared, and the role of different indexes in salt tolerance evaluation was compared by correlation analysis and principal component analysis. On this basis, salt tolerance of 65 germplasms tested was ordered and evaluated by comprehensive score ordering and cluster analysis. The

收稿日期: 2015-04-30

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(14)2001; CX(15)1005]; 江苏省盐土生物资源研究重点实验室开放课题(JKLB2014002); 2015 年盐城市农业创新专项引导资金项目(YK2015017)

作者简介: 何晓兰(1973—),女,江苏东台人,硕士,副研究员,主要从事盐土农业与生物技术方面的研究工作。

①通信作者 E-mail: shaohongbochu@126.com; gogow12@126.com

results show that change ranges of relative germination potential, relative germination rate, relative root length, relative seedling height and relative root-shoot ratio of 65 germplasms tested are large with 0.00%–140.56%, 31.61%–124.81%, 10.45%–154.30%, 12.80%–124.95% and 22.09%–380.84%, respectively. While change range of relative salt-injury rate is small only with –8.27%–22.80%. Among six salt tolerance indexes, correlations of relative seedling height with relative germination rate and relative salt-injury rate and those of relative root-shoot ratio with relative germination potential, relative germination rate and relative salt-injury rate are not significant, while correlations among other indexes are significant or extremely significant. In principal component analysis, cumulative contribution rate of the first two principal components is 75.1213%, in which, relative germination potential, relative germination rate and relative salt-injury rate are main factors of the first principal component, relative seedling height is main factor of the second principal component. The comprehensive score of salt tolerance of 65 germplasms tested is 7.18–65.11. In which, comprehensive score of salt tolerance of Tianxuan 35 is the highest (65.11) and its salt tolerance order is the first, while that of Heisuiluji is the lowest (7.18) and its salt tolerance order is the end. The cluster analysis result shows that at Euclidean distance of 5.5, 65 germplasms tested can be divided into seven categories, in which, the I, II and III categories contain 12 germplasms totally, 9 of them are germplasms with salt tolerance order of top 9, belonging to high salt tolerance germplasm; the IV, V and VI categories contain 31 germplasms totally, belonging to moderate salt tolerance germplasm; and the VII category contains 22 germplasms, 10 of them are germplasms with salt tolerance order of post 10, belonging to high salt sensitive germplasm. The comprehensive analysis result shows that differences in salt tolerance of 65 germplasms tested of *S. bicolor* are great, in which, Tianxuan 35, Rio, Ningtianxuan 10, Ningtianxuan 11, Tianxuan 107, Ningtianxuan 17, Tianxuan 148, Liaotian No. 8 and Yantianxuan 10, etc are high salt tolerance germplasms, which are suitable for growing in saline soil. Otherwise, order result of comprehensive score of salt tolerance is basically consistent with cluster analysis result, indicating that salt tolerance of *S. bicolor* germplasms can be preliminarily evaluated by ways of salt tolerance indexes at germination stage.

Key words: germplasm of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench; germination stage; salt tolerance index; principal component analysis; cluster analysis; order of salt tolerance

土壤中高浓度的盐分能够对作物造成渗透胁迫和离子毒害,从而影响作物的生长,致使作物严重减产^[1-2]。目前,全世界至少有20%耕地发生盐渍化,其中,中国的盐碱土总面积约 9.913×10^7 hm²,包括现代盐碱土面积约 3.693×10^6 hm²、残余盐碱土面积约 4.487×10^6 hm²和潜在盐碱土面积约 1.733×10^6 hm²,主要分布在东北、华北和西北的内陆地区以及长江以北的沿海地带^[3]。江苏省的沿海滩涂面积居全国首位,总面积达 6.87×10^5 hm²,并以近 1333 hm²·a⁻¹的速率增加,是江苏农业发展的重要后备资源^[4]。

高粱[*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench]是全球第五大重要作物^[5],为短日照C₄型植物,生长能力较强,具有粮、饲、酿造等多种用途,是干旱半干旱地区的主要作物^[6-7];此外,高粱的基因组较小(750 Mb),目前已经完成对其基因组的测序工作,成为继水稻(*Oryza sativa* Linn.)之后又一个重要的粮食和能源模式作物^[8]。高粱属于中度耐盐作物,但其品种间的耐盐性却存在较大差异^[9-11]。研究表明:发芽期和幼苗

期为植物对盐胁迫最敏感的时期^[12-13],植物在种子萌芽期的耐盐性可较准确地反映其他时期的耐盐性^[14-15];崔江慧等^[15]以发芽势、发芽率、侧根数、根长、1/2叶片萎蔫持续时间和整个叶片萎蔫持续时间作为高粱萌芽期耐盐性的评价指标进行了相关研究;王秀玲等^[16]则采用发芽指数、活力指数及芽和根的鲜质量作为鉴定指标进行耐盐性分析;Wang等^[13]采用QTL鉴定法对高粱的耐盐性进行了相关研究,在其7号染色体上发现1个与相对盐害率有关的QTL位点,并认为相对盐害率可以作为高粱的耐盐指标。

对植物的耐盐性进行分级是确定植物耐盐性的重要方法,然而关于耐盐性的分级方法较多。崔江慧等^[15]以高粱发芽盐害率、芽高盐害率、侧根数盐害率、根长盐害率和叶片萎蔫持续时间的得分值的总分值对高粱耐盐性进行排序,并据此筛选出耐盐性较强的高粱种质;孙璐等^[17]通过主成分分析、聚类分析和各品种表现的综合评定,对高粱品种进行耐盐性分类;张巧凤等^[18]则采用耐盐隶属函数综合值对小麦

