

小麦育种高代品系耐盐优质性的鉴定分析

王子强^{1,2}, 张思娅¹, 张娜¹, 金开拓¹, 高国庆³, 吴崇宁¹, 田纪春¹, 邓志英¹

(1. 山东农业大学农学院, 小麦育种全国重点实验室, 山东泰安 271000;

2. 高唐县农业农村局, 山东高唐 252800; 3. 菏泽学院, 山东菏泽 274000)

摘要: 培育优质耐盐小麦新品种是中国农业发展的一大趋势。本研究以德抗 961 为对照, 对 156 份小麦育种品系和 3 份亲本材料, 在苗期利用水培法进行不同浓度(0、75 和 150 mmol · L⁻¹) NaCl 盐胁迫处理, 分析不同浓度盐胁迫下小麦苗期形态和生理指标, 同时, 利用优质特异分子标记进行辅助筛选, 结合品质性状检测分析, 以期获得苗期耐盐性强且品质性状佳的小麦新品系。结果表明, 通过对耐盐性综合评价(*D* 值)进行聚类分析, 筛选出高耐盐材料 7 份, 耐盐材料 42 份, 中度耐盐材料 51 份, 盐敏感材料 24 份和高盐敏感材料 35 份; 优质分子标记鉴定发现, *Sec-1* 位点缺失且含有 5+10 亚基的材料有 109 份, *Sec-1* 位点与 *Gli-D2* 位点均缺失的材料有 5 份, *Gli-D2* 位点缺失且含有 5+10 亚基的材料有 3 份, *Sec-1* 位点和 *Gli-D2* 位点同时缺失且含有 5+10 亚基的小麦材料有 3 份。综合分析筛选出高耐盐且 3 个优质基因位点聚合的品系 1 份, 高耐盐且 2 个优质基因位点聚合的品系 3 份, 高耐盐且 *Sec-1* 位点缺失的品系 3 份。

关键词: 小麦育种高代品系; 耐盐性鉴定; 分子标记检测; 品质分析

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)05-0563-13

Identification and Analysis of Salt-Tolerant and High-Quality Lines in Advanced Wheat Breeding Lines

WANG Ziqiang^{1,2}, ZHANG Siya¹, ZHANG Na¹, JIN Kaituo¹, GAO Guoqing³,
WU Chongning¹, TIAN Jichun¹, DENG Zhiying¹

(1. Agronomy College of Shandong Agricultural University, National Key Laboratory of Wheat Breeding, Taian, Shandong 271000, China; 2. Agriculture and Rural Bureau of Gaotang County, Gaotang, Shandong 252800, China;

3. Heze University, Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: The development of high-quality salt-tolerant wheat varieties represents a significant trend in the advancement of agricultural development in China. In this study, Dekang 961 was used as the control, and 156 high-generation wheat breeding lines and three parental materials were subjected to different concentrations(0, 75, and 150 mmol · L⁻¹) of NaCl stress treatments using the hydroponic method during the seedling stage. Meanwhile, high-quality specific molecular markers were used for assisted selection, combined with quality trait detection and analysis, to obtain wheat lines with strong salt tolerance at the seedling stage and excellent quality traits. The results showed that seven highly salt-tolerant materials, 42 salt-tolerant materials, 51 moderately salt-tolerant materials, 24 salt-sensitive materials, and 35 highly salt-sensitive materials were screened through cluster analysis of the comprehensive evaluation value *D*. Quality molecular marker identification revealed that 109 materials lack *Sec-1* locus but possess the 5+10 subunit; five materials lack both the *Sec-1* and *Gli-D2*

收稿日期: 2024-06-28 修回日期: 2024-12-09

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MC189); 山东省重点研发计划(农业良种工程)项目(2023LZGC009-4-2, 2022LZGCQY002-3); 国家农业重大科技项目(NK20220601); 山东省一流学科建设“811”项目

第一作者 E-mail: 281524639@qq.com(王子强); 2224023327@qq.com(张思娅)

通讯作者 E-mail: deng868@163.com(邓志英); 5661916@163.com(高国庆)

loci; three materials lack the *Gli-D2* locus but possess the 5+10 subunit, and three materials lack both the *Sec-1* and *Gli-D2* loci while possess the 5+10 subunit. Comprehensive analysis led to the selection of one line with high salt tolerance and the pyramiding of three high-quality gene loci, three lines with high salt tolerance and the pyramiding of two high-quality gene loci, and three lines with high salt tolerance and the absence of the *Sec-1* locus.

Keywords: Wheat elite lines; Salt tolerance identification; Molecular marker detection; Quality analysis

小麦是中国三大粮食作物之一,其播种面积和产量占中国粮食作物的 1/4 左右^[1],在实现粮食持续稳定增产、保障国家粮食安全中发挥着重要的作用。然而,土地盐渍化面积的增多使得盐胁迫成为限制小麦产量增加和品质提高的一大因素^[2]。在土壤盐渍化日益加剧的情况下,迫切需要开展与小麦耐盐性相关的研究^[3],培育耐盐小麦新品种。

当前对小麦芽期、苗期和成株期耐盐性的研究都有大量报道,但主要集中在苗期。盐胁迫下小麦的发芽率、出苗率、成活率及分蘖能力均出现了不同程度的下降;同时,小麦苗高、穗长、分蘖数、单株穗数、千粒重以及穗粒数在盐胁迫下也普遍呈现下降趋势^[4-8]。目前已证实转录因子、蛋白激酶基因等调节基因^[9-12]和离子转运蛋白基因、水通道蛋白基因、抗氧化酶基因和 LEA 基因等功能基因对提高小麦耐盐性有积极作用^[13-16]。

同时,随着人们生活品质的提高,优质的面制品也越来越受关注^[17],影响小麦加工品质的主要因素是面筋的含量和质量。研究表明,麦谷蛋白和醇溶蛋白是赋予面筋具有弹性和延伸性的主要成分。前人对高分子量麦谷蛋白亚基影响面包品质的研究较多,一般认为 5+10 亚基对小麦的加工品质贡献较大^[18]。而高醇溶蛋白含量对加工品质有负面作用,醇溶蛋白位点 *Gli-D2* 的缺失可改善小麦的加工品质^[19]。

尽管目前对如何提高小麦耐盐性和改善小麦品质性状进行了大量研究,但从二者协同性方面,开展既耐盐又优质的小麦新品种的相关研究却很少,且生产上也缺乏耐盐性好且优质的小麦新品种。因此,筛选并培育耐盐且品质性状俱佳的小麦新品种对充分利用盐渍地、提高作物产量和解决目前粮食问题具有非常重要的现实意义^[20-22]。本研究对 156 份小麦育种高代品系和 3 份亲本材料进行苗期耐盐性鉴定,同时利用特异分子标记进行辅助筛选,以期获得耐盐性好且品质性状俱佳的小麦新品系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验材料为稳定的小麦育种高代品系 F₆₋₇ 85 份,离子诱变 M₇ 稳定品系 71 份,亲本 3 份,对照品种为德抗 961(表 1)。于 2021 年 10 月种植于山东农业大学试验田,随机区组设计,3 次重复,按当地生产管理措施进行。

1.2 小麦苗期盐胁迫处理

从每个材料挑选出 80 粒健康、丰满、一致且无病虫害的种子,腹沟朝下,种胚朝向同一方向,种子间隔距离均匀一致,均匀摆放在发芽盒中(图 1),设置 3 次重复。

在每个发芽盒摆放 4 个材料进行培养,第一阶段用去离子水培养约 7 d(小麦培养至 1 叶 1 心期),然后使用 0、75 和 150 mmol · L⁻¹ NaCl 溶液进行胁迫处理,培养 5 d 后,测量幼苗高度、最大根长、鲜重、干重、MDA 含量、地上部和根系钠离子含量及钾离子含量等形态指标或生理生化指标。

