



# 谷子萌发期耐盐种质筛选及其保护酶系统对盐胁迫的响应

秦岭, 张艳亭, 陈二影, 杨延兵, 黎飞飞, 管延安

(山东省农业科学院作物研究所/山东省特色作物工程实验室, 济南 250100)

**摘要:**【目的】确定谷子萌发期耐盐评价指标, 筛选萌发期耐盐种质, 并探讨不同基因型谷子苗期盐胁迫对保护酶系统的影响, 为谷子大规模耐盐性鉴定、耐盐机理的研究提供鉴定方法和优异资源。【方法】以不同生态区的 54 份谷子种质为试验材料, 用 1.5%NaCl 溶液进行盐胁迫, 蒸馏水为对照, 采用培养皿发芽法在人工气候培养箱内进行谷子萌发期耐盐性鉴定; 测定谷子相对发芽势、相对发芽率、相对胚芽长、相对胚根长、相对胚芽比以及发芽率、盐害率等指标; 通过对指标值的相关性分析、主成分分析和聚类分析, 筛选谷子萌发耐盐评价指标。采用筛选出的 3 个不同耐盐性谷子品种, 以 0.5%NaCl 溶液进行苗期盐胁迫, 测定盐土盆栽条件下苗期叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。分析盐胁迫下 3 个基因型间生理响应机理的差异。【结果】在 1.5%NaCl 溶液胁迫下, 谷子的相对发芽势与相对发芽率( $r=0.51$ ,  $P<0.01$ )、相对胚芽长之间呈显著正相关( $r=0.54$ ,  $P<0.01$ ); 相对胚芽长与相对胚根长呈显著正相关( $r=0.64$ ,  $P<0.01$ ); 发芽率盐害率与相对发芽势( $r=-0.37$ ,  $P<0.01$ )、相对胚芽长( $r=-0.51$ ,  $P<0.01$ )呈显著负相关。通过主成分分析将萌发期盐胁迫处理的 6 个单项指标转换成 3 个彼此独立的综合指标; 通过隶属函数分析, 得到不同品种萌发期耐盐性综合评价(D值), 并通过聚类分析, 将 54 份谷子品种分成高度盐敏感品种、盐敏感品种、中度耐盐品种、耐盐品种以及高度耐盐品种 5 个不同类型。其中, 高度耐盐品种有 4 个, 分别是华北夏谷区的济谷 16、矮 88, 西北春谷区的陇谷 3 号和延谷 13。苗期盐土盆栽试验表明, 盐胁迫条件下谷子叶片 SOD、POD、CAT 酶活性呈现先上升后下降的趋势。耐盐性强品种济谷 16 的 SOD、POD、CAT 酶活性上升幅度显著大于耐盐性弱的品种鲁谷 1 号。【结论】54 份谷子种质材料在耐盐性上存在显著差异, 利用隶属函数法综合分析萌发期各指标, 全面地评价谷子种质资源萌发期的耐盐性。不同基因型谷子品种叶片保护酶系统对 NaCl 胁迫响应能力的差异, 可能是由于谷子耐盐能力不同造成的。

**关键词:** 谷子; 盐胁迫; 萌发期; 综合评价; 保护酶

## Screening for Germplasms Tolerant to Salt at Germination Stage and Response of Protective Enzymes to Salt Stress in Foxtail Millet

QIN Ling, ZHANG YanTing, CHEN ErYing, YANG YanBing, LI FeiFei, GUAN YanAn

(Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Featured Crops Engineering Laboratory of Shandong Province, Jinan 250100)

**Abstract:** 【Objective】The purpose of this study was to select germplasms tolerant to salt at germination stage, to establish an evaluation criterion for salt tolerance, and to investigate the effect of salt stress on protective enzyme system of different genotypes

收稿日期: 2019-06-05; 接受日期: 2019-07-08

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-13. 5-A19)、山东省农业科学院农业科技创新工程(CXGC2018D02)、山东省杂粮创新团队项目(SDAIT-15-03)

联系方式: 秦岭, 0531-66659029; E-mail: qinling1021@163.com. 通信作者管延安, 0531-66658115; E-mail: yguan65@163.com

of foxtail millet at seedling stage. The results could propose an identification method and excellent genetic resources for research on salt-tolerant mechanisms of foxtail millet. 【Method】 54 foxtail millet varieties from different eco-regions were applied as experimental materials. Salt stress was implemented by adding 1.5% NaCl solution, and distilled water was used as the control. A petri dish based germination method was used to assess the salt tolerance of foxtail millet varieties in artificial climate incubator. Six salt-tolerant indexes were investigated in each treatment, including relative germination potential, relative germination rate, relative coleoptile length, relative radical root length, relative radical root / coleoptiles, and relative salt damage rate. A comprehensive analysis of the salt tolerance of different varieties was conducted via correlation analysis, principal component analysis and clustering analysis. Furthermore, pot experiment was conducted to cultivate selected varieties with different salt tolerance under both salt stress and normal conditions, and superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, and catalase (CAT) activity in shoot were analyzed. And then the differences of physiological responses between those genotypes under salt stress were analyzed.

【Result】 Under salt stress of 1.5% NaCl, a significant positive correlation was detected between relative germination potential and relative germination( $r=0.51$ ,  $P<0.01$ ) and relative coleoptile length ( $r=0.54$ ,  $P<0.01$ ). There was a significant positive correlation between relative coleoptile length and relative radical root length ( $r=0.64$ ,  $P<0.01$ ), while the relative salt damage rate showed a significant negative correlation with relative germination rate ( $r=-0.37$ ,  $P<0.01$ ) and relative coleoptile length ( $r=-0.51$ ,  $P<0.01$ ). Principal component analysis transformed the six single indexes in the salt-stressed germination stage of foxtail millet to three independent comprehensive indexes. Subordinate function analysis was conducted to obtain the comprehensive assessment value ( $D$ -value) of salt tolerance of different varieties at germination stage. 54 foxtail millet varieties were classified into five salt tolerant types based on clustering analysis, including extremely salt sensitive, salt sensitive, moderate salt tolerance, salt tolerance and high salt tolerance. The varieties with high salt tolerance were Yangu 13, Longgu 3 from spring sowing region of northwest China, and Jigu 16, Ai88 from summer sowing region of north China. The activities of SOD, POD, and CAT were increased and then decreased under salt stress condition. SOD, POD, and CAT in shoot increased in response to salt stress, and the activity of those enzymes in Jigu 16 was significantly higher than that in Lugu 1. 【Conclusion】 Remarkable variations in salt tolerance were detected among the 54 genotypes of foxtail millet. The systematical and clear results can be obtained by membership function analysis, and the salt tolerance of foxtail millet can be evaluated objectively and comprehensively. The leaf protective enzymes are important for the adaptability of foxtail millet to salt stress in seedling stage.

**Key words:** foxtail millet (*Setaria italica* L.); salt-stress; germination stage; comprehensive evaluation; protective enzymes

## 0 引言

【研究意义】土壤盐渍化是非常严峻的非生物胁迫之一,严重影响种子萌发、植物生长和农作物产量<sup>[1]</sup>。近年来,随着土壤盐渍化面积的不断扩大,土壤盐渍化成为限制农业生产发展的重要因素之一<sup>[2-3]</sup>。中国的盐碱化耕地面积约 3 467 万  $\text{hm}^2$ ,居世界第四位<sup>[4]</sup>,主要分布于土壤蒸发量大,降水少的干旱、半干旱及滨海地区<sup>[5]</sup>。谷子(*Setaria italica* (L.) P. Beauv.)的主要种植区域也在这些地区。因此,挖掘谷子耐盐遗传资源,开展谷子耐盐机制研究,对培育耐盐品种,扩大可利用耕地面积,保证农业可持续发展具有深远意义。【前人研究进展】谷子是中国北方重要的禾本科粮食作物,营养价值丰富,根系发达、抗旱耐瘠薄,距今已有 8 000 多年的栽培历史<sup>[6-7]</sup>。中国是谷子的起源地,拥有丰富的种质资源,具有广泛的遗传变异。目前,关于谷子耐盐品种的筛选与鉴定已开展了部分工作<sup>[8-12]</sup>,田伯红等<sup>[8]</sup>对 194 份谷子地方品种的耐盐性