(*Triticum aestivum* Linn.) 芽期和苗期的耐盐性进行评价。

为初步评估不同高粱种质的耐盐性,并简化耐盐性评价指标和缩短测定时间,作者对 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 65 个高粱种质的相对发芽率、相对发芽势、相对根长、相对苗高、相对根冠比和相对盐害率 6 个耐盐指标进行比较,并分析了这 6 个耐盐指标间的相关性;在此基础上,基于这 6 个耐盐指标对各高粱种质萌芽期的耐盐性进行了主成分分析和聚类分析,并据此对供试高粱种质的耐盐性综合得分进行排序,以期初步筛选出萌芽期耐盐性较高的高粱种质,并为适宜在江苏盐渍土壤中种植的耐盐高粱品种的改良和利用研究提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试的 65 个高粱种质的编号、名称及来源见表 1,所有种子均为 2013 年在南京地区种植后收获的种子。

1.2 方法

1.2.1 种子培养及胁迫处理 挑选籽粒饱满的种子,经体积分数 70% 乙醇浸泡 1 min 后再用质量体积分数 0.5% NaClO 溶液消毒 20 min,无菌水冲洗 3 次;将种子置于铺有双层滤纸的培养皿中,每皿 40 粒种子;在各培养皿中分别加入 7 mL 相应处理液,其中,

表 1 供试 65 个高粱种质的名称和来源

Table 1 Name and source of 65 germplasms tested of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench

编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	来源 ²⁾ Source ²⁾	编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	来源 ²⁾ Source ²⁾	编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	来源 ²⁾ Source ²⁾
1	甜选 97-1 Tianxuan 97-1	CAAS	23	甜杆茭 Tianganjiao	CAAS	45	JUAR-3	CAAS
2	甜高粱 Sweet sorghum	HAAS	24	甜高粱 Sweet sorghum	HAAS	46	甜选 41 Tianxuan 41	CAAS
3	盐甜选 1 Yantianxuan 1	JAAS	25	甜选 35 Tianxuan 35	CAAS	47	甜高粱 Sweet sorghum	CAAS
4	宁甜选 13 Ningtianxuan 13	OSPT	26	晋甜杂 2 号 Jintianza No. 2	SAAS	48	宁甜选 17 Ningtianxuan 17	CAAS
5	甜选 97-2 Tianxuan 97-2	CAAS	27	甜选 61 Tianxuan 61	CAAS	49	晋甜杂 3 号 Jintianza No. 3	SAAS
6	甜选 97-3 Tianxuan 97-3	CAAS	28	甜选 33 Tianxuan 33	CAAS	50	大力士 Dalishi	SLG
7	甘蔗芦稷 Ganzheluji	JAAS	29	甜选 90 Tianxuan 90	CAAS	51	Rio	JAAS
8	甜选 2 Tianxuan 2	CAAS	30	甜高粱 Sweet sorghum	CAAS	52	盐甜选 8 Yantianxuan 8	JAAS
9	甜选 29-1 Tianxuan 29-1	CAAS	31	甜选 29-3 Tianxuan 29-3	CAAS	53	盐甜选 10 Yantianxuan 10	JAAS
10	甘蔗芦稷 Ganzheluji	JAAS	32	宁甜选 14 Ningtianxuan 14	OSPT	54	甜选 33 Tianxuan 33	CAAS
11	盐甜选 5 Yantianxuan 5	JAAS	33	甜选 122 Tianxuan 122	CAAS	55	宁甜选 16 Ningtianxuan 16	OSPT
12	黑穗芦稷 Heisuiluji	JAAS	34	甘蔗芦稷 Ganzheluji	JAAS	56	甜选 107 Tianxuan 107	CAAS
13	甜选 29-2 Tianxuan 29-2	CAAS	35	盐甜选 7 Yantianxuan 7	JAAS	57	甜高粱 Sweet sorghum	CAAS
14	甜选 157 Tianxuan 157	CAAS	36	甜高粱 Sweet sorghum	HAAS	58	甜选 184 Tianxuan 184	CAAS
15	甜选 171 Tianxuan 171	CAAS	37	甘蔗芦稷 Ganzheluji	JAAS	59	JUAR-3	CAAS
16	小甜高粱 Small sweet sorghum	CAAS	38	甜选 38 Tianxuan 38	CAAS	60	BTX623	JAAS
17	BTX623	JAAS	39	甜芦粟 Tianlusu	CAAS	61	宁甜选 15 Ningtianxuan 15	OSPT
18	甜选 37 Tianxuan 37	CAAS	40	ROMA	CAAS	62	宁甜选 11 Ningtianxuan 11	OSPT
19	甜选 39 Tianxuan 39	CAAS	41	甜选 148 Tianxuan 148	CAAS	63	大甜秆 Datiangan	CAAS
20	甘蔗芦稷 Ganzheluji	JAAS	42	宁甜选 10 Ningtianxuan 10	OSPT	64	甜选 100 Tianxuan 100	CAAS
21	MN-2765	CAAS	43	甜选 83 Tianxuan 83	CAAS	65	甜选 116 Tianxuan 116	CAAS
22	甘芝甜高粱 Ganzhi sweet sorghum	CAAS	44	辽甜 8 号 Liaotian No. 8	LAAS			

¹⁾ 编号 1、5 和 6 的 3 个种质为甜选 97 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 1, 5 and 6 are three inbred lines of Tianxuan 97; 编号 9、13 和 31 的 3 个种质为甜选 29 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 9, 13 and 31 are three inbred lines of Tianxuan 29; 编号 2、24、30、36、47 和 57 的种质为甜高粱的 6 个种质 Germplasms of No. 2, 24, 30, 36, 47 and 57 are six germplasms of Sweet sorghum; 编号 7、10、20、34 和 37 的种质为甘蔗芦稷的 5 个种质 Germplasms of No. 7, 10, 20, 34 and 37 are five germplasms of Ganzheluji; 编号 17 和 60 的种质为 BTX623 的 2 个种质 Germplasms of No. 17 and 60 are two germplasms of BTX623; 编号 45 和 59 的种质为 JUAR-3 的 2 个种质 Germplasms of No. 45 and 59 are two germplasms of JUAR-3.