1.3 形态和生理指标测定

形态指标、MDA 含量及 Na⁺ 和 K⁺ 含量参考李合生^[23]的方法测定。

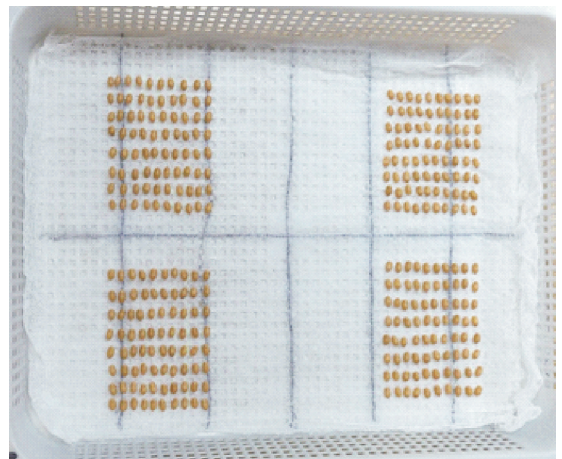


图 1 小麦种子水培摆放情况

Fig. 1 Hydroponic culture of wheat seeds

表 1 供试材料的名称
Table 1 Name of the tested materials

编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name
Z-2	DHBL1	Z-58	DHBL16	Z-112	DHBL36
Z-5	DHBL2	Z-59	DHBL17	Z-113	DHBL37
Z-6	DHBL3	Z-60	DHBL18	Z-114	DHBL38
Z-7	DHBL4	Z-61	DHBL19	Z-115	DHBL39
Z-8	DHBL5	Z-62	DHBL20	Z-116	DHBL40
Z-9	DHBL6	Z-63	DHBL21	Z-118	DHBL41
Z-10	DHBL7	Z-64	kx632-A-1-5	Z-119	DHBL42
Z-11	DHBL8	Z-65	kx632-A-1-8	Z-120	DHBL43
Z-12	DHBL9	Z-66	kx632-A-1-11	Z-121	DHBL44
Z-13	DHBL10	Z-67	kx632-A-10-1	Z-122	DHBL45
Z-14	DHBL11	Z-68	kx632-A-10-2	Z-123	DHBL46
Z-16	DHBL12	Z-69	kx632-A-10-3	Z-124	DHBL47
Z-17	366-1-6 1-1	Z-70	kx626-C-9-13	Z-126	DHBL48
Z-18	366-3-7 1-2	Z-71	kx626-C-9-14	Z-127	DHBL49
Z-19	366-4-1 1-5	Z-72	kx626-C-8-7	Z-128	DHBL50
Z-20	366-4-2 3-2	Z-73	366-11-7 1-6	Z-129	DHBL51
Z-21	366-7-2 1-5	Z-74	366-11-7 4-1	Z-130	DHBL52
Z-22	366-7-5 1-4	Z-75	366-11-7 5-1	Z-131	DHBL53
Z-23	366-3-13 2-2	Z-76	366-11-7 5-2	Z-132	DHBL54
Z-24	366-7-4 1-2	Z-77	366-11-7 7-3	Z-133	DHBL55
Z-25	366-7-4 3-3	Z-78	366-11-7 7-5	Z-134	DHBL56
Z-26	kx631-A-1-12	Z-79	366-11-7 9-2	Z-135	DHBL57
Z-27	kx631-A-3-16	Z-80	366-11-7 12-4	Z-136	DHBL58
Z-28	kx631-B-2-6	Z-81	366-11-7 13-1	Z-137	DHBL59
Z-29	kx631-B-4-11	Z-82	366-11-7 14-4	Z-138	DHBL60
Z-30	kx631-B-6-2	Z-83	366-11-7 17-3	Z-139	DHBL61
Z-31	kx631-B-10-8	Z-84	366-11-7 19-5	Z-140	DHBL62
Z-32	kx632-A-1-2	Z-85	366-11-7 21-4	Z-141	DHBL63
Z-33	kx632-A-3-12	Z-86	366-11-7 24-4	Z-142	DHBL64
Z-34	kx632-A-10-4	Z-87	366-11-7 26-1	Z-143	DHBL65
Z-35	kx632-A-10-12	Z-88	366-11-7 27-3	Z-144	DHBL66
Z-36	kx638-A-6-1	Z-89	366-1-2 4-4	Z-145	DHBL67
Z-37	kx638-B-6-9	Z-90	366-1-5 3-3	Z-146	DHBL68
Z-38	kx638-B-9-6	Z-91	366-3-4 1-5	Z-147	DHBL69
Z-39	kx638-B-9-10	Z-92	366-3-4 3-6	Z-148	DHBL70
Z-40	kx638-B-10-2	Z-93	366-3-5 1-6	Z-149	DHBL71
Z-41	kx638-B-10-5	Z-95	366-4-2 4-3	Z-150	DHBL72
Z-42	kx638-B-10-11	Z-96	366-9-2 4-4	Z-151	DHBL73
Z-43	kx638-B-10-16	Z-97	366-4-2 4-4	Z-152	DHBL74
Z-44	kx638-C-9-16	Z-98	DHBL22	Z-153	DHBL75
Z-45	kx626-A-1-6	Z-99	DHBL23	Z-154	DHBL76
Z-46	kx626-A-8-11	Z-100	DHBL24	Z-155	DHBL77
Z-47	kx626-A-11-4	Z-101	DHBL25	Z-156	DHBL78
Z-48	kx626-A-11-13	Z-102	DHBL26	Z-157	DHBL79
Z-49	kx626-A-14-3	Z-103	DHBL27	Z-158	DHBL80
Z-50	kx626-C-4-8	Z-104	DHBL28	Z-159	DHBL81
Z-51	kx626-C-5-6	Z-105	DHBL29	Z-160	DHBL82
Z-52	kx626-C-5-7	Z-106	DHBL30	Z-161	DHBL83
Z-53	kx626-C-8-12	Z-107	DHBL31	Z-162	DHBL84
Z-54	kx626-C-9-12	Z-108	DHBL32	Z-163	DHBL85
Z-55	DHBL13	Z-109	DHBL33	Z-164	山农 20 Shannong 20
Z-56	DHBL14	Z-110	DHBL34	Z-165	中优 9507 Zhongyou 9507
Z-57	DHBL15	Z-111	DHBL35	Z-166	济麦 22 Jimai 22
				对照 Control	德抗 961 Dekang 961

表 2 引物序列相关信息

Table 2 Information of Primers Sequences

类别 Type	引物名称 Name of primer	序列 Sequence	目标片段大小 Target fragment size/bp
1RS 缺失 <i>Sec-1</i> 位点 Deletion of <i>Sec-1</i> on chromosome 1RS	bmac0213-F	ATGGATGCAAGACCAAAC	524
	bmac0213-R	CTATGAGAGGTAGAGCAGCC	
HMW-GS 5+10	Xrj2-F	CTCGCTCGACGGTGTGAA	428
	Xrj2-R	CCTTTGGCCCAGATAAAGTG	
6D 染色体上缺失 <i>Gli-D2</i> Deletion of <i>Gli-D2</i> on chromosome 6D	ctg342-F	CACAACATAGCGCATGGAAGG	205
	ctg342-R	GCTGTTGGAAGGAGACCTGGG	

