

王莹莹, 刘照坤, 王欢, 等. 不结球白菜萌发期耐盐性鉴定及综合评价[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(10): 2027-2036.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.016

不结球白菜萌发期耐盐性鉴定及综合评价

王莹莹, 刘照坤, 王欢, 韩建军
(江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215000)

摘要: 加强作物种质资源的耐盐性鉴定与耐盐新品种培育对盐渍化土壤利用和农业发展具有重要意义。为鉴定不结球白菜种质资源萌发期的耐盐性, 本研究在筛选不结球白菜种质萌发期耐盐性适宜盐浓度的基础上, 对江苏太湖地区农业科学研究所培育或收集的 48 份不结球白菜种质进行蒸馏水对照(CK)和适宜盐浓度的胁迫处理, 得到萌发期盐胁迫下的相对生长指标(盐胁迫处理与 CK 的生长指标比值)。基于主成分分析、隶属函数分析等方法, 综合评价供试种质的耐盐性, 建立不结球白菜萌发期耐盐性综合评价体系。结果表明, 不结球白菜种质萌发期耐盐性鉴定的适宜盐浓度为 200 mmol/L, 该浓度盐胁迫下, 不结球白菜发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、芽长、根长、根鲜重、根冠比等生长指标均显著低于 CK; 多对相对生长指标(耐盐系数)存在显著或极显著的相关性。主成分分析结果显示, 10 个相对生长指标(相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对芽长、相对根长、相对芽鲜重、相对根鲜重、相对根冠比、相对盐害率)可降维为 3 个主成分, 其累计方差贡献率达到 85.72%。根据耐盐性综合指标 *D* 值, 可将 48 份种质聚类为 5 个耐盐等级, 包括高耐盐型种质 2 份、中耐盐型种质 21 份、低耐盐型种质 12 份、盐敏感型种质 9 份、高盐敏感型种质 4 份。逐步回归分析结果表明, 相对根长、相对根鲜重、相对根冠比、相对活力指数、相对盐害率和相对芽长等 6 项指标是不结球白菜萌发期耐盐性鉴定的关键因子。

关键词: 不结球白菜; 萌发期; 耐盐性; 综合评价

中图分类号: S634.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)10-2027-10

Identification and comprehensive evaluation of salt tolerance in non-heading Chinese cabbage at germination stage

WANG Yingying, LIU Zhaokun, WANG Huan, HAN Jianjun
(*Jiangsu Taihu Lake Region Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215000, China*)

Abstract: It is of great significance to strengthen the identification of salt tolerance of crop germplasm resources and the cultivation of new salt-tolerant varieties for the utilization of salinized soil and agricultural development. In order to identify the salt tolerance of non-heading Chinese cabbage germplasm resources during germination stage, based on the screening of suitable salt concentration for salt tolerance of non-heading Chinese cabbage germplasm during germination stage, 48 non-heading Chinese cabbage germplasms cultivated or collected by Jiangsu Taihu Lake Region Institute of Agricultural Sciences were subjected to distilled water control (CK) and stress treatment with suitable salt concentration, and the relative growth

index (the ratio of growth index under salt stress treatment to that of CK) under salt stress during germination stage was obtained. Based on principal component analysis, membership function analysis and other methods, the salt tolerance of the tested germplasm was comprehensively evaluated, and a comprehensive evaluation system for salt tolerance of non-heading Chinese cabbage at germination stage was established. The results showed that the suitable

收稿日期: 2025-07-09

基金项目: 江苏省省级农业种质资源保护项目(JS-ZW-K18); 苏州市农业科学院科研基金项目(24028)

作者简介: 王莹莹(1998-), 女, 河南兰考人, 硕士, 研究实习员, 主要从事不结球白菜种质资源创新研究。(E-mail) wangyingying@jaas.ac.cn

通讯作者: 刘照坤, (E-mail) saaslz@qq.com

salt concentration for salt tolerance identification of non-heading Chinese cabbage germplasm at germination stage was 200 mmol/L. Under this concentration of salt stress, the germination potential, germination rate, germination index, vigor index, shoot length, root length, root fresh weight and root-shoot ratio of non-heading Chinese cabbage were significantly lower than those of CK. There were significant or extremely significant correlations between multiple pairs of relative growth indexes (salt tolerance coefficient). Principal component analysis showed that ten relative growth indexes (relative germination potential, relative germination rate, relative germination index, relative vigor index, relative shoot length, relative root length, relative shoot fresh weight, relative root fresh weight, relative root-shoot ratio, relative salt damage rate) could be reduced to three principal components, and the cumulative variance contribution rate reached 85.72%. According to the comprehensive index *D* value of salt tolerance, 48 germplasms could be clustered into five salt tolerance grades, including two high salt tolerant germplasms, 21 medium salt tolerant germplasms, 12 low salt tolerant germplasms, nine salt sensitive germplasms and four high salt sensitive germplasms. Stepwise regression analysis showed that relative root length, relative root fresh weight, relative root-shoot ratio, relative vigor index, relative salt damage rate and relative shoot length were the key factors for salt tolerance identification of non-heading Chinese cabbage at germination stage.

