

186 份甘蓝型油菜种子萌发期耐盐种质资源鉴定

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, 湖南长沙 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。因此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筛选出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, 甘蓝型油菜的相对萌发势、相对萌发率、相对根长、相对下胚轴长、相对鲜重、相对干重间互成极显著正相关; 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。并建立了甘蓝型油菜耐盐性鉴定的数学评价模型 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$ 。本研究筛选得到的耐盐鉴定指标和耐盐材料为开展油菜耐盐育种奠定了方法和材料基础。

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 Germplasm During Seed Germination Period in 186 accession of *Brassica napus*

JIAO Ruyu^{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, Hunan; 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

收稿日期: 2024-02-23

网络出版日期:

URL:

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资金项目(2022 年度)(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 (2022)(2022CX55); The Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2023RC1077); The Science and Technology Talent Support Program of Hunan Province (2023TJ-Z09)

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 vigor, germination rate, root length, hypocotyl length, fresh weight, and dry weight of 186 *Brassica napus* germplasm 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 significant positive correlation among the relative germination vigor, relative germination rate, relative root length, relative hypocotyl length, relative fresh weight, and relative 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 have established the methodological and material groundwork for 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:国家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。因此,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之一。

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的背景下,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,是改良与利用盐碱土地的先锋作物之一^[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材料鉴定评价的研究报道较少。对甘蓝型油菜种质资源材料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,张华瑜等对 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^[8];田蕾等利用 125 mM 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 3 个粳稻种质资源芽期耐盐性的重要指标^[9];张晓婷等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^[10];饶庆琳等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^[11]。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,由于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,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,并运用聚类分析的方法确定耐盐等级,目的在于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 份待鉴定材料均为甘蓝型油菜自交系,均由湖南省作物研究所提供。它们遗传多样性丰富、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 最佳胁迫浓度的确定

随机选择 15 个油菜自交系,设置 0.75%、1%、1.25%、1.5% NaCl 浓度梯度^[14,18-19](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,以确定进行盐胁迫的最佳 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,将它们置于直径为 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,每组设置 3 个生物学重复。置于人工气候培养室内培养,温度为 $24 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}/22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (日/夜),相对湿度为 70%,光照强度 $650\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

(16 h 光照/8 h 黑暗)^[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。

1.3 186 份材料的耐盐性鉴定

对 186 份材料进行耐盐性鉴定。试验组的处理浓度为 1.25% NaCl 溶液,每个处理 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 cm \times 25 cm \times 6.5 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。

1.4 测定指标与方法

第 3 天记录种子的发芽数,第 7 天计算发芽率,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。

发芽势=3d 种子发芽数/供试种子总数 $\times 100\%$

发芽率=7d 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 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=1-耐盐指数

1.5 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,通过计算各项指标的耐盐指数,利用主成分分析降维,旨在提取累积贡献率超过 85%的前 P 个主成分。这些主成分将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。接着,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其进行标准化处理,将其缩放到区间[0, 1]。

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

式中 X_i 表示第 i 个综合指标测定值, X_{\min} 、 X_{\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)。