进行了鉴定,筛选出红谷、小黄谷、三变丑等 11 份耐盐性较强的品种。韩飞等<sup>[9]</sup>通过隶属函数得分对 63 份谷子种质萌发期耐盐性进行了综合评价,筛选出济谷 16、汾特 11 号等 5 份耐盐谷子品种。同时,韩飞等<sup>[10]</sup>研究表明谷子在盐胁迫下发芽率和发芽势显著降低,并且不同谷子品种发芽率、根和芽长存在品种间差异;在混合盐碱胁迫下谷子发芽率显著降低,芽长、根长、发芽指数、活力指数均随着盐碱浓度的提高而减小<sup>[13]</sup>。发芽率、发芽指数和相对芽长可作为谷子芽期耐盐性的鉴定指标<sup>[14]</sup>。在盐胁迫中,渗透胁迫和离子毒害作用会引发次生胁迫,包括活性氧(reaction oxygen species, ROS)的过量积累。抗氧化酶(超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和过氧化物酶(peroxidase, POD)等)通过清除多余的 ROS 来维持 ROS 的动态平衡<sup>[15]</sup>。SOD 作为环境胁迫下抵御氧化损伤的第一道屏障,在防止活性氧对植物造成的损伤中起到重要的作用<sup>[16-18]</sup>。盐胁迫条件下导致谷子叶片 SOD 酶活性显

著升高<sup>[19]</sup>, SREENIVASULU 等<sup>[20]</sup>研究表明 SOD 酶活性的高低与谷子耐盐性强弱密切相关。【本研究切入点】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相对较少, 严重制约了谷子在盐碱地的推广应用。另外, 关于盐胁迫下不同基因型谷子种质抗氧化酶类的反应也鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究以中国不同生态区的 54 份谷子种质为材料, 采用培养皿发芽试验, 1.5%NaCl 模拟盐胁迫, 筛选萌发期耐盐性指标, 利用模糊数学隶属函数法对盐胁迫下发芽特性与耐盐性的关系进行综合分析, 确定谷子萌发期评价指标, 建立谷子萌发期耐盐评价体系。并进一步以盐土盆栽方式研究不同耐盐性谷子种质苗期叶片保护酶 SOD、POD、CAT 对盐胁迫的响应, 为谷子抗逆育种提供优异资源和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2017 年在山东省农业科学院作物研究所济南试验基地进行, 供试材料为来自不同生态区的谷子种质共 54 份, 其中, 华北夏谷区 28 份、东北春谷区 10 份、西北春谷区 16 份 (电子附表 1)。

### 1.2 试验设计

1.2.1 谷子萌发期耐盐性鉴定 挑选大小一致、籽粒饱满的种子 50 粒放置在直径为 10 cm 培养皿中, 加入 1.5% (质量比) 的 NaCl 溶液 6 mL, 对照加入蒸馏水, 智能光照培养箱培养。培养箱设置温度为 28℃, 光照/黑暗为 14 h/10 h, 连续培养 8 d。每隔 1 d 补充适量蒸馏水, 以保持培养皿中的盐溶液浓度。处理的第 2 天开始每天记录发芽数, 第 8 天分别测定处理和对照的胚芽长、胚根长。

发芽势=第 4 天发芽数/供试种子粒数×100%;

发芽率=第 8 天发芽数/供试种子粒数×100%;

性状相对值(%)=处理性状值/对照性状值×100;

发芽盐害率(%)=(对照发芽率-处理发芽率)/对照发芽率×100。

1.2.2 谷子苗期对盐胁迫的响应 苗期试验在山东省农业科学院作物研究所旱棚内进行, 以萌发期耐盐性不同的 3 个品种济谷 16、鲁谷 1 号、豫谷 1 号为材料, 将种子播种在圆形塑料盆 (直径 35 cm, 高 25 cm) 内, 每盆装 8.5 kg 混合基质 (营养土: 河沙=2:1), 谷苗长至 4 叶 1 心时定苗, 每盆留苗 20 株, 此时开始进行盐胁迫处理。试验设置 2 个处理, 分别浇灌 0 (对

照, 去离子水)、0.5%的 NaCl 溶液至土壤饱和。每个处理 3 次重复, 每天以称重法补足消耗的水分。每隔 2 d 取样一次 (取整个地上部分), 直至胁迫的第 15 天取样结束, 样品经液氮速冻后放置于-20℃保存, 用于酶活性的测定。胁迫的第 15 天, 每个重复取样 3 株, 测定地上部分生物量。

地上部分生物量的测定: 样品经 105℃杀青 30 min 后, 60℃烘干至恒重, 采用千分之一天平称重。

酶活测定: 采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 采用愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性<sup>[21]</sup>, 采用紫外吸收法测定过氧化氢酶 (CAT) 酶活性<sup>[22]</sup>, 所有试剂盒均购自苏州科铭生物技术公司。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 作图表, 利用 SPSS19.0 进行相关性分析、主成分分析、方差分析, 采用 LSD 进行显著性检验, 利用 DPS7.05 进行聚类分析, 采用隶属函数法对 54 份谷子种质进行耐盐综合评价, 参考文献[23]计算指标。

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

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。

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

式中,  $W_j$  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。

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

式中,  $D$  表示在 NaCl 胁迫下各品种耐盐能力的综合评价价值。

## 2 结果

### 2.1 萌发期耐盐性鉴定适宜指标的筛选

通过对 1.5%NaCl 胁迫下谷子发芽各指标的相对值进行调查统计, 并进行相关性分析和主成分分析。54 份不同基因型的谷子在盐胁迫条件下各指标均差异显著。发芽势、发芽率、胚芽长、胚根长的相对值均小于 1, 说明盐胁迫抑制了谷子的发芽以及胚根、胚芽的生长。有 5 份种质的发芽势为 0, 占总数的 9.26%。有 1 个品种的相对根芽比大于 1, 说明盐胁迫对该品种根的抑制小于胚芽的抑制。所有指标性状变

异系数均在 10%以上。可以看出, 54 份谷子种质在盐胁迫下存在广泛的遗传变异(表 1)。

相关性分析表明, 相对发芽势与相对发芽率、相对胚芽长的相关性在 0.05 水平上极显著, 相关系数分别为 0.51\*\*和 0.54\*\*。发芽率、盐害率与相对发芽势、相对胚芽长呈显著负相关, 与相对胚根长呈负相关但不显著(表 2)。相对胚芽长与相对胚根长呈显著正相关。主成分分析 6 个耐盐特征指标在各主成分上的权重系数即特征向量可以发现(表 3), 第 I 主成分

的贡献率最大, 主要特征向量包括相对发芽率、相对发芽势 2 个指标, 为发芽因子, 特征值为 2.984, 指标贡献率为 49.73%; 第 II 主成分载荷较高的是相对胚根长、相对根芽比, 反映了根系因子, 特征值为 1.613, 指标贡献率为 26.89%; 第 III 主成分载荷较高的是相对芽长, 特征值为 0.870, 指标贡献率为 14.5%。前 3 个主成分累积贡献率达 91.12%, 因此, 利用 3 个相互独立的综合指标可以对不同谷子萌发期耐盐性进行客观分析。

表 1 萌发期盐胁迫下谷子各性状的变化范围及变异系数

Table 1 Coefficient and variation of each character of different millet varieties under salt stress

指标 Index	变化范围 Variation range	平均值 Mean	变异系数 Coefficient of variance
相对发芽势 Relative germination potential(%)	0.00—74.57	14.24	100.27
相对发芽率 Relative germination rate(%)	3.81—93.77	36.15	56.96
相对胚芽长 Relative coleoptile length(%)	8.66—59.48	24.45	36.33
相对胚根长 Relative radical root length(%)	4.52—33.62	9.83	47.64
相对根芽比 Relative radical root / coleoptiles(%)	19.83—105.46	41.67	35.88
相对盐害率 Relative salt damage rate(%)	6.33—96.19	63.85	32.25

