

DOI:10.11686/cyxb2025210

http://cyxb.magtech.com.cn

李铮, 胡海英, 兰剑, 等. 小黑麦种质资源萌芽期耐盐性评价与筛选. 草业学报, 2026, 35(5): 225—238.

LI Zheng, HU Hai-ying, LAN Jian, *et al.* Evaluation and screening of salt tolerance of triticale germplasm resources at the germination stage. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 225—238.

## 小黑麦种质资源萌芽期耐盐性评价与筛选

李铮<sup>1,2</sup>, 胡海英<sup>1</sup>, 兰剑<sup>1</sup>, 丁莉<sup>1</sup>, 魏文博<sup>1</sup>, 李玉莲<sup>1</sup>, 马巧利<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193)

**摘要:**为提升宁夏引黄灌区盐碱地利用效率并缓解粮草争地矛盾,本研究以 103 份小黑麦种质材料为对象,开展耐盐性评价与筛选。通过 0~300 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 梯度胁迫预试验,确定 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 为最适胁迫浓度。基于存活率、株高、地上部鲜重、根长及叶绿素含量等耐盐系数,采用主成分分析提取 3 个综合指标(累计贡献率>80%),结合隶属函数及聚类分析,筛选出耐盐型材料(QT-5、LJ-65)和盐敏感型材料(M90、M36)。进一步测定 6 份代表性材料的萌发指标(发芽势、存活率)、表型指标(株高、地上部鲜重、根长)及生理生化指标[丙二醛(MDA)含量,过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性],发现小黑麦叶片较根系更早响应盐胁迫,耐盐型材料的抗氧化酶(CAT、POD、SOD)活性变化大于盐敏感材料,而 MDA 含量仅在耐盐性差异显著时有明显变化,表明活性氧清除能力是耐盐性的关键生理机制。本研究为宁夏地区小黑麦耐盐育种提供了优异种质资源,并丰富了耐盐性评价的生理指标体系。

**关键词:**小黑麦;耐盐性评价;隶属函数分析;生理生化指标

## Evaluation and screening of salt tolerance of triticale germplasm resources at the germination stage

LI Zheng<sup>1,2</sup>, HU Hai-ying<sup>1</sup>, LAN Jian<sup>1</sup>, DING Li<sup>1</sup>, WEI Wen-bo<sup>1</sup>, LI Yu-lian<sup>1</sup>, MA Qiao-li<sup>1\*</sup>

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract:** The overall aim of our research is to improve saline-alkali land utilization efficiency and alleviate the competition between grain and forage production in the Ningxia Yellow River irrigation region. To this end, we evaluated and screened 103 triticale (*×Triticosecale*) germplasm at the germination stage to determine their salt tolerance. Preliminary trials were conducted under a NaCl gradient (0—300 mmol·L<sup>-1</sup>), and the results showed that 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl was the optimal concentration for evaluation. Three principal components with a cumulative contribution rate of >80% were extracted from the salt tolerance coefficients of survival rate, plant height, shoot fresh weight, root length, and chlorophyll content. Integrated membership function and cluster analyses identified two salt-tolerant genotypes (QT-5, LJ-65) and two salt-sensitive genotypes (M90, M36). Six representative accessions were further analyzed to determine their germination traits (germination potential, survival rate), phenotypic parameters (plant height, shoot fresh weight, root length), and physiological indices [malondialdehyde

收稿日期:2025-05-26;改回日期:2025-07-21

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01012),宁夏回族自治区中央引导地方科技发展专项项目(2024FRD05055),全职引进高层次人才(2024BEH04144)和 2025 年宁夏大学创新创业训练计划(202510748549)资助。

作者简介:李铮(2003—),女,山东泰安人,在读硕士。E-mail: lz1297039586@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mql\_2008@126.com

(MDA) content, catalase (CAT), peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities]. The results show that triticale leaves responded to salt stress earlier than roots. The increase in activities of antioxidant enzymes (CAT, POD, SOD) were greater in salt-tolerant genotypes than in salt-sensitive ones, whereas the MDA content only varied significantly when salt tolerance differed markedly. These findings suggest that the capacity to scavenge reactive oxygen species is crucial for salt tolerance. The results of this study identify elite germplasm resources for salt-tolerant triticale breeding in Ningxia and demonstrate the use of a robust physiological evaluation system to screen salt-tolerant materials.

**Key words:** triticale; evaluation of salt tolerance; membership function analysis; physiological and biochemical indicators

盐胁迫通过影响植物的生长发育最终降低农作物产量。依据联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)的不完全统计,全世界范围内的盐碱土面积达9.54亿 $\text{hm}^2$ ,约占全球陆地面积的7%<sup>[1]</sup>。我国土壤盐碱化和次生盐碱化面积约为 $9.913 \times 10^7 \text{hm}^2$ ,占全国土地面积的10%<sup>[2]</sup>。盐碱化发生的原因大多是降水量少而蒸发量大。宁夏地处西北地区东部,黄河上游下段,年平均降水量较少(约292 mm),年蒸发量较大(水面蒸发量1296 mm)<sup>[3]</sup>,导致引黄灌区内大面积土壤出现盐渍化。据统计该区次生盐渍化面积约为 $2.4 \times 10^5 \text{hm}^2$ ,占现有耕地面积的48.9%<sup>[4]</sup>,对宁夏农业的高质量发展构成了阻碍。

针对这一问题,研究人员对改良盐碱地的技术和措施展开探索,提出了诸多切实可行的方法,在各项治理措施当中,生物措施被视作最为有效的改良方法<sup>[5]</sup>。其中通过种质资源筛选利用耐盐植物对盐碱地进行改良,不仅契合了“粮草兼顾”结构转型的要求,也能够实现作物增产和盐碱地改良双赢<sup>[6]</sup>。

小黑麦( $\times$  *Triticosecale*)是小麦属(*Triticum*)与黑麦属(*Secale*)植物进行物种间有性杂交以及杂种染色体数加倍后得到的人工培育新品种<sup>[7]</sup>,结合了小麦(*Triticum aestivum*)的高产特性和黑麦(*Secale cereale*)的强抗逆性,具有显著的杂种生长优势。小黑麦根系发达,能够改善土壤结构,增加土壤有机质含量,提高土壤肥力,同时它也有良好的适口性,能够作为牲畜的饲料,有研究表明,小黑麦有助于提高肉类和奶制品的质量<sup>[8]</sup>。而且小黑麦部分品种具备较高的耐盐性,是改良盐碱土的先锋植物。因此,本研究对其种质资源进行耐盐性评价与筛选。

植物的萌芽期作为植物生长发育过程的起点,是生命活动最脆弱、敏感的时期,因此在探究植物耐盐性的试验中常用萌芽期的一些性状如发芽率、发芽势、根长等作为筛选耐盐性植物的指标<sup>[9]</sup>。尉志强等<sup>[10]</sup>设置了0~200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl溶液作为盐胁迫处理对7份小黑麦种质材料进行耐盐性筛选,试验表明随着NaCl浓度的增加,种子的相对芽长、相对芽干重、相对根长、相对根干重、相对发芽率等指标均有显著性下降。且该试验发现,7份小黑麦材料在NaCl胁迫浓度为160~200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时相对发芽率的差异并不显著,由此假设部分小黑麦材料萌发期耐盐胁迫浓度可能比200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高,并建议在试验中设置更高的盐胁迫浓度对小黑麦种质材料进行耐盐性鉴定。钱娇娇等<sup>[11]</sup>用200和300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl溶液对29份小黑麦种质材料进行了苗期高浓度盐胁迫处理,并筛选出苗期耐盐小黑麦种质材料1份,敏盐种质材料4份。本试验选择0~300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl溶液对随机选出的当年收获的8份小黑麦种质材料进行适宜NaCl溶液浓度筛选预试验,通过测定存活率、株高、地上部分鲜重等指标并对其进行显著性差异分析和变异系数分析,最终确定了将200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl溶液作为后续小黑麦耐盐性评价的胁迫浓度。

本研究采用200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl溶液作为盐胁迫条件,评价不同小黑麦种质资源在萌芽期的耐盐生理响应,旨在筛选出具有显著耐盐特性的种质材料,为宁夏盐碱地适生小黑麦品种的选育提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

