

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2024.02.04

5个黍子育成品种耐盐性鉴定

郭娟¹, 王昕¹, 曹晓宁², 陈凌², Santra Dipak K³, 王瑞云^{1,2}, 乔治军²

(1. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学农业基因资源研究中心/农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室/杂粮种质资源发掘与遗传改良山西省重点实验室, 山西 太原 030031; 3. 内布拉斯加大学 林肯分校农艺系小宗粮豆研究与推广中心, 美国 内布拉斯加州 69361)

摘要: 土壤盐渍化会影响农业可持续发展, 造成生态失去平衡。培育耐盐植物是经济效益最大化和土壤改良效果最优的重要环节。研究旨在为黍子耐盐新品种选育提供鉴定指标, 为盐碱地黍子品种的种植提供材料。以5个黍子育成品种为试验材料, 基于不同浓度的中性混合盐(NaCl和Na₂SO₄), 采用培养皿发芽方法, 从芽鲜质量(SFW)、芽长(BL)、发芽指数(GI)、发芽势(GP)、根鲜质量(RFW)、发芽率(GR)、根长(RL)、活力指数(VI)等8项农艺性状评估材料的耐盐程度。通过分析不同盐浓度下这5个黍子育成品种发芽势和发芽率的差异, 结果发现, 160 mmol/L为进行盐处理的最适浓度。在该浓度下, 5份材料的8项指标变异丰富, 变异系数分别为168.41%、48.12%、23.13%、15.11%、32.94%、18.90%、64.37%和123.53%。对8个指标进行相关性分析、主成分分析及综合评价D值综合评价, 结果发现, SFW、BL、GI、GP和RFW等5项指标可作为黍子耐盐性评价的参考指标; 5份材料耐盐性从强到弱依次为晋黍7号、龙黍19号、宁糜13号、齐黍1号和龙黍9号。

关键词: 黍子; 育成品种; 耐盐性; 农艺性状

中图分类号: S516 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)02-0021-07

Salt Tolerance Identification of 5 Bred Varieties of Broomcorn Millet

GUO Juan¹, WANG Xin¹, CAO Xiaoning², CHEN Ling², SANTRA Dipak K.³,
WANG Ruiyun^{1,2}, QIAO Zhijun²

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyu 030801, China; 2. Center for Agricultural Genetic Resources Research, Shanxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Taiyuan 030031, China; 3. Panhandle Research and Extension Center, Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska Lincoln, Scottsbluff 69361, USA)

Abstract: Soil salinization affects the sustainable development of agriculture and causes ecological imbalance. Cultivation of salt-tolerant plants is an important step to maximize economic benefits and optimize soil improvement. In order to provide identification index for breeding for new varieties of salt-tolerant broomcorn millet, and provide materials for the cultivation of broomcorn varieties in aine-alkali soil, in this study, five bred varieties of broomcorn millet were used as the test material, based on different concentrations of neutral salt mixture(NaCl and Na₂SO₄), using the dish germination method, eight agronomic traits including bud fresh weight(SFW), bud length(BL), germination index(GI), germination potential(GP), root fresh weight(RFW), germination rate(GR), root length(RL), and activity index(VI) were used to evaluate the salt tolerance of the materials. By analyzing the difference in germination potential and germination rate of the 5 broomcorn millet varieties under different salt concentrations, the results showed that 160 mmol/L was the optimal concentration for salt treatment. At this concentration, the variation of the eight indexes of the five materials was abundant, and the coefficient of variation was 168.41%, 48.12%, 23.13%, 15.11%, 32.94%, 18.90%, 64.37%, and 123.53%, respectively. Correlation analysis, principal component analysis, and comprehensive evaluation of D value of the eight indexes found that 5 indexes including SFW, BL, GI, GP, and RFW could be taken as the reference indexes of salt tolerance evaluation. The salt tolerance of the five materials from strong to weak was: Jinshu 7, Longshu 19, Ningmi 13, Qishu 1, and Longshu 9.