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

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

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。

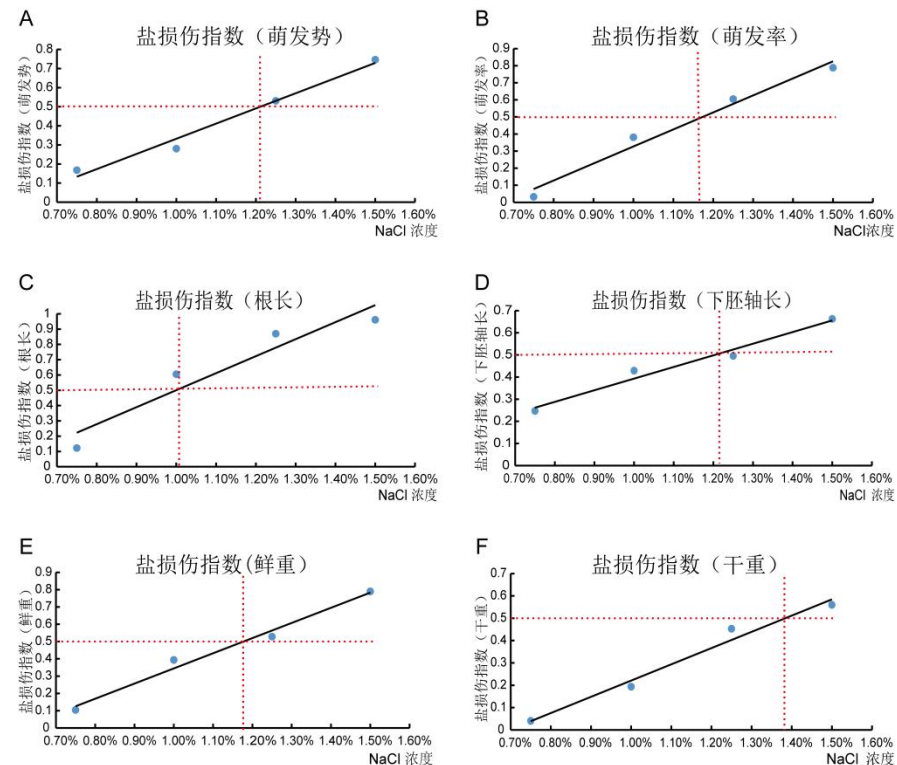
1.6 聚类分析

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（相对萌发势、相对萌发率、相对根长、相对下胚轴长、相对干重、相对鲜重）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%、1.25%、1.5%）的 NaCl 溶液进行盐胁迫处理。通过计算萌发率、萌发势、根长、下胚轴长等指标的盐损伤指数，运用线性回归分析的方法进行综合评价。结果发现，在使用 1.2113% 的 NaCl 处理甘蓝型油菜时，萌发势的盐损伤指数为对照组的一半；同时，当萌发率的盐损伤指数降到对照组的 50% 时，NaCl 浓度为 1.1734%；此外，根长、下胚轴长、鲜重、干重的盐损伤指数达到对照组的一半所对应的 NaCl 浓度分别为 0.9993%、1.2037%、1.1773%、1.3839%（图 1）。通过综合各项指标的盐损伤指数，得出其平均 NaCl 浓度为 1.1915%，因此，我们选择 1.25% NaCl 作为处理浓度，对 186 份甘蓝型油菜种质进行全面评价。



A: 萌发势盐损伤指数; B: 萌发率盐损伤指数; C: 根长盐损伤指数; D: 下胚轴长盐损伤指数; E: 鲜重盐损伤指数; F: 干重盐损伤指数。图中数据为 15 个自交系在各 NaCl 浓度下各指标的平均值

Salt damage indices of germination vigor (A); germination rate (B); root length (C); hypocotyl length (D); fresh weight (E); dry weight (F). The data in the figure represent the average values of each parameter for the 15 inbred lines under stress of various sodium chloride concentrations

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。通过表 1 可观察到，相对萌发势、相对萌发率、相对根长、相对下胚轴长、相对鲜重、相对干重的变异系数（标准差/平均数）分别为 143.54%、83.36%、109.03%、55.58%、58.99%、37.48%。这些变异系数均超过 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。这些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，其相对萌发势和相对根长均显著降低，皆小于 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	平均数	标准差	变异系数(%)
Index	Mean	SD	CV
相对萌发势 Relative germination potential	0.1825	0.2620	143.54
相对萌发率 Relative germination ratio	0.3659	0.3051	83.36
相对根长 Relative root length	0.1629	0.1776	109.03
相对下胚轴长 Relative hypocotyl length	0.2528	0.1405	55.58
相对鲜重 Relative fresh weight	0.4443	0.2621	58.99
相对干重 Relative 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

计算甘蓝型油菜各种质在对照和盐胁迫条件下的相对萌发势、相对萌发率、相对根长、相对下胚轴长、相对鲜重和相对干重，并利用 IBM. SPSS Statistics 20.0 对各项指标进行相关性分析。研究结果表明，任意两个指标间均呈极显著的正相关（ $P<0.01$ ）（表 2）。其中，相对鲜重和相对下胚轴长之间的相关性最强，相关系数为 0.9，而相对萌发势和相对下胚轴长之间的相关性最小，相关系数仅为 0.464。在植物的耐盐机制中，各项指标发挥的作用不尽相同，而上述研究结果显示这些指标之间又存在显著相关性，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 indexes in *Brassica napus* under 1.25% NaCl stress

