

97份特色小麦种质资源萌发期耐盐性筛选与鉴定

田汝美¹,李蕾蕾^{1,2},宫永超¹,李润芳¹,崔德周¹,赵红军¹,李娜娜¹,蒲艳艳^{1*}

1. 山东省农业科学院, 山东 济南 250100
2. 沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110866

摘要:为评价97份特色小麦萌发期耐盐性,设置150 mmol·L⁻¹ NaCl和对照(蒸馏水)处理,采用培养皿培养法,测定第7 d发芽率、芽长、根长、鲜重和干重,利用隶属函数以及主成分分析赋权重法计算综合耐盐指数(D值),并对D值进行聚类分析,评价盐溶液对特色小麦萌发期的影响,筛选耐盐型种质资源。结果表明,盐胁迫导致特色小麦发芽率、芽长、根长、鲜重和干重降低;3个主成分的累计贡献率为92.55%,5个指标与特色小麦萌发期耐盐性关系密切,可以作为特色小麦萌发期耐盐性鉴定的评价指标;不同种质资源耐盐能力差异较大,D值范围为-2.26~4.54;聚类分析将97份材料划分为5个级别,其中高耐盐种质1份,耐盐种质2份,中等耐盐种质10份,盐敏感种质82份和极端盐敏感种质2份。该研究为特色小麦种质资源萌发期规模化耐盐性鉴定和培育耐盐新种质提供了技术体系和基础材料。

关键词:小麦; 种质资源; 萌发期; 耐盐性; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)01-0139-10

Screening and Identification of Salt Tolerance of 97 Characteristic Wheat Germplasm Resources at Germination Stage

TIAN Ru-mei¹, LI Lei-lei^{1,2}, GONG Yong-chao¹, LI Run-fang¹, CUI De-zhou¹, ZHAO Hong-jun¹, LI Na-na¹, PU Yan-yan^{1*}

1. Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100, China

2. Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: To evaluate the salt tolerance of 97 characteristic wheat germplasm resources at the germination stage, this study sets up a 150 mmol·L⁻¹ NaCl treatment and a control (distilled water), and measures the germination rate, bud length, root length, fresh weight, and dry weight on the 7th day using the Petri dish culture method. It calculates the comprehensive salt tolerance index (D-value) by combining the membership function method and weighted principal component analysis (PCA) method. Then this study performs cluster analysis based on the D-values to evaluate the effect of salt solution on the germination of characteristic wheat and to screen for salt-tolerant germplasm resources. The results show that salt stress leads to reductions in the germination rate, bud length, root length, fresh weight, and dry weight of characteristic wheat varieties. The cumulative contribution rate of the three principal components is 92.55%. The five indicators correlate closely with the salt tolerance of characteristic wheat at the germination stage, and can serve as evaluation criteria for assessing salt tolerance in characteristic wheat at the germination stage. The salt tolerance capacity varies significantly among different germplasm resources, with D-values ranging from -2.26 to 4.54. Cluster analysis classifies the 97 characteristic wheat germplasm resources into five grades: one high salt-tolerant germplasm, two salt-tolerant germplasms, ten moderately salt-tolerant germplasms, 82 salt-sensitive germplasms, and two extremely salt-sensitive germplasms. This study provides a technical framework and foundational materials for large-scale salt-tolerance identification of characteristic wheat germplasm resources at the germination stage and for the cultivation of new salt-tolerant varieties.

Keywords: wheat; germplasm resources; germination stage; salt tolerance; principal component analysis; cluster analysis

我国是世界上盐碱地分布最广的国家之一,盐碱地总面积约为9 913万hm²,主要集中在东北、西北、华北及滨海地区^[1]。其中,耕地盐

渍化面积已达920万hm²,占全国耕地总面积的6.62%。由于不合理的施肥和灌溉措施,盐渍化耕地面积仍在持续扩大^[2,3]。盐渍化土壤不仅严

收稿日期: 2025-04-22

修回日期: 2025-12-30

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2023TSGC0360);山东省重点研发计划(2023LZGC001);科技创新2030重大项目子课题(2023ZD0402603);2024年济南市农业科技攻关项目(GG202403)

第1作者简介: 田汝美(1985-),女,硕士,研究实习员,研究方向:种质资源鉴定与评价。E-mail:trm404887264@163.com

*通讯作者: Author for correspondence.E-mail: puyanyan12@126.com

重抑制作物的生长发育,导致产量下降,甚至可能造成作物死亡^[4-6]。因此,筛选耐盐种质资源,培育耐盐品种,对于提高盐碱地农作物的产量和效益具有重要意义。

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国重要的粮食作物,常年种植面积约为 2.31×10^8 hm²,占全国耕地面积的三分之一^[7]。小麦的产量和营养价值直接关系到国民健康和国家粮食安全。近年来,由于微量营养元素摄入不足或营养不均衡导致的健康问题日益突出,国际科研人员通过现代生物育种技术,成功培育出富含微量营养元素的功能性作物品种^[8,9],为改善人类营养状况提供了新的解决方案。