Key words: broomcorn millet; bred varieties; salt tolerance; agronomic trait

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271791); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-14.5-A16); 山西省现代农业产业技术体系建设(杂粮)项目(2022-03); 山西省重点研发项目(2022ZDYF110)

作者简介: 郭娟(1999-), 女, 山西吕梁人, 在读硕士, 研究方向: 糜子分子育种。

通信作者: 王瑞云(1969-), 女, 山西平定人, 教授, 博士, 主要从事糜子分子育种研究工作。

土壤盐渍化已成为影响生态环境和农业发展的因素之一,且随着人口的不断增长、土地利用的持续缩减,以及森林、草地、湿地等的大规模开发利用,对原有的植被和土壤结构造成了严重的损害,加深了土地盐碱化,极大地制约了农业的可持续发展^[1-3]。而次生盐渍化是我国水土流失的主要表现,因不合理的灌溉、过度的砍伐、过度施用肥料,造成了盐田的面积和品质迅速改变,盐碱地含盐量偏高,养分和有机质含量偏低,造成了土壤的退化^[4]。在植物生长过程中,盐碱胁迫是一种非常重要的非生物胁迫因素,其结果是:渗透胁迫、活性氧胁迫、离子毒性等对作物生长造成一定的影响,造成作物产量下降,甚至造成植株死亡^[5-6]。相关研究表明,耐盐性作物的栽培是开发利用盐渍化土壤的不二之选^[7]。因此,开展筛选和培育耐盐性较强的作物,对盐渍土壤的开发利用和农业可持续发展具有重要的意义。

黍子作为小杂粮,耐旱耐瘠薄,生长周期较短、种植面积不大,但因其营养价值高,具有平衡膳食的作用,在国内外饮食文化中占据重要地位^[8-10]。黍子在我国分布范围很广,播种面积 53.3 万 hm^2 左右,主要栽种于内蒙古、甘肃、陕西、黑龙江、吉林、河北、山西、宁夏等省(自治区),是我国近年来栽培面积和产量均居世界第 2 位的小杂粮食物^[11-14]。我国盐渍地总面积约 1 亿 hm^2 ,居世界第 3,多为中性盐渍化(NaCl 和 Na_2SO_4)和碱性(NaHCO_3 、 Na_2CO_3 等)土壤,极大阻碍了农业生产。随着全球气候变暖,在我国旱作生态农业建设中,黍子的作用越来越明显,从芒种前后到大暑前都能播种,不仅避免了春旱,而且还能保持幼苗的丰产,是盐碱地和沙漠改良的重要农作物^[15-16]。

盐胁迫对植株从种子萌发至成熟的各时期都有一定的影响,而且随着作物生长和生育周期的变化也有一定的差异^[17-18]。耐盐性直接影响植株的出苗情况进而决定作物产量^[19-21]。目前,关于黍子的研究主要集中在抗旱性、抗倒性、抗冷性等方面,而对耐盐性方面的研究较少^[22-23]。袁雨豪等^[24]研究了 100 份黍子资源,用 1% 氯化钠溶液进行耐盐性分析,发现发芽势、发芽率和发芽指数可作为判断芽期耐盐性能力的重要指标,并利用该指标筛选出 17 份高度耐盐、71 份耐盐、14 份盐敏感和 4 份高度敏感材料。刘敏轩等^[25]以 16 份黍子资源为材料,分别在不同中性混合盐胁迫下进行了耐盐性试验,发现其相对发芽率和复萌率都有所降低,随着混合盐

浓度的增大,其对种子萌发抑制效应也随之增强,并且在高浓度混合盐的胁迫下,其损伤一般具有不可逆性。LIU 等^[26]对 195 份黍子品种耐盐性鉴定中,为避免种子萌发不良和盐胁迫对早期营养生长的影响相混淆,剔除 40 份发芽率低于 80% 的品种,155 份材料根据盐害指数分别筛选出 39 份高度耐盐、22 份耐盐、26 份中度耐盐和 47 份中度敏盐和敏盐品种。马洪驰等^[27]对 39 个黍子品种开展的耐碱性混合盐(NaHCO_3 和 Na_2CO_3)鉴定中,筛选出 1 份高度耐盐碱、1 份耐盐碱性、15 份中等耐盐碱、17 份敏感盐碱和 5 份高度敏感盐碱品种。前人对黍子耐盐性的研究主要集中于单盐(NaCl)和碱性混合盐(NaHCO_3 和 Na_2CO_3),对中性混合盐的研究甚少。种子萌发与早期幼苗生长阶段是作物能否在盐碱胁迫下进行生长最为关键的时期,芽期耐盐性的强弱影响出苗好坏,而苗期耐盐性则影响成苗多少,很多研究显示,芽期耐盐性与苗期耐盐性并没有显著的相关性。通过研究黍子在中性混合盐胁迫下的生理变化机制,不仅有助于挖掘优良耐盐黍子资源,而且有望为黍子育种与合理种植提供理论指导。