Key words: non-heading Chinese cabbage; germination stage; salt tolerance; comprehensive evaluation

受气候变化的影响,全球盐渍化土壤面积呈上升趋势。目前全球盐渍土的总面积约为 1.1×10^9 hm²,中国盐渍土总面积约为 3.69×10^7 hm²[1]。土壤盐渍化通过离子毒害与渗透胁迫制约作物生长发育,导致农作物减产、品质下降,已成为阻碍农业发展和影响全球粮食安全的挑战之一[2-3]。除自然过程引起的土壤原发性盐碱化外,高强度农业活动、不适当的灌溉方法等亦加剧了土壤次生盐渍化进程。因此,开展种质资源耐盐性鉴定,筛选与挖掘耐盐性种质,培育创制耐盐新品种,是盐渍化土壤改良利用的重要途径[4]。

不结球白菜 (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* Makino) 是起源于中国的一、二年生十字花科芸薹属蔬菜作物,在中国具有悠久的栽培历史。中国不结球白菜种质资源丰富、生育期短且营养品质优良,在蔬菜周年供应中具有重要作用,已逐渐发展成为世界性蔬菜作物[5-6]。萌发期是作物对盐胁迫较敏感的生育阶段,种子萌发期的耐盐性对作物在盐渍土中存活和生长具有重要影响。苏永全等[7]研究认为,低盐可促进作物种子萌发,但随着盐浓度升高,种子发芽率等指标均呈下降趋势。王爱斌等[8]研究发现,高浓度盐胁迫 (≥ 150 mmol/L) 对小白菜种子萌发和胚生长具有抑制作用。植物萌发期对盐胁迫的响应涉及离子平衡调节、渗透适应等多层面的信号转导通路,生理生化机制复杂[9],且品种间不同生长指标对盐胁迫的响应存在较大差异[10]。因此,选择合理的评价指标是准确评估作物萌发期耐盐性的关键。目前,基于主成分分析、隶属函数、聚类分析及逐步回归分析的多元统计方法,已被广泛

应用于水稻、油菜等作物的耐盐性评价研究[11-13]。然而,针对不结球白菜种质资源的耐盐性评价研究仍显不足,限制了不结球白菜耐盐新品种的选育与推广。本研究以江苏太湖地区农业科学研究所培育或收集的 48 份不结球白菜种质为材料,以 NaCl 溶液模拟盐胁迫,测定萌发期相关生长指标并评估其受盐胁迫影响程度。通过主成分分析、隶属函数分析、聚类分析及逐步回归分析等方法对不结球白菜萌发期耐盐性开展综合评价,并筛选耐盐种质和关键评价指标,旨在为快速、准确地鉴定和筛选不结球白菜优异耐盐种质提供参考,同时亦为耐盐新品种培育与耐盐基因挖掘提供基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本研究所用的 48 份不结球白菜材料由江苏太湖地区农业科学研究所培育或收集(表 1)。

1.2 试验设计及测定项目

1.2.1 不结球白菜萌发期耐盐性鉴定适宜盐浓度筛选试验 以 SZ04、X05、T03、SH01、A01、W01 等 6 份种质为材料,每种质选取形态饱满、大小一致的不结球白菜种子 30 粒,等间距置于含双层滤纸、直径 12 mm 的玻璃培养皿中,以蒸馏水浸润为对照(CK),设置 25 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L、150 mmol/L、200 mmol/L、250 mmol/L 6 个浓度的盐胁迫处理,培养皿中 NaCl 溶液和蒸馏水的注入量均为 6 mL。各处理设 3 次重复。将培养皿置于温度 25 ℃、光周期 12 h/d、相对湿度 75% 的人工气候室内培养。每日通

过称重法对培养皿中 NaCl 溶液和蒸馏水进行定量补充。同时,为消除空间位置对试验结果的影响,培养皿的排列位置按上下顺序进行逐日轮换。以胚根突破种皮且胚根长度超过种子本体长度为萌发标准,培

养后每隔 24 h 观测并记录萌发种子数,培养后 5 d 统计最终萌发数,得到不同处理 6 个种质的发芽率,并以发芽率存在较大差异的 NaCl 浓度为不结球白菜萌发期耐盐种质筛选的适宜盐浓度。

表 1 供试不结球白菜材料种质代号及品种类型

Table 1 Germplasm code and variety type of non-heading Chinese cabbage materials for test

种质代号	品种类型	种质代号	品种类型	种质代号	品种类型	种质代号	品种类型
SZ01	苏州青	SH03	上海青	SH04	上海青	SH08	上海青
SZ02	苏州青	SZ06	苏州青	SZ11	苏州青	SH09	上海青
X01	香青菜	SZ07	苏州青	SZ12	苏州青	B03	五月慢
T01	菜薹	A01	矮脚黄	SZ13	苏州青	B04	六月慢
SH01	上海青	W01	乌塌菜	SZ14	苏州青	SH10	上海青
SZ03	苏州青	SZ08	苏州青	SZ15	苏州青	SH11	上海青
X02	香青菜	SZ09	苏州青	W02	乌塌菜	SH12	上海青
T02	菜薹	X04	香青菜	Z01	紫青菜	W03	乌塌菜
SH02	上海青	B01	四月慢	B02	五月慢	W04	乌塌菜
SZ04	苏州青	SZ10	苏州青	SH05	上海青	SH13	上海青
SZ05	苏州青	X05	香青菜	SH06	上海青	Z02	紫青菜
X03	香青菜	T03	菜薹	SH07	上海青	SZ16	苏州青

1.2.2 不结球白菜萌发期耐盐种质筛选试验 以蒸馏水浸润为对照(CK),对 48 份不结球白菜种质进行筛选得到适宜盐浓度处理,进一步开展萌发试验,培养方式同适宜盐浓度筛选试验,萌发培养后每隔 24 h 观测并记录萌发种子数,培养后 5 d 统计最终萌发数,每个重复随机取 10 株幼苗,测定根长、芽长、根鲜重、芽鲜重、根干重、芽干重等形态及生长指标,并计算根冠比(根干重/芽干重)。