目前,我国种植的特色小麦主要包括糯小麦和彩色小麦,这些品种通过化学诱变、物理诱变及远缘杂交等技术培育而成^[10]。糯小麦因其独特的淀粉结构和理化特性,在食品加工领域具有广泛的应用前景^[11,12]。相比较普通小麦,彩色小麦因含有更丰富的蛋白质、维生素、矿质元素及稀有微量元素等营养物质而备受关注。此外,彩色小麦还含有普通小麦中缺乏的花青素、黄酮、生物碱、植物甾醇、强心苷等活性物质,具有更高的营养价值和保健功能^[13-17]。随着人们生活水平的提高和健康意识的增强,特色小麦因其独特的营养价值和口感,市场需求持续增长,因此,关于彩色小麦的育种与开发利用越来越受到重视^[18,19]。

前人对普通小麦耐盐性鉴定的研究很多,利用梯度盐溶液进行耐盐鉴定费时费力,因此研究者通过选择胁迫最适盐溶液浓度进行耐盐性鉴定。李雪颖等^[20]以 6 个浓度 NaCl 溶液对 4 份小

黑麦进行盐胁迫,发现 150 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液是小黑麦萌发期耐盐性筛选的最适宜浓度。郭超等^[21]通过隶属函数法对小麦芽期耐盐性进行了综合评价,确定 150 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液是小麦芽期耐盐性鉴定的较佳浓度,发现相对发芽率、相对根长和相对芽长可作为小麦芽期耐盐性评价指标。赵燕等^[22]利用 5 个浓度梯度的 NaCl 溶液进行盐胁迫,确定 150~200 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液浓度适宜做小麦种子萌发期的耐盐性鉴定的最佳盐浓度,发现发芽率、发芽势、发芽指数、最大根长、最大芽长等 7 个指标可以作为小麦耐盐性鉴定的指标。Anuj Choudhary^[23]和李媛媛^[24]通过试验均表明 150 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液为小麦种质筛选的最佳盐浓度。筛选耐盐种质资源,培育耐盐品种,对于提高盐碱地农作物的产量和效益具有重要意义。

特色小麦主要包括糯小麦和彩色小麦,目前对其耐盐性研究较少。本研究评价 97 份特色小麦萌发期耐盐性,筛选了耐盐资源,建立了评价指标和鉴定技术体系,为特色小麦种质资源萌发期规模化耐盐性鉴定和耐盐品种的培育提供了技术体系和基础材料,同时为挖掘萌发期耐盐相关分子机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料由山东省农作物种质资源库和国家抗旱耐盐碱作物种质资源中期库(济南)提供,共 97 份材料,包括糯性小麦 16 份和彩色小麦 81 份,具体信息见表 1。

表 1 试验材料名称
Table 1 Names of the tested materials

编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature	编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature	编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature
1	汾黑麦 1831	紫	34	沽 L0415	蓝	67	沽 L2173	白糯
2	临黑 187	紫	35	沽 L1924	紫	68	沽 L2014	白糯
3	彩麦 6	紫	36	沽 L1688	紫	69	沽 L1816	紫
4	彩麦 8	紫	37	沽 L2978	白糯	70	沽 L2027	白糯
5	彩麦 9	紫	38	沽 L2878	白糯	71	沽 L0092	蓝
6	彩麦 10	紫	39	沽 L0097	蓝	72	沽 L0067	蓝
7	冬黑 161 号	紫	40	沽 L2126	蓝	73	沽 L2737	蓝
8	冬黑 1 号	紫	41	沽 L2839	白糯	74	沽 L0076	蓝
9	运紫糯 1 号	紫糯	42	沽 L1347	蓝	75	D 黑 40	紫
10	黑麦 8555	紫	43	沽 L2119	白糯	76	D 黑 19	紫

续表

编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature	编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature	编号 Number	名称 Name	籽粒特点 Grain feature
11	紫优5号	紫	44	沽L2007	白糯	77	D黑7	紫
12	沽L1825	紫	45	沽L0668	蓝	78	D黑29	紫
13	顺义L-5446	蓝	46	沽L1822	紫	79	D黑122	紫
14	沽L0181	蓝	47	沽L0533	蓝	80	D黑15	紫
15	顺义L-5149	蓝	48	沽L1577	紫	81	D黑47	紫
16	D黑5	紫	49	沽L1936	白糯	82	D黑23	紫
17	顺义L-5325	紫	50	沽L0577	蓝	83	顺义L-5338	紫
18	D黑27	紫	51	沽L0035	白糯	84	顺义L-5925	紫
19	沽L1325	紫	52	沽L0081	蓝	85	顺义L-5287	蓝
20	沽L1401	蓝	53	沽L10497	蓝	86	顺义L-4793	紫
21	沽L0086	蓝	54	沽L1593	紫	87	顺义L-4717	蓝
22	沽L0623	蓝	55	沽L0719	蓝	88	顺义L-4941	紫
23	沽L0169	蓝	56	沽L0771	蓝	89	顺义L-5689	蓝
24	沽L0101	蓝	57	沽L1902	紫	90	顺义L-5400	蓝
25	顺义L-5877	蓝	58	沽L1363	蓝	91	顺义L-5891	紫
26	沽L2398	白糯	59	沽L2223	白糯	92	顺义L-4925	蓝
27	沽L0491	蓝	60	沽L2283	白糯	93	顺义L-5447	蓝
28	顺义L-5574	蓝	61	沽L0009	蓝	94	顺义L-5845	蓝
29	顺义L-4889	蓝	62	沽L4125	蓝	95	顺义L-4037	蓝
30	沽L2848	白糯	63	沽L0722	蓝	96	农大3753	紫
31	沽L0669	蓝	64	沽L1681	紫	97	中麦998	紫
32	沽L1994	白糯	65	沽L2412	白糯			
33	沽L112	蓝	66	沽L0756	蓝			