因此,本研究采用中性混合盐对 5 个黍子品种的耐盐性进行了鉴定,从中筛选出具有较高抗盐性的优良品种,为盐碱地改良提供种植材料。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验选用 5 个黍子育成品种,包括晋黍 7 号(山西)、宁糜 13 号(宁夏)、齐黍 1 号(黑龙江齐齐哈尔)、龙黍 9 号、龙黍 19 号(黑龙江)等,均来自中性盐渍化(NaCl 和 Na_2SO_4)和碱性(NaHCO_3 、 Na_2CO_3 等)土壤地区。

1.2 试验方法

采用 PERCIVAL-AR36L3 型人工气候箱培养供试材料,昼/夜温度 25 $^{\circ}\text{C}$,湿度 65%,光照/暗 16 h/8 h,光照强度 12 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。选择 30 颗籽粒饱满的种子,用 1% 的次氯酸钠溶液消毒后,用无菌水多次冲洗至干净,放于铺有双层过滤纸的培养皿中,分别加入 0、40、80、120、160 和 200 mmol/L 的混合中性盐(NaCl 和 Na_2SO_4 的摩尔浓度比为 1:1)溶液,每个处理重复 3 次。

1.3 测定项目及方法

培养 4~7 d,统计发芽数,第 7 天开始从每个培养皿中取出 5 株样品,测定其芽长、根长、芽鲜质

量、根鲜质量。

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第4天发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{第10天发芽种数}}{\text{供试种数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum Gt/Dt \quad (3)$$

式中, Gt为第t日的发芽种子个数; Dt为相应发芽天数。

$$\text{活力指数(VI)} = \frac{\text{发芽指数(GI)}}{\text{胚根鲜质量}} \quad (4)$$

$$\text{相对值} = \frac{\text{各指标处理值}}{\text{对照值}} \quad (5)$$

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2019、IBM SPSS Statistics 27 和 Origin 2021 对所有数据进行整理与统计分析, 用 Microsoft Excel 2019 制表; 用 Origin 2021 制相关系数热图。芽期耐性指标相对值采用隶属函数值的方法计算其隶属值。

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad i=1, 2, 3 \dots$$

$$m; j=1, 2, 3 \dots n \quad (6)$$

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

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times W_j] \quad j=1, 2, 3 \dots n \quad (8)$$

式(6)中, X_{ij} 表示第*i*份材料第*j*个指标的实测值, $X_{j\max}$ 为第*j*个指标的最大值, $X_{j\min}$ 为第*j*个指标的最小值; 式(7)中, W_j 表示第*j*个综合指标在所有综合指标中的重要程度及权重; P_j 为各品种第*j*个综合指标的贡献率; 式(8)中, D 表示在混合盐胁迫下各品种耐盐能力的综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 筛选黍子耐盐性的最适浓度

为筛选出不同黍子材料芽期耐盐浓度, 对5个材料在不同盐浓度下的发芽势和发芽率进行了检测(表1、2)。从表1、2可以看出, 在不同浓度的中性混合盐胁迫下, 各品种的发芽势、发芽率都存在一定差异。

表1 5份材料在不同盐浓度胁迫下的发芽势
Tab.1 Germination potential of 5 materials under different salt concentration stress %

材料 Material	盐浓度/(mmol/L) Salt concentration					
	0	40	80	120	160	200
晋黍7号 Jinshu 7	81.11±10.72aA	73.33±8.82aA	58.89±8.39abAB	41.11±9.62bB	7.78±8.39cC	0.00±0.00cC
宁糜13号 Ningmei 13	97.78±1.92aA	88.89±7.70aAB	64.44±10.72bB	26.67±15.28cC	0.00±0.00dC	0.00±0.00dC
齐黍1号 Qishu 1	74.44±13.47aA	51.11±6.94bAB	28.89±5.09cBC	13.33±6.67cdCD	1.11±1.92dD	0.00±0.00dD
龙黍9号 Longshu 9	80.00±5.77aA	61.11±5.09bAB	44.44±10.18cB	13.33±6.67dC	0.00±0.00dC	0.00±0.00dC
龙黍19号 Longshu 19	96.67±5.77aA	92.22±1.92aA	70.00±5.77bB	22.22±6.94cC	0.00±0.00dD	0.00±0.00dD

注: 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示处理间差异极显著($P < 0.01$)。表2同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference ($P < 0.05$) between treatments, different uppercase letters indicated extremely significant difference ($P < 0.01$) between treatments. The same as Tab.2.

