

186份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性鉴定

焦茹玉^{1,2}, 朱羿霖^{1,2}, 谢其均^{2,3,4}, 谭文清^{2,3}, 曲亮^{2,3}, 刘新红^{2,3},
邓力超^{2,3}, 刘丽莉^{1,2}, 严明理^{1,2,3}

(¹湖南科技大学生命科学与健康学院/湖南省经济作物遗传改良与综合利用重点实验室, 湘潭 411201; ²岳麓山实验室, 长沙 410125; ³湖南省农业科学院作物研究所, 长沙 410125; ⁴湖南工业大学生命科学与化学学院, 株洲 412007)

摘要: 盐胁迫对植物的生长产生严重抑制作用, 导致作物产量降低。萌发期是植物对盐害最为敏感的时期, 建立准确便捷的耐盐性鉴定评价体系和筛选耐盐甘蓝型油菜种质对提高油菜品种抗盐能力至关重要。本研究根据15份甘蓝型油菜种质的盐损伤指数确定萌发期耐盐性鉴定的最佳浓度为1.25%。在该浓度下对186份甘蓝型油菜种质资源的萌发势、萌发率、根长、下胚轴长、鲜重和干重进行测定, 并计算其耐盐指数。通过主成分分析、隶属函数等分析方法对油菜种质资源进行耐盐性综合评价, 并建立耐盐性综合评价模型, 筛选出适宜的评价鉴定指标。结果表明: 1.25% NaCl胁迫下, 甘蓝型油菜的萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数、根长耐盐指数、下胚轴长耐盐指数、鲜重耐盐指数、干重耐盐指数间互相呈极显著正相关; 利用主成分分析将6项指标综合为3个主成分, 累计贡献率达92.809%。依据3个主成分的权重计算各种质的D值, 将186份种质划分为4个等级, 筛选出5份耐盐材料。建立了甘蓝型油菜耐盐性鉴定的数学评价模型 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$ 。本研究筛选出的耐盐鉴定指标和耐盐材料可为开展油菜耐盐育种提供帮助。

关键词: 萌发期; 甘蓝型油菜; 耐盐性; 主成分分析; 聚类分析

Identification of Salt-Tolerant During Seed Germination Period in 186 Accession of *Brassica napus*

JIAO Ruyun^{1,2}, ZHU Yilin^{1,2}, XIE Qijun^{2,3,4}, TAN Wenqing^{2,3}, QU Liang^{2,3}, LIU Xinhong^{2,3},
DENG Lichao^{2,3}, LIU Lili^{1,2}, YAN Mingli^{1,2,3}

(¹Hunan Key Laboratory of Economic Crops Genetic Improvement and Integrated Utilization/School of Life and Health Sciences, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201; ²Yuelushan Laboratory, Changsha 410125; ³Crop Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125; ⁴School of Life Science and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007)

Abstract: Salt stress severely inhibits the growth of plants, resulting in a decrease in crop yield. The germination period is the most sensitive phase for plants to salt damage. Therefore, establishing an accurate and convenient salt tolerance identification and evaluation system, as well as screening for salt-tolerant germplasm in *Brassica napus*, is crucial for enhancing the salt resistance of rapeseed varieties. In this study, the optimal concentration for salt tolerance identification during the germination period was determined to be 1.25% based on the salt damage index of 15 *Brassica napus* germplasms. At this concentration, the germination potential, germination rate, root length, hypocotyl length, fresh weight, and dry weight of 186 *Brassica napus* germplasm

收稿日期: 2024-02-23 网络出版日期: 2024-09-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240223005>

第一作者研究方向为植物抗逆, E-mail: 1521458861@qq.com; 朱羿霖为共同第一作者

通信作者: 刘丽莉, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: liulili276@163.com

严明理, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: mlyan@hunaas.cn

基金项目: 湖南省农业科技创新基金项目(2022CX55); 湖南省科技创新计划(2023RC1077); 湖南省科技人才托举工程项目(2023TJ-Z09)

Foundation projects: The Agricultural Technology Innovation Fund Project of Hunan Province (2022CX55); The Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2023RC1077); The Science and Technology Talent Support Program of Hunan Province (2023TJ-Z09)

resources were measured, and their salt tolerance indices were calculated. Conducting comprehensive salt tolerance assessment of rapeseed germplasm resources using analysis methods such as principal component analysis and membership functions. A salt tolerance comprehensive evaluation model was established, and suitable evaluation indicators were selected. The results showed that under 1.25% NaCl stress, there was a highly significantly positive correlation among the salt tolerance index of germination potential, salt tolerance index of germination ratio, salt tolerance index of root length, salt tolerance index of hypocotyl length, salt tolerance index of fresh weight, salt tolerance index of dry weight of *Brassica napus*. By employing principal component analysis, these six indicators were condensed into three principal components, which collectively account for a cumulative variance of 92.809%. Based on the weights of these three principal components, D values were calculated for various germplasms, resulting in the classification of 186 germplasms into four levels and the identification of five salt-tolerant materials. Furthermore, a mathematical evaluation model for salt tolerance identification in *Brassica napus* was established as $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_3$. The salt tolerance identification criteria and salt-tolerant materials chosen in this study provide valuable support for the development of salt-tolerant rapeseed breeding.

Key words: germination stage; *Brassica napus*; salt tolerance; principal component analysis; cluster analysis

土壤盐碱化是由于自然或人为因素的影响,在干旱、半干旱和半湿润地区发生的易溶性盐分在土壤表层积累的现象^[1]。过量的盐分对土壤结构和肥力产生不利影响,严重阻碍植物生长并导致农作物产量下降。自然环境恶化、灌溉不当和气候变化加剧了土壤盐碱化问题^[2-3]。目前,土壤盐碱化是农业和粮食安全面临的最严重威胁之一,世界上大约20%的灌溉农田受到土壤盐碱化胁迫^[4],造成了大量的土地资源浪费。近期出台的《中华人民共和国粮食安全保障法》提出要推动盐碱地综合利用,制定相关规划和支持政策,鼓励和引导社会资本投入,挖掘盐碱地开发利用潜力,分区分类开展盐碱耕地治理改良,加快选育耐盐碱特色品种,推广改良盐碱地有效做法,遏制耕地盐碱化趋势。筛选耐盐种质,培育耐盐品种,提高植物的耐盐性,是有效利用盐碱化土地资源的关键手段。

油菜是全球第三重要的植物油来源,其产量仅次于棕榈和大豆^[5]。长期以来,世界大部分地区油菜种植面积一直保持着小幅增长的趋势。油菜是我国最重要的油料作物之一,在我国食用油自给率不足背景下,发展油菜生产对于维护我国食用油供应安全具有极其重要的战略意义。我国盐碱地土地资源丰富,而油菜具有生物学产量高、适应性广泛、对盐碱土地耐受力强等特点,是改良与利用盐碱地的先锋作物之一^[6]。培育耐盐性强的油菜品种、充分利用我国盐碱土地资源拓展油菜种植区域,是提高我国油菜总产量和食用油供给能力的有效途径。然而,迄今关于油菜耐盐资源鉴定评价的

研究报道较少。对甘蓝型油菜种质资源进行耐盐性鉴定和评价,可为油菜耐盐育种研究和应用提供参考依据。

隶属函数法常用于评估品种的逆境耐受性并筛选耐逆性品种,其核心思想是将多个相关的评估指标集成到一个系统中进行综合评估^[7]。近年来,隶属函数分析法被广泛应用于植物耐逆性研究,徐银萍等^[8]对30份大麦种质资源进行正常灌水和干旱胁迫处理,采用隶属函数分析、聚类分析等方法将其分为5个抗旱等级;田蕾等^[9]利用125 mmol/L NaCl溶液对64份粳稻种质资源进行盐胁迫,运用隶属函数分析获得了评价粳稻种质资源芽期耐盐性的3个重要指标;张晓婷等^[10]利用隶属函数综合评判91份荔枝种质的抗寒性,获得抗寒性强的优质荔枝种质资源;饶庆琳等^[11]运用隶属函数分析揭示了296份花生种质资源的遗传多样性和综合评分,筛选出优异种质资源。目前,这一方法在大豆、花生、水稻等多种物种的逆境耐受性研究中得到广泛应用,但在甘蓝型油菜耐盐性方面的研究较为有限。