共有103份小黑麦种质资源供试,其中M系列44份种质和QT系列24份种质来自河北省农科院旱作农业研

究所, LJ 系列 35 份种质由宁夏大学林业与草业学院提供。

## 1.2 试验方法

试验于 2024 年 7 月—2025 年 4 月在宁夏大学林业与草业学院草学实验室进行, 采用蛭石和营养土体积比 1:1 (v/v) 混合土培, 植物培养间温度为  $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ , 光周期为 16 h/8 h (光/暗), 相对湿度为 60%。

**1.2.1 小黑麦耐盐种质资源评价与筛选** 采用蛭石与营养土按 1:1 (v/v) 比例混合作为栽培基质, 均匀装填于育苗盆中。试验设对照组 (蒸馏水处理) 和盐处理组 ( $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 溶液), 每组溶液浇灌体积相同。选取籽粒饱满、大小均一的小黑麦种子, 经蒸馏水表面冲洗后, 每盆播种 10 粒, 每个处理设置 3 次重复。放置在植物培养间中, 隔日补充蒸馏水维持基质湿度为田间持水量的 70%~80%。播种后 14 d 测定存活率、株高、地上部鲜重、叶绿素含量等指标。

**1.2.2 小黑麦耐盐和敏盐种质材料差异性分析** 以耐盐性评价筛选试验获得的小黑麦种质为材料, 在植物培养间进行土培试验, 栽培基质为营养土与蛭石按 1:1 (v/v) 比例混合配制。试验设对照组 (蒸馏水浇灌) 和盐处理组 ( $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 溶液浇灌), 每个品种 × 处理组合设置 3 次生物学重复, 每盆播种 10 粒经蒸馏水冲洗的均一饱满种子。处理期间隔日补充蒸馏水维持基质湿度为田间持水量的 70%~80%。播种后 4 d 测定发芽势; 播种后 14 d 测定表型指标 (存活率、株高、地上部鲜重、根长) 和生理生化指标 [叶绿素相对含量、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量]。

## 1.3 指标测定方法

**1.3.1 形态指标测定方法** 1) 采用标准刻度尺 (精度 1 mm) 测量苗期株高和根长, 每份种质随机选取 6 株测定, 取算术平均值作为该材料的株高和根长。每份种质随机选取 9 株材料, 用电子分析天平 (精度  $0.0001 \text{ g}$ , LE204E, 上海) 测定植株地上部鲜重, 计算平均鲜重以消除个体差异。

2) 相关指标计算公式如下:

$$\text{发芽势 (germination potential, \%)} = \text{第4天发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100$$

$$\text{存活率 (survival rate, \%)} = \text{第14天发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100$$

$$\text{相对株高} = \text{处理组株高} / \text{对照组株高}$$

$$\text{相对地上部鲜重} = \text{处理组地上部鲜重} / \text{对照组地上部鲜重}$$

$$\text{相对根长} = \text{处理组根长} / \text{对照组根长}$$

**1.3.2 生理指标测定方法** 1) 叶绿素相对含量 (relative content of chlorophyll), 采用便携式叶绿素测定仪 (TYS-B, 浙江托普云农科技股份有限公司) 测定幼苗顶层完全展开叶片的叶绿素 SPAD (soil and plant analyzer development) 值, 每个种质材料随机选取 6 片叶进行测定, 取平均值作为该材料的叶绿素相对含量指标。

2) 过氧化氢酶 (CAT) 活性, 采用北京索莱宝科技有限公司试剂盒 (货号: BC0205), 测定反应溶液在 240 nm 下的初始吸光值  $A_1$  和 1 min 后的吸光值  $A_2$ , 根据 240 nm 处吸光度的变化率可进一步计算出酶活性。

3) 丙二醛含量 (MDA), 使用北京索莱宝科技有限公司试剂盒 (货号: BC0020), 测定 532 nm 处 MDA-TBA 复合物特征吸收峰, 进而估测样本中 MDA 含量。

4) 过氧化物酶 (POD) 活性, 用北京索莱宝科技有限公司试剂盒 (货号: BC0090) 测定, 记录 470 nm 下 30 s 时的吸光值  $A_1$  和 90 s 后的吸光值  $A_2$ , 通过 470 nm 处吸光值的变化率进一步计算得出酶活性。

5) 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 用北京索莱宝科技有限公司的超氧化物歧化酶活性检测试剂盒 (货号: BC0170) 测定样品在 560 nm 处的吸光值, 计算得出 SOD 活性。

## 1.4 数据分析

用 Excel 2019 进行数据统计与整理, 计算平均值、标准差等, 利用 SPSS 26 和 Origin 2024 进行方差、相关性、隶属函数、主成分等多元分析及绘图。

隶属函数计算公式:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

式中: $U$ 表示隶属函数值; $X_{ij}$ 表示第*i*个种质的第*j*个主成分值; $X_{jmax}$ 表示第*j*个主成分的最大值; $X_{jmin}$ 表示第*j*个主成分的最小值<sup>[12]</sup>。

主成分权重计算公式:

$$w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ ;权重 $w_j$ 表示第*j*个主成分的重要程度; $p_j$ 表示第*j*个主成分的贡献率。

耐盐性综合评价值(D)计算公式:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times w_j] \quad (3)$$

式中: $D$ 值表示第*i*个小黑麦种质材料在盐胁迫条件下的耐盐性综合评价值。

## 2 结果与分析

### 2.1 种质资源的耐盐性评价与筛选

**2.1.1 主成分分析** 采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)对小黑麦耐盐性相关的5个指标(种子存活率、株高、地上鲜重、根长及叶绿素相对含量)的耐盐系数进行降维分析,构建出一组互不相关的综合指标。根据Kaiser准则(特征值 $>1$ )和累计贡献率阈值( $>80\%$ )的提取标准<sup>[12]</sup>,PCA分析共提取3个主成分,其特征值分别为36.867%、32.349%和14.867%,累计贡献率达84.083%,能够充分反映原始指标的大部分信息(表1)。通过公式(2)计算各主成分权重后,基于这3个综合指标对103份小黑麦种质资源进行隶属函数分析,从而实现小黑麦耐盐性的综合评价。该分析方法能够有效识别影响小黑麦耐盐性的主导因子,为小黑麦耐盐种质筛选提供了科学依据。

表1 小黑麦种质资源耐盐性评价指标的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of salt tolerance evaluation indicators in triticale germplasm

成分 Component	总计 Total	初始特征值方差百分比 Percentage of variance of the initial eigenvalues (%)	累积 Accumulative (%)	提取载荷平方和总计 Extract the total sum of squared loadings	方差百分比 Percentage of variance (%)	累积 Accumulative (%)	主成分权重 Principal component weight
1	1.843	36.867	36.867	1.843	36.867	36.867	0.438
2	1.617	32.349	69.216	1.617	32.349	69.216	0.385
3	0.743	14.867	84.083	0.743	14.867	84.083	0.177
4	0.483	9.662	93.745				
5	0.313	6.255	100.000				

**2.1.2 隶属函数分析** 基于隶属函数分析法,本研究对103份小黑麦种质材料的耐盐性进行了综合评价(表2)。对主成分分析得出的主成分值和主成分权重利用公式(1)、(3)进行隶属函数分析,计算出每份小黑麦种质材料对应的隶属函数值和D值(表2),其中D值为0.18~0.93,参照王萌等<sup>[13]</sup>的划分标准,结合D值将种质材料划分为5个耐盐等级:1级高耐盐,0.80 $\leq$ D值 $\leq$ 1.00;2级耐盐,0.60 $\leq$ D值 $<$ 0.80;3级中间型,0.40 $\leq$ D值 $<$ 0.60;4级不耐盐,0.20 $\leq$ D值 $<$ 0.40;5级盐敏感,0.00 $\leq$ D值 $<$ 0.20。共鉴定到高耐盐材料1份(LJ-26);耐盐材料4份(LJ-8、QT-37、LJ-42、LJ-27);中间型材料75份,不耐盐材料22份,盐敏感材料1份(QT-22)。