表 2 盐胁迫下谷子萌发期各性状的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of coefficient for each character of different foxtail millet varieties under salt stress

相关系数 Correlation coefficient	相对发芽势 Relative germination potential ( $X_1$ )	相对发芽率 Relative germination rate ( $X_2$ )	相对胚芽长 Relative coleoptile length ( $X_3$ )	相对胚根长 Relative radical root length ( $X_4$ )	相对根芽比 Relative radical root / coleoptiles ( $X_5$ )	相对盐害率 Relative salt damage rate ( $X_6$ )
$X_1$	1					
$X_2$	0.51**	1				
$X_3$	0.54**	0.46**	1			
$X_4$	0.05	0.10	0.64**	1		
$X_5$	-0.37**	-0.28**	-0.27**	0.47**	1	
$X_6$	-0.51**	-1.00**	-0.46**	-0.10	0.28**	1

\*\* 在 0.01 水平差异极显著; \*在 0.05 水平差异显著

\*\* indicates a significant relationship at 0.01 level; \* indicates a significant relationship at 0.05 level

2.2 利用隶属函数法对参试 54 份谷子种质进行萌发期耐盐性评价

根据公式(1)计算得表 4 数据, 对于同一综合指标如  $CI_l$  而言, 经盐胁迫处理, 延谷 13 号的  $\mu(X_j)$  最大为 1.000, 表明该品种在  $CI_l$  上表现为耐盐性最强, 而晋谷 35 的  $\mu(X_j)$  最小, 为 0, 表明该品种在这一综合指标上表现为耐盐性最差。根据各综合指标贡献率大小, 经计算 3 个综合指标的权重分别为 0.5458、

0.2951 和 0.1591。运用公式(3)计算谷子的萌发期综合耐盐评价价值  $D$  值, 并根据  $D$  值进行耐盐能力强弱排序, 其中, 长生 4 的  $D$  值最小, 表明其耐盐性最差; 延谷 13 的  $D$  值最大, 表明其耐盐性最强。

采用最大距离法对  $D$  值进行聚类分析(图 1), 可将 54 个基因型划分为 5 类, 第 I 类是高度盐敏感品种, 包括 9 个品种, 占参试品种的 16.7%, 其中西北春谷区占比最高, 有 6 个品种; 第 II 类是盐敏感品种,

包括 16 个品种，占参试品种的 29.62%，分别来自华北夏谷区 10 个品种、西北春谷区 4 个、东北春谷区 2 个品种；第 III 类是中度耐盐品种，该类型品种最多，包括 20 个品种，占参试品种的 37.03%，其中有 11 个来自华北夏谷区，3 个来自西北春谷区，6 个来自东北春谷区；第 IV 类是耐盐品种，包括 5 个品种，占参试品种的 9.26%，3 个来自华北夏谷区，东北春谷区和西北春谷区各 1 个。第 V 类是高度耐盐品种，类别包括 4 个品种，分别是华北夏谷区的济谷 16 和矮 88，以及西北春谷区的陇谷 3 号和延谷 13。

2.3 谷子苗期盐胁迫下地上部分生物量及保护酶活性变化

萌发期耐盐性不同的 3 个谷子品种济谷 16、豫谷

表 3 各综合指标特征值、贡献率及特征向量  
Table 3 Eigenvalue and contribution and eigenvectors of 3 comprehensive indexes [ $CI(x)$ ]

项目 Item	$CI_1$	$CI_2$	$CI_3$
特征值 Eigen value	2.984	1.613	0.870
贡献率 Contributive ratio (%)	49.73	26.89	14.50
累积贡献率 Cumulative contributive ratio (%)	49.73	76.62	91.12
特征向量 Eigenvector $X_1$	0.435	-0.092	0.324
特征向量 Eigenvector $X_2$	0.517	-0.075	-0.465
特征向量 Eigenvector $X_3$	0.438	0.340	0.462
特征向量 Eigenvector $X_4$	0.144	0.748	0.099
特征向量 Eigenvector $X_5$	-0.252	0.552	-0.490
特征向量 Eigenvector $X_6$	-0.517	0.075	0.465

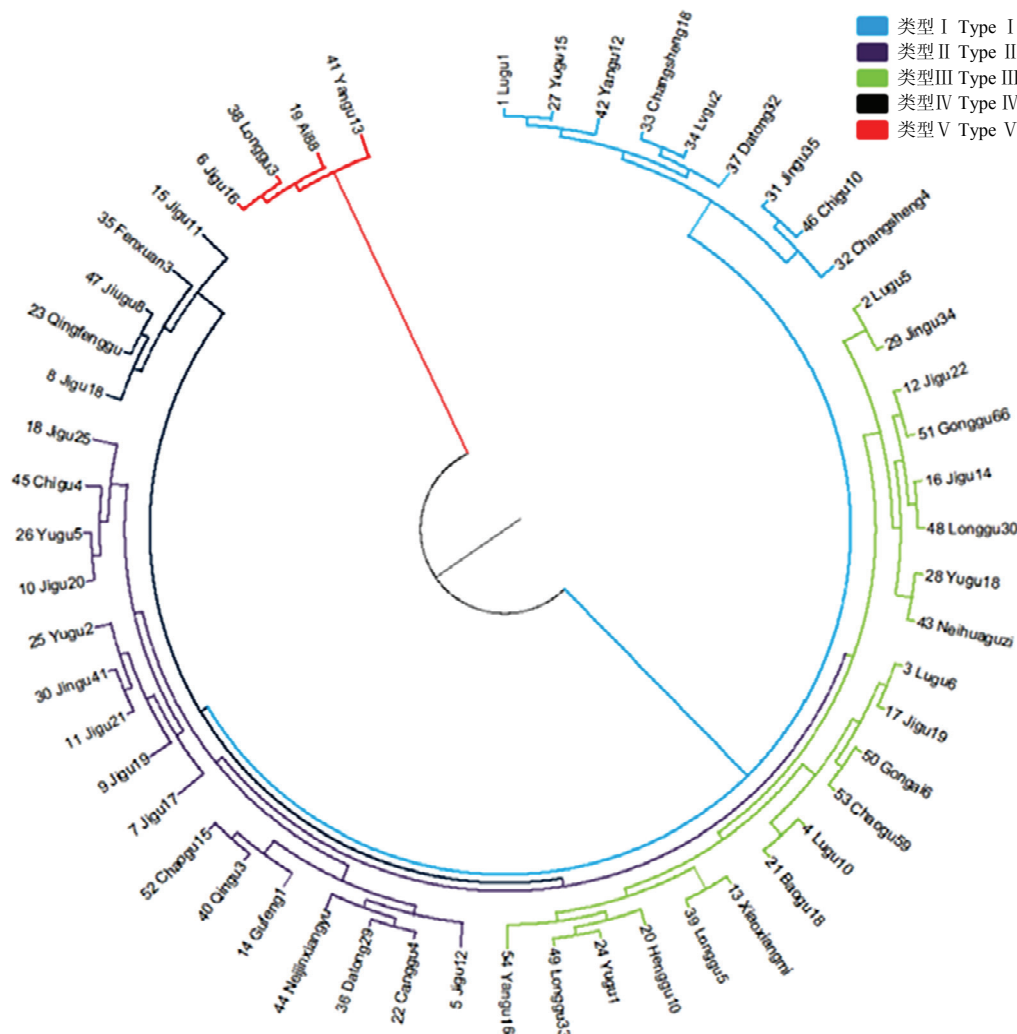


图 1 54 份谷子萌发期耐盐性聚类分析  
Fig. 1 Cluster of salt-tolerance in germination of 54 foxtail millet varieties

表 4 各品种(系)的综合指标值、权重以及  $D$  值  
Table 4 Comprehensive index( $CI_x$ ), index weight,  $\mu(X)$  and  $D$  value of each variety