植物种子萌发期是其生命周期中一个至关重要的阶段,标志着植物从休眠状态向活跃生长状态的转变,是植物生命的起始点。在这一关键时期,如果受到盐胁迫,可能导致发芽受阻、胚芽生长受损,从而影响整个生命周期。因此,植物种子在萌发阶段的耐盐能力对其在高盐环境下的存活与生长发育至关重要^[12-13]。此外,种子萌发期间的形态指标(如发芽势、发芽率、下胚轴长等)测定方法便

捷高效,因此已广泛用于评价不同种质的耐盐性^[14-17]。本研究以186份甘蓝型油菜种质资源为研究对象,在盐胁迫条件下对种子萌发期的萌发活力以及生物量等方面进行了研究,应用隶属函数等统计方法,对每一份材料的各项指标进行分析,并运用聚类分析确定耐盐等级,筛选出优异耐盐种质并建立甘蓝型油菜的耐盐性评价指标体系,为甘蓝型油菜耐盐育种奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

186份试验材料均为甘蓝型油菜自交系,由湖南省作物研究所提供。这些材料遗传多样性丰富、来源广泛,均为当季收获种子,种子活力强健且萌发能力良好。

1.2 试验方法

1.2.1 最佳胁迫浓度确定 随机选择15个油菜自交系,设置0.75%、1.00%、1.25%、1.50%共4个NaCl浓度梯度^[14,18-19]进行盐胁迫,蒸馏水作为对照,对这些种质在萌发期的耐盐性进行全面的评估,以确定盐胁迫的最佳NaCl浓度。从15个自交系中各选择30颗均匀健康的种子,经1%次氯酸钠消毒5 min后,用蒸馏水反复洗涤5次,将种子置于直径为9 cm的培养皿上,培养皿内放有3张滤纸,加入10 mL上述NaCl溶液进行萌发试验,每份材料胁迫组和对照组均设置3个生物学重复。置于人工气候培养室内培养,16 h光照 24 ± 2 °C,8 h黑暗 22 ± 2 °C,相对湿度为70%,光照强度 $650 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[20]。当胚根长度 ≥ 2 mm时,认为种子已萌发^[21-22]。通过线性回归方法获得各指标盐损伤指数达到对照50%时的NaCl溶液浓度,确定该浓度为NaCl的最佳胁迫浓度。

1.2.2 186份材料耐盐性鉴定 利用1.25%的NaCl溶液对材料进行盐胁迫处理,每份材料的胁迫组和对照组均设置3个重复,每个重复50粒种子,均匀摆放在含有三层滤纸的 $37 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 6.5 \text{ cm}$ 的发芽盒中,倒入120 mL NaCl溶液,置于人工气候培养室内培养,培养条件同上。

第3天记录种子的发芽数,第7天计算萌发率,第8天随机选取每个重复中10株幼苗,测量它们的根长、下胚轴长、鲜重以及干重,随后分别计算盐损伤指数。

萌发势(%)=3 d种子发芽数/供试种子总数 $\times 100\%$

萌发率(%)=7 d种子发芽数/供试种子总数 $\times 100\%$ ^[13]

耐盐指数(%)=(X_i/CK_i) $\times 100\%$

式中, X_i 和 CK_i 分别为第*i*个指标在对照和盐处理下的测定值^[14,23]。

盐损伤指数(%)=100%-耐盐指数

1.3 数据分析

采用Excel 2013进行数据处理,IBM SPSS Statistics 20.0进行变异分析和指标相关性分析,通过主成分分析、隶属函数等方法对不同种质进行耐盐性综合评价。

首先,计算各项指标的耐盐指数,并利用主成分分析降维,提取累积贡献率超过85%的前*P*个主成分。提取出的主成分替代原有的耐盐指数,以更有效地评估甘蓝型油菜的耐盐性。利用SPSS软件将主成分设置为3,计算不同种质在前*P*个主成分上的值,并利用隶属函数法对这些值进行标准化处理(标度到区间[0, 1]),公式如下。

隶属函数值计算公式: $\mu(X_{ip}) = (X_{ip} - X_{ip,\min}) / (X_{ip,\max} - X_{ip,\min})$ $i=1, 2, \dots, n$

式中, X_{ip} 表示第*i*个材料在第*P*个主成分上标准化处理后的值, $X_{ip,\min}$ 、 $X_{ip,\max}$ 分别表示参试材料某一指标的最小值和最大值。

根据主成分的贡献率大小,计算其权重。

$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$ $i=1, 2, \dots, n$

式中, W_i 表示第*i*个综合指标的权重, V_i 则表示该指标的贡献率^[24-25]。

利用各材料在不同指标上的隶属函数值及其权重,计算186份材料的耐盐性综合评价值(D值)。

$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_{ip}) \times W_i]$ $i=1, 2, \dots, n$

以D值对186份材料的耐盐性进行等级划分,盐敏感材料:(0~0.25];低度耐盐材料:(0.25~0.5];中度耐盐材料:(0.5~0.75];耐盐材料:(0.75~1]。

最后,以各项指标的耐盐指数为自变量,对综合D值进行回归分析,构建相应的回归方程。以此筛选出可快捷高效鉴定甘蓝型油菜种质在种子萌发期耐盐性的形态指标。

利用IBM SPSS Statistics 20.0软件进行系统聚类分析,采用欧氏距离的组间联接法(设置欧氏距离=5),对186份油菜种质在种子萌发期各性状耐盐指数(萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数、根长耐盐指数、下胚轴长耐盐指数、鲜重耐盐指数、干重耐盐指数)的平均值进行聚类分析,应用MEGA7软件对聚类分析结果进行树状图可视化。

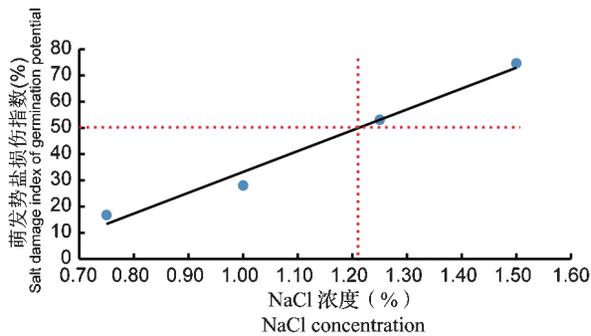
2 结果与分析

2.1 最佳胁迫浓度的确定

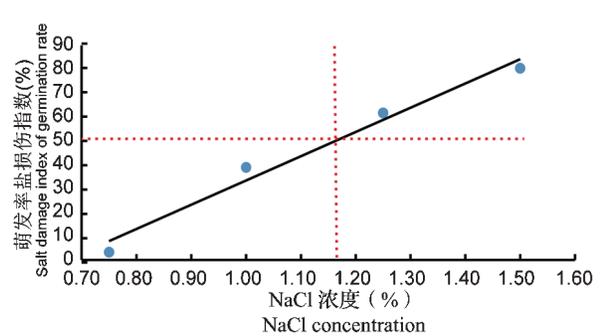
为了确定甘蓝型油菜种子萌发期最佳盐胁迫浓度,随机选择15个自交系,使用不同浓度(0.75%、1.00%、1.25%、1.50%)的NaCl溶液进行盐胁迫处理。结果发现,当萌发势、萌发率的盐损伤指数降到对照组的50%时,NaCl浓度分别为1.2113%、

1.1734%;而盐处理下根长、下胚轴长、鲜重、干重的盐损伤指数降到对照组的50%时所对应的NaCl浓度分别为0.9993%、1.2037%、1.1773%、1.3839%(图1)。综上发现,盐处理下各项指标的盐损伤指数降到对照组的50%时所对应的盐胁迫浓度平均为1.1915%,因此,本研究选择1.25% NaCl浓度作为处理浓度,对186份甘蓝型油菜种质进行全面评价。