**2.1.3 聚类分析** 为精准筛选出小黑麦耐盐的核心种质资源,采用聚类分析法对103份小黑麦种质资源的3个关键耐盐指标(相对地上鲜重、相对存活率及相对株高)进行综合评价。聚类分析热图(图1)结果显示,红色区域表征指标值较高,蓝色区域则表征较低值,空间距离相近的品种在多项耐盐指标上表现出相似性特征。分析表明,LJ-65、QT-41等12份材料分布于白色至红色区域,其在盐胁迫条件下仍能维持较高的存活率、株高及地上生物量(相对值 $\geq$ 0.9),表现出明显的耐盐特性;而LJ-77、M90等5份材料主要聚集于蓝色区域,其各项耐盐指标相对值均较低,表现出明显的盐敏感特征。通过隶属函数分析与聚类分析结果的交叉验证,最后筛选出耐盐型小黑麦种质材料QT-5和LJ-65;盐敏感型种质材料M90和M36以及中间型材料QT-41和LJ-25。

表 2 小黑麦种质资源的耐盐性评价隶属函数值和 D 值

Table 2 Membership function values and D-values for salt tolerance evaluation of triticale germplasm

种质编号 Germplasm number	主成分值 Principal component value			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	排名 Rank
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$		
LJ-26	4.621	-0.115	5.234	1.000	0.747	1.000	0.927	1
LJ-8	2.648	0.174	2.013	0.723	0.785	0.530	0.709	2
QT-37	2.731	-0.607	2.590	0.734	0.684	0.614	0.700	3
LJ-42	2.093	0.581	2.010	0.645	0.837	0.530	0.681	4
LJ-27	1.785	1.122	-1.206	0.602	0.907	0.061	0.601	5
LJ-23	1.400	-0.331	0.060	0.548	0.720	0.245	0.548	6
LJ-25	0.642	1.271	-0.469	0.441	0.926	0.168	0.536	7
LJ-32	1.334	-0.663	0.233	0.538	0.677	0.271	0.534	8
LJ-15	1.178	0.356	-1.275	0.516	0.808	0.050	0.524	9
LJ-1	0.850	0.488	-0.429	0.470	0.825	0.174	0.524	10
LJ-76	0.997	-0.027	-0.213	0.491	0.759	0.205	0.521	11
LJ-63	0.596	1.026	-0.627	0.435	0.894	0.145	0.520	12
QT-18	0.847	0.140	-0.133	0.470	0.780	0.217	0.518	13
LJ-36	1.202	-0.521	-0.411	0.520	0.695	0.177	0.514	14
QT-31	1.006	0.294	-1.201	0.492	0.800	0.061	0.510	15
M59	0.298	1.480	-0.871	0.393	0.953	0.109	0.508	16
LJ-65	0.430	0.451	-0.014	0.411	0.820	0.234	0.500	17
M26	0.272	0.955	-0.467	0.389	0.885	0.168	0.496	18
LJ-68	0.505	0.128	0.034	0.422	0.779	0.241	0.495	19
M51	-0.250	1.746	-0.058	0.316	0.987	0.228	0.495	20
LJ-79	0.418	0.469	-0.353	0.410	0.823	0.185	0.492	21
M58	0.178	1.156	-0.715	0.376	0.911	0.132	0.490	22
QT-35	1.046	-0.817	-0.454	0.498	0.657	0.170	0.490	23
QT-28	0.882	-0.849	0.091	0.475	0.653	0.250	0.489	24
QT-39	0.660	0.005	-0.634	0.444	0.763	0.144	0.486	25
QT-40	0.880	0.140	-1.592	0.475	0.780	0.004	0.485	26
QT-5	0.199	0.517	-0.074	0.379	0.829	0.226	0.483	27
M38	0.110	0.594	-0.010	0.366	0.839	0.235	0.481	28
QT-42	-0.058	0.612	0.398	0.343	0.841	0.295	0.478	29
QT-41	0.194	0.128	0.329	0.378	0.779	0.285	0.478	30
M92	-0.823	1.833	0.915	0.235	0.998	0.370	0.477	31
M25	-0.057	1.302	-0.754	0.343	0.930	0.127	0.476	32
QT-3	0.215	0.490	-0.381	0.381	0.825	0.181	0.476	33
LJ-5	0.658	-0.339	-0.661	0.443	0.718	0.140	0.473	34
M50	0.015	0.715	-0.344	0.353	0.854	0.186	0.470	35
LJ-72	0.700	-0.645	-0.467	0.449	0.679	0.168	0.469	36
QT-34	0.374	-0.109	-0.264	0.403	0.748	0.198	0.469	37
M14	-0.021	0.516	-0.036	0.348	0.829	0.231	0.467	38
LJ-78	-0.207	1.080	-0.442	0.322	0.901	0.172	0.464	39
M54	-0.027	0.481	-0.117	0.347	0.824	0.219	0.463	40
M4	-0.891	1.846	0.458	0.226	1.000	0.303	0.461	41
LJ-51	0.344	-0.973	0.822	0.399	0.637	0.356	0.461	42
QT-8	-0.020	0.872	-0.892	0.348	0.875	0.106	0.460	43
M60	0.093	0.563	-0.909	0.364	0.835	0.104	0.457	44
M48	-0.216	0.555	0.069	0.320	0.834	0.247	0.456	45

续表 Continued Table

种质编号 Germplasm number	主成分值 Principal component value			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	排名 Rank
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$		
M2	0.214	0.571	-1.376	0.381	0.836	0.036	0.455	46
M45	-0.394	0.655	0.411	0.296	0.847	0.296	0.454	47
QT-29	0.468	-0.227	-1.007	0.417	0.733	0.090	0.454	48
M95	-0.949	1.632	0.574	0.218	0.972	0.320	0.452	49
QT-20	0.217	-0.583	0.252	0.381	0.687	0.273	0.452	50
QT-44	0.055	-0.186	0.060	0.359	0.738	0.245	0.449	51
M66	-0.691	0.800	0.855	0.254	0.865	0.361	0.447	52
M41	-0.467	1.057	-0.272	0.285	0.898	0.197	0.447	53
M9	-0.172	0.513	-0.382	0.327	0.828	0.181	0.447	54
LJ-56	-0.040	0.162	-0.286	0.345	0.783	0.195	0.447	55
QT-30	0.436	-0.621	-0.613	0.412	0.682	0.147	0.446	56
LJ-9	0.054	-0.051	-0.287	0.358	0.756	0.195	0.446	57
LJ-28	-0.160	0.586	-0.663	0.328	0.838	0.140	0.444	58
M47	-0.003	-0.259	0.134	0.350	0.729	0.256	0.444	59
LJ-70	-1.609	1.667	2.219	0.125	0.977	0.560	0.442	60
QT-9	-0.222	0.631	-0.676	0.320	0.843	0.138	0.441	61
LJ-20	0.575	-0.780	-1.202	0.432	0.662	0.061	0.437	62
LJ-6	0.399	-0.191	-1.621	0.407	0.738	0.000	0.435	63
M44	-0.289	-0.022	0.124	0.310	0.759	0.255	0.430	64
LJ-52	-0.179	-0.348	0.226	0.326	0.717	0.269	0.429	65
LJ-42	0.319	-0.697	-1.086	0.396	0.672	0.078	0.423	66
M52	-0.848	0.719	0.285	0.232	0.855	0.278	0.419	67
M33	-0.865	0.463	0.685	0.229	0.822	0.336	0.417	68
3604	-0.346	0.045	-0.376	0.302	0.768	0.182	0.417	69
M37	-0.269	-0.243	-0.188	0.313	0.731	0.209	0.416	70
M22	-0.156	-0.552	-0.101	0.329	0.691	0.222	0.416	71
M93	-0.481	0.318	-0.564	0.283	0.803	0.154	0.412	72
LJ-2	-0.121	-0.763	-0.175	0.334	0.664	0.211	0.409	73
M40	-0.475	0.002	-0.256	0.284	0.762	0.199	0.408	74
LJ-64	-0.314	-0.286	-0.388	0.307	0.725	0.180	0.406	75
M42	-0.466	-0.176	-0.112	0.285	0.739	0.220	0.405	76
M46	-0.457	-0.245	-0.092	0.287	0.731	0.223	0.404	77
LJ-50	-0.598	-0.371	0.381	0.267	0.714	0.292	0.400	78
M8	-0.473	-0.128	-0.558	0.284	0.746	0.155	0.396	79
M36	-0.238	-0.661	-0.491	0.317	0.677	0.165	0.396	80
M27	-1.985	1.364	1.896	0.072	0.938	0.513	0.394	81
M56	-0.365	-1.023	0.267	0.300	0.630	0.275	0.391	82
LJ-71	-1.096	0.125	0.816	0.197	0.778	0.355	0.390	83
QT-38	-0.539	-0.358	-0.413	0.275	0.716	0.176	0.386	84
LJ-11	0.280	-1.576	-1.271	0.390	0.559	0.051	0.383	85
M57	-0.652	-0.201	-0.472	0.259	0.736	0.168	0.382	86
LJ-3	0.284	-1.849	-0.974	0.391	0.524	0.094	0.381	87
M34	-0.586	-0.699	-0.091	0.268	0.672	0.223	0.377	88
QT-25	-0.627	-0.868	0.169	0.263	0.650	0.261	0.374	89
M53	-1.077	0.015	0.220	0.200	0.764	0.269	0.373	90
M35	-1.371	0.268	0.747	0.158	0.797	0.346	0.373	91

