麦类作物学报 2026,46(10):1280－1289
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.02

网络出版时间:2026-06-18
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260618.1332.002

96份小麦-长穗偃麦草衍生系耐盐种质的分析及筛选

刘付和,赵肖琦,任 伟,刘云琪,王长有,刘新伦,
李停栋,陈春环,邓平川,赵继新,吉万全
(西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100)

摘 要:为拓宽耐盐小麦种质资源,对96份小麦-长穗偃麦草衍生系种质幼苗进行150 mmol·L^{-1} NaCl胁迫处理,测定其14个形态指标,并结合主成分分析、隶属函数法、聚类分析等方法进行耐盐性综合评价。结果表明,盐胁迫显著抑制供试材料苗期地上部和地下部生长。盐胁迫下供试材料的苗鲜重、根鲜重等多数指标较对照(0 mmol·L^{-1} NaCl)显著下降,变异系数较高(>25%)。通过主成分分析提取出5个主成分,累计方差贡献率达83.85%,其中苗鲜重、根鲜重、总根长、根系表面积、苗干重、根干重为核心的生物量因子贡献率最高(33.15%),可作为评价苗期耐盐性的关键指标。经聚类分析,供试材料可划分为5个耐盐等级,其中高耐盐材料7份(占7.1%),中等耐盐材料17份(占17.3%)。这些耐盐材料在盐胁迫下能更有效地维持较低的Na^+/K^+比值,表现出更强的离子稳态调控能力。

关键词:小麦;长穗偃麦草;衍生系;苗期;盐胁迫;综合评价
中图分类号:S512.1;S330 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1280-10

Analysis and Screening of 96 Salt-Tolerant Germplasm from Wheat-*Thinopyrum ponticum* Derivative Lines

Liu Fuhe, Zhao Xiaoqi, Ren Wei, Liu Yunqi, Wang Changyou, Liu Xinlun, Li Tingdong, Chen Chunhuan, Deng Pingchuan, Zhao Jixin, Ji Wanquan
(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To broaden the genetic resources for salt-tolerant wheat, 96 wheat-*Thinopyrum ponticum* derivative lines were treated with 150 mmol·L^{-1} NaCl at the seedling stage. Fourteen morphological traits were measured, and a comprehensive evaluation of salt tolerance was carried out using principal component analysis (PCA), the membership function method, and cluster analysis. The results showed that salt stress significantly inhibited both aboveground and underground growth of the seedlings. Most traits, such as shoot fresh weight and root fresh weight, decreased markedly compared to the control, with high coefficients of variation (>25%). PCA extracted five principal components, which together explained 83.85% of the total variance. Among them, a biomass factor (including shoot fresh weight, root fresh weight, total root length, root surface area, shoot dry weight, and root dry weight) had the highest contribution rate (33.15%), which can be used as a key indicator for evaluating salt tolerance at the seedling stage. Cluster analysis classified the 96 lines into five salttolerance grades, including seven highly salttolerant lines (7.1%) and 17 moderately salt-tolerant lines (17.3%). Further measurements of Na^+ and K^+ contents confirmed that salttolerant lines maintained a lower Na^+/K^+ ratio under salt stress, showing a stronger ability to regulate ion homeostasis.

收稿日期:2026-03-09 修回日期:2026-04-13
基金项目:陕西省省级农业专项资金项目(2023－2025);杨凌种业创新中心重点研发项目(ylzy-xm-02)
第一作者 E-mail:2503605896@qq.com(刘付和)
通讯作者 E-mail:jiwanquan2008@126.com(吉万全)

Keywords: Wheat; *Thinopyrum ponticum*; Derivative lines; Seedling stage; Salt stress; Comprehensive evaluation

小麦作为全球三大粮食作物之一,供养着全球约三成的人口,在保障世界粮食安全中占据举足轻重的地位[1]。中国人均耕地不足世界平均水平的一半,加之城镇化和工业化加速发展占用大量耕地,导致小麦总产量难以大幅增长,因而开发后备土地资源成为保障国家粮食安全的关键[2-3]。与此同时,土壤盐渍化作为农业生产中主要的非生物胁迫之一,严重影响作物的生长发育和产量[4-5]。中国已拥有各种类型的盐渍地 9.91×10^7 hm^2[6]。由于不合理施用化肥、灌溉等因素影响,中国现有耕地土壤盐渍化程度在不断加剧,进一步威胁着小麦生产的稳定性[7]。多数盐渍化土壤返盐期与小麦苗期时间一致,小麦苗期高耐盐性是保障苗全、苗齐的关键前提,影响小麦后续生长发育[8]。因此,面对开发盐碱地资源和缓解耕地盐渍化的双重挑战,融合传统育种与现代分子技术,培育抗盐高产的小麦新品种,已成为高效利用盐渍化土壤、实现农业可持续发展的关键途径[9]。