1.2 试验设计

通过预试验发现,150 mmol·L⁻¹ NaCl处理较对照籽粒萌发时间明显推迟,萌发率有降低趋势;而200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下籽粒几乎不发芽,同时100 mmol·L⁻¹ NaCl处理与对照萌发时间及比例差异较小,与前人研究结果一致^[20-24],据此选取150 mmol·L⁻¹ NaCl进行特色小麦耐盐性鉴定。

试验设置蒸馏水为对照,以150 mmol·L⁻¹ NaCl溶液进行盐胁迫处理。挑选大小一致、籽粒饱满的种子,每个处理设置3个重复,每个重复使用30粒种子。用150 mmol·L⁻¹ NaCl溶液浸泡8 h,后用蒸馏水冲洗3遍,用1% NaClO溶液浸泡30 min,用无菌水反复冲洗干净,并用滤纸吸干多余水分。对照采用蒸馏水浸泡。

培养皿中(直径为90 mm)铺有两层滤纸,将种子腹沟向下均匀摆放在培养皿中,对照组和盐胁迫处理组分别加入15 mL蒸馏水和盐溶液。培养皿置于组培室进行培养,昼夜温度为

26.0 °C/21.0 °C,光/暗周期为14 h/10 h。及时补充蒸馏水保持NaCl浓度不变,两天更换1次蒸馏水和盐溶液。第7 d时,根据《国家种子检验规程》,以胚根长≥种子长、胚芽长≥1/2种子长作为发芽标准,统计发芽数。每个培养皿随机取10株幼苗调查芽长、根长、幼苗鲜重、幼苗干重,取平均值。

1.3 测定指标及方法

发芽率(%)=第7 d发芽种子数/供试种子数×100%

指标相对值=处理组平均值/对照组平均值

第7 d,每个重复随机取10株小麦幼苗,测量根长、芽长。用滤纸擦干植株上的水分测量幼苗鲜重,将幼苗于烘箱内105 °C杀青15 min,80 °C烘干8 h,称取干重。所有指标均以平均值表示。

1.4 数据分析

据李凤琴^[25]方法,小麦耐盐性是受多种因素影响的一种较为复杂的性状,小麦的耐盐性需要

多指标进行评价,运用小麦耐盐性各指标的相对值获得隶属函数值、权重值和萌发期耐盐综合性评价(D)值,分析供试小麦品种的耐盐性。

(1)隶属函数值计算公式如下:

$$\mu(X_{ij})=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})\times 100\%$$

$$(i=1,2,3,\dots,n)$$

公式中, $\mu(X_{ij})$ 指第*i*个材料第*j*个性状的隶属函数值, X_{ij} 指第*i*个材料第*j*个性状相对值; $X_{j\max}$ 、 $X_{j\min}$ 分别为所有供试材料中*j*性状的最大值、最小值。

(2)综合指标权重(W_j)的计算公式如下:

$$W_j=P_j/\sum_{j=1}^n P_j$$

公式中, W_j 为第*j*个主成分在所有主成分中的重要程度; P_j 代表经主成分分析所得的第*j*个主成分的贡献率。

(3)综合评价价值(D)的计算公式如下:

$$D=\sum_{i=1}^n [\mu(x_{ij}) \times W_j]$$

公式中, D 值为盐溶胁迫处理计算所得的综合耐

盐性系数,数值越大,耐盐性越强,反之耐盐性越差。

1.5 数据统计分析

用 Microsoft Excel 2016 处理原始数据,用 SPSS 23.0 软件进行主成分分析和相关性分析,利用 Origin 2024 软件进行聚类。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下萌发期各指标变异分析

盐胁迫下特色小麦萌发期各生长指标的统计分析表明,对照处理(蒸馏水)的变异范围是 20.74%~72.22%,变异系数从大到小依次为干重、鲜重、发芽率、根长、芽长,反映出不同供试材料间性状的天然变异性;盐胁迫变异系数在 33.09%~80.43%,变异系数从大到小的排列顺序与对照组相同,表明 97 份特色小麦种质资源在盐胁迫条件下各性状表现出明显的变异,其中干重变异系数最大,芽长最小(表 2)。

表 2 盐胁迫下 97 份特色小麦种质资源 5 个性状指标的统计分析

Table 2 Statistical analysis of five trait indicators of 97 characteristic wheat germplasm resources under salt stress