续表 Continued Table

种质编号 Germplasm number	主成分值 Principal component value			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	排名 Rank
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$		
QT-7	-0.582	-1.030	-0.013	0.269	0.629	0.235	0.367	92
M90	-0.514	-0.926	-0.610	0.279	0.643	0.148	0.362	93
M29	-0.667	-1.331	0.480	0.257	0.591	0.307	0.361	94
QT-35	-0.679	-1.307	0.258	0.255	0.594	0.274	0.356	95
LJ-77	0.059	-2.002	-1.188	0.359	0.504	0.063	0.352	96
QT-4	-0.631	-0.946	-0.679	0.262	0.640	0.138	0.351	97
M82	-2.497	0.528	2.570	0.000	0.830	0.611	0.339	98
M83	-1.578	-0.754	1.487	0.129	0.665	0.453	0.337	99
M28	-1.666	-0.371	1.153	0.117	0.714	0.405	0.336	100
M39	-2.347	-0.451	1.960	0.021	0.704	0.522	0.300	101
M31	-1.482	-1.214	0.320	0.143	0.606	0.283	0.299	102
QT-22	-0.970	-5.916	1.152	0.215	0.000	0.405	0.184	103

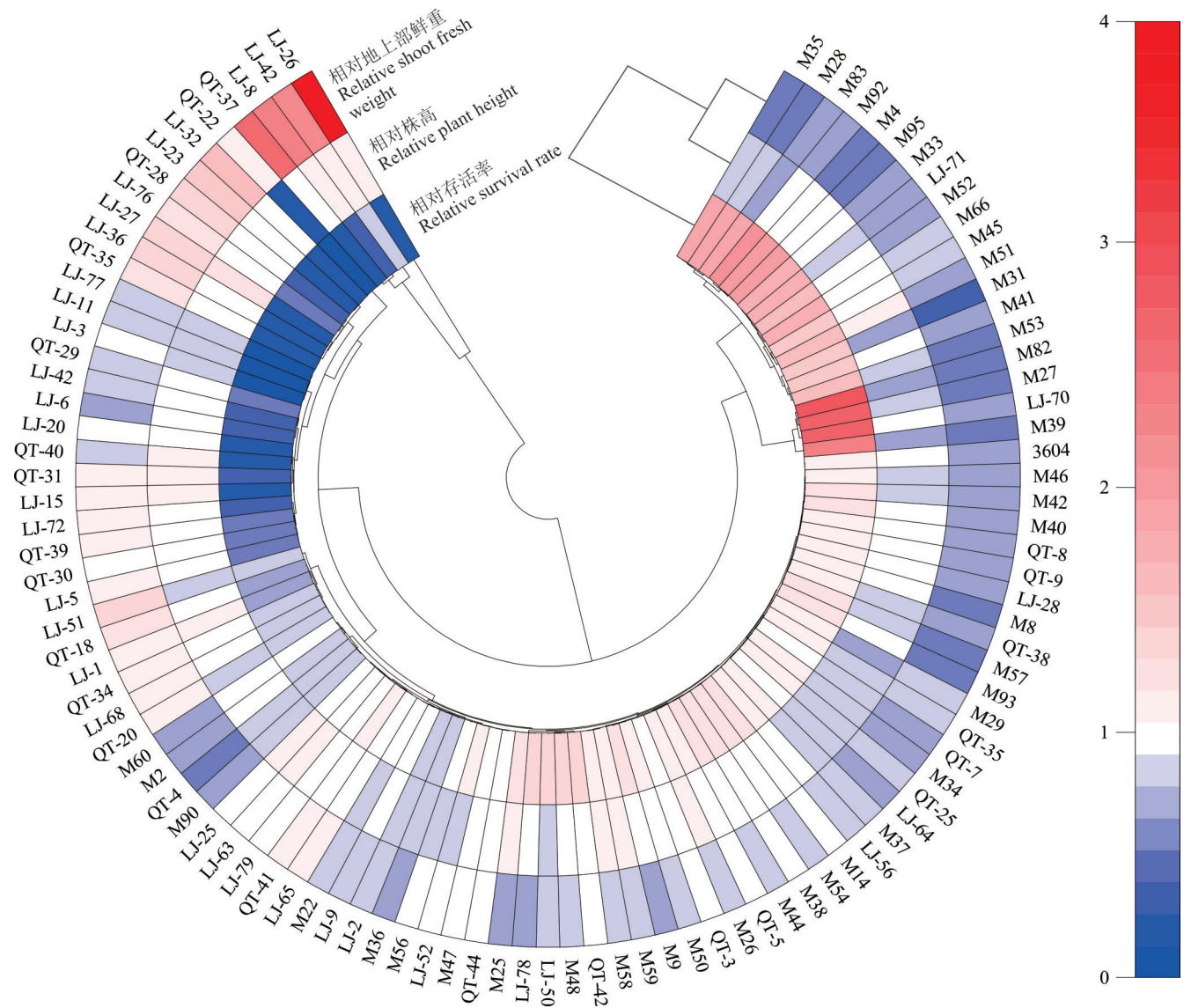


图 1 小黑麦种质资源耐盐性筛选的聚类分析热图

Fig. 1 Heatmap of cluster analysis for salt tolerance screening in triticale germplasm

## 2.2 耐盐性差异对比分析

**2.2.1 萌发期指标** 对以上6个小黑麦种质材料进行不同耐盐性种质响应盐胁迫的表型指标和生理生化指标差异性分析。经  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫处理 4 d 后, 供试小黑麦种质的发芽势除 LJ-65 外均呈现显著降低趋势 ( $P < 0.05$ )。其中, 耐盐种质 QT-5 和 LJ-65 的发芽势降幅分别为 18.5% 和 26.2%, 降幅低于中间型种质 (QT-41: 30%; LJ-25: 49%) 和盐敏感种质 (M90: 53%; M36: 79%, 图 2A), 该结果证实盐胁迫主要通过抑制种子萌发来影响小黑麦早期的生长发育。

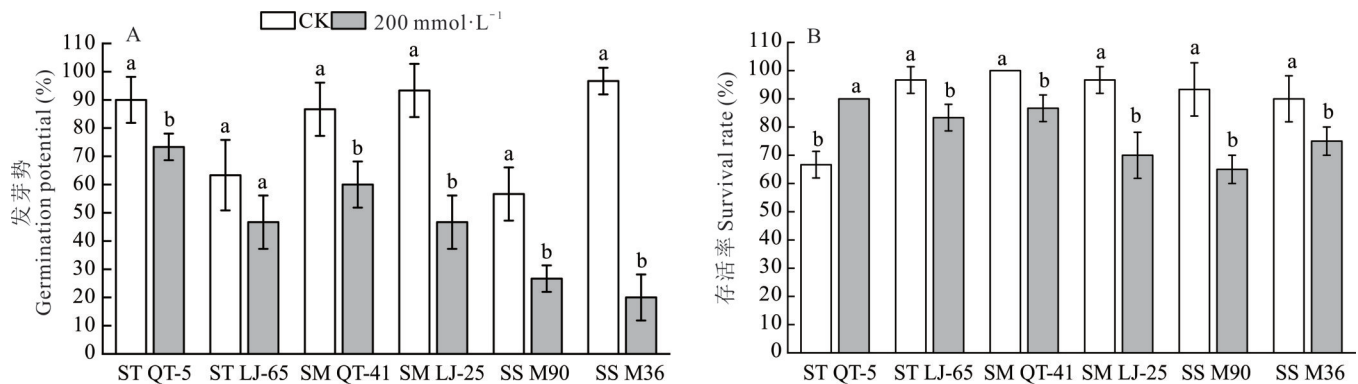


图 2 不同耐盐性小黑麦种质资源萌发期指标的对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of germination period indicators of triticale with different salt tolerance

ST: 耐盐型; SM: 耐盐中间型; SS: 盐敏感型; CK: 对照组 (蒸馏水处理);  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ : 盐胁迫组 ( $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 溶液处理)。不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。ST: Salt-tolerant type; SM: Salt-tolerant intermediate type; SS: Salt-sensitive type; CK: Control group (treated with distilled water);  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ : Salt stress group (treated with  $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl solution). Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments within the same variety at  $P < 0.05$ , the same below.