小麦不同品种(系)的耐盐性存在显著差异,筛选并鉴定耐盐种质资源是选育小麦耐盐品种的前提条件[10]。长穗偃麦草作为一种能够在中度或重度盐碱地上生长的牧草,在盐胁迫下具有千粒重高、叶片不易脱落等优点,能储藏丰富的养分[11];作为小麦的三级基因库,其蕴含丰富的抗逆基因,针对该物种进行研究对提升小麦抗逆性和抗病性具有重要价值[12,8]。如今,中国以普通小麦与长穗偃麦草远缘杂交创制培育出一批抗锈、耐旱的新品种[13]。李振声团队育成的小偃 81 是从普通小麦与长穗偃麦草远缘杂交后代中选出的第一代耐盐品种,在含盐量 0.2%～0.3%的土壤中能正常出苗生长,中轻度盐碱地每公顷产量可达 6 000 kg,比常规品种增产 1 500 kg[14]。赵振东团队育成的济麦 22 在含盐量 0.2%左右的中轻度滨海盐碱地中表现适应性强、产量高[15]。因此,利用小麦与长穗偃麦草远缘杂交实现新种质的创新,对增强小麦耐盐性、为国家储备战略种质资源、提高土地利用率等具有重要实践意义。

本研究选取小麦-长穗偃麦草衍生系为试验材料,开展苗期耐盐性鉴定与筛选。通过测定盐胁迫条件下小麦苗期相关生理及生长指标,结合主成分分析与隶属函数法测算综合耐盐指数,并以方差分析、聚类分析等统计方法,对供试材料的苗期耐盐性进行综合评价,以明确苗期耐盐关键评价指标,筛选出优异耐盐种质,为小麦耐盐性遗传改良提供理论参考与种质支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为 96 份小麦-长穗偃麦草衍生系。其中,丰优 1718 与小偃 784 杂交后连续自交 9 代的材料 52 份(以 N1404 开头编号),丰优 1718 与小偃 784 杂交后与丰优 1718 回交连续自交 7 代材料 2 份(以 N1612 开头编号),丰优 1718 与小偃 7630 杂交后连续自交 7 代材料 2 份(以 N1614 开头编号),丰优 1718 与小偃 7630 杂交后与丰优 1718 回交连续自交 6 代材料 2 份(以 N1711 开头编号),丰优 1718 与小偃 693 杂交后连续自交 7 代材料 12 份(以 N1616 开头编号),丰优 1718 与小偃 693 杂交后与丰优 1718 回交连续自交 6 代材料 11 份(分别以 N1712、N1713、N1714、N1715 开头编号),中国春小麦-长穗偃麦草异代换系 5 份[CS-2E(2D)、CS-3E(3B)-2、CS-3E(3B)-1、CS-6E(6B)、CS-7E(7B)],中国春小麦-长穗偃麦草异附加系 5 份(CS-3E、CS-5ES、CS-6EL、CS-7E、CS-7EL)。此外,选择济麦 22 和矮抗 58 分别作为耐盐和盐敏感参考材料[16]。

1.2　供试材料苗期的盐胁迫处理方法

选取饱满、大小长度一致、无破损的种子,10% NaClO 浸泡 5 min,蒸馏水冲洗 3～4 次后滤纸吸干。将小麦(种腹向下)放置在铺有双层滤纸的培养皿培养,每份材料 1 个培养皿,单个培养皿 50 粒种子,置于无光照的培养箱(23 ℃)中发根,2 d 后将材料移入水培盒内,用 1/2 Hoagland 营养液培养 7 d 后对材料进行苗期盐胁迫处理。试验采取的盐溶液为 NaCl 分析纯试剂与 Hoagland 营养液配制而成的 150 mmol·L^{-1} 单盐溶液[17]。以不含盐的 Hoagland 营养液为 CK。

1.3　形态指标测定

对供试材料进行 14 d 盐胁迫处理,用 LA-S 根系扫描仪结合人工测量,测定指标为苗高、苗鲜重(SFW)、根鲜重(RFW)、最大根长、总根长、根

系表面积、总根体积、平均根系直径等苗期形态指标。形态指标测定完成后，将供试材料根和地上部进行杀青、烘干处理，分别称量根干重（RDW）和苗干重（SDW），根据如下公式计算鲜重根冠比（RSFW）、干重根冠比（RSDW）、根含水率（RWR）及苗含水率（SWR）[17]。