序号 Number	$CI_1$	$CI_2$	$CI_3$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$D$	综合评价 Comprehensive valuation
1	-2.2796	-0.5447	0.4050	0.0955	0.1295	0.5460	0.1772	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
2	1.3460	0.2178	-0.1585	0.4899	0.2264	0.4308	0.4028	中度耐盐 Moderate salt tolerance
3	1.2316	0.2696	-1.8077	0.4775	0.2330	0.0939	0.3443	中度耐盐 Moderate salt tolerance
4	0.0000	0.8496	-0.0200	0.3435	0.3067	0.4591	0.3510	中度耐盐 Moderate salt tolerance
5	-0.0623	-1.2831	0.4707	0.3367	0.0357	0.5594	0.2833	盐敏感 Salt sensitivity
6	2.2398	3.5566	0.6492	0.5872	0.6506	0.5958	0.6073	高度耐盐 High salt tolerance
7	-0.4241	-0.1059	-0.6293	0.2973	0.1853	0.3346	0.2702	盐敏感 Salt sensitivity
8	-0.5756	1.9376	2.6273	0.2809	0.4449	1.0000	0.4437	耐盐 Salt tolerance
9	-0.3235	-0.5754	-0.4567	0.3083	0.1256	0.3699	0.2642	盐敏感 Salt sensitivity
10	-1.0946	0.0800	-0.5070	0.2244	0.2089	0.3596	0.2413	盐敏感 Salt sensitivity
11	-0.1767	0.4078	-1.9838	0.3243	0.2505	0.0579	0.2601	盐敏感 Salt sensitivity
12	1.5976	-0.0443	-1.1515	0.5173	0.1931	0.2279	0.3756	中度耐盐 Moderate salt tolerance
13	0.6795	-0.2044	-0.7963	0.4174	0.1727	0.3005	0.3266	中度耐盐 Moderate salt tolerance
14	-0.4494	-1.1064	1.4951	0.2946	0.0581	0.7687	0.3002	盐敏感 Salt sensitivity
15	2.0224	0.6177	0.1566	0.5635	0.2772	0.4952	0.4682	耐盐 Salt tolerance
16	1.7565	-1.1427	0.0451	0.5346	0.0535	0.4724	0.3827	中度耐盐 Moderate salt tolerance
17	0.9306	-0.6810	-0.2228	0.4447	0.1122	0.4177	0.3423	中度耐盐 Moderate salt tolerance
18	-1.4052	-0.1881	0.5329	0.1906	0.1748	0.5721	0.2466	盐敏感 Salt sensitivity
19	-0.7363	6.3065	0.4175	0.2634	1.0000	0.5485	0.5261	高度耐盐 High salt tolerance
20	0.4163	-0.8748	0.1120	0.3888	0.0876	0.4861	0.3154	中度耐盐 Moderate salt tolerance
21	2.619	-1.4495	-2.1504	0.6284	0.0145	0.0238	0.3511	中度耐盐 Moderate salt tolerance
22	-0.0984	-0.9923	0.3280	0.3328	0.0726	0.5302	0.2874	盐敏感 Salt sensitivity
23	2.0215	-0.3289	0.3369	0.5634	0.1569	0.5320	0.4385	耐盐 Salt tolerance
24	0.8321	-1.5640	0.2352	0.4340	0.0000	0.5113	0.3182	中度耐盐 Moderate salt tolerance
25	-0.3626	-0.8436	-0.2953	0.3040	0.0915	0.4029	0.2570	盐敏感 Salt sensitivity
26	-0.6926	-1.2175	0.2139	0.2681	0.0440	0.5069	0.2400	盐敏感 Salt sensitivity
27	-1.9623	-0.6357	-0.0949	0.1300	0.1179	0.4438	0.1764	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
28	0.4516	1.1999	-0.8049	0.3926	0.3512	0.2987	0.3655	中度耐盐 Moderate salt tolerance
29	1.2783	-0.4670	0.5348	0.4826	0.1394	0.5725	0.3956	中度耐盐 Moderate salt tolerance
30	-1.1852	-0.1785	0.5406	0.2145	0.1760	0.5737	0.2603	盐敏感 Salt sensitivity
31	-3.1570	1.8624	-2.2671	0.0000	0.4353	0.0000	0.1285	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
32	-3.0920	-0.8026	-0.0456	0.0071	0.0967	0.4539	0.1046	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
33	-1.5469	-1.1680	0.6173	0.1752	0.0503	0.5893	0.2042	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
34	-1.8683	-1.2398	1.1237	0.1402	0.0412	0.6928	0.1989	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
35	1.0959	1.4691	-0.4824	0.4627	0.3854	0.3646	0.4243	耐盐 Salt tolerance
36	-0.5245	-0.4524	0.4839	0.2864	0.1412	0.5621	0.2874	盐敏感 Salt sensitivity

续表 4 Continued table 4

序号 Number	$CI_1$	$CI_2$	$CI_3$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$D$	综合评价 Comprehensive valuation
37	-1.9564	-0.5711	0.2578	0.1306	0.1262	0.5159	0.1906	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
38	5.6668	-1.3401	0.1074	0.9600	0.0284	0.4851	0.6096	高度耐盐 High salt tolerance
39	-0.4107	-0.5841	1.7251	0.2988	0.1245	0.8157	0.3296	中度耐盐 Moderate salt tolerance
40	-0.0538	-1.0250	0.4973	0.3376	0.0685	0.5648	0.2944	盐敏感 Salt sensitivity
41	6.0342	1.7618	1.6937	1.0000	0.4226	0.8093	0.7993	高度耐盐 High salt tolerance
42	-2.1428	-0.5681	0.0462	0.1103	0.1265	0.4726	0.1728	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
43	0.4245	0.1161	0.4252	0.3897	0.2135	0.5501	0.3632	中度耐盐 Moderate salt tolerance
44	-1.1984	0.6045	0.4779	0.2131	0.2755	0.5608	0.2868	盐敏感 Salt sensitivity
45	-0.9893	-0.9606	0.5596	0.2358	0.0767	0.5775	0.2432	盐敏感 Salt sensitivity
46	-2.2146	-0.6243	-0.9891	0.1025	0.1194	0.2611	0.1327	高度盐敏感 Extremely salt sensitivity
47	0.5139	1.8569	0.6272	0.3994	0.4346	0.5913	0.4403	耐盐 Salt-tolerance
48	1.3441	0.245	-0.8058	0.4897	0.2298	0.2986	0.3826	中度耐盐 Moderate salt tolerance
49	-0.4474	1.3137	-0.7449	0.2948	0.3656	0.3110	0.3183	中度耐盐 Moderate salt tolerance
50	0.1973	-0.2087	0.3914	0.3649	0.1722	0.5432	0.3364	中度耐盐 Moderate salt tolerance
51	0.6813	0.2845	0.1753	0.4176	0.2349	0.4990	0.3766	中度耐盐 Moderate salt tolerance
52	0.3868	0.2984	-1.8436	0.3856	0.2366	0.0865	0.2940	盐敏感 Salt sensitivity
53	0.3103	-0.0096	-0.0411	0.3772	0.1975	0.4548	0.3365	中度耐盐 Moderate salt tolerance
54	-1.3353	1.3425	0.5085	0.1982	0.3693	0.5671	0.3074	中度耐盐 Moderate salt tolerance
权重 Index weight( $W_j$ )				0.5458	0.2951	0.1591		

1 号以及鲁谷 1 号苗期在盐胁迫下生长均受到抑制。豫谷 1 号和济谷 16 受抑制程度较小,而鲁谷 1 号受抑制程度最大(表 5)。对于萌发期中度耐盐的豫谷 1 号苗期表现的耐盐性要强于萌发期,鲁谷 1 号与济谷 16 苗期耐盐性与萌发期基本一致。随着盐胁迫时间的延长济谷 16 号、豫谷 1 号以及鲁谷 1 号 SOD 酶活性呈现先上升后下降的趋势,在胁迫第 9 天三者的酶活性均达到最大值,济谷 16、鲁谷 1 号以及豫谷 1 号分别比对照升高 77.16%、38.48%和 58.98%。豫谷 1 号和济谷 16 在盐胁迫的第 3 天酶活性迅速增加,并且与对照差异呈极显著水平。3 个品种的 SOD 酶活性均在第 12 天呈现下降趋势(图 2)。盐胁迫下,鲁谷 1 号、