²⁾ CAAS: 中国农业科学院 Chinese Academy of Agricultural Sciences; HAAS: 黑龙江省农业科学院 Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences; JAAS: 江苏省农业科学院 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; OSPT: 项目组自选 Optional selection by the project team; SAAS: 山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences; LAAS: 辽宁省农业科学院 Liaoning Academy of Agricultural Sciences; SLG: 山东绿禾草业有限公司 Shandong Lühe Grass Co., Ltd.

对照组加入蒸馏水 7 mL,处理组加入 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液 7 mL。每个种质的对照组和处理组各 3 个培养皿,每皿视为 1 个重复。将培养皿用封口膜封闭,置于昼温 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、夜温 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光照时间 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 和光照度 1000 lx 的条件下培养。

1.2.2 种子萌发观察及耐盐指标计算 以胚根长度达到种子长度且胚芽长度达到种子长度的二分之一作为判定种子发芽的标准。每天统计发芽种子数,并根据第 3 天的统计结果,按照公式“发芽势=(前 3 天发芽的种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ ”和“相对发芽势=(处理组发芽势/对照组发芽势) $\times 100\%$ ”计算发芽势和相对发芽势。根据第 7 天的发芽统计结果,按照公式“发芽率=(前 7 天发芽的种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ ”、“相对发芽率=(处理组发芽率/对照组发芽率) $\times 100\%$ ”和“相对盐害率=[(对照组发芽率-处理组发芽率)/处理组发芽率] $\times 100\%$ ”计算发芽率、相对发芽率和相对盐害率。于发芽第 7 天测量萌发幼苗的根长和苗高,每皿测量 6 株,结果取平均值;基于测量结果,按照公式“相对根长=(处理组根长/对照组根长) $\times 100\%$ ”、“相对苗高=(处理组苗高/对照组苗高) $\times 100\%$ ”、“根冠比=(根长/苗高) $\times 100\%$ ”

和“相对根冠比=(处理组根冠比/对照组根冠比) $\times 100\%$ ”分别计算相对根长、相对苗高、根冠比和相对根冠比。

1.3 数据统计分析

用 EXCEL 2003 统计分析软件对相关数据进行整理和统计分析,用 SPSS 17.0 统计分析软件对 6 个耐盐指标进行相关性分析和主成分分析;基于欧氏距离、采用可变类平均法对各种质耐盐性进行聚类分析并绘制树状图。此外,对 6 个耐盐指标进行标准化转换,并计算各种质耐盐性的综合得分,据此对各种质的耐盐性进行排序。

2 结果和分析

2.1 供试高粱种质耐盐指标的比较

在 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 65 个高粱种质 6 个耐盐指标的比较结果见表 2。由表 2 可以看出:65 个高粱种质的相对发芽势为 $0.00\% \sim 140.56\%$;其中,甜选 97-1、盐甜选 5、黑穗芦稷和甜高粱(编号 57)的相对发芽势均为 0.00% ,Rio 的相对发芽势最高(为 140.56%),盐甜选 10 号的相对发芽势次之

表 2 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下供试 65 个高粱种质萌芽期 6 个耐盐指标的比较分析¹⁾

Table 2 Comparative analysis on six salt tolerance indexes at germination stage of 65 germplasm tested of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench under $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl stress¹⁾

编号 No.	种质名称 ²⁾ Germplasm name ²⁾	RGP/%	RGR/%	RSIR/%	RRL/%	RSH/%	RRSR/%
1	甜选 97-1 Tianxuan 97-1	0.00	52.22	15.93	10.45	26.79	39.54
2	甜高粱 Sweet sorghum	41.37	43.74	18.75	21.03	45.19	45.44
3	盐甜选 1 Yantianxuan 1	58.70	95.07	1.64	16.28	73.82	22.09
4	宁甜选 13 Ningtianxuan 13	26.65	51.25	16.25	33.57	41.04	81.17
5	甜选 97-2 Tianxuan 97-2	3.28	75.38	8.21	22.40	25.87	95.24
6	甜选 97-3 Tianxuan 97-3	30.92	87.31	4.23	22.04	28.25	77.91
7	甘蔗芦稷 Ganzheluji	31.38	73.31	8.90	34.00	49.75	73.37
8	甜选 2 Tianxuan 2	32.30	61.83	12.72	30.57	29.27	101.08
9	甜选 29-1 Tianxuan 29-1	63.75	67.56	10.81	36.92	54.15	70.75
10	甘蔗芦稷 Ganzheluji	34.41	79.06	6.98	40.90	57.87	72.63
11	盐甜选 5 Yantianxuan 5	0.00	65.10	11.63	29.99	24.71	122.89
12	黑穗芦稷 Heisuiluji	0.00	31.61	22.80	22.72	14.69	162.10
13	甜选 29-2 Tianxuan 29-2	5.41	58.42	13.86	35.48	28.47	128.76
14	甜选 157 Tianxuan 157	28.90	73.32	8.89	46.54	43.79	106.13
15	甜选 171 Tianxuan 171	7.34	78.03	7.32	42.86	35.22	122.01
16	小甜高粱 Small sweet sorghum	68.16	88.46	3.85	51.06	71.01	70.94
17	BTX623	65.62	97.74	0.75	36.56	39.54	93.52
18	甜选 37 Tianxuan 37	63.26	54.67	15.11	65.68	124.95	66.64
19	甜选 39 Tianxuan 39	50.03	81.99	6.00	43.33	40.89	107.48
20	甘蔗芦稷 Ganzheluji	36.09	40.01	20.00	49.36	36.30	136.33