1.4 生理指标测定

将材料分为地上部、地下部两部分，烘干后分别放入离心管（2 mL），粉碎过筛，各材料重复 3 次。称 0.2 g 样品放于消解管，加入 5 mL HNO_3、2 mL $HClO_4$ 蒸干，加 10 mL 蒸馏水摇匀，稀释 10 倍，用原子吸收分光光度计（PE-pinAAcle900F）测定地上部、地下部 Na^+、K^+ 含量[17]，并计算 Na^+/K^+。

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 进行数据整理，用 SPSS 进行统计分析。

对供试材料苗期测定的形态学指标求平均值后，计算各形态指标的耐盐系数[10,18]。耐盐系数＝盐胁迫处理各指标的均值/空白处理各指标的均值。

计算各综合指标的隶属函数值$[U(x_i)]$[19]：$U(x_i)=(x_i-x_{min})/(x_{max}-x_{min})$；$i=1,2,\cdots\cdots n$；$x_i$ 为第 i 个综合指标；x_{min} 和 x_{max} 为最小值和最大值。

计算抗盐性综合评价值（D 值）：$D=\sum_{i=1}^{n}[U(x_i)\times W_i]$；$i=1, 2,\cdots\cdots n$；$W_i$ 为第 i 个综合指标权重。

同时，依据对照材料济麦 22、矮抗 58 对试验材料进行耐盐性等级分级，选取代表性材料进行 Na^+、K^+ 含量测定。

2 结果与分析

2.1 供试材料幼苗生长对盐胁迫的响应

盐胁迫下供试材料的苗鲜重（SFW）、根鲜重（RFW）、根系表面（RSA）、总根体积（RV）、苗干重（SDW）及根干重（RDW）的变异系数均高于 25%，根含水率（RWR）、苗含水率（SWR）的变异系数均小于 10%，表明供试材料的大部分性状对盐胁迫的敏感性在群体内存在较大遗传变异（表 1）。与对照（CK）相比，盐胁迫处理下供试材料的苗高（SH）、最大根长（MRL）、SFW、RFW、总根长（TRL）、RSA、RV、平均根系直径（RAD）、SDW、RDW 最大值、最小值、均值均有下降趋势，其中 SH、TRL、SFW、SDW、RFW、RDW 及 RSA 的下降幅度较大，分别为 27.28%、45.07%、43.07%、46.43%、48.96%、45.02%、49.71%，说明盐胁迫对小麦幼苗地上部与地下部的生长发育均产生了明显的抑制作用。通过 t 检验，盐胁迫对供试材料苗期 SH、MRL、SFW、RFW、TRL、RSA、RV、RAD（平均根系直径）、RSFW、SDW、RDW、SWR 和 RWR 的影响达到极显著水平（$P<0.01$），对 RSDW 影响不显著（$P>0.05$）（图 1）。

2.2 供试材料不同性状耐盐系数的相关性

通过对供试材料苗期不同性状耐盐系数进行相关性分析，不同性状间存在一定的相关性（图 2），其中相关系数达到极显著水平（$P<0.01$）的组合有 48 对，达到显著相关水平（$P<0.05$）的组合有 5 对。这些性状中，MRL 与 SH，SFW 与 SH、MRL，RFW 与 SH、MRL、SFW，TRL 与 MRL、SFW、RFW，SDW 与 SH、MRL、SFW、RFW、TRL，RDW 与 SH、MRL、SFW、RFW、TRL、RSA、RV、SDW 均呈极显著正相关，而 RSFW 与 SH、SFW 均呈极显著负相关。由此可见，供试材料的不同性状间存在一定的关联性，在反映耐盐性方面存在不同程度信息重叠，因此适合用主成分分析进行综合评价。

2.3 供试材料耐盐性的主成分分析结果

通过各指标耐盐系数进行主成分分析，将 14 项指标降维为 5 个独立的综合指标即主成分，5 个主成分的累积贡献率达 83.85%（表 2）。其中，第一主成分贡献率最高（33.15%），特征值 4.64，SFW、RFW、TRL、RSA、SDW、RDW 为其主要特征向量，表明小麦耐盐性与生物量呈正相关；第二主成分贡献率次之（19.29%），特征值 2.70，RSDW 为其主要特征向量，说明小麦耐盐性受地上与地下部物质分配的影响；第三主成分贡献率 15.26%，特征值 2.14，其核心特征向量为 RSFW，说明盐胁迫下小麦地上地下部的鲜重分配同样会影响耐盐水平；第四主成分贡献率为 8.28%，特征值 1.16，主要特征向量为 RWR，反映出盐胁迫环境中小麦可通过根细胞主动吸水缓解渗透胁迫；第五主成分贡献率 7.86%，特征值 1.10，主要特征向量为 MRL，表明该指标对小麦耐盐性的提升具有积极作用（表 3）。由此可见，SFW、RFW、TRL、RSA、SDW、RDW 等指标可有效表征供试小麦苗期的耐盐水平，可作为鉴定小麦苗期耐盐性的重要参考指标。