济谷 16、豫谷 1 号地上部分 POD 活性的变化均呈现先上升后下降的趋势,如图 3 所示,济谷 16、豫谷 1 号处理 3 d 后 POD 活性有明显的上升趋势,与对照差异呈极显著水平。处理的第 9 天济谷 16、鲁谷 1 号、豫谷 1 号 POD 活性分别比对照增长 61.5%、58.1%、38.4%。胁迫 12 d 后 POD 酶活性开始下降,鲁谷 1 号酶活性降幅最大,胁迫的第 15 天由于 NaCl 对叶片损伤严重导致酶活性低于对照水平。图 4 可见,NaCl 胁迫下,3 个品种地上部分 CAT 活性均随盐浓度的增加而升高,随着处理时间表现为先上升后下降,这一趋势同 SOD、POD 的酶活变化。济谷 16 和豫谷 1 号 CAT 酶活性在盐处理 9 d 达最大值,鲁谷 1 号 CAT 酶活性

表 5 NaCl 胁迫下相对生物量的变化

Table 5 Changes of Relative Biomass under NaCl stress

品种 Variety	济谷 16 Jigu 16	鲁谷 1 号 Lugu 1	豫谷 1 号 Yugu 1
相对生物量 Relative biomass	0.888a	0.769b	0.926a

不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著 Different letters indicates a significant difference at 0.05 level

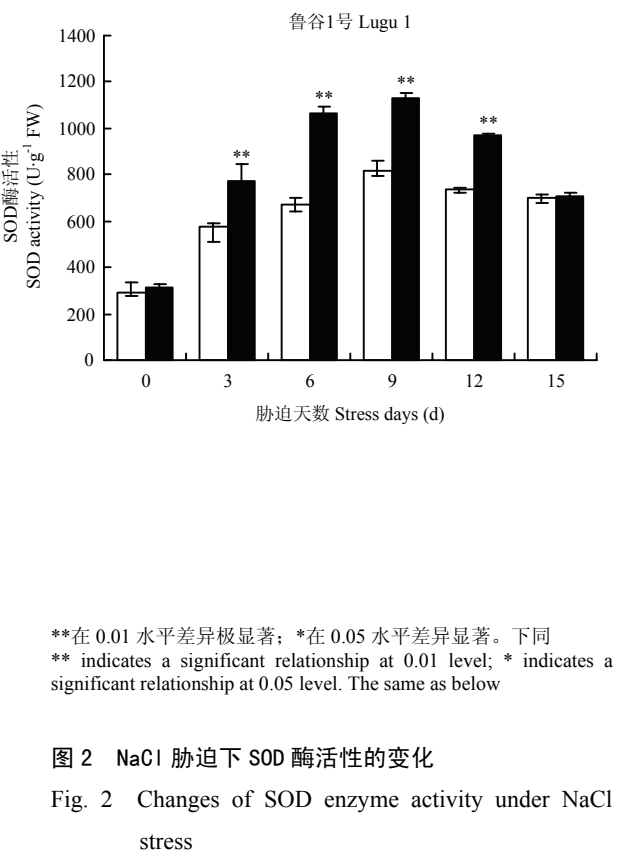
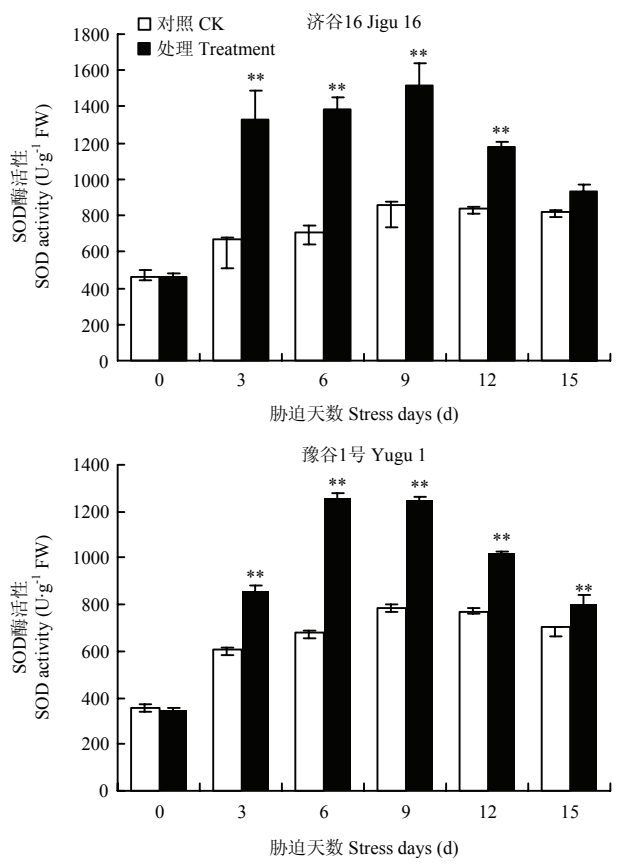


图 2 NaCl 胁迫下 SOD 酶活性的变化

Fig. 2 Changes of SOD enzyme activity under NaCl stress

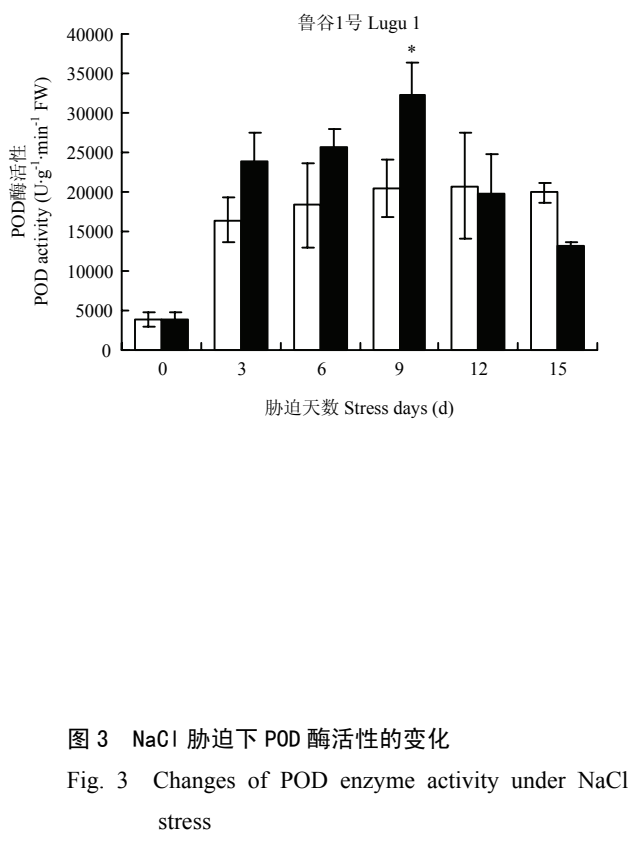
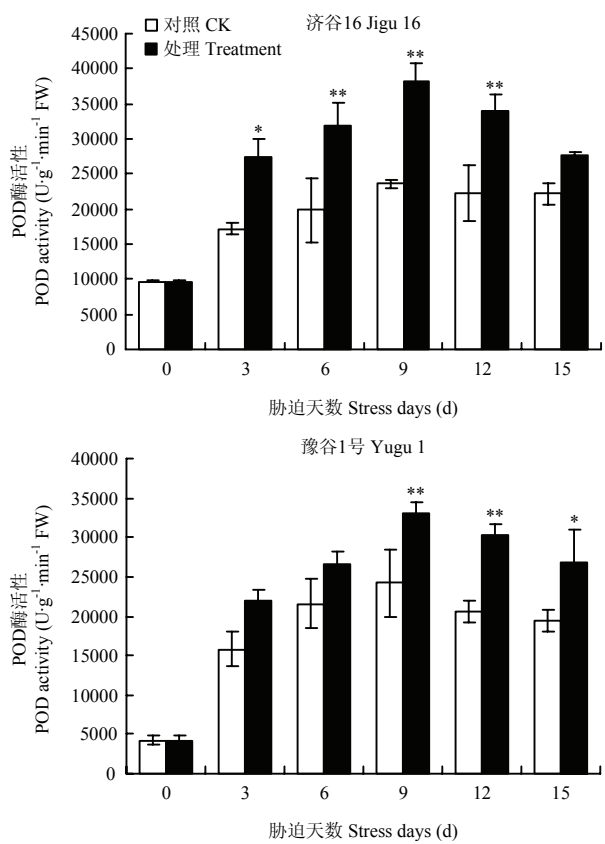