1.3 耐盐鉴定指标

不结球白菜种子萌发指标的计算公式如下:

$$\text{发芽势}(GP) = \frac{\text{初始 3 d 萌发种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(GR) = \frac{\text{终期萌发种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数}(GI) = \sum_{t=1}^T (Gt/t) \quad (3)$$

$$\text{活力指数}(VI) = GI \times S \quad (4)$$

$$\text{相对盐害率}(RSDR) = (GR_{CK} - GR_T) / GR_{CK} \times 100\% \quad (5)$$

式(1)~(5)中, t 为萌发天数($t = 1, 2, \dots, T$), T 为总观测天数($T = 5$), Gt 为第 t 日的萌发种子数, S 为芽苗平均鲜重, GR_{CK} 、 GR_T 分别为对照和盐处理下的发芽率。

各生长指标的耐盐系数(Salt tolerance coeffi-

cient, STC)均为盐胁迫处理下的指标值与对照指标值之比,即相对生长指标。

1.4 不结球白菜萌发期耐盐性综合评价方法及指标

利用相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对芽长、相对根长、相对芽鲜重、相对根鲜重、相对根冠比、相对盐害率 10 个指标,进行主成分分析,筛选得到特征值 >1 的主成分,以上述主成分为综合指标,根据其隶属函数值和权重,得到不结球白菜萌发期耐盐性综合评价指标 D 值。进一步基于供试种质的 D 值,采用欧氏距离法进行聚类分析和种质资源耐盐等级划分;并以 D 值为因变量,以相对生长指标为自变量,利用逐步回归方法建立不结球白菜萌发期耐盐性综合评价指标 D 值的预测方程。

各综合指标隶属函数值:

$$\mu(X_i) = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

式中, X_i 表示第 i 个综合指标值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为 48 份种质第 i 个综合指标中的最大值和最小值。

各综合指标权重:

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中, W_i 表示第 i 个综合指标在全部综合指标中的权重; P_i 为其对应的方差贡献率。

耐盐性综合评价 D 值由下式计算:

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W(X_i)] \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

1.5 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2010 处理原始数据; 利用 SPSS 26.0 软件对萌发期各指标值进行相关性分析、主成分分析和逐步回归分析等。

2 结果与分析

2.1 不结球白菜萌发期盐胁迫浓度的筛选

不同盐浓度处理下, 6 个种质发芽率的变化如图 1 所示。从图中可以看出, 低盐浓度 (≤ 100 mmol/L) 下, 各供试种质发芽率均在 90% 以上。此后, 随着盐浓度升高, 各种质发芽能力逐渐得到抑制, 种质间耐盐性差异开始显现; 当盐浓度 ≥ 200 mmol/L 时, 各处理发芽率均显著低于对照, 抑制效果随盐浓度升高而加剧, 且 200 mmol/L 盐胁迫下不同种质间发芽率差异最为显著。因此, 本研究认为, 不结球白菜种质萌发期耐盐性鉴定的适宜盐浓度为 200 mmol/L。

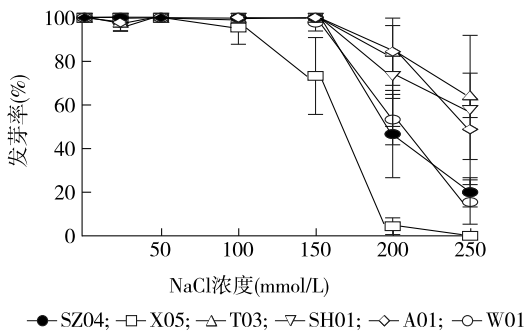


图 1 不同盐浓度处理下 6 种不结球白菜种质的发芽率

Fig.1 Germination rate of six kinds of non-heading Chinese cabbage germplasm types under different salt concentration treatments

2.2 盐胁迫对不结球白菜种质萌发期性状指标的影响

蒸馏水浸润对照和盐胁迫处理下, 48 份不结球白菜种质各性状指标呈现显著变化。由表 2、表 3 可知, 与对照相比, 盐胁迫处理不结球白菜种子的发芽势、发芽率、发芽指数、芽长、根长、根鲜重、根冠比、活力指数的均值分别极显著下降 21.97%、19.25%、51.04%、40.60%、57.77%、56.52%、65.52%、44.64%, 根冠比、根

鲜重、根长、发芽指数等性状指标下降幅度均超过 50.00%, 说明盐胁迫对不结球白菜的根系发育、地上部生长及种子萌发均产生不利影响, 且不同性状受抑制程度不同。盐胁迫下, 不结球白菜种子的发芽势、发芽率、发芽指数、根长、芽鲜重、根鲜重、活力指数等性状指标的变异系数均大于蒸馏水浸润对照 (CK), 说明盐胁迫能加大种质间表型性状的差异。其中, 盐胁迫下, 活力指数、发芽指数、根长等性状指标的变异系数较大, 说明这些性状对盐胁迫响应较显著。上述结果还说明, 不同种质对盐胁迫的响应存在广泛变异, 单一指标难以全面评估不结球白菜种质的耐盐性强弱。

表 2 蒸馏水浸润对照 48 份不结球白菜种质的表型性状统计分析
Table 2 Statistical analysis of phenotypic traits of 48 non-heading Chinese cabbage germplasm types infiltrated with distilled water

指标	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数 (%)
发芽势 (%)	100.00	77.78	96.23	4.95	5.14
发芽率 (%)	100.00	86.67	97.04	3.91	4.03
发芽指数	30.00	12.31	25.49	4.87	19.11
芽长 (mm)	16.02	4.10	8.35	2.96	35.45
根长 (mm)	74.01	22.16	45.47	12.86	28.28
芽鲜重 (mg)	25.26	6.17	14.87	5.63	37.86
根鲜重 (mg)	10.85	2.23	6.67	1.85	27.74
根冠比	0.54	0.17	0.29	0.09	31.03
活力指数	1.04	0.16	0.56	0.22	39.29