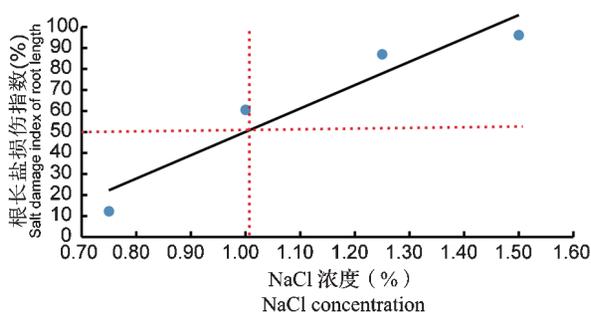
A



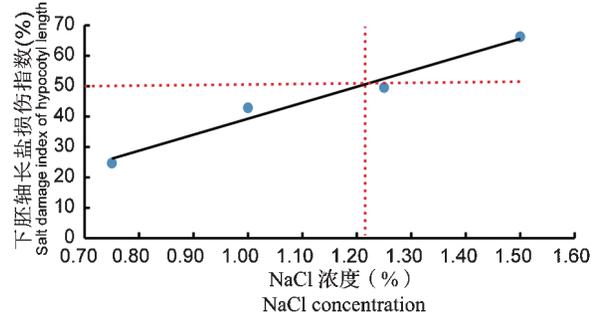
B



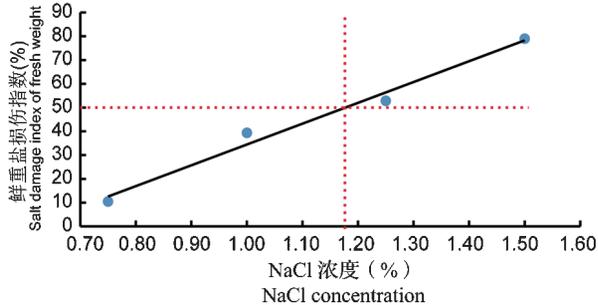
C



D



E



F

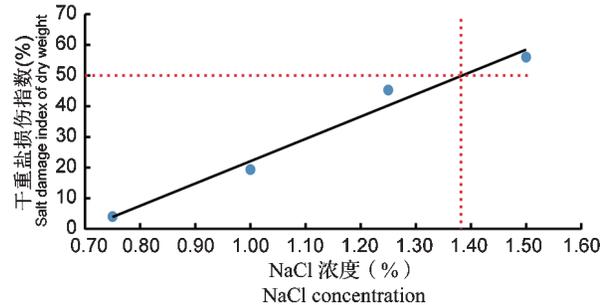


图1 15个甘蓝型油菜自交系6个测定指标在不同盐浓度下的盐损伤指数

Fig.1 Salt damage indices of six parameters for the 15 inbred lines under stress of various sodium chloride concentrations

2.2 盐胁迫下甘蓝型油菜萌发期各指标的变异分析

在1.25% NaCl胁迫下,186份甘蓝型油菜在种子萌发期表现出明显的差异。由表1可知,萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数、根长耐盐指数、下胚轴长耐盐指数、鲜重耐盐指数、干重耐盐指数的变异

系数分别为143.54%、83.36%、109.03%、55.58%、58.99%、37.48%,均超过10%,表明参试的186份甘蓝型油菜在耐盐性相关指标上存在丰富的变异性。6个指标可用于指示种质的耐盐性,为甘蓝型油菜种质的耐盐性鉴定提供参考。同时,这也表明单一指标评价甘蓝型油菜种质的耐盐性在准确性上存

在一定局限,因此需要综合考虑多项指标。此外,各种质经过盐处理后,其萌发势耐盐指数和根长耐

盐指数均明显降低,均小于0.2,说明盐胁迫明显抑制了甘蓝型油菜的萌发势和根长。

表1 盐胁迫下各形态指标的变异分析

Table 1 Variation analysis of morphological indices under salt stress

指标 Index	平均数 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV
萌发势耐盐指数 Salt tolerance index of germination potential	0.1825	0.2620	143.54
萌发率耐盐指数 Salt tolerance index of germination ratio	0.3659	0.3051	83.36
根长耐盐指数 Salt tolerance index of root length	0.1629	0.1776	109.03
下胚轴长耐盐指数 Salt tolerance index of hypocotyl length	0.2528	0.1405	55.58
鲜重耐盐指数 Salt tolerance index of fresh weight	0.4443	0.2621	58.99
干重耐盐指数 Salt tolerance index of dry weight	0.9947	0.3728	37.48

2.3 盐胁迫下甘蓝型油菜各项指标的相关性分析

各项指标相关性分析结果表明,任意两个指标间均呈极显著的正相关($P < 0.01$)(表2)。其中,鲜重耐盐指数和下胚轴长耐盐指数之间的相关性最强,相关系数为0.900,而萌发势耐盐指数和下胚轴长耐盐指数之间的相关性最小,相关系数仅为

0.464。在植物的耐盐机制中,各项指标作用不同,且又存在显著相关性,表明它们在反映信息时存在一定的重叠,这可能导致在评估甘蓝型油菜耐盐性时出现冗余。因此,通过主成分分析剔除多余变量,有助于在保持原始信息的同时,更全面客观地评估甘蓝型油菜种子萌发期的耐盐性。

表2 1.25% NaCl胁迫下甘蓝型油菜各指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of various indices in *Brassica napus* under 1.25% NaCl stress

指标 Index	萌发势耐盐指数 Salt tolerance index of germination potential	萌发率耐盐指数 Salt tolerance index of germination ratio	根长耐盐指数 Salt tolerance index of root length	下胚轴长耐盐指数 Salt tolerance index of hypocotyl length	鲜重耐盐指数 Salt tolerance index of fresh weight	干重耐盐指数 Salt tolerance index of dry weight
萌发势耐盐指数 Salt tolerance index of germination potential	1**					
萌发率耐盐指数 Salt tolerance index of germination ratio	0.674**	1**				
根长耐盐指数 Salt tolerance index of root length	0.466**	0.676**	1**			
下胚轴长耐盐指数 Salt tolerance index of hypocotyl length	0.464**	0.737**	0.843**	1**		
鲜重耐盐指数 Salt tolerance index of fresh weight	0.508**	0.726**	0.823**	0.900**	1**	
干重耐盐指数 Salt tolerance index of dry weight	0.493**	0.619**	0.533**	0.719**	0.816**	1**

** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关

** indicates a significant correlation at $P < 0.01$ level

2.4 主成分分析

为了确定甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性鉴定的主要指标,利用IBM SPSS Statistics 20.0对186份种质资源的6项指标进行主成分分析。根据主成分分析研究理论,累计贡献率达到或超过85%时,原

始数据的大部分信息即可被涵括替代^[26]。由表3可知,前3个主成分的累积贡献率为92.809%,其中第1主成分的特征值为4.371,方差贡献率达到72.851%;第2主成分的特征值为0.714,方差贡献率为11.906%;第3主成分的特征值为0.483,方差贡献

率为8.052%。前3个主成分累积贡献率超过85%，说明6个萌发指标的大部分信息被有效表征，全面反映了油菜在盐胁迫下萌发期的特性，因此可作为油菜耐盐种质评价的综合指标。

由表4可知，在第1主成分中，各项指标均呈现正向影响，其中鲜重耐盐指数和下胚轴长耐盐指数的载荷绝对值较高，分别为0.216、0.212，属于生物量因子。在第2主成分中，萌发势耐盐指数和萌发率耐盐指数代表的萌发活力因子在其中发挥了主要的正向作用，特别是萌发势耐盐指数，其载荷绝对值达到0.974，而根长耐盐指数、下胚轴长耐盐指数、鲜重耐盐指数和干重耐盐指数均呈现负向影响。在第3主成分中，干重耐盐指数是主要的正向作用因子，而根长耐盐指数对其产生主要的负向影响。

表4 甘蓝型油菜耐盐指标的主成分载荷矩阵

Table 4 Principal component load matrix of salt-tolerance index of *Brassica napus*

主成分 Principal components	萌发势耐盐指数 Salt tolerance index of germination potential	萌发率耐盐指数 Salt tolerance index of germination ratio	根长耐盐指数 Salt tolerance index of root length	下胚轴长耐盐指数 Salt tolerance index of hypocotyl length	鲜重耐盐指数 Salt tolerance index of fresh weight	干重耐盐指数 Salt tolerance index of dry weight
1	0.156	0.198	0.197	0.212	0.216	0.188
2	0.974	0.352	-0.316	-0.356	-0.300	-0.103
3	-0.055	-0.255	-0.804	-0.160	0.171	1.140

2.5 186份甘蓝型油菜种质萌发期耐盐性的综合评价

根据各主成分的贡献率，计算其权重，3个综合指标（主成分）的权重分别为0.785、0.1283、0.0867。基于186份材料在各主成分上的隶属函数值及权重，得到相应的耐盐性综合评价值（D值），并将其进行排序。结果显示，186份甘蓝型油菜种质的D值范围为0.0936~0.8218。其中，Y203的D值最高，表