性状 Trait	统计参数 Statistical parameter	发芽率/% Germination rate	芽长/cm Germ length	根长/cm Root length	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight
对照组 CK	最大值 Max	97	13.54	17.03	6.84	3.64
	最小值 Min	72	3.24	3.83	1.58	0.02
	平均值 Mean	56	10.27	11.76	3.29	0.72
	标准差 SD	23.77	2.13	3.08	1.46	0.52
	变异系数 CV/%	42.44	20.74	26.19	44.44	72.22
盐胁迫 Salt stress	最大值 Max	81	9.84	10.62	4.14	1.83
	最小值 Min	33	1.52	1.70	0.11	0.02
	平均值 Mean	46	5.53	5.42	2.03	0.46
	标准差 SD	20.61	1.83	1.94	0.99	0.37
	变异系数 CV/%	44.80	33.09	35.79	48.77	80.43
较对照变化 Comparison with the control	变化值 Variation	-10	-4.74	-6.34	-1.26	-0.26
	变化百分比 Percentage of variation/%	-17.9	-46.15	-53.91	-38.30	-36.11

与对照比较,盐胁迫下发芽率、芽长、根长和鲜重均受到明显抑制,芽长、根长、鲜重和干重较对照下降幅度 30% 以上,其中根长和芽长受到抑制较严重,下降幅度为 53.91% 和 46.15%,而发芽率受到影响相对较小,下降幅度

为 17.9%。由此可见不同性状对盐胁迫的响应不同,使用单一性状不能全面评价小麦资源的耐盐性强弱。

2.2 盐胁迫下各指标相关性分析

对盐胁迫下各生长指标相对值进行相关性

分析(图1),结果显示,任意两个指标间均呈正相关关系,但是相关性大小不同。相对芽长和相对根长聚合在一起,呈极显著正相关;相对干重、相对发芽率和相对鲜重聚合在一起,两两之间呈极显著,相对发芽率和相对鲜重距离较近,相关性较高。

综上所述,耐盐性是一个复杂的数量性状,萌发期盐胁迫影响小麦多个性状指标,对多个性状进行综合分析才能准确的评价盐胁迫下小麦萌发期的耐盐特性。

2.3 萌发期盐胁迫各指标相对值的主成分分析

如表3所示,对5个指标相对值进行主成分分析共得到3个主成分。第I主成分贡献率最高,为52.52%,特征值为2.63;第II主成分贡献率21.80%,特征值为1.09;第III主成分贡献率18.24%,特征值为0.91。3个主成分累计贡献率为92.55%,包含了所有指标的主要信息,表明这3个主成分可以充分反映盐胁迫下特色小麦萌发期5个测量指标的变化趋势。如表4所示,

表3 盐胁迫下3个主成分的特征值以及贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rates of three principal components under salt stress

主成分 Principal component	I	II	III
特征值 Eigenvalue	2.63	1.09	0.91
贡献率 Contribution/%	52.52	21.80	18.24
累计贡献率 Cumulative Contribution/%	52.52	74.32	92.55

表4 盐胁迫下3个主成分各因子的载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of factors for three principal components under salt stress

主成分 Principal component	相对发芽率 Relative germination rate	相对芽长 Relative bud length	相对根长 Relative root length	相对鲜重 Relative fresh weight	相对干重 Relative dry weight
I	0.736	0.804	0.800	0.885	0.121
II	0.432	-0.383	-0.424	0.274	0.709
III	-0.460	0.303	0.269	-0.231	0.695

综上所述分析发现,鲜重、根长、芽长、发芽率与干重与小麦耐盐性密切相关,可作为特色小麦萌发期耐盐性筛选的指标。

2.4 特色小麦耐盐性综合评价及聚类分析

根据公式(1)和(2),计算出97份特色小麦种质资源的隶属函数值和3个主成分的权重值。根据公式(3)计算出耐盐性综合评价D值(表5),根据D值的大小对97份特色小麦种质资源耐盐性进行排序,D值越大表明该材料萌发期耐盐性越好。利用 Origin 2024 软件采用欧氏距离

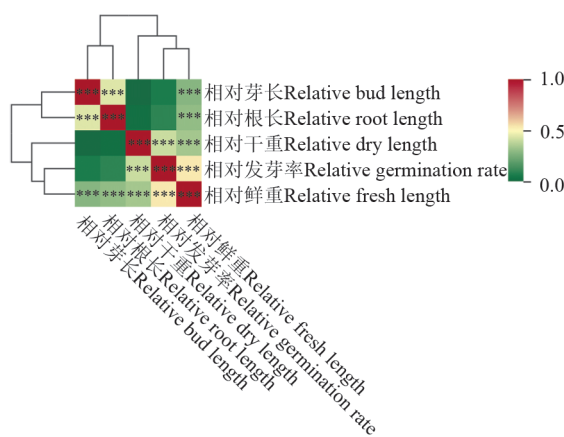


图1 盐胁迫下特色小麦种质资源5个性状指标相对值相关性分析热图

Fig. 1 Heatmap of correlation analysis for relative values of five traits in characteristic wheat germplasm resources under salt stress

注:***表示在0.01水平极显著相关。

Note: ***indicated significant difference at the 0.01 level.