指标	相对萌发势	相对萌发率	相对根长	相对下胚轴长	相对鲜重	相对干重
Index	Relative germination	Relative	Relative root	Relative hypocotyl	Relative fresh	Relative dry

	potential	germination ratio	length	length	weight	weight
相对萌发势	1.000**					
Relative germination potential						
相对萌发率	0.674**	1.000**				
Relative germination ratio						
相对根长 Relative root length	0.466**	0.676**	1.000**			
相对下胚轴长	0.464**	0.737**	0.843**	1.000**		
Relative hypocotyl length						
相对鲜重 Relative fresh weight	0.508**	0.726**	0.823**	0.900**	1.000**	
相对干重 Relative dry weight	0.493**	0.619**	0.533**	0.719**	0.816**	1.000**

** 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

为了确定进行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，累积贡献率为 92.809% 时，涉及 3 个主成分，第一主成分的特征值为 4.371，方差贡献率达到 72.851%；第二主成分的特征值为 0.714，方差贡献率为 11.906%；第三主成分的特征值为 0.483，方差贡献率达到了 8.052%，当主成分的累积贡献率超过 85% 时，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 可得知，在第一主成分中，各项指标均呈现正向影响，尤其是相对鲜重和相对下胚轴长的载荷绝对值较高，分别为 0.216、0.212，属于生物量因子，在第一主成分中发挥着重要的作用；在第二主成分中，与相对萌发势和相对萌发率相关的萌发活力因子在其中发挥了主要的正向作用，特别是相对萌发势，其载荷绝对值达到 0.974，相反地，相对根长、相对下胚轴、相对鲜重和相对干重均呈现负向影响；在第三主成分中，相对干重是主要正向作用的因子，而相对根长对其产生主要的负向影响。

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			提取平方和载入 Extract Square sum load		
	特征值 Eigen value	方差贡献(%)	累计贡献率(%)	特征值 Eigen value	方差贡献(%)	累计贡献率(%)
		Variance	Cumulative variance		Variance	Cumulative variance
		Contribution rate	Contribution rate		Contribution rate	Contribution rate
1	4.371	72.851	72.851	4.371	72.851	72.851
2	0.714	11.906	84.757	0.714	11.906	84.757
3	0.483	8.052	92.809	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	100.000			

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	相对萌发势	相对萌发率	相对根长	相对下胚轴长	相对鲜重	相对干重
Principal components	Relative germination potential	Relative germination ratio	Relative root length	Relative hypocotyl length	Relative fresh weight	Relative 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

通过计算各主成分的贡献率，并相应地确定其权重，能够揭示三个综合指标在模型中的相对重要性。具体而言，这三个综合指标的权重分别为 0.785、0.1283、0.0867。基于这些权重以及不同甘蓝型油菜种质在隶属函数值上的表现，得到 186 份材料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 表现出最高的 D 值，表明其具有最强的耐盐性；相反，F3、F8 等材料具有最小的 D 值，表明它们对盐胁迫最为敏感（表 5）。最终，根据 D 值的大小，将 186 份甘蓝型油菜种质资源分为四个类别：0<D≤0.25 为盐敏感材料，共有 87 份，占总数的 46.77%；0.25<D≤0.5 为低度耐盐材料，共有 66 份，占总数的 35.48%；0.5<D≤0.75 为中度耐盐材料，共有 28 份，占总数的 15.06%；0.75<D≤1 为耐盐材料，共有 5 份，占总数的 2.69%。