表3 甘蓝型油菜主成分特征值及方差贡献率

Table 3 Principal component eigenvalues and variance contribution rates of *Brassica napus*

主成分 Principal components	初始特征值 Initial eigenvalue		
	特征值 Eigen value	方差贡献率(%) Variance Contribution rate	累计贡献率(%) Cumulative Contribution rate
1	4.371	72.851	72.851
2	0.714	11.906	84.757
3	0.483	8.052	92.809
4	0.250	4.170	96.979
5	0.108	1.806	98.784
6	0.073	1.216	100

明其具有最强的耐盐性；而F3、F8等61份材料D值最小，表明它们对盐胁迫最为敏感（表5）。根据D值的大小，将186份甘蓝型油菜种质资源分为4个类别： $0 < D \leq 0.25$ 为盐敏感材料，共有87份，占总数的46.77%； $0.25 < D \leq 0.5$ 为低度耐盐材料，共有66份，占总数的35.48%； $0.5 < D \leq 0.75$ 为中度耐盐材料，共有28份，占总数的15.06%； $0.75 < D \leq 1$ 为耐盐材料，共有5份，占总数的2.69%。

表5 186份甘蓝型油菜种质的D值以及耐盐性等级划分

Table 5 D value and classification of salt tolerance of 186 *Brassica napus* germplasms

名称 Name	D值 D value	抗性等级 Level									
Y203	0.8218	耐盐	Y84	0.6951	中度耐盐	Y91	0.5862	中度耐盐	Y56	0.5423	中度耐盐
Y195	0.7701	耐盐	Y366	0.6772	中度耐盐	Y45	0.5811	中度耐盐	Y359	0.5358	中度耐盐
Y343	0.7693	耐盐	Y88	0.6484	中度耐盐	Y472	0.5747	中度耐盐	Y58	0.5353	中度耐盐
Y336	0.7669	耐盐	Y83	0.6151	中度耐盐	Y43	0.5709	中度耐盐	Y86	0.5336	中度耐盐
Y85	0.7538	耐盐	Y167	0.6102	中度耐盐	Y364	0.5687	中度耐盐	Y74	0.5292	中度耐盐
Y100	0.7235	中度耐盐	Y94	0.6059	中度耐盐	Y499	0.5528	中度耐盐	Y70	0.5232	中度耐盐
Y110	0.7022	中度耐盐	Y196	0.5897	中度耐盐	Y49	0.5429	中度耐盐	Y90	0.5169	中度耐盐

表 5 (续)

名称 Name	D 值 D value	抗性等级 Level									
Y92	0.5141	中度耐盐	Y71	0.3393	低度耐盐	Y47	0.2154	盐敏感	Y128	0.0936	盐敏感
Y82	0.5076	中度耐盐	Y18	0.3375	低度耐盐	Y80	0.2116	盐敏感	Y129	0.0936	盐敏感
Y62	0.5060	中度耐盐	Y17	0.3363	低度耐盐	Y162	0.2096	盐敏感	Y132	0.0936	盐敏感
Y372	0.5036	中度耐盐	Y79	0.3244	低度耐盐	F24	0.2078	盐敏感	Y133	0.0936	盐敏感
Y81	0.5020	中度耐盐	Y152	0.3233	低度耐盐	Y166	0.2070	盐敏感	Y135	0.0936	盐敏感
Y69	0.4874	低度耐盐	Y111	0.3126	低度耐盐	Y151	0.2068	盐敏感	Y136	0.0936	盐敏感
Y384	0.4781	低度耐盐	Y23	0.3124	低度耐盐	Y27	0.2058	盐敏感	Y139	0.0936	盐敏感
Y425	0.4653	低度耐盐	Y93	0.3053	低度耐盐	Y48	0.2052	盐敏感	Y141	0.0936	盐敏感
Y76	0.4458	低度耐盐	Y96	0.2977	低度耐盐	Y3	0.2035	盐敏感	Y145	0.0936	盐敏感
F58	0.4449	低度耐盐	Y529	0.2955	低度耐盐	Y51	0.2020	盐敏感	Y146	0.0936	盐敏感
Y140	0.4444	低度耐盐	Y189	0.2943	低度耐盐	Y420	0.1991	盐敏感	Y147	0.0936	盐敏感
Y344	0.4323	低度耐盐	Y421	0.2942	低度耐盐	Y356	0.1904	盐敏感	Y149	0.0936	盐敏感
Y159	0.4265	低度耐盐	Y157	0.2940	低度耐盐	F12	0.1867	盐敏感	Y150	0.0936	盐敏感
Y68	0.4252	低度耐盐	Y525	0.2937	低度耐盐	F45	0.1706	盐敏感	Y154	0.0936	盐敏感
Y387	0.4206	低度耐盐	Y494	0.2923	低度耐盐	Y104	0.1696	盐敏感	Y163	0.0936	盐敏感
Y75	0.4188	低度耐盐	Y440	0.2919	低度耐盐	Y175	0.1656	盐敏感	Y172	0.0936	盐敏感
Y197	0.4126	低度耐盐	Y131	0.2880	低度耐盐	Y355	0.1611	盐敏感	Y182	0.0936	盐敏感
Y41	0.4103	低度耐盐	Y101	0.2836	低度耐盐	F10	0.0936	盐敏感	Y194	0.0936	盐敏感
Y518	0.4095	低度耐盐	Y346	0.2807	低度耐盐	F16	0.0936	盐敏感	Y198	0.0936	盐敏感
Y46	0.4089	低度耐盐	Y349	0.2793	低度耐盐	F3	0.0936	盐敏感	Y200	0.0936	盐敏感
Y160	0.4013	低度耐盐	Y87	0.2737	低度耐盐	F33	0.0936	盐敏感	Y21	0.0936	盐敏感
Y54	0.4007	低度耐盐	Y191	0.2729	低度耐盐	F35	0.0936	盐敏感	Y35	0.0936	盐敏感
Y183	0.3990	低度耐盐	Y153	0.2701	低度耐盐	F41	0.0936	盐敏感	Y377	0.0936	盐敏感
Y109	0.3838	低度耐盐	Y108	0.2696	低度耐盐	F43	0.0936	盐敏感	Y39	0.0936	盐敏感
F32	0.3834	低度耐盐	Y515	0.2688	低度耐盐	F44	0.0936	盐敏感	Y401	0.0936	盐敏感
Y184	0.3785	低度耐盐	F2	0.2686	低度耐盐	F46	0.0936	盐敏感	Y411	0.0936	盐敏感
Y170	0.3735	低度耐盐	Y433	0.2685	低度耐盐	F50	0.0936	盐敏感	Y416	0.0936	盐敏感
Y25	0.3713	低度耐盐	Y164	0.2660	低度耐盐	F52	0.0936	盐敏感	Y418	0.0936	盐敏感
Y477	0.3699	低度耐盐	Y72	0.2641	低度耐盐	F55	0.0936	盐敏感	Y426	0.0936	盐敏感
Y64	0.3689	低度耐盐	F47	0.2569	低度耐盐	F56	0.0936	盐敏感	Y430	0.0936	盐敏感
Y130	0.3677	低度耐盐	Y89	0.2531	低度耐盐	F8	0.0936	盐敏感	Y473	0.0936	盐敏感
Y33	0.3594	低度耐盐	Y155	0.2496	盐敏感	Y106	0.0936	盐敏感	Y474	0.0936	盐敏感
Y391	0.3588	低度耐盐	Y77	0.2489	盐敏感	Y107	0.0936	盐敏感	Y491	0.0936	盐敏感
Y103	0.3587	低度耐盐	Y410	0.2471	盐敏感	Y116	0.0936	盐敏感	Y493	0.0936	盐敏感
Y158	0.3577	低度耐盐	Y5	0.2401	盐敏感	Y121	0.0936	盐敏感	Y66	0.0936	盐敏感
Y78	0.3543	低度耐盐	Y73	0.2325	盐敏感	Y123	0.0936	盐敏感	Y97	0.0936	盐敏感
Y520	0.3526	低度耐盐	Y345	0.2286	盐敏感	Y124	0.0936	盐敏感	Y98	0.0936	盐敏感
Y475	0.3508	低度耐盐	F18	0.2264	盐敏感	Y125	0.0936	盐敏感	Y99	0.0936	盐敏感
Y404	0.3499	低度耐盐	Y408	0.2209	盐敏感	Y126	0.0936	盐敏感			
Y95	0.3478	低度耐盐	Y161	0.2190	盐敏感	Y127	0.0936	盐敏感			