续表2 Table 2 (Continued)

编号 No.	种质名称 ²⁾ Germplasm name ²⁾	RGP/%	RGR/%	RSIR/%	RRL/%	RSH/%	RRSR/%
21	MN-2765	93.94	90.72	3.09	42.75	52.52	81.38
22	甘芝甜高粱 Ganzhi sweet sorghum	76.71	76.09	7.97	53.00	56.16	93.83
23	甜杆茭 Tianganjiao	80.58	84.14	5.29	52.10	57.09	88.60
24	甜高粱 Sweet sorghum	85.66	75.74	8.09	50.00	44.50	109.31
25	甜选35 Tianxuan 35	107.04	98.96	0.35	64.54	121.27	52.88
26	晋甜杂2号 Jintianza No. 2	51.96	61.55	12.82	68.25	58.45	115.90
27	甜选61 Tianxuan 61	91.62	88.01	4.00	53.38	48.86	108.41
28	甜选33 Tianxuan 33	63.70	66.01	11.33	59.16	45.75	129.35
29	甜选90 Tianxuan 90	14.97	43.52	18.83	54.56	31.76	181.24
30	甜高粱 Sweet sorghum	11.01	50.19	16.60	61.86	35.44	170.17
31	甜选29-3 Tianxuan 29-3	77.69	77.46	7.51	47.32	31.35	145.86
32	宁甜选14 Ningtianxuan 14	6.74	91.07	2.98	45.22	28.10	172.27
33	甜选122 Tianxuan 122	7.91	73.82	8.73	30.45	16.01	210.85
34	甘蔗芦稷 Ganzheluji	45.21	81.90	6.03	54.56	35.05	155.33
35	盐甜选7 Yantianxuan 7	7.14	79.24	6.92	74.71	45.51	150.91
36	甜高粱 Sweet sorghum	81.94	76.89	7.70	50.24	30.84	163.06
37	甘蔗芦稷 Ganzheluji	23.27	82.83	5.72	57.94	31.98	181.35
38	甜选38 Tianxuan 38	60.17	91.68	2.77	58.94	36.05	160.63
39	甜芦粟 Tianlusu	48.08	124.81	-8.27	68.38	52.27	129.03
40	ROMA	33.89	66.01	11.33	48.93	25.80	209.64
41	甜选148 Tianxuan 148	91.42	88.08	3.97	79.44	73.15	134.30
42	宁甜选10 Ningtianxuan 10	101.42	97.82	0.73	91.56	91.90	102.53
43	甜选83 Tianxuan 83	91.81	106.22	-2.07	52.29	37.37	171.55
44	辽甜8号 Liaotian No. 8	82.97	93.64	2.12	86.38	69.96	131.53
45	JUAR-3	80.86	84.42	5.19	74.11	46.37	163.08
46	甜选41 Tianxuan 41	7.07	46.38	17.87	53.01	20.11	263.15
47	甜高粱 Sweet sorghum	11.79	56.16	14.61	85.20	42.59	207.44
48	宁甜选17 Ningtianxuan 17	106.61	109.34	-3.11	78.61	58.19	135.57
49	晋甜杂3号 Jintianza No. 3	74.96	92.82	2.39	83.54	47.72	157.84
50	大力士 Dalishi	100.49	123.75	-7.92	59.82	35.13	160.18
51	Rio	140.56	120.34	-6.78	67.03	49.43	136.13
52	盐甜选8 Yantianxuan 8	43.07	79.49	6.84	92.85	46.51	195.81
53	盐甜选10 Yantianxuan 10	123.86	110.31	-3.44	56.56	34.72	194.05
54	甜选33 Tianxuan 33	69.91	98.10	0.63	74.55	37.03	208.81
55	宁甜选16 Ningtianxuan 16	88.22	95.76	1.41	88.15	49.60	181.70
56	甜选107 Tianxuan 107	97.69	98.08	0.64	102.39	61.15	159.11
57	甜高粱 Sweet sorghum	0.00	108.99	-3.00	37.87	12.80	297.43
58	甜选184 Tianxuan 184	20.08	90.02	3.33	71.70	28.39	252.66
59	JUAR-3	55.77	67.34	10.89	95.94	45.12	215.71
60	BTX623	16.01	96.14	1.29	61.84	23.30	265.56
61	宁甜选15 Ningtianxuan 15	48.44	98.57	0.48	103.10	40.33	234.76
62	宁甜选11 Ningtianxuan 11	60.12	99.31	0.23	154.30	68.49	206.20
63	大甜秆 Datiangan	10.71	72.56	9.15	92.19	27.57	348.97
64	甜选100 Tianxuan 100	35.43	100.98	-0.33	83.86	25.52	380.84
65	甜选116 Tianxuan 116	79.86	74.56	8.48	130.37	38.08	344.88

¹⁾ RGP: 相对发芽势 Relative germination potential; RGR: 相对发芽率 Relative germination rate; RSIR: 相对盐害率 Relative salt-injury rate; RRL: 相对根长 Relative root length; RSH: 相对苗高 Relative seedling height; RRSR: 相对根冠比 Relative root-shoot ratio.

²⁾ 编号1、5和6的3个种质为甜选97的3个自交系 Three germplasms of No. 1, 5 and 6 are three inbred lines of Tianxuan 97; 编号9、13和31的3个种质为甜选29的3个自交系 Three germplasms of No. 9, 13 and 31 are three inbred lines of Tianxuan 29; 编号2、24、30、36、47和57的种质为甜高粱的6个种质 Germplasms of No. 2, 24, 30, 36, 47 and 57 are six germplasms of Sweet sorghum; 编号7、10、20、34和37的种质为甘蔗芦稷的5个种质 Germplasms of No. 7, 10, 20, 34 and 37 are five germplasms of Ganzheluji; 编号17和60的种质为BTX623的2个种质 Germplasms of No. 17 and 60 are two germplasms of BTX623; 编号45和59的种质为JUAR-3的2个种质 Germplasms of No. 45 and 59 are two germplasms of JUAR-3.