1.4 小麦品质性状调控基因位点的分子标记检测

采用中科院遗传与发育生物学研究所王道文课题组提供的 3 对引物(表 2),分别检测 1B/1R 易位系 1 RS 染色体上的*Sec-1* 位点, HMW-GS 中的 5+10 亚基和 6 D 染色体上的*Gli-D2* 位点。

采用改良的 CTAB 法对小麦幼苗样品进行全基因组 DNA 提取。琼脂糖凝胶电泳参考韩冉等^[24]方法。

1.5 小麦籽粒品质性状测定

按照 GB/T18868-2002 标准,用 DA7200 型近红外仪对小麦籽粒蛋白质含量进行测定。按照 GB/T21304-2007 标准,利用硬度指数测定仪测定籽粒硬度指数。按照 GB/T55062-2008 和 LS/T6102-1995 标准,利用 Perern 面筋仪测定湿面筋含量及面筋指数。按照 GB/T14614-2019 标准,用 Brabender 粉质仪测定面团粉质仪参数。

1.6 数据分析

用 Excel 2020、SPSS 26.0 及 R Studio 对数据进行处理分析。

1.6.1 主成分分析

利用 SPSS 26.0 对各性状和各性状的相对值进行主成分分析。主成分分析利用正交变换的降维思想,将原来许多相互关联的耐盐指标变成几个互不相关的综合指标,可有效避免因耐盐指标相关性而造成的统计误差。

1.6.2 综合评价

小麦的耐盐性和品质性状受多种因素影响,单一指标并不能准确评价小麦的耐盐性和品质,因此,要对多个指标进行综合判断。

$$\text{相对值} = (\text{盐胁迫值} / \text{对照值}) \times 100\% \text{ [25]}$$

(1) 隶属函数值^[26]

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

X_j 表示第 j 个综合指标的相对值;

X_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小值;

X_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值。

(2) 权重^[27]

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

W_j 表示通过主成分分析后得到在所有综合指标中第 j 个综合指标的所占的比重, P_j 为第 j 个综合指标的贡献率。

(3) 综合评价价值^[27]

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, \dots, n$$

(4) 聚类分析

利用 R Studio 对各小麦材料的综合评价价值 D 进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 小麦苗期耐盐性鉴定

2.1.1 不同浓度盐胁迫对小麦苗期形态和生理指标的影响

由图 2 可知,小麦苗高、最大根长、地上部鲜重、根系鲜重的均值随着 NaCl 浓度的升高而降低。苗高在 0 与 150 mmol · L⁻¹ NaCl 处理之间存在显著差异;最大根长、地上部鲜重在 3 个盐浓度处理间均存在显著差异;根系鲜重在 0 与 75、150 mmol · L⁻¹ NaCl 处理间差异性显著。这说明盐胁迫抑制了小麦地上部和根系的生长,且盐浓度越大抑制作用越强。

地上部和根系钠离子含量在 3 个盐浓度处理间都表现为显著差异。随着盐浓度的升高,地上部钾离子含量在 0 与 75、150 mmol · L⁻¹ 处理间存在显著差异;根系钾离子含量在 3 个盐浓度

处理间均存在显著性差异。推测盐胁迫破坏了小麦细胞膜的通透性,影响小麦幼苗的株高和根长,抑制了小麦的正常生长。另外,除苗高外,其他指标 0 与 75 mmol · L⁻¹ NaCl 盐浓度处理间均存在显著差异(图 2),推测小麦生长在 75 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度下已经受到明显抑制。

2.1.2 小麦苗期耐盐性状的表型分析

由表 3 可知,苗长、最大根长、地上部鲜重、根系鲜重 4 项指标在 150 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下受抑制最明显,且根系受抑制程度大于地上部。综合分析,为保证幼苗在盐胁迫下生长且能够表现出耐盐差异性,以 75 mmol · L⁻¹ NaCl 处理对小麦品系进行耐盐性鉴定。

通过计算发现,盐胁迫对鲜重根冠比(变异系数为 26.18%)、根系鲜重(变异系数为 25.79%)、根系钾离子含量(变异系数为 34.77%)、根系钠钾比(变异系数为 30.81%)、MDA 含量(变异系数为 27.12%)等指标产生了较大影响。由此说明这些指标对盐胁迫比较敏感,在小麦耐盐性改良的选择中有较大的应用潜力。

2.1.3 小麦苗期耐盐性主成分分析

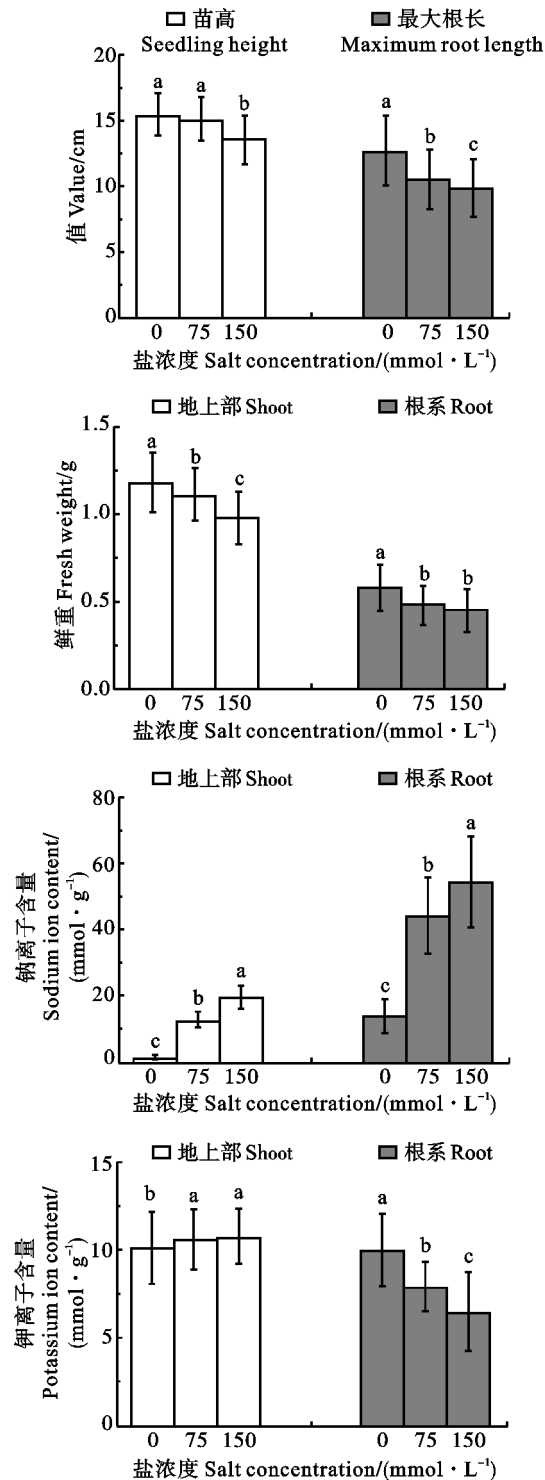
通过对各个指标的相对值进行主成分分析,将 17 个指标划分成了 4 个综合性指标(A1~A4),得到这 4 个综合性指标的特征值和贡献率。4 个综合性指标的贡献率分别为 42.58%、17.54%、14.07% 和 6.23%,累计贡献率达到了 80.42%(表 4),包含了绝大部分指标的主要信息。

通过主成分分析得出各因子的载荷系数(表 4),综合性指标 A1 中根系鲜重和干重的载荷量较大,归为根系鲜干重主成分;A2 中地上部鲜重和干重的载荷量较大,归为地上部鲜干重主成分;A3 中地上部钠钾比的载荷量最大,归为地上部钠钾比主成分;A4 中 MDA 的载荷量最大,归为 MDA 主成分。综合分析,上述 4 个综合性指标与小麦耐盐性密切相关,可将这些指标作为小麦苗期耐盐性鉴定的筛选指标。

2.1.4 小麦苗期耐盐性综合性评价

D 值综合了小麦耐盐各指标的主要信息,避免了因单一指标评价的不可靠性,可以较为准确地评价小麦耐盐性。图 3 横轴的宽度代表在该位置数据密度,较宽的部分表示数据更密集,而较窄的部分表示数据较稀疏。D 值越大,说明该品

(系)耐盐性越强。由图 3 可知,仅有少数小麦品系耐盐性(盐敏感)较强,大多数耐盐性居中。



图柱上不同字母表示盐处理间差异显著(P < 0.05)。

Different letters on the columns indicate significant differences among different NaCl treatments at 0.05 level.