2.6 回归模型建立及鉴定指标筛选

为方便对甘蓝型油菜种质资源进行鉴定和筛选,建立数学模型用于评估其萌发期耐盐性。以D值为因变量,各单项指标为自变量,采用逐步回归分析建立回归方程,最终得到优化的回归方程: $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_3$ 。该回归方程的决定系数 R^2 为0.988, $P<0.001$,其中 X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数。利用回归方程计算了186份甘蓝型油菜种质的耐盐性预测值,并与已有的D值进行相关性分析。结果表明,两者之间存在极显著的相关性,相关性系数为0.992,说明在6个指标中,萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数这3个指标对甘蓝型油菜种子萌发期的耐盐性鉴定影响显著。因此,在相同条件下,这3个指标可作为快速评价甘蓝型油菜种质耐盐性的重要指标,有助于更快速精准地评估甘蓝型油菜的萌发期耐盐性。

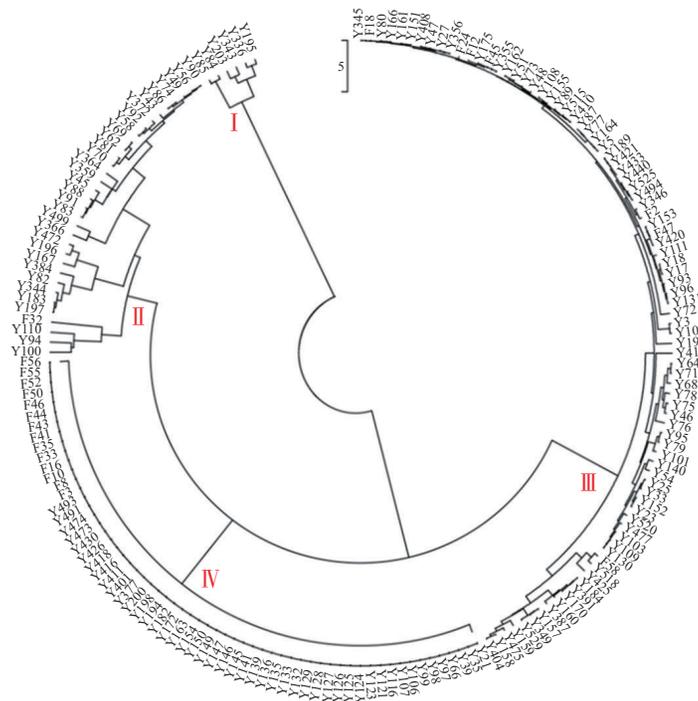
2.7 隶属函数法分析

对186份油菜种质种子萌发期耐盐性各性状耐盐指数的隶属函数值取平均值,再根据平均值进行耐盐性综合排序,平均值越大耐盐性越强,反之耐盐性越弱。通过隶属函数法鉴定的耐盐性等级与通过D值划分的耐盐性等级基本一致(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240223005>,附表1),仅Y384、F47、Y72材料耐盐评级不同。在同一抗盐等级内,两种方法得出的耐盐指数的排名略有差异。如通过D值计算得到耐盐性较强的种质依次为Y203、Y195、Y343、Y336、Y85,而隶属函数值排名前5位的分别是Y203、Y336、Y195、Y343、Y85,两种评价方法中这些种质均属于耐盐种质,但排名有差异。因此,隶属函数法综合评价油菜种质的耐盐性与D值评价结果虽存在个别差异,但大致相同,并未有明显差异。

通过组间联接法,基于各项指标的耐盐指数,采用最远距离法进行系统聚类。当欧氏距离为5时,可将186份甘蓝型油菜种质划分为4大类(图2)。第I类主要为耐盐材料,包括Y195、Y336、Y343、Y203、Y84、Y85;第II类为中度耐盐材料,包括Y90、Y56、Y49等33份种质;第III类为低度耐盐材料,包括Y404、Y158、Y475等86份种质;第IV类为盐敏感材料,包括F56、F55、F52等61份种质。与依据D值分类的结果相比,运用不同评价体系对186份油菜种质的耐盐性进行排名,结果未出现显著差异,耐盐材料和敏盐材料的筛选结果基本一致。

2.8 聚类分析

通过组间联接法,基于各项指标的耐盐指数,采用最远距离法进行系统聚类。当欧氏距离为5时,可将186份甘蓝型油菜种质划分为4大类(图2)。第I类主要为耐盐材料,包括Y195、Y336、Y343、Y203、Y84、Y85;第II类为中度耐盐材料,包括Y90、Y56、Y49等33份种质;第III类为低度耐盐材料,包括Y404、Y158、Y475等86份种质;第IV类为盐敏感材料,包括F56、F55、F52等61份种质。与依据D值分类的结果相比,运用不同评价体系对186份油菜种质的耐盐性进行排名,结果未出现显著差异,耐盐材料和敏盐材料的筛选结果基本一致。



材料编号同表5

Material numbers are the same as in table 5

图2 186份甘蓝型油菜种质资源耐盐性聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of salt tolerance of 186 *Brassica napus* germplasm resources

3 讨论

土壤盐碱化是指土壤中盐分累积过多,达到影响植物正常生长发育的程度,是一种严重威胁农业可持续发展的土壤问题。这主要是长期的不合理灌溉、过度蒸发和土地利用不当导致土壤中的盐分逐渐积累,形成盐碱土^[27]。盐碱化对农业产生了多方面的危害,并对生态环境和社会经济也造成了严重的影响^[28]。为了应对土壤盐碱化的挑战,培育能够在高盐环境下生存和生长的耐盐材料显得尤为迫切,以减轻土壤盐碱化对农业的不利影响。

在植物种子萌发期进行耐盐材料的筛选对农业和植物科学领域至关重要。种子萌发期不仅是植物生命周期的关键节点,更是决定植物对环境胁迫适应性的重要时期。在这个阶段,植物对外界条件的适应性和生存能力得到充分体现。在植物种子萌发期进行耐盐性筛选,可以更早发现具有潜在抗性的品种或个体,为培育更具耐盐性的作物品种、适应盐碱地的生产需求提供材料基础。但目前耐盐性鉴定的筛选浓度尚未形成一致的共识。李萍等^[18]选择了230 mmol/L NaCl溶液对146份甘蓝型油菜进行萌发期耐盐性鉴定。而Wu等^[14]通过对549份甘蓝型油菜自交系进行相关研究,得到耐盐筛选的最佳浓度为200 mmol/L NaCl。龙卫华等^[29]认为214 mmol/L NaCl最适于耐盐性鉴定。本研究通过设置盐浓度梯度,观察不同种质的耐盐能力,最终确定1.25% NaCl浓度作为本研究最佳筛选浓度,这与前人研究结果一致。

耐盐性是植物在高盐土壤中正常萌发生长的关键因素,近年来,学者对油菜种子萌发期的耐盐性开展了一系列研究。曹禹等^[30]在4个主效QTL置信区间内,筛选获得了5个与耐盐性相关的候选基因,并利用250 mmol/L NaCl筛选获得5份耐盐优异种质。胡凤仪等^[31]鉴定479份芥菜型油菜萌发期的耐盐性,分为4个等级,并建立线性回归方程。江建霞等^[32]在16个品种中筛选出3个抗盐胁迫最强的种质。此外,研究和确定萌发期的关键耐盐性指标,有助于更全面地理解植物对盐胁迫的响应机制,为耐盐材料的筛选和育种提供科学依据。在已有研究中,基于植物在盐胁迫条件下的形态变化^[33],如萌发势、萌发率、根长、发芽指数、活力指数等测定方法简单,经常被用作萌发期耐盐性的测定指标。许多学者在研究水稻^[34-36]、高粱^[37-38]、小麦^[39]等作物的萌发期耐盐性时,利用上述指标及其相对