(为123.86%),甜选35、宁甜选10、宁甜选17和大力士的相对发芽势也较高(均高于100.00%)。65个高粱种质的相对发芽率为31.61%~124.81%;其中,黑穗芦稷最低,甜芦粟最高,甜选83、宁甜选17、大力士、Rio、盐甜选10、甜高粱(编号57)和甜选100也较高(均高于100.00%)。65个高粱种质的相对盐害率均较低,甚至出现了负值,其变化范围为-8.27%~22.80%;其中,黑穗芦稷最高,甜芦粟最低,甜选83、宁甜选17、大力士、Rio、盐甜选10、甜高粱(编号57)和甜选100也较低。65个高粱种质的相对根长为10.45%~154.30%;其中,甜选97-1最低,宁甜选11最高,甜选107、宁甜选15和甜选116也较高。65个高粱种质的相对苗高为12.80%~124.95%;其中,甜高粱(编号57)最低,甜选37最高,甜选35次之。65个高粱种质的相对根冠比为22.09%~380.84%;其中,盐甜选1最低,甜选100最高;并且,在供试高粱种质中,相对根冠比高于100.00%的种质约占75%。

2.2 供试高粱种质耐盐指标的相关性分析

采用双变量相关性分析法对 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 胁迫条件下供试高粱种质6个耐盐指标的相关性进行分析,结果见表3。结果表明:供试高粱种质的相对发芽势与相对发芽率、相对根长和相对苗高均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.562、0.351及0.541;而相对发芽势与相对盐害率呈极显著负相关,相关系数为-0.562。相对发芽率与相对根长呈极显著正相关,相关系数为0.327;而与相对盐害率呈极显著负相关,相关系数为-1.000。相对盐害率与相对根长呈极显著负相关,相关系数为-0.327;相对根长与相对苗高和相对根冠比分别呈显著($P<0.05$)和极显著正相关,相关系数分别为0.299和0.540;相对苗高与相对根冠比呈极显著负相关,相关系数为-0.469。另外,相对根冠比与相对发芽势、相对发芽率和相对盐害率的相关性均较低,并且相对根长与相对发芽率和相对盐害率的相关性也较低。

表3 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 胁迫条件下供试高粱种质萌芽期6个耐盐指标的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient among six salt tolerance indexes at germination stage of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench germplasm tested under $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ stress¹⁾

指标 Index	各指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes					
	RGP	RGR	RSIR	RRL	RSH	RRSR
RGP	1.000					
RGR	0.562**	1.000				
RSIR	-0.562**	-1.000**	1.000			
RRL	0.351**	0.327**	-0.327**	1.000		
RSH	0.541**	0.187	-0.187	0.299*	1.000	
RRSR	-0.193	0.137	-0.137	0.540**	-0.469**	1.000

¹⁾ RGP: 相对发芽势 Relative germination potential; RGR: 相对发芽率 Relative germination rate; RSIR: 相对盐害率 Relative salt-injury rate; RRL: 相对根长 Relative root length; RSH: 相对苗高 Relative seedling height; RRSR: 相对根冠比 Relative root-shoot ratio. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

2.3 供试高粱种质耐盐指标的主成分分析

根据上述相关性分析结果,剔除与相对发芽率和相对发芽势相关性较低的相对根冠比这一指标,依据其他5个耐盐指标对高粱种质的耐盐性进行主成分分析,结果见表4。结果表明:第1主成分的贡献率为47.1436%,第2主成分的贡献率为27.9777%,前2个主成分的累计贡献率达75.1213%,基本反映了供试耐盐指标的绝大部分信息,因此,可将这2个主成分用于高粱耐盐性分析。此外,在第1主成分中,相对发芽势、相对发芽率和相对盐害率的载荷均较高,分别为0.810、0.892和-0.892,表明在第1主成分中这3个指标为主要作用因子;而在第2主成分中

相对苗高的载荷最高,为0.745,表明第2主成分中相对苗高为主要作用因子。

2.4 供试高粱种质耐盐性的综合得分及排序

根据上述主成分分析结果获得的第1主成分的拟合方程为 $F_1=0.287X_1+0.316X_2-0.316X_3+0.198X_4+0.182X_5$,获得的第2主成分的拟合方程为 $F_2=-0.239X_1-0.394X_2+0.394X_3+0.286X_4+0.678X_5$,据此获得的高粱各种质综合得分的计算公式为 $F=0.471436F_1+0.279777F_2$ 。

根据上述公式计算获得供试65个高粱种质耐盐性的综合得分(F)及耐盐性排序结果,详见表5。由表5可以看出:在供试的65个高粱种质中,甜选35

表4 供试高粱种质萌芽期耐盐指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis on salt tolerance indexes at germination stage of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench germplasms tested

主成分 Principal component	各指标的载荷 ¹⁾ Load of different indexes ¹⁾					特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	RGP	RGR	RSIR	RRL	RSH			
1	0.810	0.892	-0.892	0.560	0.515	2.828 6	47.143 6	47.143 6
2	0.263	-0.433	0.433	0.315	0.745	1.678 7	27.977 7	75.121 3

¹⁾RGP: 相对发芽势 Relative germination potential; RGR: 相对发芽率 Relative germination rate; RSIR: 相对盐害率 Relative salt-injury rate; RRL: 相对根长 Relative root length; RSH: 相对苗高 Relative seedling height.