表2 5份材料在不同盐浓度胁迫下的发芽率
Tab.2 Germination rate of 5 materials under different salt concentration stress %

材料 Material	盐浓度/(mmol/L) Salt concentration					
	0	40	80	120	160	200
晋黍7号 Jinshu 7	85.56±6.94aA	82.22±6.94abA	78.89±10.72abA	83.33±14.53abA	57.78±10.18bA	8.89±1.92cB
宁糜13号 Ningmei 13	97.78±1.92aA	94.44±1.92aA	97.78±1.92aA	88.89±6.94aA	44.44±12.62bB	0.00±0.00cC
齐黍1号 Qishu 1	83.33±5.77aA	62.22±13.47abA	72.22±8.39abA	53.33±15.28bA	14.44±10.27cB	0.00±0.00cB
龙黍9号 Longshu 9	95.56±1.92aA	95.56±5.09aA	94.44±1.92aA	81.11±3.85bB	27.78±3.85cC	0.00±0.00dD
龙黍19号 Longshu 19	100.00±0.00aA	97.78±1.92abA	88.89±6.94abA	70.00±17.32bA	25.56±16.48cB	0.00±0.00cB

从表1可以看出, 随着中性盐含量的增加, 各品种的发芽势均呈现出逐渐下降的趋势。在低浓度的NaCl和Na₂SO₄(40、80 mmol/L)胁迫下, 大多数品种的发芽势与对照无显著差异, 但随盐浓度的增加, 其差异也随之增加。在120 mmol/L下, 各品种的发芽势与对照比较有较大差别; 在盐浓度

160 mmol/L时, 不同品种的发芽势与对照相比有显著差异($P < 0.05$)。由表2可知, 在低浓度的NaCl和Na₂SO₄(40、80 mmol/L)胁迫下, 与发芽势一样, 大多数品种的发芽率与对照无显著差异, 但随盐浓度的增加, 其差异也随之增加。在120 mmol/L下, 仅有3个品种(齐黍1号、龙黍9号、龙黍19号)

的发芽率与对照差异显著 ($P < 0.05$)；在盐浓度 160 mmol/L 时,不同品种的发芽率与对照相比有显著差异 ($P < 0.05$)；浓度达到 200 mmol/L 时,仅有个别种子发芽,表明盐浓度过高对种子发芽产生抑制作用。

综上表明,随着中性混合盐浓度的升高对种子的发芽具有显著的抑制作用,而 160 mmol/L 的中性混合盐则是黍子耐盐性筛选的最适浓度。

2.2 不同品种萌发期对盐胁迫的响应

在 160 mmol/L 盐胁迫下,各性状指标在芽期的相对值见表 3。由表 3 可知,5 份黍子资源的 8 个性状指标变异系数分别为 168.41%、48.12%、23.13%、15.11%、32.94%、18.90%、64.37% 和

123.53%,表明材料耐盐相关性状具有丰富的变异,有差异较大的性状指标,可作耐盐鉴定。其中,相对发芽势(RGP)的变化范围为 0.00(宁糜 13 号、龙黍 9 号和龙黍 19 号)~9.59(晋黍 7 号);相对发芽率(RGR)为 17.33(齐黍 1 号)~67.53(晋黍 7 号);相对芽长(RBL)为 22.62(宁糜 13 号)~38.88(晋黍 7 号);相对根长(RRL)为 7.46(龙黍 9 号)~11.43(晋黍 7 号);相对芽鲜质量(RSFW)为 16.75(龙黍 9 号)~38.71(晋黍 7 号);相对根鲜质量(RRFW)为 7.53(龙黍 9 号)~12.88(齐黍 1 号);相对发芽指数(RGI)为 10.15(齐黍 1 号)~44.09(晋黍 7 号);相对活力指数(RVI)为 0.98(龙黍 9 号)~13.49(晋黍 7 号)。

表 3 在盐胁迫下 5 份材料芽期各性状的相对值
Tab.3 The relative values of each trait at bud stage of 5 materials under salt stress

编号	Number	材料	Material	RGP	RGR	RBL	RRL	RSFW	RRFW	RGI	RVI
1		晋黍 7 号		9.59	67.53	38.88	11.43	38.71	12.79	44.09	13.49
2		宁糜 13 号		0.00	45.45	22.62	11.29	18.52	11.96	18.07	2.16
3		齐黍 1 号		1.49	17.33	23.89	10.74	20.78	12.88	10.15	1.30
4		龙黍 9 号		0.00	29.07	25.56	7.46	16.75	7.53	13.00	0.98
5		龙黍 19 号		0.00	25.56	36.62	9.14	29.28	9.67	12.26	1.55
均值	Mean			2.22	36.99	29.51	10.01	24.81	10.97	19.51	3.90
标准差	SD			3.73	17.80	6.83	1.51	8.17	2.07	12.56	4.81
变异系数/%	CV			168.41	48.12	23.13	15.11	32.94	18.90	64.37	123.53