表 5 186 份甘蓝型油菜种质材料的 D 值以及耐盐性等级划分

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

材料名称	D 值	抗性等级	材料名称	D 值	抗性等级	材料名称	D 值	抗性等级	材料名称	D 值	抗性等级
Material	D Value	Level	Material	D Value	Level	Material	D Value	Level	Material	D Value	Level
Y203	0.8218	耐盐	Y46	0.4089	低度耐盐	Y433	0.2685	低度耐盐	Y116	0.0936	盐敏感
Y195	0.7701	耐盐	Y160	0.4013	低度耐盐	Y164	0.2660	低度耐盐	Y121	0.0936	盐敏感
Y343	0.7693	耐盐	Y54	0.4007	低度耐盐	Y72	0.2641	低度耐盐	Y123	0.0936	盐敏感
Y336	0.7669	耐盐	Y183	0.3990	低度耐盐	F47	0.2569	低度耐盐	Y124	0.0936	盐敏感
Y85	0.7538	耐盐	Y109	0.3838	低度耐盐	Y89	0.2531	低度耐盐	Y125	0.0936	盐敏感
Y100	0.7235	中度耐盐	F32	0.3834	低度耐盐	Y155	0.2496	盐敏感	Y126	0.0936	盐敏感
Y110	0.7022	中度耐盐	Y184	0.3785	低度耐盐	Y77	0.2489	盐敏感	Y127	0.0936	盐敏感
Y84	0.6951	中度耐盐	Y170	0.3735	低度耐盐	Y410	0.2471	盐敏感	Y128	0.0936	盐敏感
Y366	0.6772	中度耐盐	Y25	0.3713	低度耐盐	Y5	0.2401	盐敏感	Y129	0.0936	盐敏感
Y88	0.6484	中度耐盐	Y477	0.3699	低度耐盐	Y73	0.2325	盐敏感	Y132	0.0936	盐敏感
Y83	0.6151	中度耐盐	Y64	0.3689	低度耐盐	Y345	0.2286	盐敏感	Y133	0.0936	盐敏感
Y167	0.6102	中度耐盐	Y130	0.3677	低度耐盐	F18	0.2264	盐敏感	Y135	0.0936	盐敏感
Y94	0.6059	中度耐盐	Y33	0.3594	低度耐盐	Y408	0.2209	盐敏感	Y136	0.0936	盐敏感
Y196	0.5897	中度耐盐	Y391	0.3588	低度耐盐	Y161	0.2190	盐敏感	Y139	0.0936	盐敏感
Y91	0.5862	中度耐盐	Y103	0.3587	低度耐盐	Y47	0.2154	盐敏感	Y141	0.0936	盐敏感
Y45	0.5811	中度耐盐	Y158	0.3577	低度耐盐	Y80	0.2116	盐敏感	Y145	0.0936	盐敏感
Y472	0.5747	中度耐盐	Y78	0.3543	低度耐盐	Y162	0.2096	盐敏感	Y146	0.0936	盐敏感