图 3 NaCl 胁迫下 POD 酶活性的变化

Fig. 3 Changes of POD enzyme activity under NaCl stress

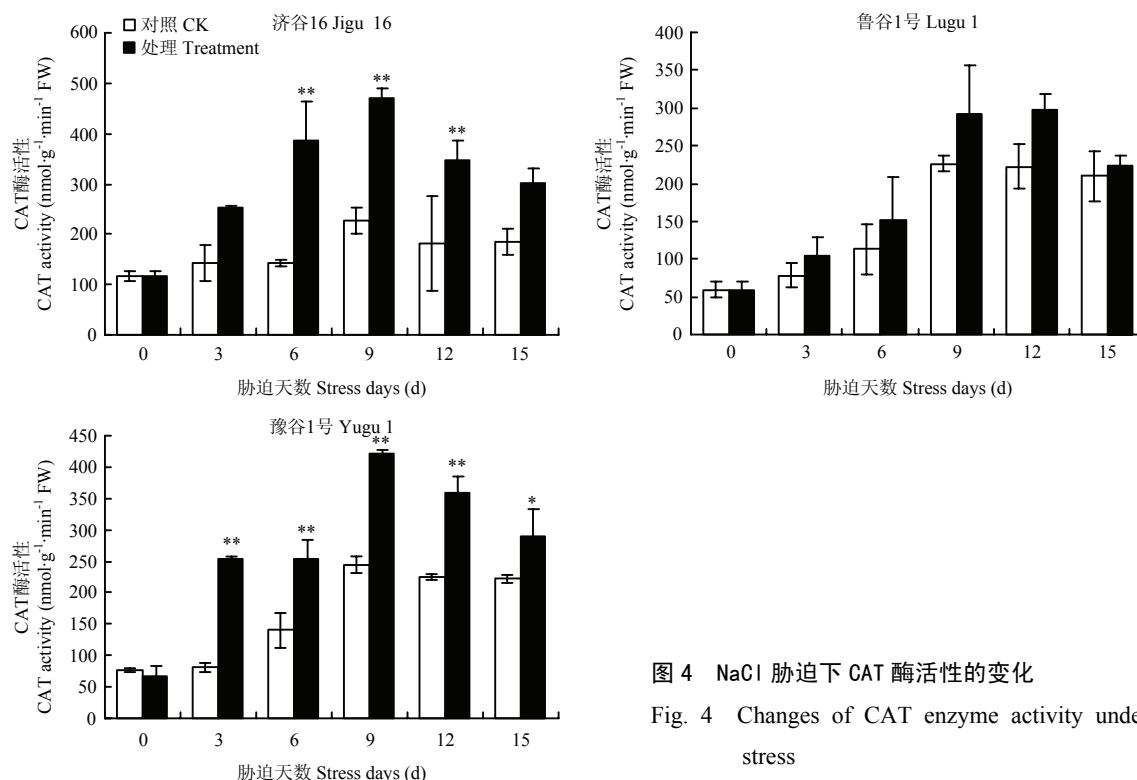


图4 NaCl胁迫下CAT酶活性的变化

Fig. 4 Changes of CAT enzyme activity under NaCl stress

在盐处理 12 d 达到最大。济谷 16 上升的幅度最大，为对照的 2 倍，其次是豫谷 1 号酶活性是对照的 1.72 倍，鲁谷 1 号上升幅度最小，是对照的 1.34 倍。济谷 16 号和豫谷 1 号在处理 12 和 15 d 后，CAT 活性增长幅度仍然较大。

### 3 讨论

#### 3.1 谷子萌发期耐盐综合指标的确定

作物种质资源具有丰富的遗传多样性，蕴藏着多种可利用的优异基因<sup>[24]</sup>，耐盐种质资源的发现和利用是耐盐品种培育的关键。作物的萌发期决定了出苗率和成苗率，是进行耐盐性鉴定的重要时期之一<sup>[25]</sup>。萌发期进行耐盐性鉴定，可以在短时间内对大量的品种进行评价，这一方法可操作性强、周期短、效率高，一般用于对农作物耐盐性的初步评价<sup>[26]</sup>。由于试验所选用材料的不同，其耐盐鉴定的指标也存在差异。根长、叶长可以作为小麦、玉米耐盐性筛选的首要形态学指标<sup>[27-28]</sup>。发芽势、发芽率等指标也可作为作物萌发期耐盐能力鉴定的主要性状<sup>[29-31]</sup>。本研究以 1.5%NaCl 溶液为萌发期胁迫浓度，来自不同生态区的谷子品种为材料，测定发芽率、发芽势、胚根长、胚芽长等性状指标，结果表明，54 份谷子种质在萌发期盐胁迫下存在广泛的遗传变异。通过相关性分析发现

相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对芽长与耐盐性关系密切。

作物的耐盐性是涉及多种代谢途径的复杂性状，采用单一指标进行耐盐性鉴定具有片面性。因此，进行作物耐盐资源评价鉴定，应综合考虑各个指标对其耐盐性的贡献。隶属函数分析法在作物的耐盐性综合评价中达到了广泛的应用，是一个科学系统的筛选鉴定体系<sup>[10, 32-34]</sup>。刘敏轩等<sup>[35]</sup>利用隶属函数法研究了 16 份黍稷种质在中性混合盐胁迫下的耐盐性，认为该方法能够较为准确地评价黍稷的耐盐性。本研究采用隶属函数法对谷子种质进行萌发期耐盐性综合评价，并通过系统聚类对其耐盐性进行了划分。54 份谷子种质被分为高度盐敏感品种（16.7%）、盐敏感品种（29.62%）、中度耐盐品种（37.03%）、耐盐品种（9.26%）、以及高度耐盐品种（7.40%）5 种类型。其中，萌发期耐盐性最强的是来自西北春谷区的品种延谷 13，该品种的相对发芽势为 74.57%，相对芽长 59.48%在所有参试品种中最高。同时对筛选到的不同耐盐性材料进行苗期耐盐性鉴定并进行生理指标的验证。

#### 3.2 叶片保护酶系统对盐胁迫的响应

植物盐胁迫后会产生大量的活性氧，对植物细胞和组织造成伤害。为抵抗胁迫造成的伤害，植物自身

具备清除活性的功能。SOD、POD、CAT 等酶类是植物抗逆的重要酶保护系统。SOD 能催化过氧阴离子发生歧化反应,生成过氧化氢,是植物体内防御和抵抗活性氧毒害的第一道防线<sup>[36]</sup>。过氧化氢在 CAT、POD 等抗氧化酶的作用下转化成水和氧气,从而提高植物对逆境的耐受能力<sup>[37]</sup>。高昆等<sup>[19]</sup>研究发现盐碱胁迫 2 周后豫谷 18 幼苗过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性上升。这说明在盐胁迫的过程中谷子幼苗通过提高 SOD、POD、CAT 的酶活性来清除体内多余的活性氧,以抵御盐胁迫伤害;本研究发现,随着 0.5% NaCl 胁迫时间的延长,济谷 16、豫谷 1 号以及鲁谷 1 号叶片中 SOD、CAT、POD 酶均出现先升高后降低的趋势。3 个品种中 SOD 酶活性在盐胁迫的第 9 天酶活性达到最大值,但与对照相比上升的幅度并不相同,耐盐性相对较强的济谷 16 和豫谷 1 号上升幅度要高于盐敏感的鲁谷 1 号。济谷 16 和豫谷 1 号 CAT 酶活性同样在盐处理 9 d 达到最大酶活,鲁谷 1 号 CAT 酶活性在盐处理 12 d 达到最大酶活。济谷 16 上升的幅度最大,为对照的 2 倍。说明耐盐性相对较强的谷子品种在胁迫应答过程中产生较高保护酶活性抵御盐离子造成的损伤,减少对植株的损伤。随着盐胁迫程度的加重,3 个品种的 SOD、POD、CAT 的酶活性均开始下降,鲁谷 1 号的 POD 酶活性降幅最大,至盐胁迫的第 15 天酶活性只有对照的 65.93%,说明盐敏感品种鲁谷 1 号的抗氧化系统遭受较大的损伤。