盐胁迫处理 14 d 后, 耐盐种质 QT-5 表现出较强的耐盐性, 其存活率较对照升高了 34% (图 2B), 而 LJ-65 的存活率较对照降低了 17%, 降幅明显低于盐敏感种质 M90 (降幅 43%) 和 M36 (降幅 23%); 中间型种质 QT-41 和 LJ-25 的存活率较对照显著降低 ( $P < 0.05$ ), 表现出中等耐盐胁迫能力。试验结果表明, 耐盐种质在萌发初期就表现出了一定的抗盐胁迫性, 虽然盐胁迫延缓了耐盐种质和中间型种质的萌发进程, 但其最终存活率仍然保持了较高的水平。而盐敏感种质则在持续的盐胁迫下表现出了明显的生长抑制和存活率下降。

**2.2.2 表型指标分析** 盐胁迫处理对不同耐盐性小黑麦种质表型指标的影响存在差异 (图 3)。研究结果显示, 盐胁迫处理后, 不同耐盐性小黑麦种质的株高表现出梯度变化 (图 3A, B)。耐盐种质 QT-5 和 LJ-65 的降幅分别为 15% 和 12%, 低于中间型种质 QT-41 (降幅 17%)、LJ-25 (降幅 25%) 和盐敏感种质 M90 (降幅 31%)、M36 (降幅 30%)。

地上部鲜重测定的结果显示 (图 3C), 所有种质均受到了盐胁迫的显著影响。耐盐种质 QT-5 和 LJ-65 的地上部鲜重较对照组分别降低了 40% 和 26%, 中间型种质 QT-41 和 LJ-25 分别降低了 33% 和 24%, 盐敏感种质 M90 和 M36 降幅较大, 分别为 48% 和 44%。

不同耐盐性种质的根长分析结果表明 (图 3D), 耐盐型种质表现出了明显的根系抗性优势。盐胁迫处理后, 耐盐种质 QT-5 和 LJ-65 的根长较对照组分别降低了 21% 和 15%, 中间型种质 QT-41 和 LJ-25 分别降低了 36% 和 26%, 盐敏感种质 M90 和 M36 降幅较大, 分别为 37% 和 42%。综合分析表明, 盐胁迫对小黑麦的株高、地上部鲜重和根长均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 耐盐型种质的株高和根长降低幅度明显小于盐敏感型种质, 而所有供试种质的地上部鲜重降低都比较明显, 说明株高和根长指标更能评价小黑麦的耐盐性。

**2.2.3 不同耐盐性小黑麦种质材料生理指标的对比分析** 盐胁迫处理下不同耐盐性小黑麦种质材料的抗氧化酶活性表现出明显差异 (图 4)。在叶片组织材料中 (图 4A), 除耐盐种质 QT-5 的过氧化氢酶 (CAT) 活性较对照组降低之外, 其余种质均较对照组显著提高 ( $P < 0.05$ )。耐盐种质 LJ-65 和中间型种质 QT-41、LJ-25 的 CAT

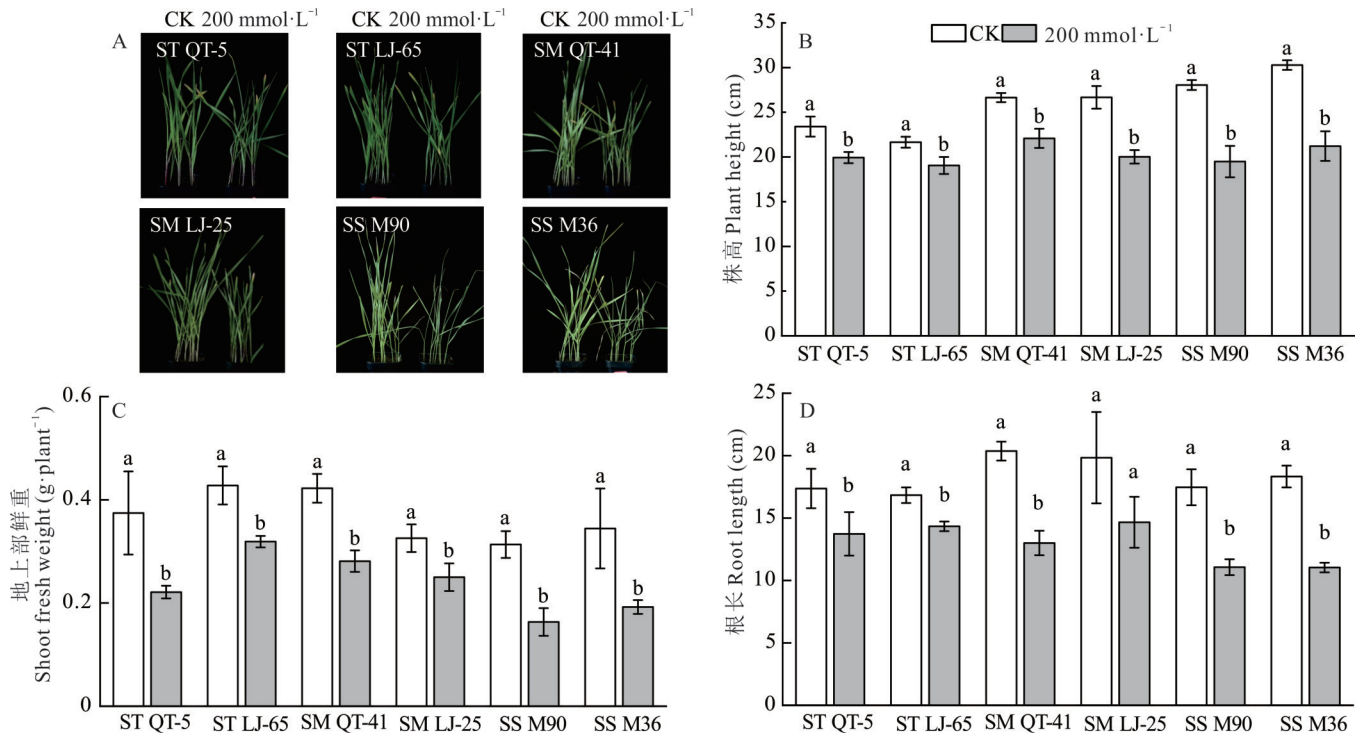


图 3 不同耐盐性小黑麦种质资源表型指标的对比分析

Fig. 3 Comparative analysis of phenotypic indicators of different salt tolerance triticale