值展开了广泛的研究。然而,对于萌发期耐盐性评价的关键指标,尚未达成一致的结论。Wu等^[14]认为地上部鲜重耐盐性指数是可以代表萌发期甘蓝型油菜种质耐盐性的可靠指标。陈新军等^[13]认为油菜各品种的发芽势和发芽率之间具有显著的差异,可将其作为研究油菜盐逆境反应的指标。刘自刚等^[40]发现,与耐盐材料相比,盐敏感材料的胚根长与胚芽长的比值明显更高,盐胁迫下耐盐材料的胚根伸长更为敏感,因此胚根长可作为耐盐材料筛选的指标。许耀照等^[41]认为种子发芽率、胚根长和丙二醛含量可以作为冬油菜品种的耐盐性筛选指标。本研究通过测定盐胁迫下各种质的萌发势、萌发率、根长、下胚轴长、鲜重以及干重,深入挖掘各项指标之间的内在关系,运用主成分分析、隶属函数等分析方法,筛选出萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数可以作为快速评价甘蓝型油菜种子萌发期耐盐性的鉴定指标。该结果不仅能够评估种子萌发活力,还能充分考虑到生物量的相关因素,从而更为准确地评价不同种质的耐盐性。

利用主成分分析、隶属函数分析以及逐步线性回归分析等方法对植物抗逆性进行综合评价、筛选植物抗逆的重要指标,已经成为综合评价作物抗逆性的客观有效的方法,并在多个作物中得到广泛应用,如油菜的耐低氮性^[42]、芥菜型油菜苗期的耐旱性^[43]、甘蓝型油菜的耐低温性^[44]、玉米的抗倒伏性^[45]、大麦的耐碱性^[46]、藜麦的抗旱性^[47]、棉花的耐低磷性^[23]。本研究利用主成分分析法,将萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数、根长耐盐指数、下胚轴长耐盐指数、鲜重耐盐指数、干重耐盐指数6个指标转换为3个更具代表性的综合指标,这3个综合指标可以代表各种质各个维度的信息。进一步计算出各种质的耐盐性综合评价值(D值),并依据D值对186份种质资源进行耐盐性等级划分,其中耐盐材料包括Y203、Y195、Y343、Y336、Y85共5份,其D值分别为0.8218、0.7701、0.7693、0.7669、0.7538。通过聚类分析对各种质进行聚类,发现耐盐材料共有6份,分别为Y195、Y336、Y343、Y203、Y84、Y85,与依据D值划分的结果相比,仅Y84不一致(依据D值Y84被划分为排名靠前的中度耐盐材料),但其余5份材料均一致。此外,两种评价方法中,F52、F55、F56等材料一致被划分为盐敏感材料,这也证明了本研究筛选极端材料的可信度。种子各生长时期的耐盐性不一定完全相同,油菜一般采用直播的形式播种,萌发期在整个生育期中至关重要,因此本

研究选择探究各种质种子萌发期的耐盐性。本研究结果只代表186份种质资源在种子萌发期的耐盐性,其在苗期、花期等其他生长阶段是否具有同样的耐盐性,有待进一步研究。本研究中,各种质经过盐胁迫后,其形态变化主要体现在萌发活力方面,萌发势、萌发率显著降低;另外,根长、下胚轴长也受到明显抑制,从而导致鲜重等生物量也显著降低。本研究综合评价各种质耐盐性的最佳指标为萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数。依据逐步线性回归方法构建线性回归方程 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$,方程决定系数 $R^2=0.988, P<0.001$,式中 X_1 、 X_2 和 X_5 分别代表萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数,回归方程可用于预测甘蓝型油菜种子萌发期的耐盐性,大规模鉴定油菜耐盐性。

4 结论

本研究通过设置不同盐浓度梯度处理,确定了甘蓝型油菜种子萌发期的最适盐胁迫浓度为1.25% NaCl。测定了186份甘蓝型油菜萌发期1.25% NaCl盐胁迫后的各项形态指标,运用主成分分析、隶属函数等方法对186份甘蓝型油菜的耐盐性进行了综合评价,筛选出5份耐盐材料。此外,通过逐步回归分析方法,建立了最优回归方程为 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$ (方程决定系数 $R^2=0.988, P<0.001$)。研究认为,萌发势耐盐指数、萌发率耐盐指数和鲜重耐盐指数可作为甘蓝型油菜萌发期耐盐性鉴定的重要指标,这些指标能够快速有效地鉴定甘蓝型油菜的萌发期耐盐性。本研究结果为甘蓝型油菜种子萌发期的耐盐性评价以及油菜耐盐育种提供了有力的参考依据。

参考文献

- [1] 马凯, 饶良懿. 我国土壤盐碱化问题研究脉络和热点分析. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 90-102
Ma K, Rao L Y. Research lineage and hot spot analysis of soil salinization in China. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(11): 90-102
- [2] Park H J, Kim W Y, Yun D J. A New insight of salt stress signaling in plant. Molecules and Cells, 2016, 39: 447-459
- [3] Ziska L H, Bunce J A, Shimono H, Gealy D R, Baker J T, Newton P C D, Reynolds M P, Jagadish K S V, Zhu C, Howden M, Wilson L T. Food security and climate change: On the potential to adapt global crop production by active selection to rising atmospheric carbon dioxide. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2012, 279: 4097-4105
- [4] Qadir M, Quill  rou E, Nangia V, Murtaza G, Singh M, Thomas R J, Drechsel P, Noble A D. Economics of salt-induced land degradation and restoration. Natural Resources Forum, 2014, 38: 282-295
- [5] Bouchet A S, Laperche A, Bissuel-Belaygue C, Snowdon R, Nesi N, Stahl A. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36: 2
- [6] 万何平, 张浩, 余忆, 陈敬东, 曾长立, 赵伦, 文静, 沈金雄, 傅廷栋. 油菜耐盐碱研究与应用. 中国农业科技导报, 2022, 24(12): 59-67
Wan H P, Zhang H, Yu Y, Chen J D, Zeng C L, Zhao L, Wen J, Shen J X, Fu T D. Study and application of salt and alkali tolerance in rapeseed. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(12): 59-67
- [7] 于伟, 刘卫东, 柳李旺, 朱士农, 崔群香. 隶属函数法对12个茄科幼苗期耐盐性的筛选与鉴定. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 228-230
Yu W, Liu W D, Liu L W, Zhu S N, Cui Q X. Salt tolerance screening and identification of 12 eggplant varieties in seedling stage using the subordination function method. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 228-230
- [8] 徐银萍, 潘永东, 刘强德, 姚元虎, 贾延春, 任诚, 火克仓, 陈文庆, 赵锋, 包奇军, 张华瑜. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 作物学报, 2020, 46(3): 448-461
Xu Y P, Pan Y D, Liu Q D, Yao Y H, Jia Y C, Ren C, Huo K C, Chen W Q, Zhao F, Bao Q J, Zhang H Y. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(3): 448-461
- [9] 田蕾, 陈亚萍, 刘俊, 马晓刚, 王娜, 杨兵, 李莹, 郭海东, 李娟, 胡慧, 张银霞, 李培富. 粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选. 中国水稻科学, 2017, 31(6): 631-642
Tian L, Chen Y P, Liu J, Ma X G, Wang N, Yang B, Li Y, Guo H D, Li J, Hu H, Zhang Y X, Li P F. Comprehensive Evaluation and selection of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at germination stage. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(6): 631-642
- [10] 张晓婷, 庄赟, 董嘉辉, 周碧燕. 荔枝种质资源抗寒性综合评价. 果树学报, 2024, 41(3): 403-425
Zhang X T, Zhuang Y, Dong J H, Zhou B Y. Comprehensive evaluation of cold tolerance in litchi germplasm resources. Journal of Fruit Science, 2024, 41(3): 403-425
- [11] 饶庆琳, 姜敏, 刘选轶, 吕建伟, 胡廷会, 成良强, 王金花, 王军. 贵州296份花生种质资源遗传多样性及综合评价. 植物遗传资源学报, 2024, 25(3): 373-385
Rao Q L, Jiang M, Liu X Y, Lyu J W, Hu T H, Cheng L Q, Wang J H, Wang J. Genetic diversity and comprehensive evaluation of 296 peanuts germplasm resources in Guizhou. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 373-385
- [12] 张彦威, 张礼凤, 李伟, 王彩洁, 张军, 徐冉. 大豆发芽期和苗期耐盐性的隶属函数分析. 山东农业科学, 2016, 48(1):