第I主成分中相对鲜重、相对根长、相对芽长和相对发芽率有较高载荷量,第II主成分和第III主成分中相对干重有较高载荷量。

“complete”法、聚类个数K=5,对综合评价D值进行聚类,将97份特色小麦划分为5个类群(图2):第I类为高耐盐型材料1份,占供试材料的1.03%,D值为4.54;第II类为耐盐型材料2份,占比2.06%,D值范围2.28~2.81;第III类为中等耐盐型材料10份,占比10.31%,D值范围-0.94~1.86;第IV类为盐敏感型材料82份,占比84.54%,D值范围-1.5~0.78;第V类为极端盐敏感型材料2份,占比2.06%,D值范围-2.26~-1.92(表6)。

表 5 97 份特色小麦种质资源 D 值
Table 5 D values of 97 characteristic wheat germplasm resources

编号 Number	名称 Name	D 值 D value	编号 Number	名称 Name	D 值 D value	编号 Number	名称 Name	D 值 D value
95	顺义 L-4037	4.54	26	沽 L2398	0.18	74	沽 L0076	-0.42
33	沽 L112	2.81	51	沽 L0035	0.17	61	沽 L0009	-0.42
36	沽 L1688	2.28	92	顺义 L-4925	0.16	21	沽 L0086	-0.42
50	沽 L0577	1.86	68	沽 L2014	0.12	37	沽 L2978	-0.45
58	沽 L1363	1.72	53	沽 L10497	0.12	1	汾黑麦 1831	-0.46
5	彩麦 9	1.65	88	顺义 L-4941	0.10	75	D 黑 40	-0.49
72	沽 L0067	1.57	69	沽 L1816	0.09	10	黑麦 8555	-0.50
56	沽 L0771	1.48	67	沽 L2173	0.07	87	顺义 L-4717	-0.53
28	顺义 L-5574	1.10	73	沽 L2737	0.04	70	沽 L2027	-0.55
79	D 黑 122	1.07	64	沽 L1681	0.03	18	D 黑 27	-0.55
13	顺义 L-5446	1.06	17	顺义 L-5325	0.02	94	顺义 L-5845	-0.56
52	沽 L0081	1.04	59	沽 L2223	0.01	60	沽 L2283	-0.63
63	沽 L0722	0.94	80	D 黑 15	0.00	25	顺义 L-5877	-0.64
9	运紫糯 1 号	0.78	20	沽 L1401	-0.07	55	沽 L0719	-0.67
31	沽 L0669	0.77	90	顺义 L-5400	-0.14	22	沽 L0623	-0.72
8	冬黑 1 号	0.64	14	沽 L0181	-0.16	19	沽 L1325	-0.81
57	沽 L1902	0.63	23	沽 L0169	-0.17	89	顺义 L-5689	-0.82
81	D 黑 47	0.59	65	沽 L2412	-0.18	2	临黑 187	-0.89
86	顺义 L-4793	0.58	35	沽 L1924	-0.18	97	中麦 998	-0.9
62	沽 L4125	0.52	44	沽 L2007	-0.22	11	紫优 5 号	-0.96
54	沽 L1593	0.51	32	沽 L1994	-0.30	3	彩麦 6	-0.97
49	沽 L1936	0.46	27	沽 L0491	-0.32	47	沽 L0533	-0.99
85	顺义 L-5287	0.45	6	彩麦 10	-0.32	40	沽 L2126	-1.14
91	顺义 L-5891	0.44	39	沽 L0097	-0.33	24	沽 L0101	-1.16
34	沽 L0415	0.40	29	顺义 L-4889	-0.33	38	沽 L2878	-1.17
16	D 黑 5	0.35	15	顺义 L-5149	-0.33	48	沽 L1577	-1.23
12	沽 L1825	0.35	45	沽 L0668	-0.35	42	沽 L1347	-1.34
43	沽 L2119	0.34	77	D 黑 7	-0.37	84	顺义 L-5925	-1.49
30	沽 L2848	0.33	46	沽 L1822	-0.37	41	沽 L2839	-1.50
93	顺义 L-5447	0.30	7	冬黑 161 号	-0.39	66	沽 L0756	-1.92
82	D 黑 23	0.26	83	顺义 L-5338	-0.40	96	农大 3753	-2.26
76	D 黑 19	0.20	4	彩麦 8	-0.40			
71	沽 L0092	0.18	78	D 黑 29	-0.41			

注:编号和表 1 相同。

Note: The number is the same as table 1.