图 2 不同浓度盐胁迫对小麦苗期形态及生理指标的影响
Fig. 2 Effects of different salt concentrations on the morphology and physiological indicators of wheat seedlings

表3 小麦苗期耐盐性状表型数据
Table 3 Phenotypic data of wheat seedling under salt treatments

性状 Trait	处理 Treatment	最小值 Min	最大值 Max	均值 Av	标准差 SD	偏度 Kurtosi	峰度 Skewness	变异系数 CV/%
苗长 SH	T1	11.85	20.20	15.48	1.61	0.33	0.28	10.41
	T2	11.00	20.15	15.14	1.64	0.99	1.23	10.80
	T3	6.25	18.85	13.56	1.82	-0.09	1.41	13.39
最大根长 MPL	T1	6.85	21.90	12.74	2.64	0.64	0.88	20.69
	T2	5.45	16.70	10.51	2.23	0.14	-0.15	21.26
	T3	5.10	14.10	9.90	2.21	-0.25	-0.80	22.32
地上部鲜重 SFW	T1	0.76	1.57	1.18	0.17	-0.23	-0.60	14.37
	T2	0.61	1.53	1.11	0.15	-0.04	0.55	13.19
	T3	0.69	1.33	0.98	0.15	0.20	-0.73	15.05
根系鲜重 RFW	T1	0.31	1.07	0.58	0.13	1.04	2.26	22.14
	T2	0.25	0.77	0.48	0.11	0.27	-0.34	23.41
	T3	0.21	0.77	0.45	0.12	0.43	-0.40	25.79
地上部干重 SDW	T1	0.09	0.25	0.14	0.03	1.17	1.20	22.59
	T2	0.09	0.20	0.14	0.02	0.15	-0.10	15.63
	T3	0.09	0.18	0.13	0.02	-0.04	-0.67	15.69
根系干重 RDW	T1	0.02	0.09	0.05	0.01	0.22	-0.20	23.03
	T2	0.03	0.08	0.05	0.01	0.09	-0.74	24.34
	T3	0.02	0.07	0.05	0.01	0.15	-0.80	25.25
鲜重根冠比 RSFW	T1	0.32	1.05	0.50	0.14	1.36	2.02	27.31
	T2	0.24	0.67	0.43	0.09	0.46	-0.39	21.38
	T3	0.26	0.78	0.47	0.12	0.70	-0.17	26.18
干重根冠比 RSDW	T1	0.24	0.85	0.38	0.10	1.89	4.98	27.43
	T2	0.24	0.52	0.35	0.07	0.62	-0.31	19.17
	T3	0.19	0.53	0.34	0.08	0.35	-0.56	22.80
地上部含水量 SWC	T1	0.67	1.40	1.03	0.15	-0.12	-0.51	14.33
	T2	0.35	1.35	0.96	0.14	-0.44	2.24	14.65
	T3	0.60	1.16	0.84	0.14	0.27	-0.81	16.06
根系含水量 RWC	T1	0.29	0.99	0.53	0.12	1.11	2.29	22.72
	T2	0.13	0.70	0.42	0.10	0.22	-0.06	24.59
	T3	0.19	0.71	0.41	0.11	0.46	-0.35	26.54
丙二醛含量 MDA content	T1	0.06	0.26	0.12	0.03	0.83	1.86	25.41
	T2	0.05	0.26	0.13	0.04	1.09	2.13	27.12
	T3	0.08	0.25	0.13	0.04	1.23	1.76	26.30
地上部 钠离子含量 SNC	T1	0.17	5.00	1.08	0.69	2.35	7.97	64.40
	T2	5.78	17.88	12.59	2.37	-0.48	-0.25	18.82
	T3	9.01	29.25	19.49	3.54	-0.02	-0.19	18.19
根系 钠离子含量 RNC	T1	1.53	29.79	13.68	5.21	0.57	0.07	38.11
	T2	18.91	72.14	44.26	11.59	-0.03	-0.73	26.18
	T3	27.67	89.67	54.50	13.85	0.09	-0.65	25.42
地上部 钾离子含量 SNKR	T1	4.07	15.43	10.12	2.05	-0.85	0.78	20.21
	T2	7.19	16.45	10.60	1.71	0.42	0.26	16.16
	T3	7.54	14.62	10.76	1.56	0.13	-0.61	14.54
根系 钾离子含量 RNKR	T1	3.82	16.10	9.99	2.05	0.15	0.46	20.51
	T2	4.08	13.22	7.93	1.40	0.65	1.01	17.60
	T3	2.93	28.51	6.47	2.25	6.32	59.49	34.77
地上部钠钾比 SNK	T1	0.02	0.49	0.11	0.07	2.33	7.50	62.48
	T2	0.54	2.18	1.21	0.28	0.67	0.69	22.96
	T3	0.81	2.95	1.85	0.45	0.35	-0.68	24.52
根系钠钾比 RNK	T1	0.40	3.22	1.38	0.48	0.75	1.09	34.60
	T2	2.81	9.24	5.60	1.25	0.48	0.54	22.26
	T3	1.77	17.66	8.87	2.73	0.49	0.50	30.81

T1~T3 分别表示 0、75 和 150 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫。

T1—T3 represent 0, 75, and 150 mmol · L⁻¹ NaCl stress. SH;Seedling height;MPL;Maximum primary root length;SFW;Shoot fresh weight;RFW;Root fresh weight;SDW;Shoot dry weight;RDW;Root dry weight;RSFW;Fresh weight root-shoot ratio;RSDW;Dry weight root-shoot ratio;SWC;Shoot water content;RWC;Root water content;MDA;Malondialdehyde;SNC;Sodium ion content in shoot;RNC;Sodium ion content in root;SNKR;Potassium ion content in shoot;RNKR;Potassium ion content in root;SNK;Shoot Na⁺/K⁺; RNK;Root Na⁺/K⁺.