表 1　盐胁迫下供试材料幼苗生长的变化

Table 1　Change of seedling growth of test materials under salt stress

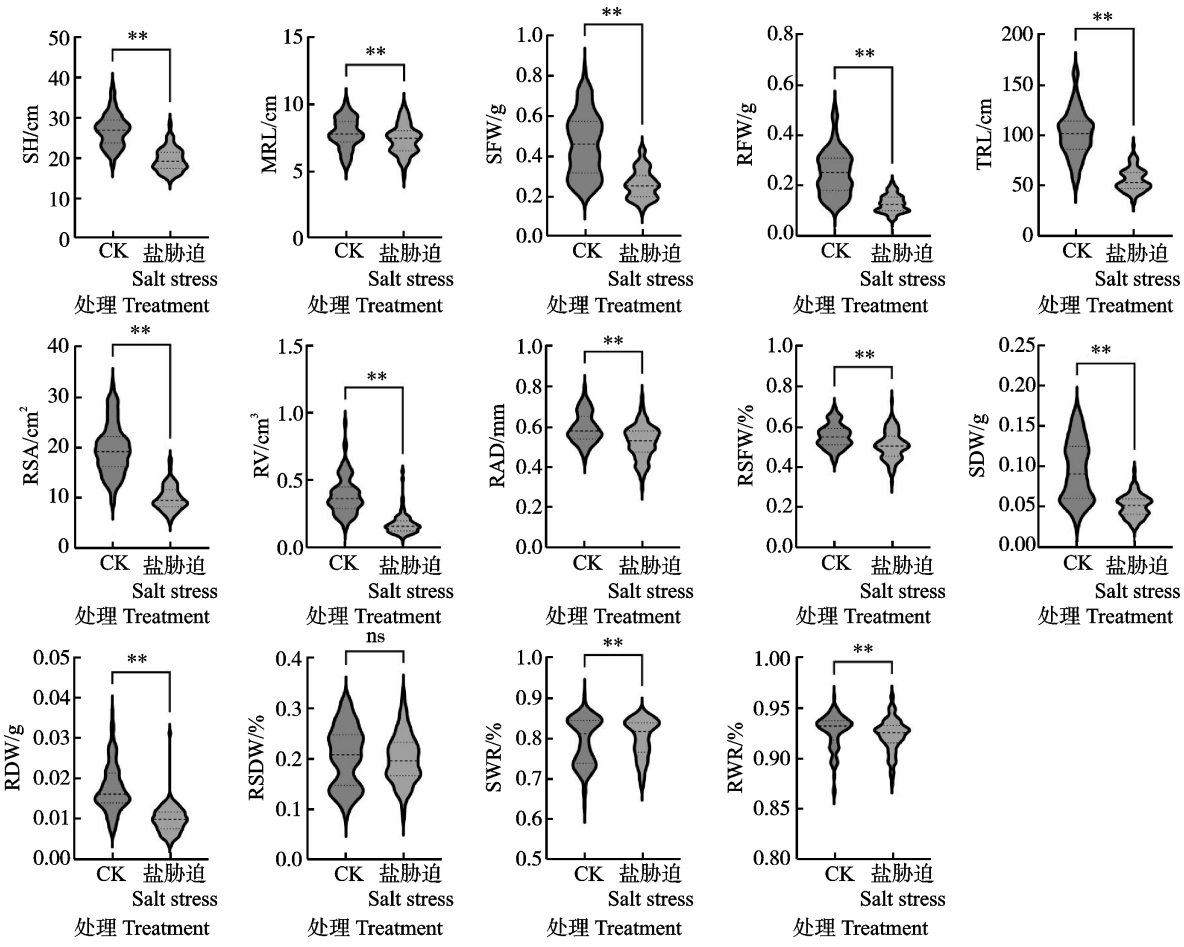
性状 Character	处理 Treatment	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
SH/cm	盐胁迫 Salt stress	28.667	14.333	14.333	19.377	2.881	14.87
	CK	38.000	18.167	19.833	26.646	3.984	14.95
MRL/cm	盐胁迫 Salt stress	10.000	4.600	5.400	7.380	1.086	14.71
	CK	10.333	5.233	5.100	7.826	1.114	14.24
SFW/g	盐胁迫 Salt stress	0.440	0.119	0.321	0.257	0.072	27.94
	CK	0.820	0.198	0.622	0.451	0.151	33.37
RFW/g	盐胁迫 Salt stress	0.211	0.062	0.149	0.127	0.034	27.15
	CK	0.509	0.102	0.406	0.247	0.151	60.90
TRL/cm	盐胁迫 Salt stress	89.473	32.941	56.532	55.763	10.912	19.57
	CK	166.683	48.950	117.733	101.513	23.051	22.71
RSA/cm^2	盐胁迫 Salt stress	17.482	5.125	12.357	9.794	2.450	25.02
	CK	32.375	8.909	23.467	19.475	4.967	25.51
RV/cm^3	盐胁迫 Salt stress	0.561	0.059	0.502	0.166	0.074	44.69
	CK	0.918	0.143	0.775	0.377	0.135	35.77
RAD/mm	盐胁迫 Salt stress	0.745	0.297	0.448	0.513	0.088	17.11
	CK	0.798	0.427	0.372	0.591	0.074	12.44
RSFW/%	盐胁迫 Salt stress	0.725	0.324	0.401	0.502	0.070	13.95
	CK	0.696	0.421	0.275	0.551	0.060	10.81
SDW/g	盐胁迫 Salt stress	0.094	0.022	0.073	0.050	0.014	27.41
	CK	0.171	0.029	0.142	0.094	0.036	38.49
RDW/g	盐胁迫 Salt stress	0.016	0.004	0.012	0.010	0.003	27.54
	CK	0.036	0.007	0.030	0.018	0.006	32.92
RSDW/%	盐胁迫 Salt stress	0.329	0.083	0.246	0.198	0.048	24.31
	CK	0.318	0.088	0.230	0.202	0.059	29.06
SWR/%	盐胁迫 Salt stress	0.865	0.676	0.189	0.798	0.048	6.06
	CK	0.904	0.633	0.271	0.788	0.059	7.45
RWR/%	盐胁迫 Salt stress	0.962	0.875	0.088	0.922	0.016	1.77
	CK	0.961	0.865	0.096	0.926	0.018	1.92