2.3 盐胁迫下各指标的相关性及主成分分析

盐胁迫作用下的供试材料芽期的 8 项指标分别作相关性分析,其结果如图 1 所示。

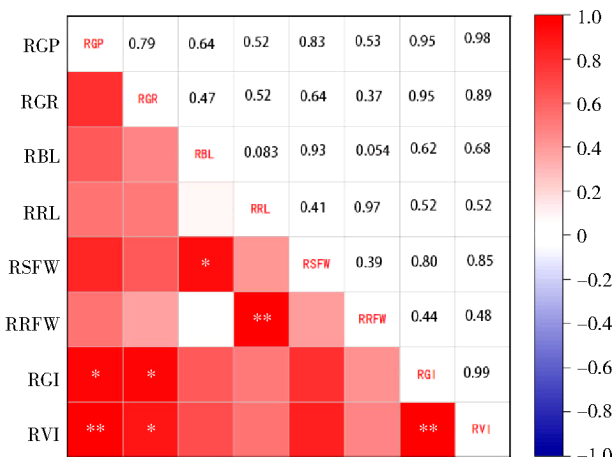


图 1 盐胁迫下芽期各指标的相关系数热图
Fig.1 Heat diagram of correlation coefficient of various indexes at bud stage under salt stress

从图 1 可以看出,越深的颜色说明相关性越强。结果表明,大部分指标之间都达到了显著和极显著的相关性,其中 RRFW 和 RRL 呈现极显著的正相关性 ($P < 0.01$),相关系数为 0.97;RVI 与 RGP 呈现极显著的正相关 ($P < 0.01$),相关系数均为 0.98;RVI 和 RGI 呈极显著正相关性 ($P < 0.01$),相关系数为 0.99;RGP 和 RGI 呈显著正相关 ($P < 0.05$),相关系数为 0.95;RGR 与 RGI 呈显著正相关性 ($P < 0.05$),相关系数分别为 0.95,RGR 与 RVI 呈显著正相关性 ($P < 0.05$),相关系数分别为 0.89,RSFW 与 RBL 呈显著正相关性 ($P < 0.05$),相关系数分别为 0.93,其余性状间的相关性较低,如:RRFW 和 RBL,相关系数为 0.054。

为确定黍子芽期耐盐性的主要指标,对 5 份黍子材料芽期耐盐性的 8 项指标进行了主成分分析,结果见表 4。由表 4 可知,特征值大于 1 的主成分有 2 个,特征值分别为 5.599 和 1.579,贡献率分别为 69.991% 和 19.734%,累计贡献率达 89.725%,对大多数指标进行了概括,所以,用 2 个相互独立的综合指标可以对 8 个单项指标的 89.725% 的信息进行概

括。第I主成分中RVI、RGI、RGP、RSFW和RBL相关系数分别为98.0%、96.3%、95.6%、89.1%和86.8%，均达到70.0%以上(表5)，说明芽苗的发芽和生长状况，可以对芽期耐盐性进行鉴定。第II主成分中RRFW和RRL的相关系数较高，分别为76.4%和74.0%，表明根部生长情况反映黍子芽期的耐盐能力。因此，可选用SF、BL、GI、GP和RFW作为黍子芽期耐中性混合盐筛选与评价的重要指标。

表4 2个主成分的特征值及贡献率
Tab.4 Eigenvalues and contribution rates of two principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
I	5.599	69.991	69.991
II	1.579	19.734	89.725

表5 各因子载荷矩阵
Tab.5 Loading matrix of each component

主成分 Principal component	RVI	RGI	RGP	RSFW	RBL	RGR	RRL	RRFW
I	98.0	96.3	95.6	89.1	86.8	69.6	64.2	59.3
II	-10.2	-9.2	-5.8	-28.6	-2.5	-58.6	74.0	76.4

2.4 不同黍子资源芽期耐盐性综合评价

5份供试材料各因子得分值和隶属函数值分析见表6。结果表明，每份黍子材料中因子的得分值和隶属函数值均不相同，对于X1因子得分值和隶属函数值U1，晋黍7号最高(分别为1.647和

1.000)，表现较强的耐盐性；齐黍1号最低(分别为-0.852和0.000)，表现较弱的耐盐性。对于X2因子得分值和隶属函数值U2，宁糜13号最高(分别为0.847和1.000)，表现较强的耐盐性；龙黍19号最低(分别为-1.275和0.000)，表现较弱的耐盐性。