- 21-25
Zhang Y W, Zhang L F, Li W, Wang C J, Zhang J, Xu R. Evaluation on salt tolerance of soybean at germination and seedling stages using membership function. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48 (1): 21-25
- [13] 陈新军, 胡茂龙, 戚存扣, 浦惠明, 张洁夫, 高建芹, 傅寿仲. 不同甘蓝型油菜品种种子萌发耐盐能力研究. *江苏农业科学*, 2007, 35(4): 26-28
Chen X J, Hu M L, Qi C K, Pu H M, Zhang J F, Gao J Q, Fu S Z. Study on salt tolerance of seed germination of different *Brassica napus* varieties. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007, 35(4): 26-28
- [14] Wu H, Guo J R, Wang C F, Li K L, Zhang X W, Yang Z, Li M T, Wang B S. An effective screening method and a reliable screening trait for salt tolerance of *Brassica napus* at the germination stage. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 530
- [15] 李阿蕾, 戴志刚, 陈基权, 邓灿辉, 唐蜻, 程超华, 许英, 张小雨, 粟建光, 杨泽茂. 239 份长果种黄麻种质资源萌发期耐镉性评价及耐镉资源筛选. *作物学报*, 2023, 49 (10): 2677-2699
Li A L, Dai Z G, Chen J Q, Deng C H, Tang Q, Cheng C H, Xu Y, Zhang X Y, Su J G, Yang Z M. Evaluation of cadmium tolerance in germination stage of 239 dark jute (*Corchorus olitorius* L.) germplasm resources and screening of cadmium tolerance resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (10): 2677-2699
- [16] 张静, 高文博, 晏林, 张宗文, 周海涛, 吴斌. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选. *作物学报*, 2023, 49 (6): 1551-1561
Zhang J, Gao W B, Yan L, Zhang Z W, Zhou H T, Wu B. Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (6): 1551-1561
- [17] 董扬. 240 份糜子种质资源萌芽期耐冷性综合评价及筛选. *干旱地区农业研究*, 2022, 40 (6): 23-33
Dong Y. Comprehensive evaluation and screening of cold tolerance of 240 broomcorn millet germplasm resources at germination stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40 (6): 23-33
- [18] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 张燕, 陶顺仙, 张琪, Aldiyar, 徐爱遐, 黄镇. 146 份甘蓝型油菜种质萌芽期耐盐性筛选及评价. *西北农业学报*, 2021, 30 (6): 848-859
Li P, Yan J Q, Zhang H, Zhang Y, Tao S X, Zhang Q, Aldiyar, Xu A X, Huang Z. Screening and evaluation of salt tolerance for 146 *Brassica napus* germplasms at germination stage. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30 (6): 848-859
- [19] Wan H P, Wei Y K, Qian J L, Guo Y L, Wen J, Bin Y, Ma C, Tu J X, Fu T D, Shen J X. Association mapping of salt tolerance traits at germination stage of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Euphytica*, 2018, 214: 1-16
- [20] Boter M, Calleja-Cabrera J, Carrera-Castaño G, Wagner G, Hatzig S, Snowdon R, Legoahec L, Bianchetti G, Bouchereau A, Nesi N, Pernas M, Oñate-Sánchez L. An integrative approach to analyze seed germination in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1342
- [21] 王瑞森, 沈盟, 姚祥坦. 低温胁迫对油菜种子发芽及成苗的影响. *上海农业学报*, 2020, 36 (1): 38-43
Wang R S, Shen M, Yao X T. Influences of low temperature stress on seed germination and seedling formation of *Brassica napus* L.. *Acta Agriculture Shanghai*, 2020, 36 (1): 38-43
- [22] 鲜孟筑, 杨萍, 胡立勇, 徐正华. 油菜种子萌发成苗期耐低温性评价. *作物杂志*, 2015 (5): 116-122
Xian M Z, Yang P, Hu L Y, Xu Z H. Comprehensive evaluation of low temperature tolerance in rapeseed during germination and emergence periods. *Crops*, 2015 (5): 116-122
- [23] 米热扎提江·喀由木, 西尔艾力·吾麦尔江, 李晓瞳, 王香茹, 贵会平, 张恒恒, 张西岭, 董强, 宋美珍. 棉花苗期耐低磷种质筛选及耐低磷综合评价. *中国农业科学*, 2023, 56 (21): 4150-4162
Kayoumu M R Z T J, Wumaierjiang X E A L, Li X T, Wang X R, Gui H P, Zhang H H, Zhang X L, Dong Q, Song M Z. Screening of low phosphorus tolerant germplasm in cotton at seedling stage and comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56 (21): 4150-4162
- [24] 李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 孙璐, 白薇, 闫彤, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定. *中国农业科学*, 2013, 46(9): 1762-1771
Li F X, Zhou Y F, Wang Y T, Sun L, Bai W, Yan T, Xu W J, Huang R D. Screening and identification of sorghum cultivars for alkali tolerance during germination. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(9): 1762-1771
- [25] 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 M A, Wang L H, Maimaiti A, Zhang J S. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerant evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (7): 1290-1300
- [26] 荣廷昭, 潘光堂, 黄玉碧. 数量遗传学. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 72, 89-106
Rong T Z, Pan G T, Huang Y B. Quantitative genetics. Beijing: China Science and Technology Press, 2003: 72, 89-106
- [27] Pereira P, Barceló D, Panagos P. Soil and water threats in a changing environment. *Environmental Research*, 2020, 186: 109501
- [28] Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt A K, Pulatov A, Kempen B, de Sousa L. Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111260
- [29] 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
- [30] 曹禹, 史睿, 杨廷海, 王亚萍, 向亚男, 陈锋, 张维, 朱斌, 张洁夫, 王晓东. 甘蓝型油菜萌发期耐盐性QTL定位及耐盐种质资源筛选. 中国油料作物学报, 2023, 45 (6): 1185-1196
Cao Y, Shi R, Yang T H, Wang Y P, Xiang Y N, Chen F, Zhang W, Zhu B, Zhang J F, Wang X D. QTL mapping and identification of salt tolerant germplasm in *Brassica napus* at germination stage. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45 (6): 1185-1196
- [31] 胡凤仪, 侯献飞, 于月华, 贾东海, 刘忠松, 李强, 苗昊翠, 沈金雄, 顾元国. 479份芥菜型油菜种质资源萌发期耐盐性综合评. 中国油料作物学报, 2023, 45 (6): 1174-1184
Hu F Y, Hou X F, Yu Y H, Jia D H, Liu Z S, Li Q, Miao H C, Shen J X, Gu Y G. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 479 *Brassica juncea* germplasm resources at germination stage. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45 (6): 1174-1184
- [32] 江建霞, 张俊英, 杨立勇, 朱吉凤, 王伟荣, 雷蕾, 周熙荣, 李延莉. 盐胁迫对甘蓝型油菜种子萌发的影响. 分子植物育种, 2024, <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230615.1538.014.html>
Jiang J X, Zhang J Y, Yang L Y, Zhu J F, Wang R W, Lei L, Zhou X R, Li Y L. Effects of salt stress on germination of rapeseed seeds. Molecular Plant Breeding, 2024, <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230615.1538.014.html>
- [33] 李培英, 孙宗玖. 33份偃麦草种质芽期耐盐性评价. 草业科学, 2015, 32(4): 593-600
Li P Y, Sun Z J. Evaluation on the salt resistance of germplasm resources of 33 *Elytrigia repens* during seed germination period. Pratacultural Science, 2015, 32(4): 593-600
- [34] Wang Z F, Wang J F, Bao Y M, Wu Y Y, Zhang H S. Quantitative trait loci controlling rice seed germination under salt stress. Euphytica, 2011, 178 (3): 297-307
- [35] 郭望模, 傅亚萍, 孙宗修, 郑镇一. 盐胁迫下不同水稻种质形态指标与耐盐性的相关分析. 植物遗传资源学报, 2003, 4 (3): 245-251
Guo W M, Fu Y P, Sun Z X, Zheng Z Y. The correlation analysis between the morphological indices and salt tolerance in different rice germplasm under the salt stress. Journal of Plant Genetic Resources, 2003, 4(3): 245-251
- [36] Chen D F, Li Y L, Fang T, Shi X L, Chen X W. Specific roles of tocopherols and tocotrienols in seed longevity and germination tolerance to abiotic stress in transgenic rice. Plant Science, 2016, 244: 31-39
- [37] 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. 植物遗传资源学报, 2012, 13(1): 35-41
Cui J H, Xie D L, Chang J H. Establishment and verification of comprehensive evaluation method for salt tolerance of sorghum materials. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(1): 35-41
- [38] 何晓兰, 徐照龙, 张大勇, 黄益洪, 彭陈, 邵宏波, 王为, 郭士伟. 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. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 52-60
He X L, Xu Z L, Zhang D Y, Huang Y H, Peng C, Shao H B, Wang W, Guo S W. Comparison on salt tolerance indexes of 65 germplasm of sorghum bicolor at germination stage and comprehensive evaluation on their salt tolerance. Journal of Plant Resources and Environment, 2015, 24(4): 52-60
- [39] 王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 张辉, 樊守金, 冯沂, 张海玲. 小麦品种资源耐盐性鉴定. 植物遗传资源学报, 2012, 13(2): 189-194
Wang M M, Jiang Q Y, Hu Z, Zhang H, Fan S J, Feng L, Zhang H L. Evaluation for salt tolerance of wheat cultivars. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(2): 189-194
- [40] 刘自刚, 王志江, 方圆, 孙万仓, 袁金海, 米超, 方彦, 武军艳, 李学才. NaCl胁迫白菜型冬油菜种子萌发和幼苗生理的影响. 中国油料作物学报, 2017, 39(3): 351-359
Liu Z G, Wang Z J, Fang Y, Sun W C, Yuan J H, Mi C, Fang Y, Wu J Y, Li X C. Effect of salt stress on seed germination and seedling physiology of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.). Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(3): 351-359
- [41] 许耀照, 曾秀存, 王振朝, 党仕卓, 刘永晶. NaCl胁迫对冬油菜种子萌发和生理特性的影响. 浙江农业学报, 2023, 35 (3): 499-508
Xu Y Z, Zeng X C, Wang Z C, Dang S Z, Liu Y J. Effects of NaCl stress on seed germination and physiological characteristics of winter oilseed rape. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35 (3): 499-508
- [42] 陈敬东, 余忆, 鲁金春子, 戴希刚, 沈金雄, 傅廷栋, 伍晓明, 曾长立, 万何平. 基于隶属函数法对甘蓝型油菜种质苗期耐低氮胁迫能力的综合评价. 江苏农业科学, 2023, 51 (14): 124-133
Chen J D, Yu Y, Lu J C Z, Dai X G, Shen J X, Fu T D, Wu X M, Zeng C L, Wan H P. Comprehensive evaluation of resistance to low nitrogen stress of *Brassica napus* germplasm at seedling stage based on membership function method. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51 (14): 124-133
- [43] 黄莎, 梁峰豪, 王璐璐, 唐容, 张玉玲, 陆光远, 徐劲松, 张学昆, 张超. 贵州芥菜型油菜苗期耐旱种质的筛选与鉴定. 分子植物育种, 2022, 20 (9): 3059-3068
Huang S, Liang F H, Wang L L, Tang R, Zhang Y L, Lu G Y, Xu J S, Zhang X K, Zhang C. Screening and identification of drought tolerant *Brassica juncea* germplasm of Guizhou at seedling stage. Molecular Plant Breeding, 2022, 20 (9): 3059-3068
- [44] 黄贺, 闫蕾, 吕艳, 丁晓雨, 蔡俊松, 程勇, 张学昆, 邹锡玲. 甘蓝型油菜发芽期低温耐性的评价与材料筛选. 中国油料作物学报, 2019, 41 (5): 723-734