SH:苗高;MRL:最大根长;SFW:苗鲜重;RFW:根鲜重;TRL:总根长;RSA:根系表面积;RV:总根体积;RAD:平均根系直径;RSFW:鲜重根冠比;SDW:苗干重;RDW:根干重;RSDW:干重根冠比;SWR:苗含水率;RWR:根含水率;S:盐胁迫;CK:对照。下文图表同。

SH: Seedling height; MRL: Maximum root length; SFW: Seedling fresh weight; RFW: Root fresh weight; TRL: Total length; RSA: Root surface area; RV: Total root volume; RAD: Average root diameter; RSFW: Fresh weight root-shoot ratio; SDW: Seedling-dry weight; RDW: Root dry weight; RSDW: Dry weight root-shoot ratio; SWR: Seedling water rate; RWR: Root water rate; S: Salt stress; CK: Control. The same in table 3, and figures 1, 2 and 4.

2.4　供试材料耐盐性的综合评价结果

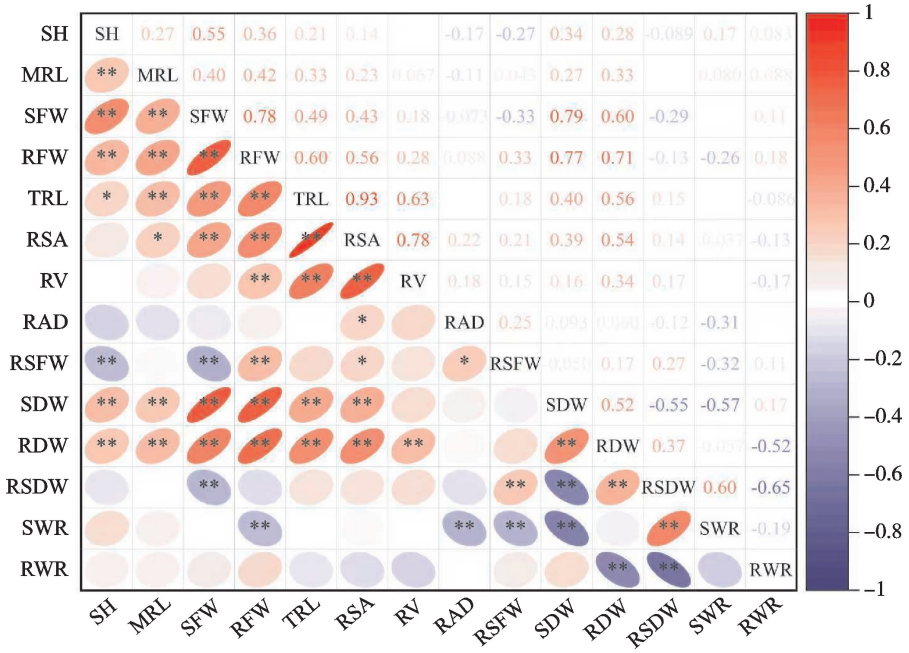
借助 SPSS 软件计算综合指标的隶属函数值与权重值,进而得到综合评价值(*D* 值),再根据 *D* 值进行系统聚类分析(表 4),结果表明,可将供试材料划分为 5 个类群(图 3)。其中,第Ⅰ类群包含 N1404-17-1-3-3-1-4-2-1、N1616-3-6-2-1-2、N1404-17-1-3-3-1-1-2、N1404-22-1-2-2-2-1-1-2、N1616-3-6-2-1-3-2、N1711-6-1-1、N1404-22-1-2-1-2-1-1-A 共 7 份材料,占总材料的 7.1%,*D* 值变化范围为 0.59～0.71,这些材料具有高耐盐性,盐胁迫下 SFW、RFW、TRL、RSA、SDW、RDW 与 CK 差异最小;第Ⅱ类群包含 N1404-17-1-3-3-1-4-2-2、N1404-22-1-2-2-1-2-2-2、N1712-3-2-1-1-2 等共 17 份材料,占总材料的 17.3%,*D* 值范围为 0.50～0.56,这些材料耐盐性中等;第Ⅲ类群包含 24 份材料,占总材料的 24.5%,*D* 值范围为 0.42～0.49,该类材料耐盐性较低;第Ⅳ类群包含 18 份材料,占总材料的 18.4%,*D* 值范围为 0.37～0.42,该类材料属于盐胁迫敏感材料;第Ⅴ类群包含 32 份材料,占总材料的 32.7%,*D* 值范围为 0.16～0.37,这些材料为盐胁迫高敏感材料,*D* 值偏小,在盐胁迫下其 SFW、RFW、TRL、RSA、SDW、RDW 与 CK 差异较大。参考材料济麦 22 和矮抗 58 分别位于第Ⅲ和第Ⅳ类群,*D* 值分别为 0.49 与 0.37。