表5 供试65个高粱种质萌芽期耐盐性的综合得分(F)及排序结果

Table 5 Comprehensive score (F) and order result of salt tolerance at germination stage of 65 germplasms tested of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench

编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	F	排序 Order	编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	F	排序 Order	编号 No.	种质名称 ¹⁾ Germplasm name ¹⁾	F	排序 Order
1	甜选 97-1 Tianxuan 97-1	11.22	64	23	甜秆茭 Tianganjiao	43.84	22	45	JUAR-3	45.18	19
2	甜高粱 Sweet sorghum	22.56	54	24	甜高粱 Sweet sorghum	40.71	25	46	甜选 41 Tianxuan 41	16.53	62
3	盐甜选 1 Yantianxuan 1	39.42	28	25	甜选 35 Tianxuan 35	65.11	1	47	甜高粱 Sweet sorghum	27.99	47
4	宁甜选 13 Ningtianxuan 13	22.13	56	26	晋甜杂 2 号 Jintianza No. 2	37.04	32	48	宁甜选 17 Ningtianxuan 17	57.28	6
5	甜选 97-2 Tianxuan 97-2	17.47	59	27	甜选 61 Tianxuan 61	24.62	50	49	晋甜杂 3 号 Jintianza No. 3	47.15	14
6	甜选 97-3 Tianxuan 97-3	25.22	49	28	甜选 33 Tianxuan 33	43.83	23	50	大力士 Dalishi	51.65	10
7	甘蔗芦稷 Ganzheluji	28.56	46	29	甜选 90 Tianxuan 90	19.91	58	51	Rio	62.38	2
8	甜选 2 Tianxuan 2	22.46	55	30	甜高粱 Sweet sorghum	22.07	57	52	盐甜选 8 Yantianxuan 8	39.87	27
9	甜选 29-1 Tianxuan 29-1	34.97	36	31	甜选 29-3 Tianxuan 29-3	36.68	34	53	盐甜选 10 Yantianxuan 10	53.20	9
10	甘蔗芦稷 Ganzheluji	32.65	39	32	宁甜选 14 Ningtianxuan 14	45.29	18	54	甜选 33 Tianxuan 33	36.39	35
11	盐甜选 5 Yantianxuan 5	15.95	63	33	甜选 122 Tianxuan 122	17.45	60	55	宁甜选 16 Ningtianxuan 16	28.83	44
12	黑穗芦稷 Heisuiluji	7.18	65	34	甘蔗芦稷 Ganzheluji	33.00	38	56	甜选 107 Tianxuan 107	57.63	5
13	甜选 29-2 Tianxuan 29-2	17.30	61	35	盐甜选 7 Yantianxuan 7	30.15	41	57	甜高粱 Sweet sorghum	22.58	53
14	甜选 157 Tianxuan 157	51.22	11	36	甜高粱 Sweet sorghum	37.73	31	58	甜选 184 Tianxuan 184	30.91	40
15	甜选 171 Tianxuan 171	23.42	51	37	甘蔗芦稷 Ganzheluji	28.91	43	59	JUAR-3	40.37	26
16	小甜高粱 Small sweet sorghum	44.63	20	38	甜选 38 Tianxuan 38	38.39	29	60	BTX623	28.82	45
17	BTX623	37.86	30	39	甜芦粟 Tianlusu	46.24	15	61	宁甜选 15 Ningtianxuan 15	44.60	21
18	甜选 37 Tianxuan 37	49.85	13	40	ROMA	25.53	48	62	宁甜选 11 Ningtianxuan 11	59.62	4
19	甜选 39 Tianxuan 39	33.37	37	41	甜选 148 Tianxuan 148	53.55	7	63	大甜秆 Datangan	28.91	42
20	甘蔗芦稷 Ganzheluji	23.40	52	42	宁甜选 10 Ningtianxuan 10	62.38	3	64	甜选 100 Tianxuan 100	37.00	33
21	MN-2765	45.33	17	43	甜选 83 Tianxuan 83	46.24	16	65	甜选 116 Tianxuan 116	49.96	12
22	甘芝甜高粱 Ganzhi sweet sorghum	41.65	24	44	辽甜 8 号 Liaotian No. 8	53.33	8				