表 4 前 4 个主成分对应的载荷系数、特征值和贡献率

Table 4 Loading coefficients, eigenvalues, and contribution rates corresponding to the first four principal components

不同指标 Different indicator	A1	A2	A3	A4
苗高 SH	0.028	0.660	-0.398	0.113
最大根长 MPL	0.467	-0.195	-0.301	0.411
地上部鲜重 SFW	0.392	0.868	-0.030	0.016
根系鲜重 RFW	0.932	0.068	-0.078	0.196
地上部干重 SDW	0.562	0.454	0.607	-0.187
根系干重 RDW	0.935	-0.045	0.208	-0.075
鲜重根冠比 RSFW	0.806	-0.402	-0.092	0.225
干重根冠比 RSDW	0.768	-0.402	-0.204	0.062
地上部含水量 SWC	0.340	0.854	-0.122	0.050
根系含水量 RWC	0.877	0.078	-0.153	0.273
丙二醛含量 MDA content	0.410	-0.077	0.242	0.484
地上部钠离子含量 SNC	-0.712	0.083	0.354	0.472
根系钠离子含量 RNC	-0.923	0.164	-0.053	0.228
地上部钾离子含量 SNKR	-0.561	-0.127	-0.713	0.150
根系钾离子含量 RNKR	-0.457	0.584	-0.339	0.162
地上部钠钾比 SNK	-0.206	0.143	0.884	0.282
根系钠钾比 RNK	-0.767	-0.257	0.211	0.168
特征值 Eigenvalue	7.24	2.98	2.39	1.06
贡献率 Contribution rate/%	42.58	17.54	14.07	6.23

根据 D 值大小对小麦耐盐性进行聚类分析(图 4),可将 159 份材料划分为五类(表 5)。第一类为高耐盐材料(D 值为 0.663~0.714),共计 7 份,占供试材料的 4.40%,如 Z-25、Z-99、Z-80 等;第二类为耐盐材料(D 值为 0.551~0.647),共计 42 份,占供试材料的 26.42%,如 Z-22、Z-39、Z-95 等;第三类为中度耐盐材料(D 值为 0.461~0.546),共计 51 份,占供试材料的 32.08%,如 Z-69、Z-124、Z-133 等;第四类为盐敏感材料(D 值为 0.357~0.450),共计 24 份,占供试材料 15.10%,如 Z-82、Z-118、Z-122 等;第五类高盐敏材料(D 值为 0.131~0.343),共计 35 份,占供试材料的 22.01%,如 Z-72、Z-128、Z-159 等。

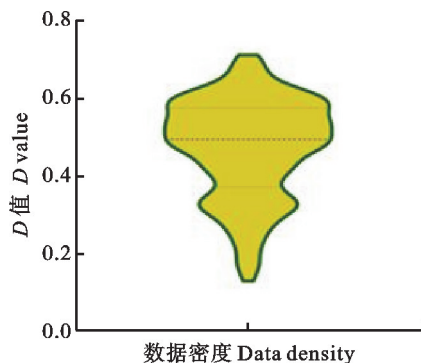
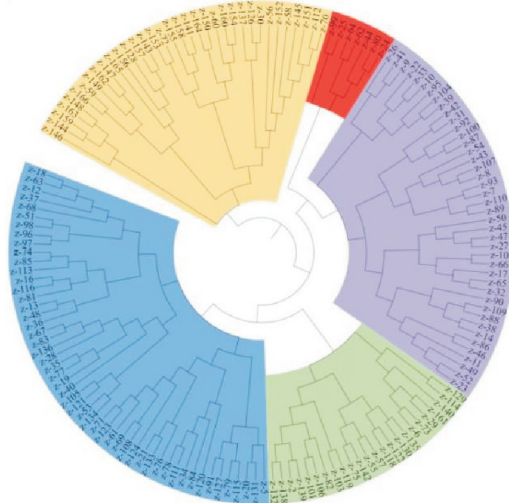


图 3 D 值分布的小提琴图

Fig. 3 Violin plot of D value distribution

■ 高耐盐材料 High salt-tolerant material
 ■ 耐盐材料 Salt-tolerant material
 ■ 中度耐盐材料 Moderately salt-tolerant material
 ■ 盐敏感材料 Salt-sensitive material
 ■ 高盐敏材料 High salt-sensitive material



各材料编号同表 1。

The material codes are same as those in table 1.

图 4 小麦耐盐性聚类分析结果

Fig. 4 Cluster analysis of wheat breeding lines under salt stress

2.2 小麦品质性状分子标记筛选与评价

2.2.1 小麦品质性状分子标记检测结果

利用相对应的引物对 159 份材料进行分子标记鉴定,结果(表 6)表明,Sec-1 位点缺失的材料

有 147 份,含有 5+10 亚基的材料有 115 份,*Gli-D2* 位点缺失的材料有 5 份。然后根据上述分子标记检测结果,*Sec-1* 位点缺失且含有 5+10 亚基的二聚体材料有 109 份,*Sec-1* 位点与*Gli-D2* 位点

均缺失的二聚体材料有 5 份,*Gli-D2* 位点缺失且含有 5+10 亚基的二聚体材料有 3 份,*Sec-1* 位点缺失、含有 5+10 亚基且*Gli-D2* 位点缺失的三聚体材料有 3 份(表 7)。

表 5 各材料 D 值
Table 5 D values of different materials

编号 Code	D 值 D value	编号 Code	D 值 D value	编号 Code	D 值 D value	编号 Code	D 值 D value
Z-25	0.714	Z-54	0.574	Z-84	0.492	Z-6	0.373
Z-99	0.709	Z-43	0.570	Z-78	0.489	Z-29	0.367
Z-80	0.687	Z-8	0.569	Z-111	0.489	Z-161	0.366
Z-24	0.685	Z-107	0.569	Z-34	0.489	Z-140	0.357
Z-44	0.680	Z-42	0.562	Z-108	0.483	Z-137	0.343
Z-64	0.669	Z-31	0.560	Z-69	0.483	Z-126	0.342
Z-62	0.663	Z-87	0.557	Z-71	0.482	Z-30	0.342
Z-26	0.647	Z-100	0.555	Z-123	0.482	Z-152	0.337
Z-9	0.640	Z-92	0.551	Z-61	0.482	Z-58	0.336
Z-41	0.637	Z-96	0.546	Z-124	0.480	Z-151	0.335
Z-22	0.631	Z-97	0.546	Z-21	0.478	Z-112	0.334
Z-33	0.626	Z-51	0.545	Z-133	0.478	Z-70	0.334
Z-10	0.626	Z-98	0.545	Z-76	0.476	Z-145	0.334
Z-39	0.622	Z-68	0.543	Z-115	0.472	Z-56	0.331
Z-104	0.621	Z-18	0.542	Z-79	0.471	Z-150	0.324
Z-95	0.618	Z-63	0.542	Z-127	0.469	Z-164	0.323
Z-32	0.612	Z-12	0.541	Z-91	0.468	Z-60	0.319
Z-65	0.611	Z-37	0.540	Z-20	0.463	Z-160	0.316
Z-17	0.611	Z-36	0.536	Z-131	0.463	Z-154	0.314
Z-102	0.609	Z-48	0.534	Z-5	0.461	Z-141	0.310
Z-66	0.608	Z-13	0.534	Z-119	0.450	Z-158	0.310
Z-50	0.605	Z-81	0.531	Z-103	0.446	Z-155	0.307
Z-45	0.604	Z-116	0.529	Z-132	0.442	Z-153	0.298
Z-47	0.603	Z-16	0.528	Z-138	0.440	Z-72	0.295
Z-27	0.603	Z-85	0.527	Z-2	0.437	Z-165	0.280
Z-90	0.599	Z-74	0.526	Z-139	0.435	Z-156	0.274
Z-14	0.596	Z-113	0.525	Z-106	0.431	Z-128	0.273
Z-38	0.595	Z-105	0.518	Z-101	0.430	Z-157	0.273
Z-109	0.594	Z-121	0.517	Z-82	0.428	Z-143	0.273
Z-88	0.593	Z-134	0.516	Z-122	0.423	Z-147	0.247
Z-11	0.589	Z-53	0.515	Z-118	0.420	Z-162	0.242
Z-49	0.588	Z-40	0.508	Z-135	0.417	Z-149	0.237
Z-23	0.587	Z-77	0.505	Z-130	0.413	Z-59	0.225
Z-52	0.587	Z-35	0.504	Z-55	0.409	Z-166	0.211
Z-86	0.584	Z-19	0.504	Z-57	0.406	Z-144	0.190
Z-46	0.584	Z-28	0.502	Z-142	0.403	Z-159	0.182
Z-110	0.580	Z-67	0.501	Z-75	0.402	Z-148	0.167
Z-89	0.579	Z-83	0.501	Z-114	0.388	Z-163	0.161
Z-93	0.578	Z-136	0.500	Z-129	0.388	Z-146	0.131
Z-7	0.577	Z-120	0.497	Z-73	0.374		