ns：$P>0.05$；**：$P<0.01$.

图 1 盐胁迫对供试材料不同性状的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on different traits of test materials



*：$P<0.05$；**：$P<0.01$.

图 2 供试材料不同性状耐盐系数的相关性

Fig. 2 Correlation of salt tolerance coefficients of different traits of the test materials

表 2　主成分特征值与贡献率

Table 2　Eigenvalues and contribution rates of principal components

主成分 Principal factor	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	4.642	33.154	33.154
2	2.700	19.288	52.442
3	2.136	15.261	67.703
4	1.160	8.283	75.986
5	1.100	7.860	83.846

2.5　在盐胁迫下耐盐材料的 Na^+、K^+ 含量特征

从第Ⅰ和Ⅱ类群耐盐材料中选取生物量和 *D* 值均较大的材料 N1616-3-6-2-1-2 和 N1712-3-2-2-1,同时从第Ⅴ类群材料中选取生物量较大、*D* 值较小的材料 CS-7EL,以济麦 22 为参考,分别测定 CK 和盐胁迫下这些材料地上部和根系 Na^+、K^+ 含量,并计算其 Na^+/K^+。结果(图 4)显示,盐胁迫后,4 份材料的地上部和根系 Na^+ 含量均呈上升趋势,其中耐盐性较强的 N1616-3-6-2-1-2 和 N1712-3-2-2-1 的 Na^+ 含量上升幅度小于济麦 22 和 CS-7EL;4 份材料的 K^+ 含量均呈下降趋势,耐盐性弱的 CS-7EL 的 K^+ 含量略低于其余 3 份材料;4 份材料的地上部和根系 Na^+/K^+ 均显著上升,其中耐盐性最好的 N1616-3-6-2-1-2 地上部和根系 Na^+/K^+ 上升幅度均最小,耐盐性最弱的 CS-7EL 地上部和根系 Na^+/K^+ 上升幅度均最大。这表明小麦地上部和根系 Na^+/K^+ 变化幅度可以反映其耐盐性强弱,也说明本研究对供试材料耐盐性综合评价结果具有较高的可靠性。