表 3 盐胁迫下 48 份不结球白菜种质的表型性状统计分析
Table 3 Statistical analysis of phenotypic traits of 48 non-heading Chinese cabbage germplasm types under salt stress

指标	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数 (%)
发芽势 (%)	100.00	5.56	75.09	27.46	36.57
发芽率 (%)	100.00	6.67	78.36	25.83	32.96
发芽指数	23.62	0.75	12.48	5.87	47.04
芽长 (mm)	7.86	2.03	4.96	1.18	23.79
根长 (mm)	39.60	2.24	19.20	8.94	46.56
芽鲜重 (mg)	35.99	5.99	18.75	7.59	40.48
根鲜重 (mg)	5.57	0.43	2.90	1.11	38.28
根冠比	0.15	0.05	0.10	0.03	30.00
活力指数	0.93	0.01	0.31	0.23	72.19

在盐胁迫处理下, 48 份不结球白菜种质萌发期的相对生长指标 (耐盐系数) 统计性状如表 4 所示。

从表中可以看出,10项相对生长指标(耐盐系数)及其变异系数存在显著差异:相对发芽势、相对发芽率等指标均值相对较高,反映出在盐胁迫下这些指标的整体表现水平。相对盐害率的变异系数高达136.20%,表明不同种质受盐害程度差异较大;相对芽鲜重和相对芽长变异系数较小,说明不同种质间这些指标的表现较为稳定。其他指标变异系数在32.50%~50.44%,说明各指标对盐胁迫的响应程度及变异水平存在种质间差异,进一步说明单一指标难以全面准确评估种质的耐盐性。

2.3 盐胁迫下不结球白菜种质相对生长指标相关性

盐胁迫下不结球白菜种质10个性状耐盐系数相关性分析显示,多数性状间存在极显著的相关(表5)。其中,相对发芽率与相对发芽势、相对活力指数与相对发芽指数的相关性较高,相关系数分别达到0.995、0.941;相对发芽指数和相对发芽势、相对发芽率之间呈极显著正相关,相关系数分别为0.899、0.888;相对活力指数和相对发芽势、相对发芽率之间的相关性也较高,相关系数分别为0.838、0.818;相对盐害率与相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数之间的相关性呈现极显著

负相关。上述结果表明,多指标反映的耐盐信息存在重叠,难以直接准确评价不结球白菜耐盐性。因此,需采用主成分分析法整合多维指标,构建不结球白菜萌发期耐盐性综合评价体系。

表4 盐胁迫下48份不结球白菜种质萌发期的相对生长指标统计分析

Table 4 Statistical analysis of relative growth index of 48 non-heading Chinese cabbage germplasms at germination stage under salt stress

指标	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数 (%)
相对发芽势	1.060	0.056	0.778	0.278	35.67
相对发芽率	1.035	0.067	0.795	0.276	32.50
相对发芽指数	0.800	0.025	0.480	0.195	40.56
相对芽长	0.995	0.210	0.635	0.159	25.05
相对根长	0.886	0.061	0.441	0.204	46.37
相对芽鲜重	2.174	0.555	1.280	0.317	24.73
相对根鲜重	0.935	0.113	0.442	0.144	32.57
相对根冠比	0.597	0.128	0.374	0.127	34.05
相对活力指数	1.122	0.031	0.538	0.270	50.44
相对盐害率	0.933	-0.035	0.193	0.262	136.20

表5 盐胁迫条件下萌发期不结球白菜各指标耐盐系数的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of salt tolerance coefficient of non-heading Chinese cabbage at germination stage under salt stress

指标	相对发芽势	相对发芽率	相对发芽指数	相对芽长	相对根长	相对芽鲜重	相对根鲜重	相对根冠比	相对活力指数	相对盐害率
相对发芽势	1.000									
相对发芽率	0.995****	1.000								
相对发芽指数	0.899****	0.888****	1.000							
相对芽长	-0.100	-0.135	-0.134	1.000						
相对根长	0.597****	0.581****	0.595****	0.019	1.000					
相对芽鲜重	0.451***	0.431**	0.440***	0.471***	0.180	1.000				
相对根鲜重	0.411**	0.370**	0.342**	0.364**	0.433**	0.350**	1.000			
相对根冠比	0.098	0.077	0.219	0.010	0.574****	0.105	0.337**	1.000		
相对活力指数	0.838****	0.818****	0.941****	0.013	0.538****	0.669****	0.440***	0.229	1.000	
相对盐害率	-0.995****	-1.000****	-0.888****	0.135	-0.581****	-0.431**	-0.370**	-0.077	-0.818****	1.000

、*、****分别表示指标间相关性在0.01、0.001、0.0001水平上显著。

2.4 不结球白菜相对生长指标(耐盐系数)的主成分分析

10个耐盐系数的主成分分析结果显示,前3个主成分特征值均>1.000,累计贡献率达85.72%,表

明其可有效表征萌发期耐盐指标的大部分信息,可作为构建不结球白菜种质萌发期耐盐性评价体系的综合指标(表6)。主成分1(PC1)中,相对发芽势、相对发芽率、相对盐害率和相对发芽指数的载荷值

分别为 0.958、0.945、-0.945、0.937, 该主成分主要反映盐胁迫下不结球白菜种质的综合萌发能力; 主成分 2(PC2) 中, 相对芽长、相对芽鲜重和相对根鲜重的载荷值分别为 0.861、0.493、0.566, 该主成分主要反映萌发期地上部生长及总生物量; 主成分 3(PC3) 中, 相对根冠比和相对根长的载荷值分别为 0.795 和 0.547, 该主成分主要表征萌发期根部生长特征。