表 6 每个分子标记在供试材料中的带型统计
Table 6 Band pattern statistics of each molecular marker in the tested materials

编号 Code	1RS 缺失 Sec-1 位点 Deletion of Sec-1 on chromosome 1RS	HMW-GS 5+10	Gli-D2 缺失 Deletion of Gli-D2	编号 Code	1RS 缺失 Sec-1 位点 Deletion of Sec-1 on chromosome 1RS	HMW-GS 5+10	Gli-D2 缺失 Deletion of Gli-D2
Z-2	0	1	1	Z-85	0	1	1
Z-5	0	1	1	Z-86	0	1	1
Z-6	0	1	1	Z-87	0	1	1
Z-7	0	1	1	Z-88	0	1	1
Z-8	0	1	1	Z-89	0	1	1
Z-9	0	1	1	Z-90	0	1	1
Z-10	0	1	1	Z-91	0	1	1
Z-11	0	0	1	Z-92	0	1	1
Z-12	0	1	1	Z-93	0	1	1
Z-13	0	0	1	Z-95	0	1	1
Z-14	0	1	1	Z-96	0	1	1
Z-16	0	1	1	Z-97	0	1	1
Z-17	0	1	1	Z-98	1	1	1
Z-18	0	1	1	Z-99	0	1	1
Z-19	0	1	1	Z-100	0	1	1
Z-20	0	1	1	Z-101	0	1	1
Z-21	0	1	1	Z-102	0	1	1
Z-22	0	1	1	Z-103	1	0	1
Z-23	0	1	1	Z-104	1	0	1
Z-24	0	1	1	Z-105	0	0	1
Z-25	0	1	0	Z-106	0	1	1
Z-26	0	1	1	Z-107	0	0	1
Z-27	0	0	1	Z-108	0	0	1
Z-28	0	1	1	Z-109	0	1	1
Z-29	0	1	0	Z-110	0	1	1
Z-30	0	1	0	Z-111	0	1	1
Z-31	0	1	1	Z-112	0	1	1
Z-32	0	1	1	Z-113	1	1	1
Z-33	0	1	1	Z-114	1	1	1
Z-34	0	1	1	Z-115	0	1	1
Z-35	0	1	1	Z-116	0	0	1
Z-36	0	0	1	Z-118	0	0	1
Z-37	0	0	1	Z-119	1	0	1
Z-38	0	1	1	Z-120	1	1	1
Z-39	0	1	1	Z-121	0	0	1
Z-40	0	1	1	Z-122	0	1	1
Z-41	0	1	1	Z-123	1	0	1
Z-42	0	1	1	Z-124	0	1	1
Z-43	0	1	1	Z-126	0	1	1
Z-44	0	1	1	Z-127	0	0	1
Z-45	0	1	1	Z-128	0	1	1
Z-46	0	1	1	Z-129	0	1	1
Z-47	0	1	1	Z-130	0	1	1
Z-48	0	1	1	Z-131	0	0	1
Z-49	0	1	1	Z-132	1	0	1
Z-50	0	1	1	Z-133	0	0	1
Z-51	0	1	1	Z-134	0	1	1
Z-52	0	1	1	Z-135	0	0	1

(续表 6 Continued table 6)

编号 Code	1RS 缺失 Sec-1 位点 Deletion of Sec-1 on chromosome 1RS	HMW-GS 5+10	Gli-D2 缺失 Deletion of Gli-D2	编号 Code	1RS 缺失 Sec-1 位点 Deletion of Sec-1 on chromosome 1RS	HMW-GS 5+10	Gli-D2 缺失 Deletion of Gli-D2
Z-53	0	1	1	Z-136	0	1	1
Z-54	0	1	1	Z-137	0	1	1
Z-55	0	1	1	Z-138	0	1	1
Z-56	0	1	1	Z-139	0	1	1
Z-57	0	1	1	Z-140	0	0	1
Z-58	0	1	1	Z-141	0	1	1
Z-59	0	1	1	Z-142	0	1	1
Z-60	0	1	1	Z-143	0	1	1
Z-61	0	0	1	Z-144	0	0	1
Z-62	0	0	1	Z-145	0	1	1
Z-63	0	0	1	Z-146	0	0	1
Z-64	0	1	1	Z-147	0	0	1
Z-65	0	1	1	Z-148	1	1	1
Z-66	0	1	1	Z-149	1	1	1
Z-67	0	1	1	Z-150	0	0	1
Z-68	0	1	1	Z-151	0	0	1
Z-69	0	1	1	Z-152	0	0	1
Z-70	0	1	1	Z-153	1	0	1
Z-71	0	1	1	Z-154	0	0	1
Z-72	0	0	1	Z-155	0	0	0
Z-73	0	1	1	Z-156	0	0	0
Z-74	0	1	1	Z-157	0	0	1
Z-75	0	1	1	Z-158	0	0	1
Z-76	0	1	1	Z-159	0	0	1
Z-77	0	1	1	Z-160	0	0	1
Z-78	0	1	1	Z-161	0	0	1
Z-79	0	1	1	Z-162	0	0	1
Z-80	0	1	1	Z-163	0	0	1
Z-81	0	1	1	Z-164	0	0	1
Z-82	0	1	1	Z-165	0	1	1
Z-83	0	1	1	Z-166	0	0	1
Z-84	0	1	1				

1 为目标片段存在;0 为目标片段不存在。

1 indicates the presence of the target fragment; 0 indicates that no target fragment exists.

2.2.2 耐盐性和优质性状分子标记的综合筛选

将小麦耐盐性结果和分子标记检测结果综合分析(表 5 和表 7),筛选出高耐盐且 3 个优质基因位点聚合的(*Sec-1*、*Gli-D2* 位点缺失且含 5+10 亚基)小麦品系 1 份, Z-25;高耐盐且优质的 2 个优质基因位点聚合的(*Sec-1* 位点缺失且含 5+10 亚基)小麦品系 3 份, Z-44、Z-64、Z-24;高耐盐且优质的(*Sec-1* 位点缺失)小麦品系 3 份, Z-62、Z-80、Z-99。

2.2.3 耐盐优质小麦品系的品质性状检测

Sec-1 位点的 ω -黑麦碱基因对面食的加工品

质有显著的不良影响,*Gli-D2* 位点的醇溶蛋白基因则会引起食物过敏,因此*Sec-1* 位点和*Gli-D2* 位点缺失的两个优质基因位点聚合的品系有较好的品质性状。通过对筛选出的 7 份高耐盐且优质的品系,以及分子标记检测到的*Sec-1* 位点缺失且*Gli-D2* 位点缺失的 4 份二聚体优质品系的品质性状进行分析(表 8),这 11 份材料中籽粒蛋白质含量最高可达 17.53%,湿面筋含量最高达 42.3%,面筋指数最高达 97,稳定时间最高达 18.2 min,均达到中强筋至强筋水平,为后续耐盐优质小麦新品种的培育奠定了良好的基础。

表 7 供试材料的品质基因位点的分子标记检测结果

Table 7 Molecular marker detection results of the quality-related gene loci in the tested materials