表 3　5 个主成分载荷矩阵

Table 3　Load matrix of the five principal components

性状 Character	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
SH	0.402	−0.107	−0.632	0.069	0.017
MRL	0.467	−0.017	−0.247	−0.015	0.595
SFW	0.786	−0.240	−0.486	−0.038	−0.123
RFW	0.893	−0.194	0.039	−0.178	0.221
TRL	0.805	0.320	0.121	0.320	0.043
RSA	0.796	0.340	0.277	0.348	−0.113
RV	0.535	0.402	0.314	0.476	−0.233
RAD	0.142	−0.094	0.582	−0.091	−0.295
RSFW	0.163	0.094	0.753	−0.192	0.523
SDW	0.777	−0.517	−0.051	−0.203	−0.189
RDW	0.756	0.39	−0.086	−0.496	−0.071
RSDW	−0.089	0.932	−0.028	−0.209	0.202
SWR	−0.224	0.594	−0.564	0.304	0.158
RWR	0.013	−0.746	0.118	0.450	0.383

3　讨论

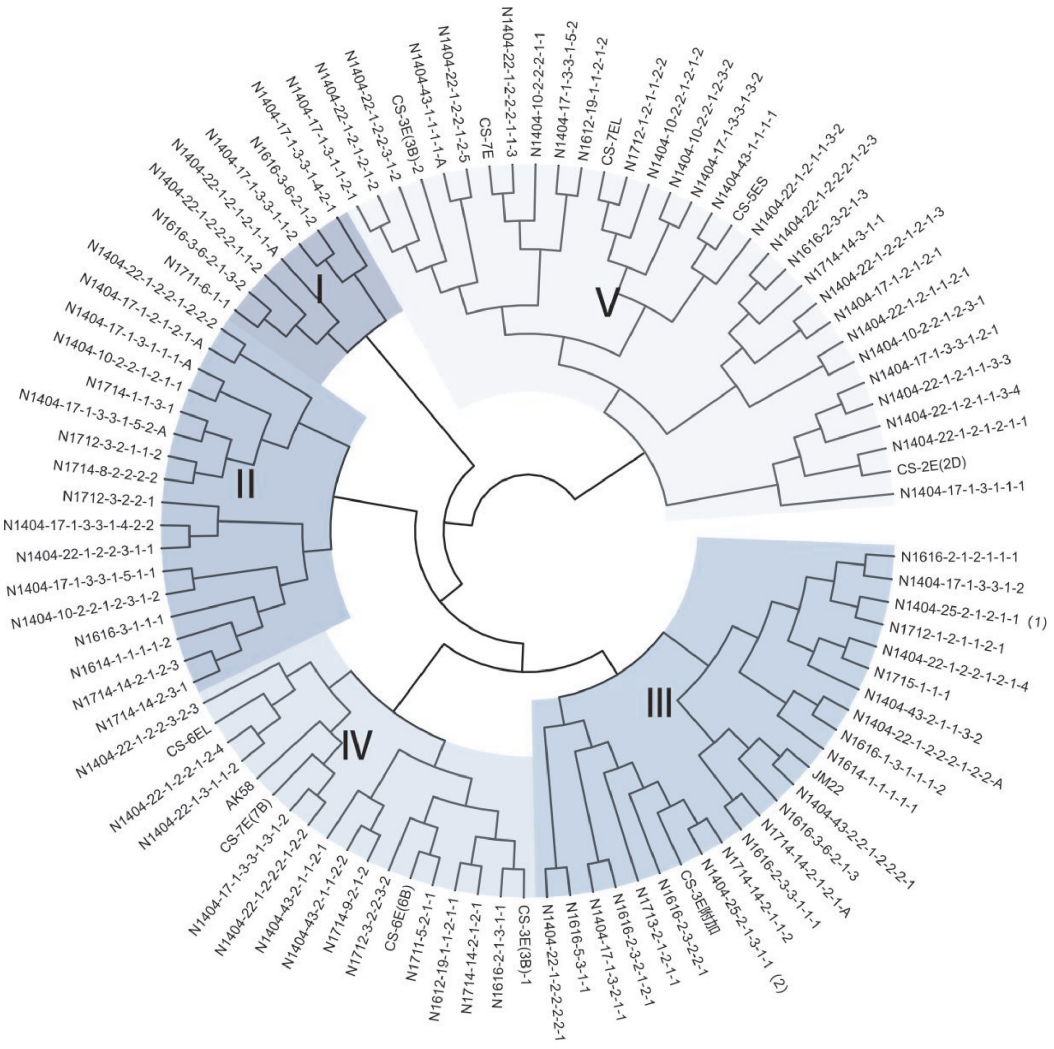
盐胁迫可显著抑制小麦的生长发育进程,并且该效应贯穿小麦全生育周期。研究表明,小麦苗期受盐胁迫的影响最大,也是小麦耐盐性鉴定的关键时期[20]。也有人认为,小麦生育时期中,萌发期和苗期对盐胁迫的敏感度均最高[21]。NaCl 处理会导致小麦株高、叶长以及最大根长缩短,且抑制作用与 NaCl 处理浓度呈正相关[22];NaCl 胁迫也会降低小麦的根长、根数、植株鲜重和干重[23]。本试验结果显示,盐胁迫下,供试材料 14 个与生长发育相关的指标的最大值、最小值及均值较 CK 均不同程度下降,说明盐胁迫对小麦地上部和地下部生长均产生显著抑制作用,这与前人研究结论一致。