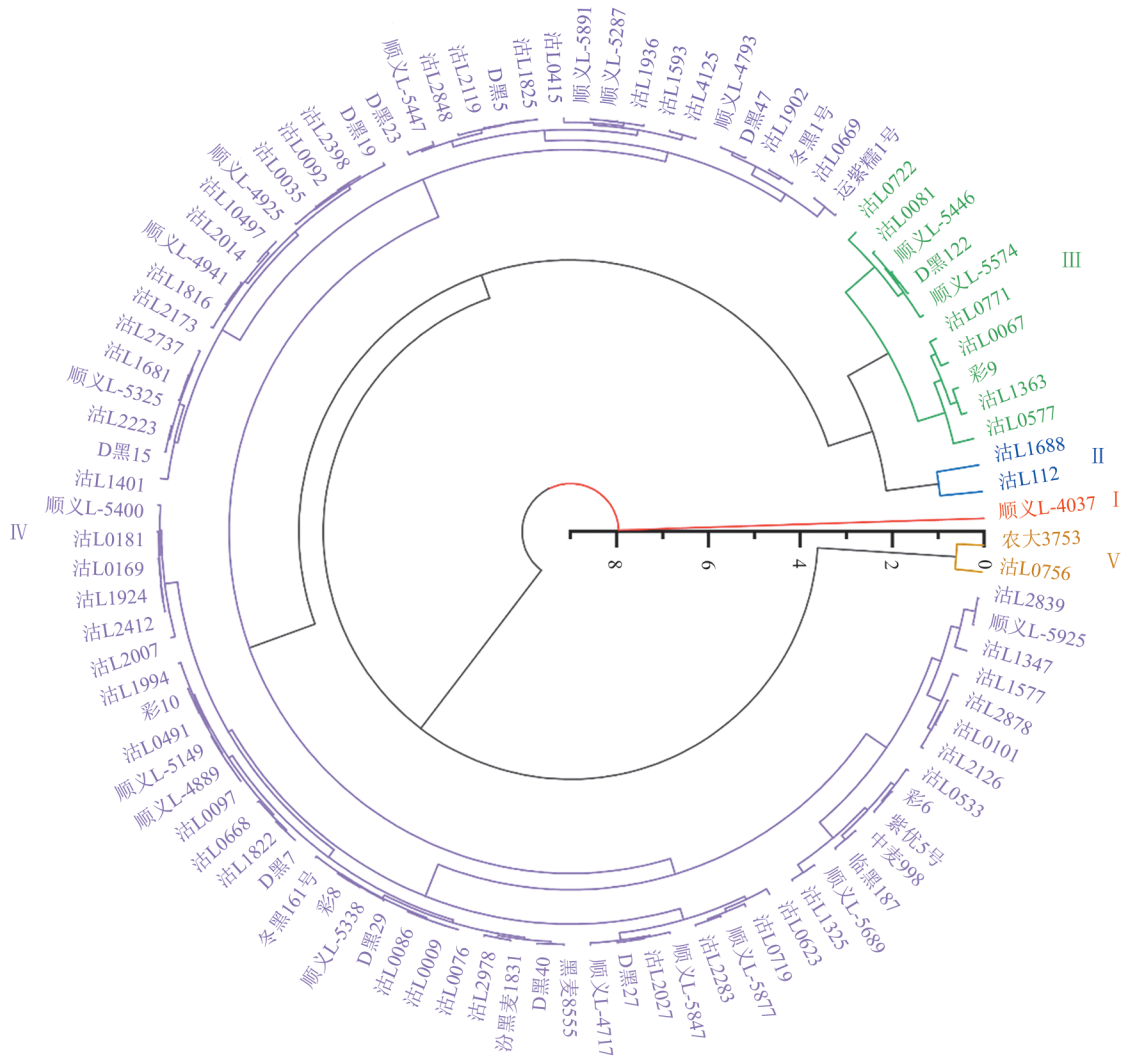


图 2 97 份特色小麦耐盐性聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of salt tolerance of 97 characteristic wheat germplasm resources

注: I: 高耐盐群体; II: 耐盐群体; III: 中等耐盐群体; IV: 盐敏感群体; V: 极端敏感群体。

Note: I: High salt tolerance group; II: Salt tolerant population; III: Moderately salt tolerant group; IV: Salt sensitive group; V: Extremely sensitive group.

表 6 97 份特色小麦萌发期耐盐等级及份数

Table 6 Salt tolerance grades and numbers of 97 characteristic wheat germplasm resources at germination stage

耐盐类型	份数	D 值范围	均值
Salt-tolerant type	Number	Range of D value	Mean value
高耐盐群体	1	4.54	4.54
High salt tolerance group			
耐盐群体	2	2.28 ~ 2.81	2.55
Salt tolerant population			
中等耐盐群体	10	0.94 ~ 1.86	1.35
Moderately salt tolerant group			
盐敏感群体	82	-1.5 ~ 0.78	-0.23
Salt sensitive group			
极端盐敏感群体	2	-2.26 ~ -1.92	-2.09
Extremely sensitive group			

3 讨论

3.1 盐胁迫对特色小麦萌发期的影响

土壤盐渍化已成为日益严重的世界性资源和生态问题,是限制小麦生长发育的关键逆境因子,直接影响小麦产量提高和品质形成^[26,27]。种子萌发是作物生命的开始,萌发期是植物生长周期中对盐分最敏感的时期,其耐盐能力的强弱不仅决定后续生长发育的潜力,更因其检测周期短、通量高的优势,前人对植物耐盐性研究多集中在植物萌发期^[28-30]。刘彤彤等^[31]研究发现,不同性状对芽期盐胁迫的敏感度存在较大差异,不同品种在同一性状的耐盐系数方面同样存在较大的品种间差异。于崧等^[32]研究发现,在盐胁迫处理下,同一品种不同鉴定指标和同一鉴定指标不同小麦品种都存在差异,表明不同品种对同种盐胁迫的耐盐特性不同。针对目前对彩色小麦、糯性小麦等特色小麦的耐盐性研究相对较少,本研究利用 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理,对 97 份特色小麦资源进行了萌发期耐盐性筛选与鉴定,发现不同种质材料间、不同性状对盐胁迫的表现均有不同,这一结果与前人对普通小麦耐盐性的研究结果一致^[33-35]。主成分分析结果表明,鲜重、根长、芽长、发芽率和干重可作为特色小麦萌发期耐盐性评价的指标,其中鲜重可作为主要筛选指标,与胡凤仪^[36]研究油菜种质资源萌发期的耐盐性结果一致。