2.5 不结球白菜萌发期耐盐性综合评价及聚类分析

通过主成分分析将 10 个性状的耐盐系数降维为 3 个综合指标。基于各综合指标计算隶属函数值, 并依据其方差贡献率确定权重, 分别为 0.654、0.192 和 0.154。结合隶属函数值与权重, 计算耐盐性综合评价值 D (表 7), 据此对 48 份不结球白菜种质资源进行耐盐性综合评价。

表 7 48 份种质萌发期耐盐性综合指标值、隶属函数值、 D 值及排序

Table 7 Comprehensive index values, membership function values, D -values, and ranking of salt tolerance of 48 non-heading Chinese cabbage germplasms at germination stage

种质代号	综合指标值			隶属函数值			D 值	D 值排序
	CI_1	CI_2	CI_3	$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$		
SZ01	-0.592	-0.992	-0.605	0.498	0.320	0.376	0.445	41
SZ02	-2.097	-2.450	-0.029	0.100	0	0.516	0.145	47
X01	-2.474	1.435	-0.644	0	0.853	0.366	0.220	45
T01	0.121	-0.193	-0.289	0.686	0.496	0.453	0.614	28
SH01	-0.144	-0.118	0.106	0.616	0.512	0.549	0.586	32
SZ03	0.418	-0.354	-0.018	0.765	0.460	0.518	0.669	22
X02	-2.253	-2.171	0.350	0.058	0.061	0.608	0.144	48
T02	-0.276	0.259	-2.150	0.581	0.595	0	0.494	36
SH02	-1.963	-1.425	-0.801	0.135	0.225	0.328	0.182	46
SZ04	-0.393	-1.462	-1.414	0.550	0.217	0.179	0.429	43
SZ05	-0.266	-0.242	-1.856	0.584	0.485	0.072	0.486	38
X03	-0.705	1.876	-1.084	0.468	0.950	0.259	0.528	35
SH03	0.116	-0.141	-1.572	0.685	0.507	0.140	0.567	33
SZ06	0.434	-0.460	-1.185	0.769	0.437	0.235	0.623	26
SZ07	1.008	-0.365	0.561	0.921	0.458	0.659	0.792	7
A01	0.781	-0.895	0.114	0.861	0.342	0.551	0.714	15
W01	1.208	0.470	-2.049	0.974	0.641	0.024	0.764	11
SZ08	1.066	0.661	1.593	0.936	0.683	0.910	0.884	2
SZ09	0.362	-0.628	-0.209	0.750	0.400	0.472	0.640	24
X04	0.850	0.199	0.777	0.879	0.582	0.712	0.796	5
B01	0.599	-0.529	0.079	0.813	0.422	0.542	0.696	21
SZ10	1.307	0.820	-1.141	1.000	0.718	0.245	0.830	3
X05	-0.377	2.103	-0.875	0.555	1.000	0.310	0.602	30
T03	1.213	1.364	0.612	0.975	0.838	0.672	0.902	1

表 6 主成分载荷值、特征值及贡献率

Table 6 The load values, eigenvalues and contribution rates of principal components

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
相对发芽势	0.958	-0.194	-0.100
相对发芽率	0.945	-0.239	-0.107
相对发芽指数	0.937	-0.178	-0.009
相对芽长	0.002	0.861	-0.333
相对根长	0.698	0.128	0.547
相对芽鲜重	0.568	0.493	-0.459
相对根鲜重	0.524	0.566	0.144
相对根冠比	0.281	0.370	0.795
相对活力指数	0.929	0.035	-0.121
相对盐害率	-0.945	0.239	0.107
特征值	5.609	1.642	1.321
贡献率 (%)	56.09	16.42	13.21
累积贡献率 (%)	56.09	72.51	85.72

续表7 Continued7

种质代号	综合指标值			隶属函数值			D 值	D 值排序
	CI_1	CI_2	CI_3	$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$		
SH04	0.914	0.937	-0.281	0.896	0.744	0.455	0.799	4
SZ11	0.593	-0.022	0.301	0.811	0.533	0.596	0.725	14
SZ12	0.632	0.034	-0.600	0.821	0.546	0.377	0.700	20
SZ13	0.989	-0.466	0.115	0.916	0.436	0.551	0.768	9
SZ14	0.188	0.651	-1.344	0.704	0.681	0.196	0.621	27
SZ15	0.627	-0.851	1.244	0.820	0.351	0.826	0.731	13
W02	0.861	-0.739	1.020	0.882	0.376	0.771	0.768	8
Z01	0.034	-0.716	0.287	0.663	0.381	0.593	0.598	31
B02	0.476	-0.480	0.823	0.780	0.433	0.723	0.705	18
SH05	0.699	-0.073	0.864	0.839	0.522	0.733	0.762	12
SH06	0.449	-0.485	1.099	0.773	0.432	0.790	0.710	16
SH07	0.690	-0.007	0.953	0.837	0.536	0.755	0.767	10
SH08	1.143	0.101	-0.466	0.957	0.560	0.409	0.796	6
SH09	-1.200	0.647	1.382	0.337	0.680	0.859	0.483	39
B03	-1.897	1.400	1.962	0.153	0.846	1.000	0.416	44
B04	-1.738	1.826	1.149	0.195	0.939	0.802	0.431	42
SH10	0.213	-0.017	0.510	0.711	0.534	0.647	0.667	23
SH11	-0.383	1.503	-0.112	0.553	0.868	0.496	0.605	29
SH12	-0.590	-0.356	-0.644	0.498	0.460	0.366	0.471	40
W03	-1.220	1.606	0.643	0.332	0.891	0.679	0.492	37
W04	-0.076	0.399	0.528	0.634	0.626	0.651	0.635	25
SH13	0.583	-0.337	0.047	0.809	0.464	0.534	0.700	19
Z02	-0.388	-0.381	0.727	0.552	0.454	0.700	0.556	34
SZ16	0.460	-0.933	1.522	0.776	0.333	0.893	0.709	17