Y43	0.5709	中度耐盐	Y520	0.3526	低度耐盐	F24	0.2078	盐敏感	Y147	0.0936	盐敏感
Y364	0.5687	中度耐盐	Y475	0.3508	低度耐盐	Y166	0.2070	盐敏感	Y149	0.0936	盐敏感
Y499	0.5528	中度耐盐	Y404	0.3499	低度耐盐	Y151	0.2068	盐敏感	Y150	0.0936	盐敏感
Y49	0.5429	中度耐盐	Y95	0.3478	低度耐盐	Y27	0.2058	盐敏感	Y154	0.0936	盐敏感
Y56	0.5423	中度耐盐	Y71	0.3393	低度耐盐	Y48	0.2052	盐敏感	Y163	0.0936	盐敏感
Y359	0.5358	中度耐盐	Y18	0.3375	低度耐盐	Y3	0.2035	盐敏感	Y172	0.0936	盐敏感
Y58	0.5353	中度耐盐	Y17	0.3363	低度耐盐	Y51	0.2020	盐敏感	Y182	0.0936	盐敏感
Y86	0.5336	中度耐盐	Y79	0.3244	低度耐盐	Y420	0.1991	盐敏感	Y194	0.0936	盐敏感
Y74	0.5292	中度耐盐	Y152	0.3233	低度耐盐	Y356	0.1904	盐敏感	Y198	0.0936	盐敏感
Y70	0.5232	中度耐盐	Y111	0.3126	低度耐盐	F12	0.1867	盐敏感	Y200	0.0936	盐敏感
Y90	0.5169	中度耐盐	Y23	0.3124	低度耐盐	F45	0.1706	盐敏感	Y21	0.0936	盐敏感
Y92	0.5141	中度耐盐	Y93	0.3053	低度耐盐	Y104	0.1696	盐敏感	Y35	0.0936	盐敏感
Y82	0.5076	中度耐盐	Y96	0.2977	低度耐盐	Y175	0.1656	盐敏感	Y377	0.0936	盐敏感
Y62	0.5060	中度耐盐	Y529	0.2955	低度耐盐	Y355	0.1611	盐敏感	Y39	0.0936	盐敏感
Y372	0.5036	中度耐盐	Y189	0.2943	低度耐盐	F10	0.0936	盐敏感	Y401	0.0936	盐敏感
Y81	0.5020	中度耐盐	Y421	0.2942	低度耐盐	F16	0.0936	盐敏感	Y411	0.0936	盐敏感
Y69	0.4874	低度耐盐	Y157	0.2940	低度耐盐	F3	0.0936	盐敏感	Y416	0.0936	盐敏感
Y384	0.4781	低度耐盐	Y525	0.2937	低度耐盐	F33	0.0936	盐敏感	Y418	0.0936	盐敏感
Y425	0.4653	低度耐盐	Y494	0.2923	低度耐盐	F35	0.0936	盐敏感	Y426	0.0936	盐敏感
Y76	0.4458	低度耐盐	Y440	0.2919	低度耐盐	F41	0.0936	盐敏感	Y430	0.0936	盐敏感
F58	0.4449	低度耐盐	Y131	0.2880	低度耐盐	F43	0.0936	盐敏感	Y473	0.0936	盐敏感
Y140	0.4444	低度耐盐	Y101	0.2836	低度耐盐	F44	0.0936	盐敏感	Y474	0.0936	盐敏感
Y344	0.4323	低度耐盐	Y346	0.2807	低度耐盐	F46	0.0936	盐敏感	Y491	0.0936	盐敏感
Y159	0.4265	低度耐盐	Y349	0.2793	低度耐盐	F50	0.0936	盐敏感	Y493	0.0936	盐敏感
Y68	0.4252	低度耐盐	Y87	0.2737	低度耐盐	F52	0.0936	盐敏感	Y66	0.0936	盐敏感
Y387	0.4206	低度耐盐	Y191	0.2729	低度耐盐	F55	0.0936	盐敏感	Y97	0.0936	盐敏感
Y75	0.4188	低度耐盐	Y153	0.2701	低度耐盐	F56	0.0936	盐敏感	Y98	0.0936	盐敏感
Y197	0.4126	低度耐盐	Y108	0.2696	低度耐盐	F8	0.0936	盐敏感	Y99	0.0936	盐敏感
Y41	0.4103	低度耐盐	Y515	0.2688	低度耐盐	Y106	0.0936	盐敏感			
Y518	0.4095	低度耐盐	F2	0.2686	低度耐盐	Y107	0.0936	盐敏感			

2. 6 回归模型建立及鉴定指标筛选

为了方便对甘蓝型油菜种质资源进行鉴定和筛选，建立了一种数学模型，用于评估其萌发期耐盐性。在该模型中，采用逐步回归分析，以 D 值为因变量，各单项指标为自变量，最终得到优化的回归方程： $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$ 。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_5 分别代表相对萌势、相对萌发率和相对鲜重。通过该方程，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。通过这个方程，发现在 6 个参评指标中，相对萌势、相对萌发率和相对鲜重这三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，这三个指标可被视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

采用隶属函数法对 186 份油菜种质种子萌发期的耐盐性进行综合评价，即对材料各指标的隶属函数值取平均值。再根据篇平均值进行耐盐性综合排序，平均值越大耐盐性越强，反之耐盐性越弱与主成分分析法相比（表 5），通过隶属函数法鉴定的耐盐性等级与前者基本一致（仅 Y384、F47、Y72 材料耐盐评级不同）（详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240223005>，附表 1）。但在同一抗盐级别内，两种方法得出的耐盐指数的排名略有差异。例如通过回归方程计算得到耐盐性最强的依次为 Y203、Y195、Y343、Y336、Y85，而隶属函数值排名前 5 位的分别是 Y203、Y336、Y195、Y343、Y85，两种评价方法中该种质均属于耐盐种质。因此，隶属函数法综合评价油菜种质的耐盐性与上述回归方程评价结果虽存在个别差异，但大致相同，并未有明显差异，同时证明该回归方程的可靠性。