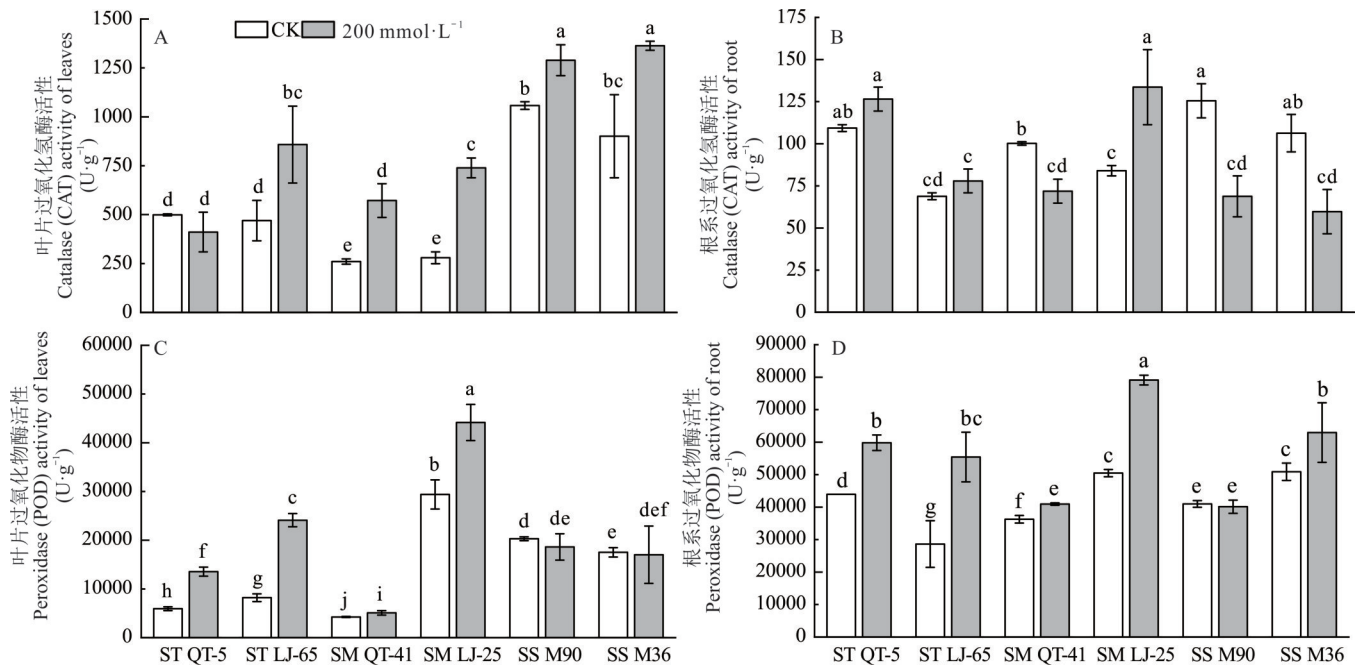


图 4 不同耐盐性小黑麦 CAT、POD 活性的对比分析

Fig. 4 Comparison analysis of CAT, POD activity of triticale with different salt tolerance

不同字母表示不同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Different letters indicate significant differences among different varieties and treatments at  $P < 0.05$ , the same below.

活性分别较对照组提高了 82.7%、120.0% 和 164.0%，盐敏感种质 M90 和 M36 的 CAT 活性增幅分别为 22% 和 51%。在根系组织材料中(图 4B)，耐盐种质 QT-5、LJ-65 和中间型种质 LJ-25 的 CAT 活性较对照组分别提高了 15%、13% 和 37%，盐敏感种质 M90、M36 和中间型种质 QT-41 的 CAT 活性则较对照组降低了 45%、44% 和

28%。试验结果表明,小黑麦叶片CAT活性与其耐盐性并无明显的相关性,而根系CAT活性则可作为耐盐性评价的重要生理指标。

过氧化物酶(POD)活性的变化特征同样呈现出组织差异性。盐胁迫处理后,在叶片中,耐盐种质QT-5、LJ-65和中间型种质QT-41、LJ-25的POD活性较对照组分别提高了127%、193%、20%和50%,而盐敏感种质M90和M36的POD活性则分别降低了8%和3%(图4C)。在根系中(图4D),盐胁迫下除盐敏感种质M90的POD活性较对照组降低了2%外,耐盐种质QT-5和LJ-65的POD活性分别提高了36%和93%,中间型种质QT-41、LJ-25和盐敏感种质M36的POD活性较对照组分别提高了13%、57%和54%。研究结果验证了POD活性与植物抵御不良环境侵害能力相关,耐盐种质和中间型种质的POD活性都有提高;而盐敏感种质叶片中的POD活性呈现降低趋势,根系中的POD活性则既有升高也有降低。试验结果对比说明,根系的POD活性变化规律更为复杂,难以有效地评价小黑麦的耐盐性。

在叶片组织中(图5A),盐胁迫下耐盐种质QT-5、LJ-65和中间型种质LJ-25的超氧化物歧化酶(SOD)活性较对照分别提高了120%、39%和5%,而中间型种质QT-41和盐敏感种质M90、M36则较对照分别降低了39%、74%和56%。在根系中(图5B),盐胁迫下耐盐种质QT-5、LJ-65的SOD活性较对照组分别提高了10%、18%,而中间型种质QT-41、LJ-25和盐敏感种质M90、M36的SOD活性则呈现不同程度的下降,降幅分别为3%、1%、37%和29%。试验结果表明,盐胁迫下不同耐盐性小黑麦叶片SOD活性的变化幅度普遍大于根系,且耐盐种质和盐敏感种质之间的差异更为明显,而中间型种质的SOD活性变化规律较为复杂,表明该指标在评价鉴定中间型小黑麦时可能受限。

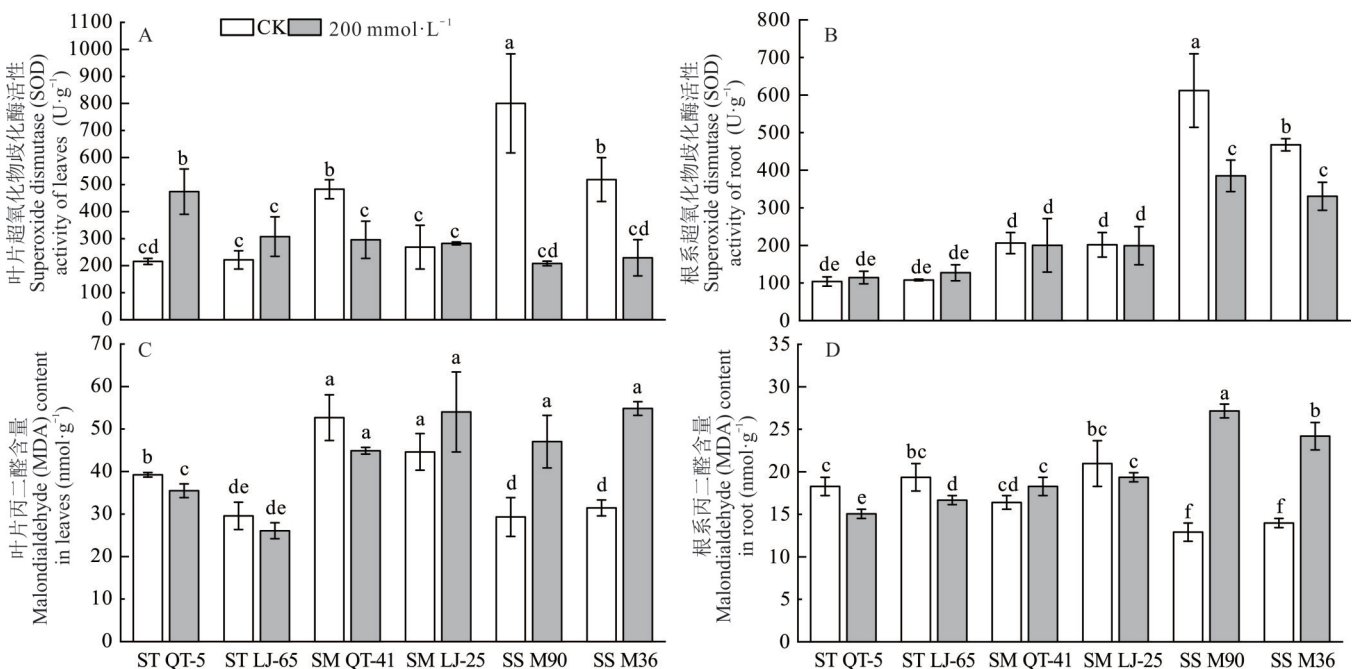


图5 不同耐盐性小黑麦SOD活性、MDA含量的对比分析

Fig. 5 Comparison analysis of SOD activity, MDA content of triticale with different salt tolerance