基于耐盐性评价价值(D)对供试种质资源进行聚类分析,48份不结球白菜种质划分为5个耐盐等级类群(图2)。 D 值介于0.884~0.902的高耐盐型种质共2份,占供试材料的4.17%; D 值介于0.667~0.830的中耐盐型种质共21份,占供试材料的43.75%; D 值介于0.528~0.640的低耐盐型种质共12份,占供试材料的25.00%; D 值介于0.416~0.494的盐敏感型种质共9份,占供试材料的18.75%; D 值介于0.144~0.220的高盐敏感型种质共4份,占供试材料的8.33%(表8)。

不同品种类型或同一品种类型的不同种质间耐盐性差异明显。1份矮脚黄型种质的耐盐性等级为中耐盐型;3份菜薹种质中,高耐、低耐、盐敏感型各

1份;4份乌塌菜种质中有2份中耐盐型、1份低耐盐型、1份盐敏感型;上海青类型种质涵盖中耐盐型、低耐盐型、敏感型、高敏类型,耐盐型材料占比约54%;苏州青种质包含高耐、中耐、低耐、敏感、高敏类型,高耐盐型和中耐盐型种质占比57%;4份晚抽薹不结球白菜材料中,1份四月慢为中耐盐型,五月慢中耐盐和盐敏感型各1份,1份六月慢为盐敏感型;2份紫青菜种质均为低耐盐型;5份香青菜种质中,中耐盐型1份,低耐和高盐敏感型各2份。

2.6 不结球白菜萌发期耐盐指标的筛选和耐盐性预测

以 D 值为因变量、10项相对生长指标(耐盐系数)为自变量,进行多元逐步回归分析,构建的 D 值预测模

型为： $D=0.180RRL+0.217RRFW+0.343RRSR+0.226RVI-0.262RRSDR+0.126RSL+0.165$ (RRL 、 $RRFW$ 、 $RRSR$ 、 RVI 、 $RRSDR$ 、 RSL 分别为相对根长、相对根鲜重、相对根冠长、相对活力指数、相对盐害率、相对芽长)。对综合得分值和回归值进行验证,各种质耐盐性的预测精度范围为94.601%~99.970%,平均预测精度为 99.109%(图

3),证明该模型的可靠性,可用于不结球白菜萌发期耐盐性的预测评价。在相同条件下通过测定根长、根鲜重、根冠比、活力指数、盐害率、芽长 6 个指标的耐盐系数,基于上述方程计算获得的综合评价 D 值,可实现不结球白菜种质资源萌发期耐盐性强弱的快速评估。

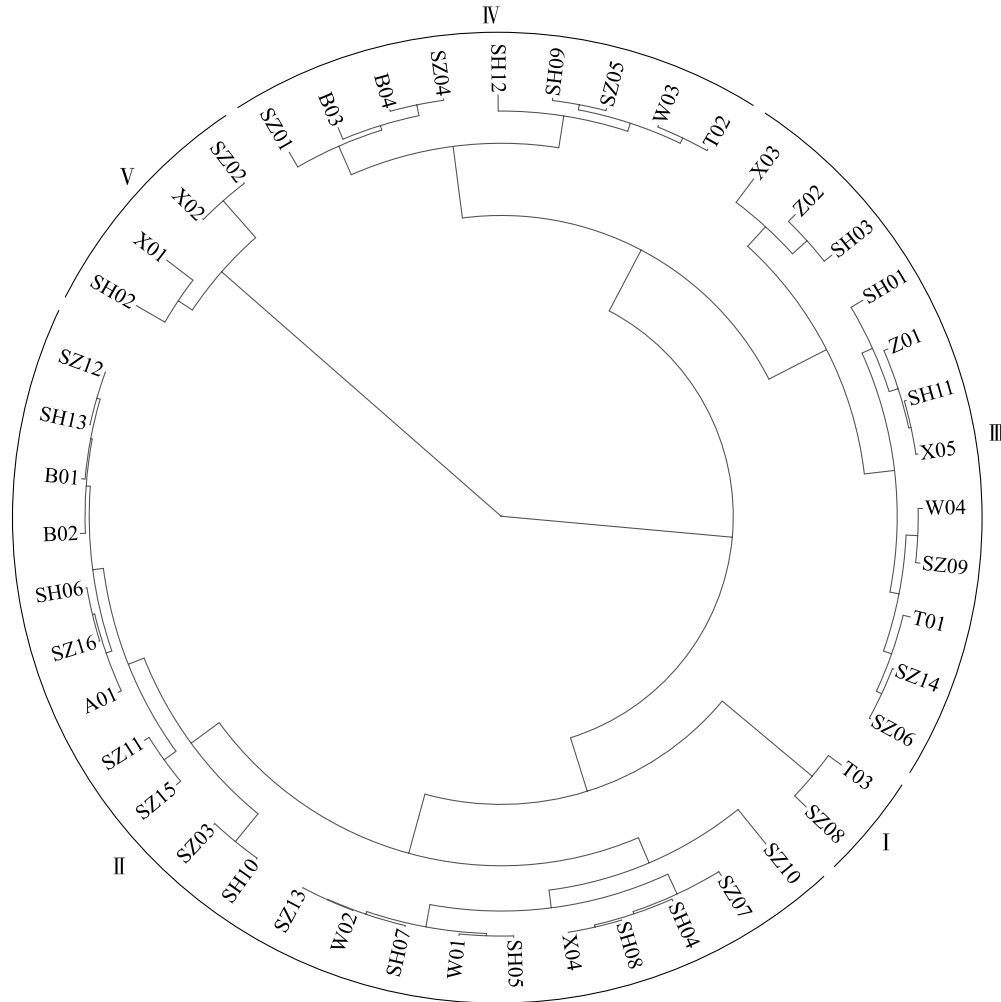


图 2 48 份不结球白菜种质萌发期耐盐性 D 值聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of D -values of salt tolerance of 48 non-heading Chinese cabbage germplasms at germination stage