2.8 聚类分析

通过组间联接法，基于各项指标的耐盐指数，对 186 份油菜种质进行聚类分析。采用最远距离法进行系统聚类，当欧氏距离为 5 时，将这 186 份甘蓝型油菜种质划分为四大类（图 2）。第 I 类主要包括耐盐材料，例如 Y195、Y336、Y343、Y203、Y84、Y85；第 II 类主要包含中度耐盐材料，如 Y90、Y56、Y49 等共 33 份；第 III 类包括低度耐盐材料，主要有 Y404、Y158、Y475 等 86 个种质材料；第 IV 类主要包括盐敏感材料，如 F56、F55、F52 等 61 份。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，这再次验证了回归方程的可信度。

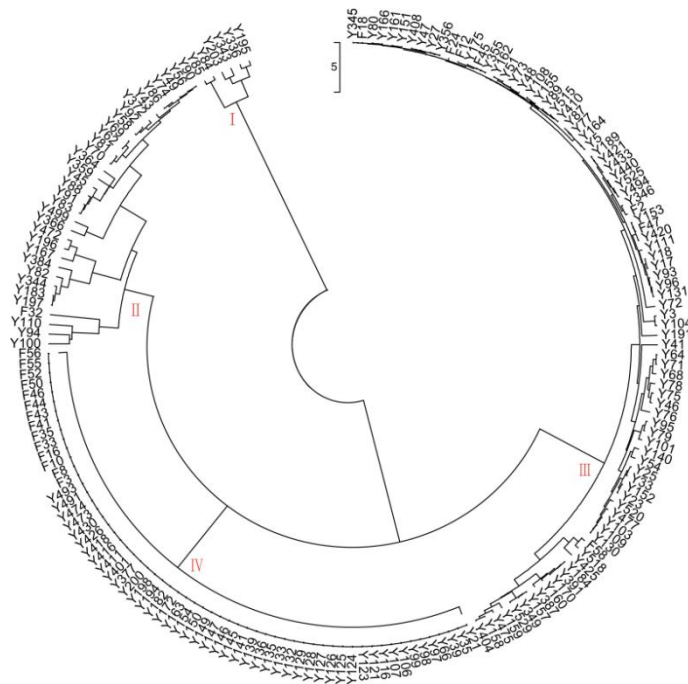


图 2 186 份甘蓝型油菜种质资源耐盐性聚类分析

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。这一现象主要由于长期不合理的灌溉、过度蒸发和不当的土地利用引起，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筛选对农业和植物科学领域至关重要。这个时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至关重要时刻。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。通过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、以适应盐碱地的生产需求提供材料基础。值得注意的是，耐盐性鉴定的筛选浓度目前尚未形成一致的共识。李萍等选择了 230 mM NaCl 对 146 份甘蓝型油菜进行萌发期耐盐性鉴定^[18]；而 Hui 等通过对 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 mM NaCl^[14]；龙卫华等认为 214 mM NaCl 最适于耐盐性鉴定^[29]。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 作为本实验最佳筛选浓度，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，而萌发期作为植物生命周期的起始阶段，对植物在盐碱土壤中的适应性和抗逆性至关重要。近年来，人们对油菜种子萌发期的耐盐性开展一系列研究，曹禹等在 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 mM NaCl 筛选获得 5 份耐盐优异种质^[30]；胡凤仪等鉴定 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^[31]；江建霞等在 16 个品种中筛选出 3 个抗盐胁迫最强的种质^[32]。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。在过去的研究中，基于植物在盐胁迫条件下的形态变化^[33]，萌发势、萌发率、根长、发芽指数、活力指数等由于测定方法简单，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。Hui 等认为地上部鲜重耐盐性指数是一个能代表萌发期甘蓝型油菜种质耐盐性的可靠性状^[14]；陈新军等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^[13]；刘自刚等发现，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^[40]；许耀照等认为种子发芽率、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^[41]。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，并计算其相对值，深入挖掘各项指标之间的内在关系，