3.2 特色小麦萌发期耐盐性评价

小麦耐盐性状是由多基因控制的数量遗传性状^[37,38],受多种环境因素和遗传因素的共同调控,单一指标难以全面反映小麦的耐盐性^[24,39],需通过多指标综合评价体系来准确区分不同基因型间的耐盐性差异^[21]。近年来,基于隶属函数法的作物抗逆性综合评价体系在耐湿^[40]、抗旱^[41]和耐盐^[42]等研究中得到了广泛应用。彭智等^[43]通过主成分分析、隶属函数值及综合评价 D 值等方法,成功筛选出小麦芽期和苗期的高耐盐材料。李媛媛等^[24]结合主成分分析与聚类分析,对 283 份小麦种质资源萌发期耐盐性进行了系统评价,筛选出 10 份耐盐种质,并发现胚芽鲜重和胚根鲜重是小麦萌发期耐盐性的主要筛选指标,这与本研究结果一致。王萌等^[44]研究

发现,小黑麦萌发期与苗期耐盐性呈极显著正相关,并筛选出 2 份萌发期和苗期均表现耐盐的材料。高坤奥等^[45]通过对 236 份小麦种质苗期耐盐性鉴定,筛选出豫农 416 和陇鉴 19 等极端耐盐品种,发现根总表面积、根总长度和根鲜重可作为苗期耐盐性评价的关键指标,发现与本研究萌发期的评价指标有差异。萌发期是小麦整个生育期中至关重要的时期,本文以不同性状指标的相对值为依据,采用相关性分析、主成分分析、隶属函数法、权重值计算、聚类分析对 97 份特色小麦种质资源进行萌发期的筛选,将 97 份特色小麦的耐盐性划分为高耐盐型、耐盐型、中等耐盐型、盐敏感型、极端盐敏感型共 5 个类群。其中高耐盐型特色小麦种质 1 份,耐盐型 2 份,中等耐盐型 10 份,盐敏感型 82 份,极端盐敏感型 2 份。

4 结论

在 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度的盐胁迫下,97 份特色小麦的发芽率、根长、芽长、幼苗鲜重等指标均受到抑制作用,其中根长受到抑制最严重,发芽率受到影响相对较小,干重平均值胁迫组高于对照组,与李媛媛等^[24]研究结果相同。根据主成分分析,3 个主成分累计贡献率为 92.55%,发现鲜重、根长、芽长、发芽率、干重与小麦耐盐性密切相关,可作为特色小麦萌发期耐盐性筛选的指标。根据隶属函数综合评价结果,筛选出高耐盐特色小麦种质顺义 L-4037,耐盐型种质沽 L112、沽 L1688 和中等耐盐型种质沽 L0577、沽 L1363、彩 9、沽 L0067、沽 L0771、顺义 L-5574、D 黑 122、顺义 L-5446、沽 L0081、沽 L0722,研究结果可供特色小麦耐盐基因发掘和品种改良利用。

参考文献

- [1] 刘小京,郭凯,封晓辉,等.农业高效利用盐碱地资源探讨[J].中国生态农业学报,2023,31(03):345-353.
- [2] 杨劲松,姚荣江.我国盐碱地的治理与农业高效利用[J].中国科学院院刊,2015,30(Z1):162.
- [3] Wang J C, Yao L R, Li B, et al. Comparative proteomic analysis of cultured suspension cells of the halophyte halogeton glomeratus by iTRAQ provides insights into response mechanisms to salt stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:110.