- Huang H, Yan L, Lv Y, Ding X Y, Cai J S, Cheng Y, Zhang X K, Zou X L. Screening and evaluation of low temperature tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) at germination stage. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41 (5): 723-734
- [45] 郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 贾晓艳, 祝丽英, 黄亚群, 陈景堂, 郭晋杰. 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(6): 1588-1596
- Zheng Y X, Liu W S, Zhao Y F, Jia X Y, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T, Guo J J. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1588-1596
- [46] 李建波, 刘志萍, 王文迪, 巴图, 马宇, 吕二锁, 杜慧婷, 徐寿军. 大麦萌发期优异耐碱性种质筛选与鉴定. *草业科学*, 2023, 40 (10): 2581-2597
- Li J B, Liu Z P, Wang W D, Ba T, Ma Y, Lyu E S, Du H T, Xu S J. Screening and identification of excellent alkali-tolerant germplasm of barley at the germination stage. *Pratacultural Science*, 2023, 40 (10): 2581-2597
- [47] 朱丽丽, 张发玉, 安宁, 陈志国. 116 份藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评. *干旱地区农业研究*, 2024, 42 (1): 23-31
- Zhu L L, Zhang F Y, An N, Chen Z G. Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42 (1): 23-31

附表 1 186 份甘蓝型油菜种质材料的平均隶属函数值

Supplementary Table 1 Average membership function values of 186 *Brassica napus* germplasm materials

材料名称 Material	平均隶属函数值 Average membership function value										
Y203	0.7207	Y62	0.3877	Y520	0.2550	Y87	0.1698	Y355	0.0644	Y141	0
Y336	0.7186	Y372	0.3858	Y78	0.2530	Y108	0.1622	F10	0	Y145	0
Y195	0.6998	Y92	0.3855	Y103	0.2517	Y153	0.1604	F16	0	Y146	0
Y343	0.6964	Y69	0.3684	Y64	0.2478	Y89	0.1560	F3	0	Y147	0
Y85	0.6449	F58	0.3669	Y33	0.2471	Y410	0.1545	F33	0	Y149	0
Y84	0.5872	Y425	0.3631	Y95	0.2435	F47	0.1502	F35	0	Y150	0
Y100	0.5726	Y387	0.3489	Y17	0.2302	Y77	0.1476	F41	0	Y154	0
Y110	0.5596	Y159	0.3405	Y18	0.2271	Y72	0.1470	F43	0	Y163	0
Y167	0.5525	Y344	0.3355	Y79	0.2225	Y5	0.1439	F44	0	Y172	0
Y366	0.5102	Y76	0.3310	Y71	0.2204	Y155	0.1435	F46	0	Y182	0
Y196	0.5079	Y140	0.3305	Y152	0.2141	Y345	0.1311	F50	0	Y194	0
Y88	0.5054	Y197	0.3273	Y157	0.2111	Y73	0.1270	F52	0	Y198	0
Y472	0.5034	Y518	0.3273	Y111	0.2066	F18	0.1258	F55	0	Y200	0
Y94	0.4858	Y160	0.3244	Y529	0.2058	Y161	0.1233	F56	0	Y21	0
Y83	0.4813	Y183	0.3111	Y93	0.1999	Y408	0.1203	F8	0	Y35	0
Y91	0.4504	Y75	0.3053	Y23	0.1988	F24	0.1181	Y106	0	Y377	0
Y45	0.4494	Y68	0.3006	Y440	0.1988	Y3	0.1135	Y107	0	Y39	0
Y364	0.4297	Y184	0.3000	Y189	0.1986	Y80	0.1131	Y116	0	Y401	0
Y43	0.4296	Y170	0.2974	Y525	0.1980	Y162	0.1125	Y121	0	Y411	0
Y56	0.4204	Y46	0.2966	Y494	0.1956	Y47	0.1118	Y123	0	Y416	0
Y49	0.4204	Y41	0.2889	Y421	0.1931	Y151	0.1085	Y124	0	Y418	0
Y86	0.4096	Y54	0.2864	Y349	0.1922	Y166	0.1081	Y125	0	Y426	0
Y384	0.4088	Y391	0.2808	Y96	0.1899	Y27	0.1059	Y126	0	Y430	0
Y359	0.4082	F32	0.2782	Y131	0.1878	Y48	0.1059	Y127	0	Y473	0
Y74	0.4058	Y109	0.2728	Y101	0.1852	Y51	0.1033	Y128	0	Y474	0
Y58	0.4030	Y158	0.2658	Y191	0.1830	Y420	0.1003	Y129	0	Y491	0
Y82	0.4027	Y477	0.2637	Y346	0.1826	F12	0.0903	Y132	0	Y493	0

Y70	0.4025	Y25	0.2601	F2	0.1777	Y356	0.0903	Y133	0	Y66	0
Y90	0.3994	Y404	0.2583	Y433	0.1718	Y104	0.0803	Y135	0	Y97	0
Y499	0.3934	Y130	0.2572	Y164	0.1703	F45	0.0737	Y136	0	Y98	0
Y81	0.3899	Y475	0.2565	Y515	0.1702	Y175	0.0706	Y139	0	Y99	0