## 4 结 论

54 份不同基因型谷子种质萌发期耐盐性存在显著差异,根据耐盐性的强弱分为高度盐敏感品种、盐敏感品种、中度耐盐品种、耐盐品种、高度耐盐品种 5 个不同类型。不同基因型谷子品种叶片保护酶系统对 NaCl 胁迫响应能力的不同,可能是由于谷子耐盐能力不同造成的。

## References

- [1] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 654-681.
- [2] JAFAR M Z, FAROOQ M, CHEEMA M, AFZAL I, BASTRA S M A, WAHID M A. Improving the performance of wheat by seed priming under saline conditions. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2012, 198(1): 38-45.
- [3] FAROOQ M. Potassium substitution by sodium in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30(4): 401-413.

- [4] 赵海燕, 王建设, 刘林强, 陈勇全, 李梦飞, 卢全伟, 刘方, 彭仁海. 海岛棉苗期盐胁迫下形态学和生理学指标变化. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3494-3505.  
ZHAO H Y, WANG J S, LIU L Q, CHEN Y Q, LI M F, LU Q W, LIU F, PENG R H. Morphological and physiological mechanism of salt tolerance in *Gossypium barbadense* to salt stress at seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18): 3494-3505. (in Chinese)
- [5] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物. 北京: 科学出版社, 1999: 1-6.  
ZHAO K F, LI F Z. *China Halophyte*. Beijing: Science Press, 1999: 1-6. (in Chinese)
- [6] DIAO X M, SCHNABLE J, BENNETZEN J L, LI J. Initiation of *Setaria* as a model plant. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2014, 1: 16-20.
- [7] DOUST A N, KELLOGG E A, DEVOS K M, BENNETZEN J L. Foxtail millet: A sequence-driven grass model system. *Plant Physiology*, 2009, 149: 137-141.
- [8] 智慧, 刁现民, 吕芑, 李伟, 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.  
ZHI H, DIAO X M, LÜ P, LI W, ZOYA A. Methodology analysis on screening of salt tolerant genotypes from foxtail millet and other *Setaria* species. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2004, 8(4): 15-18. (in Chinese)
- [9] 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.  
TIAN B H, WANG S Y, LI Y J, WANG J G, ZHANG L X, LIANG F Q, ZHAI Y Z, LIU J R. Response to sodium chloride stress at germination and seedling and identification of salinity tolerant genotypes in foxtail millet landraces originated from China. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(12): 2218-2222. (in Chinese)
- [10] 韩飞, 诸葛玉平, 娄燕宏, 王会, 张乃丹, 何伟, 晁赢. 63 份谷子种质的耐盐综合评价及耐盐品种筛选. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(4): 685-693.  
HAN F, ZHUGE Y P, LOU Y H, WANG H, ZHANG N D, HE W, CHAO Y. Evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of 63 foxtail millet germplasm. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(4): 685-693. (in Chinese)
- [11] 崔兴国, 时丽冉. 盐胁迫对不同品种谷子萌发及幼苗生长的影响. *黑龙江农业科学*, 2011(6): 14-16.  
CUI X G, SHI L R. Effect of salt stress on different seed germination and seedling growth of *Setaria italica* (L.). *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2011(6): 14-16. (in Chinese)
- [12] 牛希华, 艾海舰. NaCl 胁迫对谷子种子萌发及幼苗生长影响的研究

- 究. 榆林学院学报, 2018, 28(2): 18-81.
- NIU X H, AI H J. Seed germination and seedling growth of millet under NaCl' s intervention. *Journal of Yulin University*, 2018, 28(2): 18-81. (in Chinese)
- [13] 郭瑞锋, 张永福, 任月梅, 杨忠. 混合盐碱胁迫对谷子萌发、幼芽生长的影响及耐盐碱品种筛选. 作物杂志, 2017, 4: 63-66.
- GUO R F, ZHANG Y F, REN Y M, YANG Z. Effects of saline-alkali stress on millet germination and shoots growth and saline-alkali tolerance variety screening. *Crops*, 2017, 4: 63-66. (in Chinese)
- [14] 田伯红, 王建广, 李雅静, 张立新, 孔德平. 谷子发芽期和幼苗前期耐盐性鉴定指标的研究. 河北农业科学, 2008, 12(7): 4-6.
- TIAN B H, WANG J G, LI Y J, ZHANG L X, KONG D P Studies on screening indexes for salt tolerance of millet during germination period and early seedling stage. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(7): 4-6. (in Chinese)
- [15] SUGIMOTO M, OONO Y, GUSEV O, MATSUMOTO T, YAZAWA T, LEVINSKIKH M A, SYCHEV V N, BINGHAM G E, WHEELER R, HUMMERICK M. Genome-wide expression analysis of reactive oxygen species gene network in Mizuna plants grown in long-term spaceflight. *BMC Plant Biology*, 2014, 14: 4-14.
- [16] CHELIKANI P, FITA I, LOEWEN P C. Diversity of structures and properties among catalases. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2004, 61(2): 192-208.
- [17] SCHMITT F J, RENGGER G, FRIEDRICH T, KRESLAVSKI V D, ZHARMUKHAMEDOV S K, LOS D A, KUZNETSOV V V. Reactive oxygen species: Re-evaluation of generation, monitoring and role in stress-signaling in phototrophic organisms. *Biochemica et Biophysica Acta*, 2014, 1837: 835-848.
- [18] SEWELAM N, KAZAN K, SCHENK P M. Global plant stress signaling: reactive oxygen species at the cross-road. *Frontier in Plant Science*, 2016, 7: 187-207.
- [19] 高昆, 崔妮妮. 复合盐胁迫对豫谷 18 幼苗生理指标的影响. 山西大同大学学报(自然科学版): 2018, 54(6): 54-57.
- GAO K, CUI N N. Effects of composite salt stress on physiological indices of seedlings of Yugu 18. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science)*, 2018, 54(6):54-57. (in Chinese)
- [20] SREENIVASULU N, GRIMMA B, WOBUSA U, WESCHKE W. Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerance and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*). *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(4): 435-442.
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [22] 金丽萍, 崔世茂, 杜金伟, 金彩霞, 吴玉峰, 其日格. 干旱胁迫对不同生态条件下蒙古扁桃叶片 PAL 和 C<sub>4</sub>H 活性的影响. 华北农学报, 2009, 24(5): 118-122.
- JIN L P, CUI S M, DU J W, JIN C X, WU Y F, QI R G. Effects of drought stress in different ecological conditions of the *Prunus mongolica* maxim almond leaves in PAL and C<sub>4</sub>H activity. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(5): 118-122. (in Chinese)
- [23] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 王立红, 麦麦提·阿皮孜, 张巨松. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1290-1300.
- DAI H F, WU H, AMANGULI·MAIMAITIALI, WANG L H, MAIMAITI·APIZI, ZHANG J S. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerance evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1290-1300. (in Chinese)
- [24] 张健全, 王彦荣. 胡卢巴生物生泰学特征及种质资源研究进展. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 94-101.
- ZHANG J Q, WANG Y R. Biological and ecological characteristics of *Tiigonella foenumgraecum* and research advances in germplasm resources. *Journal of Lanzhou University*, 2012, 48(6): 94-101. (in Chinese)
- [25] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价. 作物学报, 2005, 31(1): 58-64.
- MA Y Q, WENG Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(1): 58-64. (in Chinese)
- [26] 阎志红, 刘文革, 赵胜杰, 何楠, 王俊良. NaCl 胁迫对不同西瓜种质资源发芽的影响. 植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 220-225.
- YAN Z H, LIU W G, ZHAO S J, HE N, WANG J L. Effect of NaCl stress on germination of different watermelon varieties. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(2): 220-225. (in Chinese)
- [27] DÍAZ DE LEÓN J L, CARRILLO-LAGUNA M, RAJARAM S, MUJEEB-KAZI A. Rapid in vitro screening of some salt tolerant bread wheats. *Cereal Research Communications*, 1995, 23(4): 383-389.
- [28] 刘芳, 付艳, 高树仁, 王振华. 玉米幼苗的盐胁迫反应及玉米耐盐性的鉴定. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(6): 22-26.
- LIU F, FU Y, GAO S R, WANG Z H. Response under salt stress of maize in seedling stage and appraisal of salt tolerance of maize. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2007, 19(6): 22-26. (in Chinese)