- [4] 王维. 小麦耐盐种质的筛选鉴定及利用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [5] 杨劲松, 姚荣江, 王相平等. 防止土壤盐渍化提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(06): 30-34.
- [6] Shokri N, Hassani A, Sahimi M. Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2024, 62(4): e2023RG000804.
- [7] 佟斌, 杨明, 吴姬等. 辽宁省引进黑色小麦品种中存在的题及对策[J]. 农业科技通讯, 2015(02): 19-21.
- [8] Singla P, Grover K. Biofortified cereal crops: A sustainable approach for food and nutritional security[J]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2017, 24(4): 1-13.
- [9] 田纪春, 胥倩. 功能性小麦品种的概念、类别和发展前景[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(02): 1-8.
- [10] 张小燕, 高道竹, 高向阳. 特殊粒色小麦研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(04): 7-11.
- [11] 刘健, 文莉, 张晓祥等. 糯小麦淀粉结构特征和理化品质研究[J]. 核农学报, 2023, 37(10): 2019-2027.
- [12] 梁艳, 王向东, 甄胜虎等. 中国糯小麦品种的主要农艺性状和品质性状分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(04): 423-431.
- [13] 李杏普, 侯红军, 刘玉平等. 蓝、紫粒小麦的营养品质研究[J]. 华北农学报, 2002(01): 21-24.
- [14] Guo Z F, Zhang Z B, Xu P, et al. Analysis of nutrient compositions of purple wheats in China[J]. *Cereal Research Communications*, 2013, 41(2): 293-30.
- [15] 李莉, 覃鹏. 彩色小麦的遗传与营养成分研究进展[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(01): 9-12.
- [16] 张正斌, 徐萍, 张锦鹏等. 彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(06): 1572-1584.
- [17] Magallanes-López A M, Hernandez-Espinosa N, Velu G, et al. Variability in iron, zinc and phytic acid content in a worldwide collection of commercial durum wheat cultivars and the effect of reduced irrigation on these traits[J]. *Food Chemistry*, 2017(237): 499-505.
- [18] 谷玉娟, 陈志成, 苏东民. 彩色小麦的理化特性及麸皮粉的品质评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(06): 2262-2268.
- [19] Saini P, Kumar N, Kumar S, et al. Bioactive compounds, nutritional benefits and food applications of colored wheat: A comprehensive view[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(19): 3197.
- [20] 李雪颖, 高志昊, 兰剑, 等. NaCl胁迫下25份饲用型小黑麦种子的萌发特性及耐盐性评价[J]. 草原与草坪, 2023, 43(04): 65-71+80.
- [21] 郭超, 胡思远, 郑青焕, 等. 部分美国小麦种质资源的耐盐性鉴定[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(08): 1076-1084.
- [22] 赵燕, 石大川, 王文娇, 等. 不同盐分胁迫对小麦种子萌发的影响[J]. 智慧农业导刊, 2024, 4(14): 25-30.
- [23] Anuj Choudhary, Nirmaljit, Kaur Achla Sharma, et al. Evaluation and screening of elite wheat germplasm for salinity stress at the seedling phase[J]. *Physiol Plant*, 2021, 173(4): 2207-2215.
- [24] 李媛媛, 陈博, 姚立蓉, 等. 283份小麦品种(系)萌发期耐盐碱性评价及种质筛选[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(03): 25-33.
- [25] 李凤勤. 小麦萌发期耐盐碱相关性状关联分析及种质资源的筛选[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [26] 汪洪洋, 李慧, 陆其通. 农业绿色发展存在的问题及对策[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(06): 5-7.
- [27] 刘云芬, 彭华, 王薇薇, 等. 植物耐盐性生理与分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 30-36.
- [28] 王晓歌, 高利英, 邓永胜, 等. 棉花萌发出苗期耐盐性鉴定和评价[J]. 山东农业科学, 2025, 57(02): 29-37.
- [29] 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, 4(07): 1-15.
- [30] 郭冰玲, 王润丰, 王海莲, 等. 高粱种质资源萌发期耐盐性鉴定与筛选[J]. 山东农业科学, 2024, 56(09): 43-50.
- [31] 刘彤彤, 李宁, 魏良迪, 等. 山西省主推小麦品种芽期及苗期耐盐性的综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(02): 22-33.
- [32] 于崧, 张婷婷, 于立河, 等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(02): 20-27.
- [33] 张巧凤, 陈宗金, 吴纪中, 等. 小麦种质芽期和苗期的耐盐性鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(04): 620-626.
- [34] 刘恩良, 金平, 马林, 等. 新疆冬小麦耐盐指标筛选及分析评价研究[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(05): 809-816.
- [35] 任永哲. 盐胁迫对不同小麦品种幼苗性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(17): 3702.
- [36] 胡凤仪, 侯献飞, 于月华, 等. 479份芥菜型油菜种质资源萌发期耐盐性综合评价[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(06): 1174-1184.

- [37] 刘建霞,王小楠,薛乃雯,等.36份藜麦种质资源苗期耐盐碱性评价与筛选[J].种子,2024,43(05):70-77.
- [38] Wang W W, Zhao Y, Wang W, et al. Evaluation of salt tolerance mechanism and study on salt tolerance relationship of different salt-tolerant wheat varieties[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022(1):2395568.
- [39] 陈雪梅,刘骅峻,杨 墨,等.盐碱胁迫对苜蓿种子萌发性状的影响及耐盐碱性评价[J].黑龙江农业科学,2024(03):64-70.
- [40] 佟汉文,高春保,邹 娟,等.湖北稻茬小麦品种(系)孕穗期耐渍性的鉴定与评价[J].麦类作物学报,2016,36(12):1635-1642.
- [41] 张龙龙,杨明明,董 剑,等.三个小麦新品种不同生育阶段抗旱性的综合评价[J].麦类作物学报,2016,36(04):426-434.
- [42] 冯钟慧,刘晓龙,姜昌杰,等.吉林省粳稻种质萌发期耐碱性和耐盐性综合评价[J].土壤与作物,2016,5(02):120-127.
- [43] 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(04):638-645.
- [44] 王 萌,鲁雪莉,王菊英,等.小黑麦种质萌发期苗期耐盐资源评价与筛选[J].草业学报,2024,33(05):58-68.
- [45] 高琿奥,田仁美,贾惠宁,等.236份小麦种质苗期耐盐性鉴定及耐盐指标筛选[J].麦类作物学报,2024,44(09):1115-1124.