表6 5个黍子品种耐盐性因子得分值、隶属函数值、D值及耐盐性排序
Tab.6 Salt tolerance factor score value, subordinate function value, D value, and salt tolerance order of 5 broomcorn millet varieties

材料 Material	因子得分值 Score value of each component		隶属函数值 Subordinate function value		D值 D value	排序 Order
	X1	X2	U1	U2		
晋黍7号 Jinshu 7	1.647	0.582	1.000	0.875	0.973	1
龙黍19号 Longshu 19	-0.296	-1.275	0.223	0.000	0.359	2
宁糜13号 Ningmei 13	-0.667	0.847	0.074	1.000	0.278	3
齐黍1号 Qishu 1	-0.852	0.731	0.000	0.946	0.208	4
龙黍9号 Longshu 9	0.168	-0.885	0.408	0.184	0.175	5
最小值 Min.	-0.852	-1.275	0.000	0.000		
最大值 Max.	1.647	0.847	1.000	1.000		

综合评价D值能客观反映出芽期耐盐能力的大小，数值越大说明耐盐性能力越强。根据D值大小进行排序，5份黍子材料耐盐性的强弱顺序为晋黍7号>龙黍19号>宁糜13号>齐黍1号>龙黍9号。

3 结论与讨论

土壤盐渍化是影响植物生长和土地生产力的诸多逆境因素中的主要因素之一，种子能在受盐碱胁迫的土地上萌发出苗，是植株生长发育的先决条件^[28]。前人研究表明，种子的萌发受盐浓度、盐组分、胁迫时间和酸碱度等因素的影响，而芽期作为

植物整个生长发育过程中对盐分最敏感的时期之一，对盐浓度的耐受力直接影响苗期的生长发育^[29]。李占成等^[30]选择NaCl、Na₂SO₄、MgCl₂3种盐溶液，在6个处理梯度下对黍子发芽率、相对发芽势等进行比较分析表明，3种盐对黍子种子的萌发又不同程度的影响，在一定浓度的范围内可促使种子萌发，但高浓度的盐溶液对种子的正常萌发产生抑制作用。本研究发现，在中性混合盐不同浓度的胁迫下，各品种的发芽势和发芽率均有差异，发芽势和发芽率随着中性混合盐浓度的升高而逐渐下降，表明高浓度盐抑制种子萌发。

苏国兴等^[31]研究认为，作物耐盐性的评价采用

单一指标,无法客观真实地评价实际生长情况下的耐盐性。刘敏轩等^[25]用发芽率和复萌率首次在不同浓度中性混合盐胁迫下研究 16 份黍子耐盐性,筛选出一批芽期耐盐性强的黍子资源。袁雨豪等^[24]利用根长、芽长、发芽率、发芽势、根鲜质量、芽鲜质量、发芽指数和活力指数综合判断了 100 份黍子资源的耐盐性。本研究也同样利用发芽势、发芽率、芽长、根长、芽鲜质量、根鲜质量、发芽指数和活力指数 8 个指标,综合判断 5 份黍子资源芽期的耐盐性,为黍子耐盐机制的研究提供宝贵资源。

作物耐盐性评价不仅要有高效的评价指标,还需要在分析的过程中采用科学的数量分析方法^[32]。耐盐性是植物在盐碱胁迫反应下的多种生理过程的综合反映,不同植物和同一种植物的不同基因型之间存在着不同的耐盐性,因而难以用一个单一的指数来反映植物的耐盐能力,应选取几个指标来综合评价植物的耐盐能力^[33]。目前,关于芽期耐盐性的鉴定常用的方法主要有聚类、隶属函数和主成分分析等。彭智等^[34]通过对 321 份小麦材料在盐胁迫下的芽期、苗期各相关性状的隶属函数值、耐盐综合评价 D 值进行计算,筛选出 21 份芽期和 18 份苗期耐高盐小麦材料。本研究也采用相关性分析、主成分分析和综合评价(D)相结合的方法综合评价了 5 份黍子资源芽期的耐盐性,旨在为黍子耐盐新品种的培育奠定基础。