丙二醛(MDA)作为膜脂氧化的关键产物,其含量的变化在反映盐胁迫对细胞膜的损伤程度上发挥着重要的作用。盐胁迫处理后,耐盐种质QT-5、LJ-65和中间型种质QT-41叶片中的MDA含量较对照组分别降低了9.5%、12.0%和14.0%,而中间型种质LJ-25和盐敏感种质M90、M36的MDA含量则分别较对照组增加了21%、60%和74%(图5C)。在根系中(图5D),耐盐种质QT-5、LJ-65和中间型种质LJ-25的MDA含量在盐胁迫处理后较对照组降低了18.0%、14.0%和7.6%,而中间型种质QT-41和盐敏感种质M90、M36的MDA含量则

分别增加了 11.5%、110.0%、73.0%。试验结果显示,中间型种质 QT-41 和 LJ-25 经盐胁迫处理后 MDA 含量的变化趋势并不一致:QT-41 叶片的 MDA 含量降低而根系 MDA 含量升高,LJ-25 则相反。这一结果说明 MDA 含量可以作为评价小黑麦极端耐盐表型的有效指标,但在评价鉴定中等耐盐型种质时则有一定的局限性。

### 3 讨论

#### 3.1 小黑麦耐盐性综合评价体系的构建与验证

植物耐盐性是一个非常复杂的综合性状,单一指标难以全面地反映植物的耐盐特性。不同的指标反映出的信息不同,使用多项指标综合评价植物耐盐性的强弱更加全面,也更具有说服力<sup>[14]</sup>。张莹莹等<sup>[15]</sup>研究同样认为单一指标评价植物耐盐性有所缺乏,其通过主成分分析法将发芽率、发芽势、发芽指数、根长等多个指标转换成 3 个主要成分作为耐盐性评价的综合性指标,对 55 份衡麦品种(系)进行隶属函数分析和聚类分析,筛选出 14 份极耐盐衡麦品种。彭智等<sup>[16]</sup>研究表明选用多种指标共同评价植物的耐盐性可以合理且有效地筛选出耐盐性高的植物,该研究通过主成分分析把芽期 8 个指标和苗期 6 个指标转换为独立的综合指标,避免了指标间的信息重叠,并运用隶属函数分析和聚类分析法对供试的小麦材料进行耐盐性分级,最终筛选出 2 份在芽期和苗期均表现出高耐盐性的材料。陶维旭等<sup>[17]</sup>研究水稻(*Oryza sativa*)耐盐性时发现,使用某一时期的单项指标对水稻的耐盐性进行评价鉴定具有局限性,因此试验使用主成分分析法把多项单一指标整合为少量综合指标,并计算相应的主成分值和隶属函数值,使得到的水稻耐盐性综合评价 D 值更加科学,后又通过聚类分析对不同耐盐性水稻的种质资源进行分类,将 51 份水稻种质资源分为 4 类,最终筛选出耐盐性最好的水稻品种海优 5 号。本试验采用 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 溶液对 103 份小黑麦种质材料进行盐胁迫处理,发现存活率、株高、地上部鲜重、叶绿素含量等指标对盐胁迫响应不同。通过主成分分析法将各单项指标转换为 3 个独立的综合指标(累计贡献率达 84.083%),结合隶属函数分析法和聚类分析法最终筛选出 2 份耐盐型种质材料 QT-5、LJ-65,2 份中间型种质材料 QT-41、LJ-25,2 份盐敏感型种质材料 M90、M36。需要注意的是,本试验仅在实验室条件下采用 NaCl 溶液对小黑麦种质资源进行盐胁迫筛选,筛选出的小黑麦材料能否在大田的盐碱混合胁迫和复杂的土壤组成环境中保持耐盐特性,尚需通过大田试验进一步验证。

#### 3.2 小黑麦耐盐生理机制及根系性状的关键作用

盐胁迫会对植物造成离子失衡、代谢紊乱、结构受损、水分亏缺等问题<sup>[18]</sup>。然而,在长期的自然选择过程中,部分植物已经进化出适应盐碱环境的生理机制。筛选耐盐碱性的植物、探究植物耐盐碱生理生化机制、深挖耐盐碱的关键性基因、培育耐盐碱的植物新品种是“改种适地”改良盐碱地的有效方式<sup>[19]</sup>。本研究采用 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 溶液对小黑麦进行盐胁迫处理,筛选出耐盐型、中间型和盐敏感型的小黑麦种质,并进一步探究了小黑麦的耐盐机制。有研究发现盐胁迫对植物的发芽势、发芽率、活力指数和发芽指数有明显的抑制作用,还会延长种子的萌发时间,而对植物表型的影响主要表现为生长变缓、新枝减少、株高降低等<sup>[20]</sup>。本试验发现在盐胁迫下,耐盐种质 QT-5 的存活率较对照反而有所上升,表明一定盐浓度的胁迫能够促进某些品种发芽。在地上部鲜重方面,耐盐种质 QT-5 的降幅高于中间型种质,而耐盐种质的根长降幅则低于中间型种质和盐敏感种质。研究结果表明,受到盐胁迫时地上部分对盐胁迫的响应比根系更敏感,这与邵红雨等<sup>[21]</sup>的研究成果相符。研究认为小黑麦的叶片部分比根系先抵御盐胁迫,这种抵抗机制保护了小黑麦的根系结构和功能,使其具有较强的抵御盐胁迫的能力。基于上述研究结果,本研究建议将根长作为小黑麦耐盐性评价的关键指标,小黑麦通过维持根系结构和功能来保障水分和养分的吸收,进而增强整体抗逆能力。

#### 3.3 抗氧化系统的响应特征及其在耐盐性评价中的应用

活性氧(reactive oxygen species, ROS)在植物生理机制中以信号分子的形式存在,调控植物生长发育、激素信号、细胞的程序性死亡和植物对非生物及生物胁迫的响应过程,当其在植物体内积累过多时会对植物产生氧化胁迫,破坏植物的细胞结构,损伤植物的 DNA、蛋白质等生物大分子,导致植物细胞死亡,因此清除体内过多的 ROS 是植物应对胁迫的重要生理机制<sup>[21-23]</sup>。过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)

是降低 ROS 对植物伤害的重要酶类,是保护植物细胞免受外界不良环境伤害的酶系统,可以通过协同作用共同抵御外界不良环境伤害,但三者的变化也并不完全相同<sup>[24]</sup>。丙二醛(MDA)含量的高低则是揭示质膜被破坏的程度和膜脂过氧化作用强弱的重要指标<sup>[25]</sup>。本试验发现,盐胁迫诱导了显著的抗氧化酶活性变化,且表现出了明显的组织特异性。受到盐胁迫时,除 QT-5 叶片的 CAT 活性降低且不显著外,其余所有供试种质的叶片 CAT 活性都出现显著增强,而根系 CAT 活性则因小黑麦耐盐性的强弱而呈现出不同的变化。相比之下,不同耐盐性小黑麦受到盐胁迫时,叶片 POD、SOD 活性的变化规律和幅度都更加明显。这种组织差异可能反映了不同组织对盐胁迫的防御策略:叶片作为光合作用的主要器官,需要更强的抗氧化保护,而根系则可以通过离子区隔化等机制减轻氧化压力。MDA 含量的变化在高耐盐型和盐敏感型种质的叶片和根系中变化规律比较明显,而中间型种质的变化规律更为复杂。总结上述试验结果,本研究建议采用多项指标综合评价小黑麦耐盐性,根系 CAT 活性反映植物的基础耐盐能力,叶片 POD 和 SOD 活性指示抗氧化能力,MDA 含量鉴定极端耐盐表型。这种组合评价能够全面反映植物的耐盐机制,极端表型可以通过 MDA 含量变化快速筛选,中间型种质可通过多项指标综合评估,研究结果为进一步解析小黑麦耐盐分子机制和品种选育提供了重要参考。

#### 4 结论

本研究通过 200 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫处理,对 103 份小黑麦种质材料进行了系统的耐盐性评价与筛选。通过主成分分析、隶属函数分析和聚类分析相结合的综合评价方法,筛选出 2 份耐盐种质 QT-5、LJ-65 和 2 份盐敏感种质 M90、M36,为小黑麦耐盐育种提供了优异材料资源。小黑麦叶片组织较根系更早启动对盐胁迫的防御机制,小黑麦耐盐性越强盐胁迫处理后根系生长状况越好,表明维持根系功能是小黑麦耐盐的关键生理特征。在清除活性氧方面,根系 CAT 活性和叶片 POD、SOD 活性呈现出规律性的变化,而 MDA 含量变化在极端耐盐和盐敏感种质中差异显著,可作为评价小黑麦耐盐性的辅助指标。本研究为小黑麦耐盐品种选育和盐碱地栽培提供了一定的理论依据,后续研究将重点考察筛选材料在田间盐碱地环境中的实际表现,并深入探究其耐盐分子机制。