运用主成分分析、隶属函数分析和逐步线性回归分析等方法，筛选出相对萌发势、相对萌发率和相对鲜重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。

近年来，随着对植物抗逆性研究的不断深入，采用主成分分析法、隶属函数分析法以及逐步线性回归分析等方法对植物抗逆性鉴定进行综合评价、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。例如，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，将相对萌发势、相对萌发率、相对根长、相对下胚轴长、相对鲜重、相对干重 6 个鉴定指标转换为 3 个更具代表性的综合指标（相对萌发势、相对萌发率、相对鲜重），这 3 个综合指标可以代表各种质各个维度的信息。根据 3 个主成分在耐盐性综合评价分析中的权重，计算出各种质的耐盐性综合评价值（D 值），体现甘蓝型油菜种质资源的耐盐性。D 值越大，耐盐性越强；反之，耐盐性越弱。依据 D 值对 186 份种质资源进行耐盐性等级划分，其中耐盐材料有 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，该结果与依据 D 值划分的结果仅 Y84 不一致，Y84 被划分为排名靠前的中度耐盐材料，但其余 5 份材料相一致；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，这也证明了该研究筛选极端材料的可信度。然而，种子萌发期的耐盐性与其他生长时期的耐盐性不一定完全相同，特别是，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，所以本研究选择探究各种质种子萌发期的耐盐性。因此，该结果只代表 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，本研究还未进行耐盐性鉴定，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相对萌发势、相对萌发率和相对鲜重，这一结果也验证了该研究的可靠性。依据逐步线性回归的方法对相对萌发势、相对萌发率和相对鲜重 3 个指标构建线性回归方程，建立数学评价模型 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_3$ ，方程决定系数 $R^2=0.988$ ， $P<0.001$ ，式中 X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表相对萌发势、相对萌发率和相对鲜重，预测甘蓝型油菜种子萌发期的耐盐性，可作为大规模筛选油菜耐盐性的重要指标。

4 结论

本研究通过在不同盐浓度梯度下进行处理分析，确定甘蓝型油菜种子萌发期的最适盐胁迫浓度为 1.25% NaCl。对 186 份甘蓝型油菜在萌发期用 1.25% NaCl 处理后的各项形态指标进行测定以指示种质的耐盐性。

运用主成分分析、隶属函数等方法对这 186 份甘蓝型油菜的耐盐性进行了综合评价, 得到 5 份耐盐材料。此外, 通过逐步回归分析的手段, 建立最优回归方程为 $D=0.111+0.201X_1+0.165X_2+0.381X_5$ (方程决定系数 $R^2=0.988$, $P<0.001$)。研究认为, 萌发势、萌发率和鲜重可作为甘蓝型油菜萌发期耐盐性的重要指标, 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。这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 WY, 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 个茄种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 (03): 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 (03): 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 (06): 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 (06): 631-642

- [10] 张晓婷, 庄赞, 董嘉辉, 周碧燕. 荔枝种质资源抗寒性综合评价. 果树学报, 2024: 1-40

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: 1-40

- [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: 1-18

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: 1-18

- [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 (01): 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 (01): 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, 唐靖, 程超华, 许英, 张小雨, 栗建光, 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 (06): 1551-1561

Zhang J, Gao W B, Yan L, Zhang Z Wen, 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 (06): 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 (06): 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 (06): 23-33

- [18] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 张燕, 陶顺仙, 张琪, Aldiyar, 徐爱遐, 黄镇. 146 份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价. 西北农业学报, 2021, 30 (06): 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 (06): 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 (01): 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 (01): 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 (05): 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 (05): 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, Wan 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, Pang 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 (03): 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 (03): 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 (06): 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*, 2013, 35 (03): 271-275

- [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 (06): 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 (06): 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: 1-12