本研究对 5 份经多年多点筛选耐盐性差异较大的黍子材料进行芽期耐中性混合盐($\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$)进行鉴定与评价,发现高浓度盐会显著抑制种子的萌发。同时也发现中性混合盐($\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$)鉴定的最适浓度为 160 mmol/L。进一步确定了芽鲜质量、芽长、发芽指数、发芽势和根鲜质量可作为黍子芽期耐中性混合盐筛选与评价的重要指标。最终确定 5 份黍子资源的耐中性混合盐溶液的顺序依次为晋黍 7 号、龙黍 19 号、宁糜 13 号、齐黍 1 号和龙黍 9 号。

参考文献:

- [1] GOLLDACK D, LÜKING I, YANG O. Plant tolerance to drought and salinity: stress regulating transcription factors and their functional significance in the cellular transcriptional network [J]. *Plant Cell Reports*, 2011, 30(8): 1383-1391.
- [2] 胡涛,张鸽香,郑福超,等. 植物盐胁迫响应的研究进展[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(9): 3006-3015.
HU T, ZHANG G X, ZHENG F C, et al. Research progress in plant salt stress response[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(9): 3006-3015.
- [3] Mainguet M. Aridity: droughts and human development[M]. *Aridity Droughts & Human Development*, 1998.
- [4] 赵露,苗玉华,吴儒琳,等. 不同盐胁迫对苦豆子种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(7): 844-848.
ZHAO L, MIAO Y H, WU R L, et al. Effects of different salt stress on seed germination and seedling growth of *Alopecia sativa*[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(7): 844-848.
- [5] 曹慧芬,谢建义,姚建忠,等. 氧化石墨烯对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(5): 84-92.
CAO H F, XIE J Y, YAO J Z, et al. Effects of graphene oxide on seed germination and seedling growth of wheat under salt stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(5): 84-92.
- [6] 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.
- [7] 王开喜,杨耀国,王永新,等. 硫化氢浓度对盐胁迫下胡枝子种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *山西农业科学*, 2022, 50(10): 1396-1401.
WANG K X, YANG Y G, WANG Y X, et al. Effect of hydrogen sulfide concentration on seed germination and seedling growth of *Lespedeza japonica* under salt stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(10): 1396-1401.
- [8] 沈群. 杂粮与科学的美味邂逅[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2022.
SHEN Q. The delicious encounter between miscellaneous grains and science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2022.
- [9] CRAWFORD G W. Agricultural origins in North China pushed back to the Pleistocene-Holocene boundary[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(18): 7271-7272.
- [10] LU H Y, ZHANG J P, LIU K B, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(18): 7367-7372.
- [11] 王瑞云. 糜子遗传多样性及进化研究进展[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 2-3.
WANG R Y. Research progress on genetic diversity and evolution of broomcorn millet[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 2-3.
- [12] 刘斐,刘猛,赵宇,等. 2019 年中国谷子高粱产业发展分析及后期展望[J]. *农业展望*, 2020, 16(4): 67-71.
LIU F, LIU M, ZHAO Y, et al. Industrial development of China's foxtail millet and sorghum in 2019 and its prospect[J]. *Agricultural Outlook*, 2020, 16(4): 67-71.
- [13] 王宇卓,林元香,薛亚鹏,等. 山西糜子核心种质分子身份证构建[J]. *植物学报*, 2023, 58(1): 159-168.
WANG Y Z, LIN Y X, XUE Y P, et al. Construction of molecular ID card of core germplasm of hog millet (*Panicum miliaceum*) in Shanxi[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2023, 58(1): 159-168.