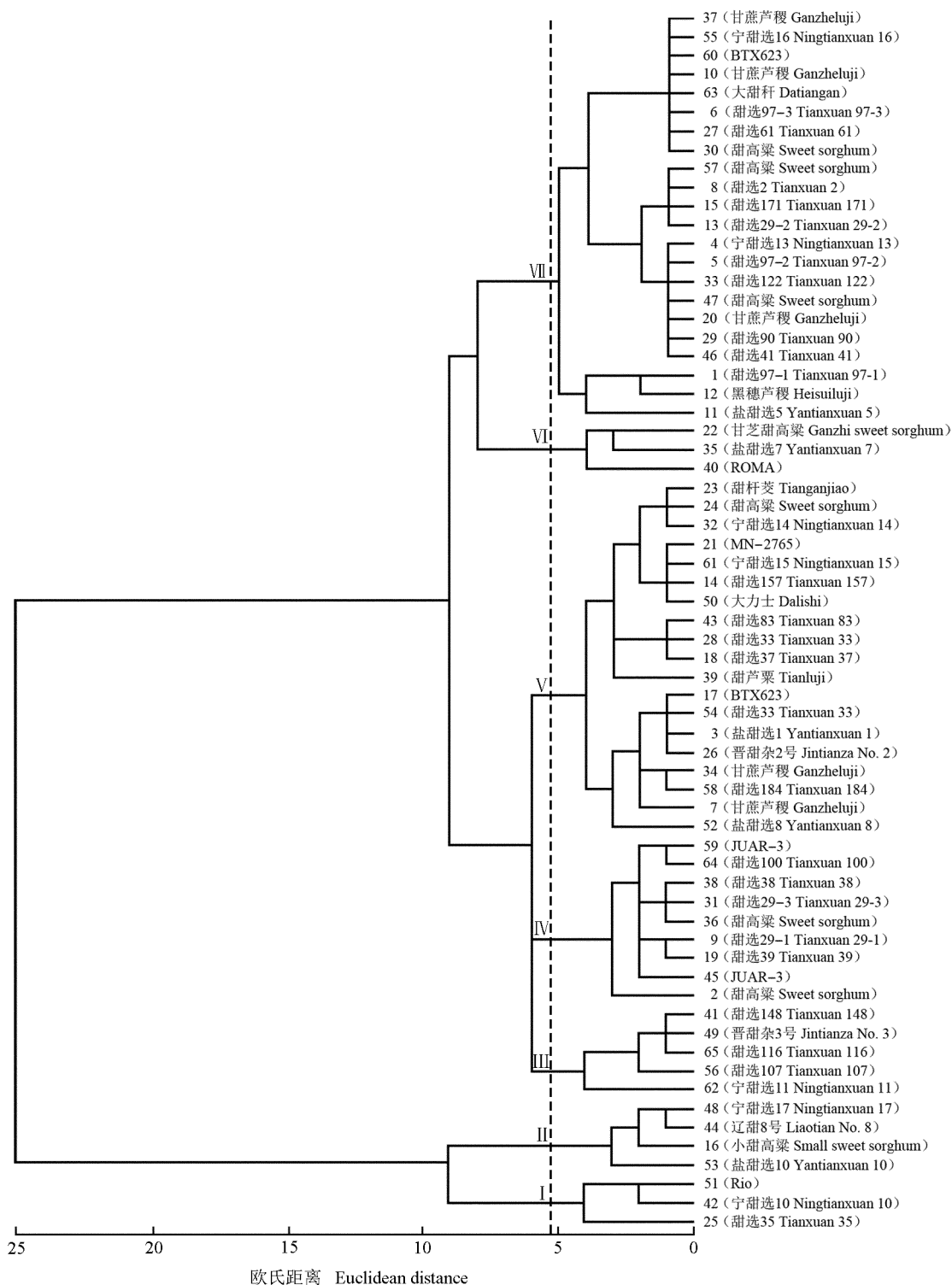
¹⁾编号 1、5 和 6 的 3 个种质为甜选 97 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 1, 5 and 6 are three inbred lines of Tianxuan 97; 编号 9、13 和 31 的 3 个种质为甜选 29 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 9, 13 and 31 are three inbred lines of Tianxuan 29; 编号 2、24、30、36、47 和 57 的种质为甜高粱的 6 个种质 Germplasms of No. 2, 24, 30, 36, 47 and 57 are six germplasms of Sweet sorghum; 编号 7、10、20、34 和 37 的种质为甘蔗芦稷的 5 个种质 Germplasms of No. 7, 10, 20, 34 and 37 are five germplasms of Ganzheluji; 编号 17 和 60 的种质为 BTX623 的 2 个种质 Germplasms of No. 17 and 60 are two germplasms of BTX623; 编号 45 和 59 的种质为 JUAR-3 的 2 个种质 Germplasms of No. 45 and 59 are two germplasms of JUAR-3.

耐盐性的综合得分最高(65.11),其耐盐性排序第一;黑穗芦稷耐盐性的综合得分最低(7.18),其耐盐性排序最末。

2.5 供试高粱种质耐盐性的聚类分析

基于欧氏距离,采用可变类平均法对供试 65 个高粱种质的耐盐性进行聚类分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,在欧氏距离 5.5 处,供试 65 个高粱种质被分为 7 类。第 I、第 II 和第 III 类共包含 12 个种质,其中耐盐性排序前 9 位的种质均包含在内,包括甜选 35、Rio、宁甜选 10、宁甜选 11、甜选 107、宁甜选 17、甜选 148、辽甜 8 号和盐甜选 10 等,它们的耐盐指标数

值均较高,其余 3 个种质的耐盐性排序也在前 20 位内,因此,可初步认定这 3 类种质为高耐盐种质。第 IV、第 V 和第 VI 类共包含 31 个种质,包括 BTX623、甜高粱(编号 36)、晋甜杂 2 号及甜选 100 等,它们的耐盐性排序均位于中间,其耐盐指标数值也比较居中,属于中等耐盐种质。第 VII 类共包含 22 个种质,耐盐性排序后 10 位的种质均包含在内,包括宁甜选 13、甜高粱(编号 30)、甜选 90、甜选 97-2、甜选 122、甜选 29-2、甜选 41、盐甜选 5、甜选 97-1 及黑穗芦稷等,它们的耐盐指标数值均偏低,因此,初步认定这类种质为高盐敏感种质。



编号 1、5 和 6 的 3 个种质为甜选 97 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 1, 5 and 6 are three inbred lines of Tianxuan 97; 编号 9、13 和 31 的 3 个种质为甜选 29 的 3 个自交系 Three germplasms of No. 9, 13 and 31 are three inbred lines of Tianxuan 29; 编号 2、24、30、36、47 和 57 的种质为甜高粱的 6 个种质 Germplasms of No. 2, 24, 30, 36, 47 and 57 are six germplasms of Sweet sorghum; 编号 7、10、20、34 和 37 的种质为甘蔗芦稷的 5 个种质 Germplasms of No. 7, 10, 20, 34 and 37 are five germplasms of Ganzheluji; 编号 17 和 60 的种质为 BTX623 的 2 个种质 Germplasms of No. 17 and 60 are two germplasms of BTX623; 编号 45 和 59 的种质为 JUAR-3 的 2 个种质 Germplasms of No. 45 and 59 are two germplasms of JUAR-3.