表 8 基于 D 值对 48 份不结球白菜种质耐盐性的分级结果

Table 8 Classification of salt tolerance of 48 non-heading Chinese cabbage germplasms based on the D -value

级别	D 值变化范围	耐盐性	材料数量	种质代号
1	0.884~0.902	高耐	2	T03, SZ08
2	0.667~0.830	中耐	21	SZ10, SH04, X04, SH08, SZ07, W02, SZ13, SH07, W01, SH05, SZ15, SZ11, A01, SH06, SZ16, B02, SH13, SZ12, B01, SZ03, SH10
3	0.528~0.640	低耐	12	SZ09, W04, SZ06, SZ14, T01, SH11, X05, Z01, SH01, SH03, Z02, X03
4	0.416~0.494	敏感	9	T02, W03, SZ05, SH09, SH12, SZ01, B04, SZ04, B03
5	0.144~0.220	高敏感	4	X01, SH02, SZ02, X02

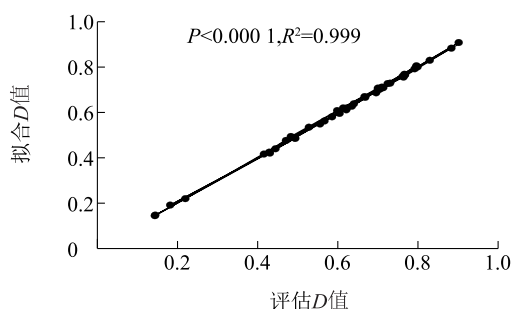


图3 不结球白菜萌发期耐盐性评估预测模型检验

Fig.3 Validation of prediction model for salt tolerance evaluation of non-heading Chinese cabbage at germination stage

3 讨论

耐盐种质资源的挖掘与创新利用,对于提升盐渍土壤农业生产能力及保障区域粮食安全具有重要意义。萌发期是植物生长发育过程中最敏感的阶段之一,直接影响其成苗与后续生长发育,该阶段可充分反映植株的抗逆响应能力。因此,研究盐胁迫下种子萌发特性对评价植物耐盐潜力及选育抗盐品种具有重要指导意义^[14]。

作物萌发期耐盐性鉴定的适宜盐浓度存在种间差异。小白菜^[8]、油菜^[13]、粳稻^[12]、玉米^[15]、高粱^[16]等作物耐盐性鉴定的适宜 NaCl 浓度分别为 150 mmol/L、250 mmol/L、125 mmol/L、180 mmol/L、150 mmol/L,这说明不同作物的耐盐性存在较大差异^[17]。本研究通过设置多梯度盐胁迫,结合参试种质发芽率变化,筛选出不结球白菜萌发期耐盐性鉴定的适宜 NaCl 浓度为 200 mmol/L,该结果与芥蓝^[18]、小麦^[19]、裸燕麦^[20]、绿豆^[21]等作物耐盐性鉴定的适宜 NaCl 浓度一致。

可靠的耐盐性指标对评估植物耐盐性、解析植物盐胁迫响应机制及其育种应用具有重要意义。目前作物萌发期耐盐性评价指标普遍采用发芽势、发芽率、根长等形态指标^[16,19,22],但不同作者在关键指标的选择上存在明显差异。田蕾等^[12]以发芽指数、相对根长与相对盐害率为关键指标评价粳稻种质耐盐性,刘鸿等^[15]以苗干重、根鲜重等指标为主要指标评估玉米种质耐盐性,孙璐等^[16]以根长、叶重与发芽率为关键指标评价高粱种质的耐盐性,张兆宁等^[23]以发芽势和胚根长为关键指标评价大豆种质的耐盐性,张国伟等^[24]以发芽率、发芽势、发芽指

数、活力指数及鲜质量的盐害系数为指标评估棉花种质的耐盐性,龙卫华等^[25]以根长和茎长为早期评价油菜耐盐性的关键指标,Ding 等^[26]认为甜高粱芽期发芽指数与种质的耐盐性相关性较高。本研究选取 10 个耐盐性指标,在 200 mmol/L NaCl 胁迫下比较 48 个不结球白菜种质的萌发期耐盐能力,通过逐步回归分析建立不结球白菜萌发期耐盐性综合评价预测方程,筛选出相对根冠比、相对盐害率、活力指数、根鲜重、根长和芽长的耐盐系数作为主要鉴定指标,这与供试材料在盐胁迫下根冠比、根长等指标显著受抑制的结果一致。

植物耐盐性是受多种机制与因素协同调控的复杂性状,随植物类型、品种类型及植物发育阶段而变化^[27-28]。单一指标难以全面表征作物耐盐性状,基于多维指标,构建综合评价体系才能更客观真实反映植物耐盐能力^[12]。徐芬芬等^[29]基于发芽率、胚芽长、胚鲜重等指标,构建了小白菜种质的耐盐性评价指标,并进行了小白菜种质资源的耐盐性分级。由于不同性状指标间存在相关性,采用多指标评价时还需避免指标信息重叠对评价结果造成的影响,因此,主成分分析、逐步线性回归等多元统计方法在作物抗逆性评价中得到了较多应用^[30-33]。本研究利用不结球白菜萌发期 10 个生长指标,经主成分分析降维为 3 个独立综合指标,可解释 85.72% 的性状特征;基于隶属函数值与主成分方差贡献率,构建不结球白菜萌发期耐盐性综合评价指标 *D* 值。进一步对 48 份不结球白菜种质萌发期的耐盐性进行聚类分析,并利用逐步回归方法构建不结球白菜萌发期耐盐性预测模型。由于不同发育时期的耐盐机理存在差异^[19,24],不结球白菜种质全生育期的耐盐性评价体系尚需进一步开展其他生育期的耐盐性试验进行确定与建立。