- [14] 丁敏,段政勇,王宇卓,等. 糜子GBSSI基因功能标记的开发与验证[J]. 作物学报, 2023, 49(3):703-718.
DING M, DUAN Z Y, WANG Y Z, et al. Development and validation of functional markers of *GBSSI* gene in proso millet [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(3):703-718.
- [15] 夏建红,张文辉. 糜子新品种(系)复种栽培适应性调查[J]. 中国农技推广, 2020, 36(5):25-26.
XIA J H, ZHANG W H. Investigation on adaptability of new millet varieties(lines) for multiple cropping cultivation[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2020, 36(5):25-26.
- [16] 胡兴雨,陆平,贺建波,等. 黍稷农艺性状的主成分分析与聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(4):492-496.
HU X Y, LU P, HE J B, et al. Principal components and cluster analysis of agronomic traits of proso millet(*Panicum miliaceum*) [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2008, 9(4):492-496.
- [17] AKBARI G, SANAVY S A, YOUSEFZADEH S. Effect of auxin and salt stress(NaCl) on seed germination of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, 2007, 10(15):2557-2561.
- [18] 方宇辉,华夏,韩留鹏,等. 非生物胁迫因素对小麦光合作用的影响研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(10):1-13.
FAN Y H, HUA X, HAN L P, et al. Research progress of abiotic stress factors on photosynthesis of wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(10):1-13.
- [19] 刘紫娟,李萍,宗毓铮,等. 干旱胁迫对糜子生理及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1279-1283.
LIU Z J, LI P, ZONG Y Z, et al. Effects of drought on physiology and yield in broomcorn millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(9):1279-1283.
- [20] 黄海,瞿小杰,刘金海,等. 盐碱胁迫下不同倍性水稻4种转录因子家族基因的表达模式分析[J]. 河南农业科学, 2023, 52(6):22-33.
HUANG H, ZHAI X J, LIU J H, et al. Analysis of gene expression patterns of 4 transcription factor families in different ploidy rice under saline-alkali stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(6):22-33.
- [21] 董扬. 糜子萌芽期耐冷种质资源综合评价体系构建[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(21):82-89.
DONG Y. Construction of comprehensive evaluation system for cold-tolerant germplasm resources of broomcorn millet in germination stage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(21):82-89.
- [22] 甄莉娜,高茹雪,张美艳,等. 盐胁迫对黍子种子萌发的影响[J]. 北方园艺, 2010(10):28-31.
ZHEN L N, GAO R X, ZHANG M Y, et al. Effect of salt stress on the seed germination of *Panicum miliacea*[J]. *Northern Horticulture*, 2010(10):28-31.
- [23] 张洪鹏,陈德龙,马强,等. 不同糜子品种芽期耐盐性比较[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23):11-13.
ZHANG H P, CHEN D L, MA Q, et al. Comparative study on salt tolerance of different varieties of broomcorn millet at the germination stage[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(23):11-13.
- [24] 袁雨豪,杨清华,党科,等. 糜子资源耐盐性评价与盐胁迫生理响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22):4066-4078.
YUAN Y H, YANG Q H, DANG K, et al. Salt-tolerance evaluation and physiological response of salt stress of broom-corn millet(*Panicum miliaceum* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22):4066-4078.
- [25] 刘敏轩,张宗文,吴斌,等. 黍稷种质资源芽、苗期中性混合盐胁迫评价与耐盐生理机制研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18):3733-3743.
LIU M X, ZHANG Z W, WU B, et al. Evaluation of mixed salt-tolerance at germination stage and seedling stage and the related physiological characteristics of *Panicum miliaceum* L. [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18):3733-3743.
- [26] LIU M X, QIAO Z J, ZHANG S, et al. Response of broom-corn millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes from semiarid regions of China to salt stress[J]. *The Crop Journal*, 2015, 3(1):57-66.
- [27] 马洪驰. 糜子耐盐碱资源鉴定与综合评价研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
MA H C. Study on identification and comprehensive evaluation of salt-tolerant resources of broomcorn millet[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [28] LI R L, SHI F C, FUKUDA K, et al. Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(5):725-733.
- [29] 李晓庆,王星斗,樊艳,等. 盐胁迫对杜梨吸收根生长指标的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(5):62-67.
LI X Q, WANG X D, FAN Y, et al. Effects of salt stress on growth indexes of absorption roots of *Fructus dorsalis*[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(5):62-67.
- [30] 李占成,张丽丽,李玮,等. 盐胁迫对糜子种子发芽的影响[J]. 作物杂志, 2011(6):122-123.
LI Z C, ZHANG L L, LI W, et al. Effect of salt stress on seed germination of millet[J]. *Crops*, 2011(6):122-123.
- [31] 苏国兴,洪法水. 桑品种耐盐性的隶属函数法之评价[J]. 江苏农业学报, 2002, 18(1):42-47.
SU G X, HONG F S. Evaluation of salt tolerance for partial mulberry varieties with subordinate function[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2002, 18(1):42-47.
- [32] 王亚,杨俊芳,王宙,等. 蓖麻种子萌发与幼苗生长对盐胁迫的生理响应[J]. 山西农业科学, 2019, 47(10):1705-1708.
WANG Y, YANG J F, WANG Z, et al. Physiological response of castor seed germination and seedling growth to salt stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(10):1705-1708.
- [33] 张相锋,杨晓绒,焦子伟. 植物耐盐性评价研究进展及评价策略[J]. 生物学杂志, 2018, 35(6):91-94.
ZHANG X F, YANG X R, JIAO Z W. Research progress of salt tolerance evaluation in plants and tolerance evaluation strategy[J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(6):91-94.
- [34] 彭智,李龙,柳玉平,等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4):638-645.
PENG Z, LI L, LIU Y P, et al. Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4):638-645.