类别 Type	离子诱变 M ₇ 稳定品系 Ionic mutation M ₇ stable strain	亲本 Parent	F ₆₋₇ 代品系 F ₆₋₇ lines	总计 Total
Sec-1 位点缺失 Deletion of Sec-1	71	3	73	147
含有 5+10 亚基 5+10 subunits	67	1	47	115
Gli-D2 位点缺失 Deletion of Gli-D2	3	0	2	5
Sec-1 位点缺失且含有 5+10 亚基 5+10 subunits and deletion of Sec-1	67	1	41	109
Sec-1 和 Gli-D2 位点缺失 Deletion of both Sec-1 and Gli-D2	3	0	2	5
含有 5+10 亚基且 Gli-D2 位点缺失 5+10 subunits and deletion of Gli-D2	3	0	0	3
供试材料数 No. of materials	71	3	85	159

表 8 11 份材料的品质性状分析

Table 8 Analysis of quality traits of the 11 wheat materials

类型 Type	样品名称 Name	硬度指数 Hardness index	籽粒蛋白质含量 Grain protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten content/%	面筋指数 Gluten index	粉质参数(50 g) Farinograph parameter		
						吸水率 Absorption/ [mL · (100 g) ⁻¹]	形成时间 Development time/min	稳定时间 Stability time/min
耐盐且优质材料 Salt tolerance and good quality	Z-24	69	16.97	36.7	83	66.5	7.2	13.7
	Z-25	70	17.53	38.8	83	67.0	6.7	13.1
	Z-44	66	17.51	42.3	81	67.6	7.4	10.5
	Z-64	64	16.48	39.9	76	63.8	5.4	7.4
	Z-62	67	14.38	34.9	86	63.8	5.7	8.0
	Z-80	68	16.18	35.3	94	65.9	9.5	14.9
	Z-99	71	14.35	31.2	97	62.2	2.2	18.2
二聚体材料 Materials with two elite mutation loci	Z-29	69	14.79	33.3	97	61.9	8.6	17.7
	Z-30	71	13.24	29.4	97	61.9	2.3	11.7
	Z-155	68	15.68	40.6	72	63.2	6.5	10.8
	Z-156	70	12.90	31.8	85	61.7	5.2	7.4

3 讨论

3.1 小麦苗期耐盐性评价

盐胁迫会显著抑制小麦的正常生长发育,其中苗期是对盐胁迫最敏感的时期^[28]。彭智等^[29]发现盐胁迫下小麦苗期的不同指标对盐胁迫敏感性存在差异。本试验中除苗高外,其他指标在不同盐浓度处理间都存在显著性差异,但差异程度各异,这与前人研究结果基本一致。本研究与李小康等^[30]均认为小麦叶片中 MDA 含量随盐浓度的升高而增加。此外,Sairam 等^[31]研究发现,长期盐胁迫条件下过氧化氢含量、膜脂过氧化程度与小麦叶片钠离子含量呈显著正相关,而本研究结果与此有所差异,可能是由于盐胁迫时间的差异导致的。任永哲^[32]研究指出,盐胁迫处理在

小麦幼苗期对地上部的影响相较于根系更为显著。但本研究中与地上部性状相比,根系性状在盐胁迫下受到的影响更为严重,这与张巧凤等^[33]的研究结果一致。推测可能是盐处理浓度和试验材料的不同导致结果出现了差异。同时,本研究利用多指标综合评价小麦的耐盐性,与陈帅君等^[34]和李小康等^[30]的研究方法相似,但在指标选择上更为丰富,为小麦苗期耐盐性的准确鉴定提供了更为全面的依据。

3.2 小麦优质性状的分子标记检测

分子标记技术能够高效识别并分析与小麦品质相关的基因遗传多样性^[35],相比 SDS-PAGE 具有明显优势^[36]。本研究通过分子标记技术筛选出了具有优质基因位点聚合的品系,这些品系在蛋白质含量、面筋含量、面筋指数等方面表现优

异,这也进一步证实了前人得出的特定基因位点与小麦品质性状呈正相关的结论^[37-39]。其中,Sec-1位点缺失且含有5+10亚基的二聚体材料最为丰富,符合前人Sec-1位点缺失和含有5+10亚基对小麦的品质性状具有显著改良效果的结论^[38-39]。这也为利用基因编辑技术编辑已知的品质功能基因去改良小麦的品质性状提供了理论依据。

3.3 小麦耐盐优质材料的创制及展望

本研究在苗期耐盐性鉴定的基础上,结合分子标记检测和品质性状评价,筛选出耐盐性好且品质优良的小麦新品系,为培育耐盐优质小麦品种提供了重要参考。前人研究表明,成株期耐盐性同样重要^[40-41]。因此,下一步将对筛选出的耐盐优质材料进行成株期耐盐性、田间产量性状、品质性状等更全面的鉴定,培育耐盐性和品质都优良的小麦新品种,同时结合分子生物学技术,深入探究小麦耐盐机制,为小麦耐盐优质新品种的培育提供理论支持。

4 结论

通过综合评价小麦苗期耐盐性和分子标记检测结果,筛选出了具有高耐盐性和优质基因位点聚合的品系。这些品系不仅耐盐性强,而且在品质性状上也表现突出,为未来小麦品种改良和耐盐优质新品种的培育奠定了基础。

参考文献:

- [1]卢秉林,包兴国,车宗贤,等.长期留茬免耕对河西绿洲灌区春小麦产量及稳定性的影响[J].农业工程学报,2022,38(7):117.
LU B L,BAO X G,CHE Z X,*et al.* Effects of long-term no-tillage with crop stubbles on yield and stability of spring wheat in Hexi Oasis Irrigated Areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(7): 117.
- [2]SHABALA S. Learning from halophytes: Physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops [J]. *Annals of Botany*, 2013, 112(7): 1209.
- [3]张相锋,杨晓绒,焦子伟.植物耐盐性评价研究进展及评价策略[J].生物学杂志,2018,35(6):91.
ZHANG X F, YANG X R, JIAO Z W. Research progress of salt tolerance evaluation in plants and tolerance evaluation strategy [J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(6): 91.
- [4]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(2):22.
LIU T T, LI N, WEI L D, *et al.* Comprehensive evaluation of salt tolerance of wheat varieties in Shanxi Province during germination and seedling stage [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 22.
- [5]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(3):25.
LI Y Y, CHEN B, YAO L R, *et al.* Evaluation of salt and alkali tolerance and germplasm screening of 283 wheat varieties (lines) during germination [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(3): 25.
- [6]孙现军,姜奇彦,胡正,等.小麦种质资源苗期耐盐性鉴定评价[J].作物学报,2023,49(4):1132.
SUN X J, JIANG Q Y, HU Z, *et al.* Identification and evaluation of wheat germplasm resources at seedling stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(4): 1132.
- [7]陶荣荣,陆钰,于琪,等.盐逆境对不同耐盐性小麦花后生理特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2022,31(3):428.
TAO R R, LU Y, YU Q, *et al.* Effects of salt stress on physiological characteristics and yield of different salt-tolerant wheat varieties [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 31(3): 428.
- [8]米海莉,许兴,马雅琴,等.小麦品种耐盐性的研究[J].干旱地区农业研究,2003(1):134.
MI H L, XU X, MA Y Q, *et al.* Study on the salt tolerance of wheat varieties [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2003(1): 134.
- [9]ZHANG L N, ZHAO L J, WANG L T, *et al.* TabZIP60 is involved in the regulation of ABA synthesis-mediated salt tolerance through interacting with TaCDPK30 in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Plantae*, 2023, 257(6): 107.
- [10]张惠媛,刘永伟,杨军峰,等.小麦转录因子基因TaWRKY33的耐盐性分析[J].中国农业科学,2018,51(24):4591.
ZHANG H Y, LIU Y W, YANG J F, *et al.* Identification and analysis of salt tolerance of wheat transcription factor TaWRKY33 gene [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(24): 4591.
- [11]JIN X, SUN T, WANG X T, *et al.* Wheat CBL-interacting protein kinase 25 negatively regulates salt tolerance in transgenic wheat [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28884.
- [12]IMTIAZ K, AHMED M, ANNUM N, *et al.* AtCIPK16, a CBL-interacting protein kinase gene, confers salinity tolerance in transgenic wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1127311.
- [13]MUNNS R, JAMES RA, XU B, *et al.* Wheat grain yield on saline soils is improved by an ancestral Na⁺ transporter gene [J]. *Nature Biotechnology*, 2012, 30(4): 360.
- [14]AYADI M, BRINI F, MASMUDI K. Overexpression of a wheat aquaporin gene, *TdPIP2;1*, enhances salt and drought tolerance in transgenic durum wheat cv. Maali [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(10): 2389.
- [15]WANG M C, ZHAO X, XIAO Z, *et al.* A wheat superoxide dismutase gene *TaSOD2* enhances salt resistance through modulating redox homeostasis by promoting NADPH oxidase activity [J]. *Plant Molecular Biology*, 2016, 91(1/2): 115.
- [16]WANG W Q, YANG Y, DENG Y M, *et al.* Overexpression of isochorismate synthase enhances salt tolerance in barley [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 162: 139.
- [17]郑青焕.21份印度小麦种品质性状的评价及主要农艺性状分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2016:1.
ZHENG Q H. Evaluation of quality traits and analysis of main agronomic traits of 21 Indian wheat germplasm [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016: 1.
- [18]邓志英,田纪春,张永祥.基因型和环境对HMW-GS表达量的影响及其与馒头和面包质构参数的相关分析[J].中国粮油学报,2008,23(2):6.
DENG Z Y, TIAN J C, ZHANG Y X. Effects of genotype and environment on HMW-GS expression and correlations with steamed bread and baked bread quality [J]. *Journal of*