#### 参考文献 References:

- [1] Li B, Wang Z C, Sun Z G, *et al.* Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 154–158.  
李彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 154–158.
- [2] Niu D L, Wang Q J. Research progress on saline-alkali field control. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6): 449–455.  
牛东玲,王启基.盐碱地治理研究进展. *土壤通报*, 2002, 33(6): 449–455.
- [3] Jia Z Z, Tan Y N, Guan X Y, *et al.* Saline-alkali soil formation and its remediation strategies in different regions of Ningxia: a comprehensive review. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(5): 122–134.  
贾壮壮,谭亚男,管孝艳,等.宁夏盐碱地成因及分区治理措施综述. *灌溉排水学报*, 2023, 42(5): 122–134.
- [4] Yu M, Rui X F. Review of improvement and utilization of saline-alkali field in Ningxia Hui Autonomous Region. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(6): 85–89, 94.  
余美,芮孝芳.宁夏盐碱地改良利用研究进展. *水利水电科技进展*, 2006, 26(6): 85–89, 94.
- [5] Guo J C, Wang M G, Geng R, *et al.* Salinity characteristics analysis of saline alkali soil in Yinbei irrigation district of Ningxia. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(5): 38–42.  
郭军成,王明国,耿荣,等.宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析. *中国农学通报*, 2021, 37(5): 38–42.
- [6] Li Q, Sun Z J, Qin P. Summary of Ningxia saline status and improved measures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(33): 10808–10810, 10813.  
李茜,孙兆军,秦萍.宁夏盐碱地现状及改良措施综述. *安徽农业科学*, 2007, 35(33): 10808–10810, 10813.
- [7] Rasouli F, Yun P, Kiani-Pouya A, *et al.* One size does not fit all: Different strategies employed by triticale and barley plants to deal with soil salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 218: 105585.
- [8] Wang S W, Liu T T, Wang Y J, *et al.* Effects of triticale silage replacing oat hay on production performance and economic

- efficiency of dairy cows. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(12): 4899–4907.
- 王思伟, 刘婷婷, 王雅晶, 等. 饲用小黑麦青贮替代燕麦干草对奶牛生产性能及经济效益的影响. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(12): 4899–4907.
- [9] Li H J, Xia F S, Bai C R, *et al.* Effects of different saline-alkali stresses on seed germination and seedling growth of forage triticale. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2024, 45(3): 58–63.
- 李韩晶, 夏方山, 白朝瑞, 等. 不同盐碱胁迫对饲用小黑麦种子萌发及幼苗生长的影响. *畜牧与饲料科学*, 2024, 45(3): 58–63.
- [10] Yu Z Q, Chu H L, Liu H C, *et al.* Study on salt tolerance of 7 triticale seeds at germination stage under NaCl stress. *Grassland and Turf*, 1–16. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20240914.1607.002>.
- 尉志强, 褚红丽, 刘汉成, 等. NaCl胁迫下7份小黑麦种子的萌发期耐盐性研究. *草原与草坪*, 1–16. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20240914.1607.002>.
- [11] Qian J J, Zhang D T, Wang R, *et al.* Evaluation and screening of salt tolerance of 29 triticale germplasms at seedling stage. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(8): 200–209.
- 钱娇娇, 张丹婷, 王蕊, 等. 29份小黑麦种质资源苗期耐盐性评价与筛选. *江苏农业科学*, 2025, 53(8): 200–209.
- [12] Zhao M Q E, Wang Z J, Bao J, *et al.* Analysis and evaluation of forage millet quality under different fertility and storage times using the membership function method. *Pratacultural Science*, 2023, 40(1): 200–207.
- 赵牧其尔, 王志军, 包健, 等. 利用隶属函数法分析和评价不同生育期和贮藏时间的饲用谷子品质. *草业科学*, 2023, 40(1): 200–207.
- [13] Wang M, Lu X L, Wang J Y, *et al.* Evaluation and screening of the salt tolerance of triticale germplasm at the germination and seedling stages. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(5): 58–68.
- 王萌, 鲁雪莉, 王菊英, 等. 小黑麦种质萌发期苗期耐盐资源评价与筛选. *草业学报*, 2024, 33(5): 58–68.
- [14] Li X Y, Gao Z H, Lan J, *et al.* Evaluation of germination characteristics and salt tolerance of 25 forage triticale seeds under NaCl stress. *Grassland and Turf*, 2023, 43(4): 65–71, 80.
- 李雪颖, 高志昊, 兰剑, 等. NaCl胁迫下25份饲用型小黑麦种子的萌发特性及耐盐性评价. *草原与草坪*, 2023, 43(4): 65–71, 80.
- [15] Zhang Y Y, Zhao M H, Meng X H, *et al.* Screening and identification of salt tolerance of 55 Hengmai wheat accessions of germplasms at germination stage. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2025, 53(2): 92–100.
- 张莹莹, 赵明辉, 孟祥海, 等. 55份衡麦系列种质资源萌发期耐盐性筛选与鉴定. *山西农业科学*, 2025, 53(2): 92–100.
- [16] Peng Z, Li L, Liu Y P, *et al.* Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 638–645.
- 彭智, 李龙, 柳玉平, 等. 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.
- [17] Tao W X, Cheng S H, Ji J C, *et al.* Comprehensive evaluation of salinity tolerance of rice variety resources and screening of salinity tolerance indexes. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(18): 180–187.
- 陶维旭, 程生海, 冀俊超, 等. 水稻品种资源耐盐性综合评价及耐盐指标筛选. *江苏农业科学*, 2022, 50(18): 180–187.
- [18] Xiao W L, Wang H R, Wang M L, *et al.* Mechanisms of plant response to saline-alkali stress: A review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(33): 78–85.
- 肖雯丽, 王含瑞, 王梦亮, 等. 盐碱胁迫下植物响应机制的研究进展. *中国农学通报*, 2024, 40(33): 78–85.
- [19] Liu Y M, Yu Y, Fang J. Saline-alkali stress and molecular mechanism of saline-alkali tolerance in plants. *Soils and Crops*, 2018, 7(2): 201–211.
- 刘奕嫩, 于洋, 方军. 盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究. *土壤与作物*, 2018, 7(2): 201–211.
- [20] Qi Q, Ma S R, Xu W D. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(8): 2741–2746.
- 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展. *分子植物育种*, 2020, 18(8): 2741–2746.
- [21] Shao H Y, Kong G C, Yue C, *et al.* Study on physiological characteristics of triticale salt resistance. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(S3): 77–81.
- 邵红雨, 孔广超, 岳超, 等. 小黑麦耐盐生理特性的研究. *新疆农业科学*, 2007, 44(S3): 77–81.

- [22] Guo M X, Liu J J, Hou L L, *et al.* Research progress on the generation and scavenging mechanisms of reactive oxygen species in plants. *Science & Technology Vision*, 2021(8): 104–106.  
郭明欣, 刘佳佳, 侯琳琳, 等. 植物体内活性氧的产生及清除机制研究进展. *科技视界*, 2021(8): 104–106.
- [23] Alagoz S M, Hadi H, Toorchi M, *et al.* Morpho-physiological responses and growth indices of triticale to drought and salt stresses. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 8896.
- [24] Rasouli F, Kiani-Pouya A. Photosynthesis capacity and enzymatic defense system as bioindicators of salt tolerance in triticale genotypes. *Flora*, 2015, 214: 34–43.
- [25] Zhu J G, Wang S G, Li X Y, *et al.* Effects of PEG stress on the activities of superoxide dismutase, peroxidase and the content of malonaldehyde of triticale seedlings. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(18): 202–204.  
朱俊刚, 王曙光, 李晓燕, 等. PEG胁迫对六倍体小黑麦幼苗SOD, POD活性及MDA含量的影响. *中国农学通报*, 2009, 25(18): 202–204.