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: 1-12

- [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 germplasms 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, 冯沥, 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
- 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
- [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 (03): 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 (03): 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 (09): 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 (05): 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 (05): 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, 陈治国. 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 (01): 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	材料名称 Material	平均隶属函数值 Average membership function value	材料名称 Material	平均隶属函数值 Average membership function value	材料名称 Material	平均隶属函数值 Average membership function value	材料名称 Material	平均隶属函数值 Average membership function value	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	0.0000
Y336	0.7186	Y372	0.3858	Y78	0.2530	Y108	0.1622	F10	0.0000	Y145	0.0000
Y195	0.6998	Y92	0.3855	Y103	0.2517	Y153	0.1604	F16	0.0000	Y146	0.0000
Y343	0.6964	Y69	0.3684	Y64	0.2478	Y89	0.1560	F3	0.0000	Y147	0.0000
Y85	0.6449	F58	0.3669	Y33	0.2471	Y410	0.1545	F33	0.0000	Y149	0.0000
Y84	0.5872	Y425	0.3631	Y95	0.2435	F47	0.1502	F35	0.0000	Y150	0.0000
Y100	0.5726	Y387	0.3489	Y17	0.2302	Y77	0.1476	F41	0.0000	Y154	0.0000
Y110	0.5596	Y159	0.3405	Y18	0.2271	Y72	0.1470	F43	0.0000	Y163	0.0000
Y167	0.5525	Y344	0.3355	Y79	0.2225	Y5	0.1439	F44	0.0000	Y172	0.0000
Y366	0.5102	Y76	0.3310	Y71	0.2204	Y155	0.1435	F46	0.0000	Y182	0.0000
Y196	0.5079	Y140	0.3305	Y152	0.2141	Y345	0.1311	F50	0.0000	Y194	0.0000
Y88	0.5054	Y197	0.3273	Y157	0.2111	Y73	0.1270	F52	0.0000	Y198	0.0000
Y472	0.5034	Y518	0.3273	Y111	0.2066	F18	0.1258	F55	0.0000	Y200	0.0000
Y94	0.4858	Y160	0.3244	Y529	0.2058	Y161	0.1233	F56	0.0000	Y21	0.0000
Y83	0.4813	Y183	0.3111	Y93	0.1999	Y408	0.1203	F8	0.0000	Y35	0.0000
Y91	0.4504	Y75	0.3053	Y23	0.1988	F24	0.1181	Y106	0.0000	Y377	0.0000
Y45	0.4494	Y68	0.3006	Y440	0.1988	Y3	0.1135	Y107	0.0000	Y39	0.0000
Y364	0.4297	Y184	0.3000	Y189	0.1986	Y80	0.1131	Y116	0.0000	Y401	0.0000
Y43	0.4296	Y170	0.2974	Y525	0.1980	Y162	0.1125	Y121	0.0000	Y411	0.0000
Y56	0.4204	Y46	0.2966	Y494	0.1956	Y47	0.1118	Y123	0.0000	Y416	0.0000
Y49	0.4204	Y41	0.2889	Y421	0.1931	Y151	0.1085	Y124	0.0000	Y418	0.0000
Y86	0.4096	Y54	0.2864	Y349	0.1922	Y166	0.1081	Y125	0.0000	Y426	0.0000
Y384	0.4088	Y391	0.2808	Y96	0.1899	Y27	0.1059	Y126	0.0000	Y430	0.0000
Y359	0.4082	F32	0.2782	Y131	0.1878	Y48	0.1059	Y127	0.0000	Y473	0.0000
Y74	0.4058	Y109	0.2728	Y101	0.1852	Y51	0.1033	Y128	0.0000	Y474	0.0000
Y58	0.4030	Y158	0.2658	Y191	0.1830	Y420	0.1003	Y129	0.0000	Y491	0.0000
Y82	0.4027	Y477	0.2637	Y346	0.1826	F12	0.0903	Y132	0.0000	Y493	0.0000

Y70	0.4025	Y25	0.2601	F2	0.1777	Y356	0.0903	Y133	0.0000	Y66	0.0000
Y90	0.3994	Y404	0.2583	Y433	0.1718	Y104	0.0803	Y135	0.0000	Y97	0.0000
Y499	0.3934	Y130	0.2572	Y164	0.1703	F45	0.0737	Y136	0.0000	Y98	0.0000
Y81	0.3899	Y475	0.2565	Y515	0.1702	Y175	0.0706	Y139	0.0000	Y99	0.0000

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 (01): 23-31