- the Chinese Cereals and Oils Association*, 2008, 23(2):6.
- [19] LI D, JIN H, ZHANG K, WANG Z, *et al.* Analysis of the Gli-D2 locus identifies a genetic target for simultaneously improving the breadmaking and health-related traits of common wheat [J]. *Plant J*, 2018, 95(3):414.
- [20] 丁锦峰, 苏盛楠, 梁鹏, 等. 拔节期和花后渍水对小麦产量、干物质及氮素积累和转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11):1473.
DING J F, SU S N, LIANG P, *et al.* Effect of waterlogging at elongation or after anthesis on grain yield and accumulation and remobilization of dry matter and nitrogen in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(11):1473.
- [21] 冯伟志. 基于盐碱地治理技术的组合非驱动水稻秸秆压埋机研制[D]. 长春:吉林农业大学, 2019:8.
FENG W Z. Development of combined non-driven rice straw press-buried machine based on saline-alkali soil control technology [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019:8.
- [22] 王玲. 盐碱地的形成及改良技术[J]. 现代农村科技, 2018(8):106.
WANG L. Formation and amelioration technology of saline-alkali land [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2018(8):106.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:234, 246, 259.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:234, 246, 259.
- [24] 韩冉, 隋新霞, 杨洪美, 等. 小麦-近缘物种染色体系的高分子量麦谷蛋白亚基组成及白粉病抗性[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(11):1494.
HAN R, SUI X X, YANG H M, *et al.* High molecular weight glutenin composition and powdery mildew resistance of wheat-alien chromosome lines [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(11):1494.
- [25] 霍鹏, 李士磊, 李卫华. 春小麦苗期耐盐性差异及聚类分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2013, 31(2):137.
HUO P, LI S L, LI W H. Salt-tolerance and cluster analysis of spring wheat at seedling stage [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2013, 31(2):137.
- [26] 龚明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价[J]. 云南农业大学学报, 1989, 4(1):73.
GONG M. Screening methods and indexes of drought resistance in crops and comprehensive evaluation [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 1989, 4(1):73.
- [27] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2000:127.
XIE J J, LIU C P. Fuzzy mathematics methods and applications [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000:127.
- [28] 王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 等. 小麦品种资源耐盐性鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(2):189.
WANG M M, JIANG Q Y, HU Z, *et al.* Identification of salt tolerance in wheat varieties [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, 13(2):189.
- [29] 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.
PENG Z, LI L, LIU Y P, *et al.* Evaluation of salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seeding stages [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4):638.
- [30] 李小康, 吴崇宁, 王维, 等. 人工合成六倍体小麦耐盐种质资源的筛选及评价[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12):1487.
LI X K, WU C N, WANG W, *et al.* Screening and evaluation of salt-tolerant germplasm of synthetic hexaploid wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12):1487.
- [31] SAIRAM R K, RAO K V, SRIVASTAVA G C. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration [J]. *Plant Science*, 2002, 163(5):1037.
- [32] 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.
REN Y Z. Effects of salt stress on different wheat varieties at seedling stage [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(17):3702.
- [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(4):620.
ZHANG Q F, CHEN Z J, WU J Z, *et al.* Screening for salt tolerance at germination and seedling stages in wheat germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(4):620.
- [34] 陈帅君, 周鑫伟, 曹高巍, 等. 墨西哥春小麦品系的耐盐性鉴定[J]. 分子植物育种, 2023, 21(13):4368.
CHENG S J, ZHOU X W, CAO G Y, *et al.* Evaluating salinity tolerance in Mexican spring wheat lines [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(13):4368.
- [35] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望[J]. 作物学报, 2011, 37(2):202.
HE Z H, XIA X C, CHEN X M, *et al.* Progress and Prospects of Wheat Breeding in China [J]. *Crop Science*, 2011, 37(2):202.
- [36] 马红勃, 刘东涛, 冯国华, 等. 部分小麦品种(系)品质相关基因的分子检测[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6):768.
MA H B, LIU D T, FENG G H, *et al.* Identification of major quality genes in some wheat cultivars from yellow and Huai River valley wheat region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(6):768.
- [37] 闫敏. 小麦 1Dx5+1Dy10、NGLi-D2 和 Sec-1^s 高代聚合体的鉴定及应用[D]. 泰安:山东农业大学, 2021:31.
YAN M. Identification and application of high generation polymers of wheat 1Dx5+1Dy10, NGLi-D2 and Sec-1^s [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021:31.
- [38] 张勇, 申小勇, 张文祥, 等. 高分子量谷蛋白 5+10 亚基和 1B/1R 易位分子标记辅助选择在小麦品质育种中的应用[J]. 作物学报, 2012, 38(10):1743.
ZHANG Y, SHEN X Y, ZHANG W X, *et al.* Application of molecular marker-assisted selection of HMW glutenin 5+10 subunit and 1B/1R translocation in wheat quality breeding [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10):1743.
- [39] 刘大欣. 小麦 5+10 亚基、NGLi-D2 和 Sec-1^s 基因聚合体的鉴定及其品质农艺效应[D]. 泰安:山东农业大学, 2019:36.
LIU D X. Identification of wheat 5+10 subunit, NGLi-D2 and Sec-1^s gene polymers and their agronomic effects on quality [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019:36.
- [40] 韩冉, 解树斌, 李欣, 等. 耐盐小麦种质筛选、鉴定与评价[J]. 山东农业科学, 2020, 52(9):12.
HAN R, XIE S B, LI X, *et al.* Screening, identification and evaluation of salt-tolerant wheat germplasms [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(9):12.
- [41] SAQIB M, AKHTAR J, QURESHI H R. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(2):169.