4 结论

本研究通过设置不同盐浓度梯度处理,确定 200 mmol/L NaCl 浓度为不结球白菜萌发期耐盐性鉴定的适宜浓度,并结合主成分分析、隶属函数法及聚类分析等方法对 48 份不结球白菜种质进行综合评价。结果表明,48 份材料可划分为 5 个耐盐等级,筛选得到高耐盐种质 2 份、高敏感种质 4 份;进一步基于逐步回归方法,筛选出相对根长、相对根鲜重、相对根冠比、相对活力指数、相对盐害率和相对

芽长6项指标可作为耐盐性评价筛选的重要鉴定指标。本研究结果为不结球白菜萌发期耐盐性快速鉴定及耐盐育种提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1):10-27.
- [2] MUKHOPADHYAY R, SARKAR B, JAT H S, et al. Soil salinity under climate change: challenges for sustainable agriculture and food security [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280:111736.
- [3] ZHU J K. Salt and drought stress signal transduction in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53:247-273.
- [4] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报,2012,67(9):1233-1245.
- [5] 侯喜林,李英,刘同坤. 不结球白菜遗传育种与分子生物学研究进展[J]. 南京农业大学学报,2022,45(5):864-873.
- [6] 刘照坤,杨雪梅,韩建军,等. 夏季耐热小白菜品种比较研究[J]. 长江蔬菜,2019(4):51-53.
- [7] 苏永全,吕迎春. 盐胁迫对植物的影响研究综述[J]. 甘肃农业科技,2007,38(3):23-27.
- [8] 王爱斌,徐芬芬,刘华伟. NaCl处理对不同品种小白菜种子萌发和根毛形态的影响[J]. 种子,2019,38(5):107-109.
- [9] PANDEY M, PENNA S. Time course of physiological, biochemical, and gene expression changes under short-term salt stress in *Brassica juncea* L[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(3):219-230.
- [10] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59:651-681.
- [11] 李浩龙,周蓉,蒋芳玲,等. 醋栗番茄LA2093渐渗系群体苗期耐盐性评价[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1620-1626.
- [12] 田蕾,陈亚萍,刘俊,等. 粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选[J]. 中国水稻科学,2017,31(6):631-642.
- [13] 陈妙妙,任军荣,姜丽霞,等. 甘蓝型油菜品种种子萌发期耐盐性综合评价[J]. 种子,2024,43(12):11-18,26.
- [14] 王东明,贾媛,崔继哲. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(4):124-128.
- [15] 刘鸿,张富来,田慧娟,等. 不同玉米品种萌发期及苗期的耐盐性研究[J]. 种子,2023,42(3):56-62,69.
- [16] 孙璐,周宇飞,汪澈,等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学,2012,45(9):1714-1722.
- [17] 张瑞,王洋, HUSSAIN S, 等. 水培条件下水稻全生育期耐盐筛选鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2021,22(6):1567-1581.
- [18] 杜欢欢,孙亚楠,魏世锦,等. 不同品种芥蓝发芽期和苗期耐盐性鉴定及综合评价[J]. 安徽农业科学,2022,50(15):47-50.
- [19] 彭智,李龙,柳玉平,等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2017,18(4):638-645.
- [20] 陈新,张宗文,吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(10):2038-2046.
- [21] 李诗晴,王素华,张耀文,等. 769份绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2025,26(4):672-682.
- [22] 曾泳怡,冯梓晴,曾晓靖,等. NaCl胁迫对不同基因型水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学,2021,49(7):25-29.
- [23] 张兆宁,李江辉,赵怡宇,等. 不同程度盐胁迫下大豆萌发期耐盐性鉴定[J]. 大豆科学,2023,42(3):335-343.
- [24] 张国伟,路海玲,张雷,等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 应用生态学报,2011,22(8):2045-2053.
- [25] 龙卫华,浦惠明,张洁夫,等. 甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选[J]. 中国油料作物学报,2013,35(3):271-275.
- [26] DING T L, YANG Z, WEI X C, et al. Evaluation of salt-tolerant germplasm and screening of the salt-tolerance traits of sweet *Sorghum* in the germination stage [J]. *Functional Plant Biology*, 2018, 45(10):1073-1081.
- [27] DEMIR I, MAVI K. Effect of salt and osmotic stresses on the germination of pepper seeds of different maturation stages [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2008, 51(5):897-902.
- [28] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses [J]. *New Phytologist*, 2018, 217(2):523-539.
- [29] 徐芬芬,俞晓凤,韩金多. 不结球白菜耐盐品种筛选[J]. 河南农业科学,2016,45(11):87-91.
- [30] 周广生,梅方竹,周竹青,等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学,2003,36(11):1378-1382.
- [31] 于珂珂,刘源,李亚明,等. 玉米花期耐高温品种的筛选与综合评价[J]. 玉米科学,2016,24(2):62-71.
- [32] 黄贺,闫蕾,吕艳,等. 甘蓝型油菜发芽期低温耐性的评价与材料筛选[J]. 中国油料作物学报,2019,41(5):723-734.
- [33] 李雪,沙栢平,高雪芹,等. 不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性鉴定与综合评价[J]. 草地学报,2020,28(2):437-445.

(责任编辑:石春林)