图 1 供试 65 个高粱种质萌芽期耐盐性的聚类分析结果
 Fig. 1 Result of cluster analysis of salt resistance at germination stage of 65 germplasms tested of *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench

3 讨论和结论

根长和苗壮是植物具有较高耐盐性的形态特征。本研究中,高粱的相对根冠比与其相对发芽势和相对发芽率的相关性均较低,故不宜用相对根冠比进行主成分分析;但由于相对根冠比是具有品种特异性的特征根,因此可将其用于聚类分析。聚类分析结果表明:第 I、第 II 和第 III 类共包含 12 个种质,其中有 9 个种质的耐盐性排序位于前 9 位,被初步确认为高耐盐种质;耐盐性排序后 10 位的种质均在第 VII 类中,被初步确认为高盐敏感种质。本研究中,聚类结果与耐盐指标和耐盐性排序结果基本吻合,说明主成分分析和聚类分析中对相对根冠比的处理较为合理。

与孙璐等^[17]的研究相比,本研究增加了相对盐害率和相对根冠比 2 个指标,但并未测定根和叶片的干质量和鲜质量以及活力指数,相对降低了萌芽期耐盐性筛选的工作量。聚类结果显示甜选 97 的 3 个自交系均聚在第 VII 类中,它们的耐盐性均较低,说明通过萌芽期 6 个耐盐指标对高粱种质的耐盐性进行排序及聚类分析,获得的结果具有一定的可靠性,可用于大量高粱种质耐盐性的初步筛选。

此外,甜选 29 的 2 个自交系(编号 9 和 31)的耐盐性居中,其耐盐性排序分别为 36 和 34,在聚类图中被划分在第 IV 类中;而甜选 29 编号 13 的自交系的耐盐性较弱,其耐盐性排序为 61,在聚类图中被划分在第 VII 类中,并且该种质具晚熟特性,相对发芽势也较低(仅为 5.41%),属于盐敏感种质。这一研究结果说明高粱萌芽期的耐盐性鉴定对种子的成熟度和纯度均有很高的要求,只有供试种子饱满、健康并在同一生态环境和年份收获和储存才能确保其萌芽期耐盐性的比较结果具有可靠性。

综上所述,通过对供试的 65 个高粱种质的相对发芽势、相对发芽率、相对盐害率、相对根长、相对苗高和相对根冠比 6 个耐盐指标进行比较、相关性分析、主成分分析和聚类分析,可以快捷有效地对供试高粱种质的耐盐性进行初步鉴定。研究结果显示:供试 65 个高粱种质萌芽期的耐盐性存在很大差异,其中,甜选 35、Rio、宁甜选 10、宁甜选 11、甜选 107、宁甜选 17、甜选 148、辽甜 8 号及盐甜选 10 等为高耐盐种质,适合在盐渍土壤中生长。

致谢:南京农业大学卫陪陪博士在数据测定过程中提供了一定的帮助,辽宁省农业科学院高粱研究所的同仁在软件应用上也给予了大力帮助,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6: 66-71.
- [2] DEINLEIN U, STEPHAN A B, HORIE T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19: 371-379.
- [3] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455.
- [4] 刘友兆,吴春林,马欣. 江苏滩涂资源开发利用研究[J]. 中国农业资源与区划, 2004, 25(3): 6-9.
- [5] DOGGETT H. Sorghum[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2008: 70-117.
- [6] NAWAZ K, IQRA A T, HUSSAIN K, et al. Induction of salt tolerance in two cultivars of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) by exogenous application of proline at seedling stage[J]. World Applied Sciences Journal, 2010, 10: 93-99.
- [7] BOURSIER P, LÄUCHLI A. Growth responses and mineral nutrient relations of salt stressed sorghum[J]. Crop Science, 1990, 30: 1226-1233.
- [8] PATERSON A H, BOWERS J E, RÉMY B, et al. The *Sorghum bicolor* genome and the diversification of grasses[J]. Nature, 2009, 457: 551-556.
- [9] OMARI R E L, NHIRI M. Adaptive response to salt stress in sorghum (*Sorghum bicolor*) [J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2015, 15: 1351-1360.
- [10] PATHAMANABHAN G, RAO J S. Note on potassium as a possible index for screening sorghum varieties for salt tolerance[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1976, 46: 392-394.
- [11] 张华文,秦岭,王海莲,等. 不同甜高粱品种(系)萌芽期耐盐性研究[J]. 山东农业科学, 2012(9): 24-26.
- [12] 孙小芳,郑青松,刘友良. 盐胁迫下不同基因型棉花萌发生长和离子吸收特性[J]. 棉花学报, 2001, 13(3): 134-137.
- [13] WANG H L, CHEN G L, ZHANG H W, et al. Identification of QTLs for salt tolerance at germination and seedling stage of *Sorghum bicolor* L. Moench[J]. Euphytica, 2014, 196: 117-127.
- [14] 王广印,周秀梅,张建伟,等. 不同黄瓜品种种子萌芽期的耐盐性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2004, 5(3): 299-303.
- [15] 崔江慧,谢登磊,常金华. 高粱材料耐盐性综合评价方法的初步建立与验证[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(1): 35-41.
- [16] 王秀玲,程序,李桂英. 甜高粱耐盐材料的筛选及芽苗期耐盐性相关分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1239-1244.
- [17] 孙璐,周宇飞,汪澈,等. 高粱品种萌芽期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714-1722.
- [18] 张巧凤,陈宗金,吴纪中,等. 小麦种质芽期和苗期的耐盐性鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(4): 620-626.

(责任编辑:佟金凤)