- [29] 彭智, 李龙, 柳玉平, 刘惠民, 景蕊莲. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645.
- PENG Z, LI L, LIU Y P, LIU H M, JING R L. Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 638-645. (in Chinese)
- [30] 龙卫华, 浦惠明, 张洁夫, 戚存扣, 张学昆. 甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选. 中国油料作物学报, 2013, 35(3): 271-275.
- LONG W H, PU H M, ZHANG J F, QI C K, ZHANG X K. Screening of *Brassica napus* for salinity tolerance at germination stage. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(3): 271-275. (in Chinese)
- [31] 郭瑞, 李峰, 周际, 李昊儒, 夏旭, 刘琪. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征. 植物生态学报, 2016, 40(1): 69-79.
- GUO R, LI F, ZHOU J, LI H R, XIA X, LIU Q. Eco-physiological responses of linseed (*Linum usitatissimum*) to salt and alkali stresses. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(1): 69-79. (in Chinese)
- [32] 牛远, 杨修艳, 戴存凤, 王博文, 任高磊, 吴静磊, 王飞兵, 陈新红. 大豆芽期和苗期耐盐性评价指标筛选. 大豆科学, 2018, 37(2): 215-223.
- NIU Y, YANG X Y, DAI C F, WANG B W, REN G L, WU J L, WANG F B, CHEN X H. Related indices selection of soybean salt tolerance at germination and seedling stages. *Soybean Science*, 2018, 37(2): 215-223. (in Chinese)
- [33] 侯文焕, 赵艳红, 唐兴富, 廖小芳, 李初英. 菜用黄麻种质萌发期耐盐性评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(2): 309-320.
- HOU W H, ZHAO Y H, TANG X F, LIAO X F, LI C Y. Assessment for salt tolerance in vegetable jute germplasms at the germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(2): 309-320. (in Chinese)
- [34] 段文学, 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 张立明. 甘薯苗期耐盐性鉴定及其指标筛选. 作物学报, 2018, 44(8): 1237-1247.
- DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, WANG B Q, ZHANG L M. Identification of salt tolerance and screening for its indicators in sweet potato varieties during seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(8): 1237-1247. (in Chinese)
- [35] 刘敏轩, 张宗文, 吴斌, 陆平. 黍稷种质资源芽、苗期耐中性混合盐胁迫评价与耐盐生理机制研究. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3733-3743.
- LIU M X, ZHANG Z W, WU B, LU P. Evaluation of mixed salt-tolerance at germination stage and seedling stage and the related physiological characteristics of *Panicum miliaceum* L.. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18): 3733-3743. (in Chinese)
- [36] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [37] JIANG L, YANG H. Prometryne-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(6): 1687-1693.

(责任编辑 李莉)

秦岭, 张艳亭, 陈二影, 杨延兵, 黎飞飞, 管延安. 谷子萌发期耐盐种质筛选及其保护酶系统对盐胁迫的响应. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4027-4038// doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.22.008

附表1 54份谷子来源及所属生态区

Supplement table 1 Resources and eco-region of 54 foxtail millet varieties

序号 Number	品种名称 Variety	来源 Resources	所属生态区 Ecological area
1	鲁谷 1 Lugu 1	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
2	鲁谷 5 Lugu 5	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
3	鲁谷 6 Lugu 6	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
4	鲁谷 10 Lugu 10	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
5	济谷 12 Jigu 12	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
6	济谷 16 Jigu 16	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
7	济谷 17 Jigu 17	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
8	济谷 18 Jigu18	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
9	济谷 19 Jigu 19	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
10	济谷 20 Jigu 20	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
11	济谷 21 Jigu 21	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
12	济谷 22 Jigu 22	山东济南 Jinan, Shandong	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
13	小香米 Xiaoxiangmi	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
14	谷丰 1 号 Gufeng 1	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
15	冀谷 11 Jigu 11	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
16	冀谷 14 Jigu 14	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
17	冀谷 19 Jigu 19	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
18	冀谷 25 Jigu 25	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
19	矮 88 Ai88	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
20	衡谷 10 Henggu 10	河北衡水 Hengshui, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
21	保谷 18 Baogu 18	河北保定 Baoding, Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
22	沧谷 4 号 Canggu 4	河北沧州 Cangzhou , Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
23	青丰谷 Qingfenggu	河北沧州 Cangzhou , Hebei	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
24	豫谷 1 号 Yugu 1	河南安阳 Anyang , Henan	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
25	豫谷 2 号 Yugu 2	河南安阳 Anyang , Henan	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
26	豫谷 5 号 Yugu 5	河南安阳 Anyang , Henan	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
27	豫谷 15 Yugu 15	河南安阳 Anyang , Henan	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
28	豫谷 18 Yugu 18	河南安阳 Anyang , Henan	华北夏谷区 Summer Sowing Region of North China
29	晋谷 34 Jingu 34	山西太原 Taiyuan, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
30	晋谷 41 Jingu 41	山西太原 Taiyuan, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
31	晋谷 35 Jingu 35	山西长治 Changzhi, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
32	长生 4 Changsheng 4	山西长治 Changzhi, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China

秦岭, 张艳亭, 陈二影, 杨延兵, 黎飞飞, 管延安. 谷子萌发期耐盐种质筛选及其保护酶系统对盐胁迫的响应. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4027-4038// doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.22.008

序号 Number	品种名称 Variety	来源 Resources	所属生态区 Ecological area
			China
33	长生 18 Changsheng 18	山西长治 Changzhi, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
34	吕谷 2 Ligu 2	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
35	汾选 3 号 Fenxuan 3	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
36	大同 29 Datong 29	山西大同 Datong, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
37	大同 32 Datong 32	山西大同 Datong, Shanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
38	陇谷 3 号 Longgu 3	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
39	陇谷 5 号 Longgu 5	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
40	秦谷 3 号 Qingu 3	陕西延安 Yanan, Shaanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
41	延谷 13 号 Yangu 13	陕西延安 Yanan, Shaanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
42	延谷 12 号 Yangu 12	陕西延安 Yanan, Shaanxi	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
43	内滑谷子 Neihuaguzi	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
44	内金香玉 Neijinxiangyu	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	西北春谷区 Spring Sowing Region of Northwest China
45	赤谷 4 号 Chigu 4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
46	赤谷 10 号 Chigu10	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
47	九谷 8 Jiugu 8	吉林省吉林市 Jilin, Jilin	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
48	龙谷 30 Longgu 30	黑龙江哈尔滨 Haibin, Heilongjiang	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
49	龙谷 33 Longgu 33	黑龙江哈尔滨 Haibin, Heilongjiang	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
50	公矮 6 Gongai 6	吉林长春 Changchun, Jilin	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
51	公谷 66 Gonggu66	吉林长春 Changchun, Jilin	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
52	朝谷 15 Chaogu 15	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
53	朝谷 59 Chaogu 59	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China
54	燕谷 16 Yangu 16	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	东北春谷区 Spring Sowing Region of Northeast China