小麦耐盐性受多因素调控,不同小麦品种(系)的耐盐性差异需要选用多个指标来分析。陈春舟等[24]提出,根系相关指标可作为评价小麦耐盐性的核心指标。研究发现,济麦 22 的耐盐性表现优秀[18],但作物对盐胁迫的响应机制复杂,多个指标所承载的信息存在一定程度重复,需要用综合评价方法进行探讨[25-26]。例如,王宏凯等[27]

表 4 供试材料综合评价值(*D* 值)

Table 4 Comprehensive evaluation value(*D* value) of the test materials

编号 No.	种质 Germplasm	*D* 值 *D* value	编号 No.	种质 Germplasm	*D* 值 *D* value
1	N1404-10-2-2-1-2-1-2	0.31	50	N1404-17-1-3-3-1-4-2-1	0.71
2	N1404-10-2-2-1-2-3-1	0.29	51	N1404-17-1-3-3-1-5-1-1	0.52
3	N1404-10-2-2-1-2-3-2	0.31	52	N1404-17-1-3-3-1-5-2-A	0.54
4	N1404-10-2-2-2-1-1	0.35	53	N1404-22-1-2-1-2-1-1-A	0.59
5	N1404-17-1-2-1-2-1	0.28	54	N1404-22-1-2-2-1-2-4	0.39
6	N1404-17-1-3-1-1-1	0.16	55	N1404-22-1-2-2-1-2-5	0.37
7	N1404-17-1-3-3-1-2-1	0.25	56	N1404-22-1-2-2-2-1-1-3	0.34
8	N1404-17-1-3-3-1-3-1-2	0.38	57	N1404-22-1-2-2-2-1-2-2-A	0.46
9	N1404-17-1-3-3-1-3-2	0.31	58	N1404-22-1-2-2-2-1-2-3	0.28
10	N1404-17-1-3-3-1-4-2-2	0.51	59	N1404-22-1-2-2-2-2-1	0.43
11	N1404-17-1-3-3-1-5-2	0.35	60	N1404-22-1-2-2-3-1-1	0.51
12	N1404-22-1-2-1-1-2-1	0.29	61	N1404-22-1-2-2-3-2-3	0.38
13	N1404-22-1-2-1-1-3-2	0.32	62	N1404-22-1-3-1-1-2	0.38
14	N1404-22-1-2-1-1-3-3	0.25	63	N1404-25-2-1-2-1-1(1)	0.45
15	N1404-22-1-2-1-1-3-4	0.24	64	N1404-25-2-1-3-1-1(2)	0.44
16	N1404-22-1-2-1-2-1-1	0.20	65	N1404-43-1-1-1-1-A	0.37
17	N1404-22-1-2-1-2-1-2	0.36	66	N1404-43-2-1-1-2-1	0.40
18	N1404-22-1-2-2-1-2-1-3	0.27	67	N1404-43-2-1-1-3-2	0.46
19	N1404-22-1-2-2-1-2-1-4	0.46	68	N1404-43-2-2-1-2-2-2-1	0.49
20	N1404-22-1-2-2-1-2-2-2	0.56	69	N1612-19-1-1-2-1-1	0.42
21	N1404-22-1-2-2-2-1-1-2	0.64	70	N1614-1-1-1-1-1	0.47
22	N1404-22-1-2-2-2-1-2-2	0.38	71	N1614-1-1-1-1-2	0.52
23	N1404-22-1-2-2-3-1-2	0.36	72	N1616-1-3-1-1-1-2	0.47
24	N1404-43-1-1-1-1	0.34	73	N1616-2-1-2-1-1-1	0.45
25	N1404-43-2-1-1-2-2	0.40	74	N1616-2-3-2-1-2-1	0.44
26	N1612-19-1-1-2-1-2	0.35	75	N1616-2-3-2-1-3	0.28
27	N1616-2-1-3-1-1	0.41	76	N1616-3-1-1-1	0.52
28	N1616-2-3-2-2-1	0.44	77	N1616-3-6-2-1-2	0.67
29	N1616-2-3-3-1-1-1	0.48	78	N1616-3-6-2-1-3-2	0.62
30	N1712-1-2-1-1-2-1	0.45	79	N1616-3-6-2-1-3	0.49
31	N1712-1-2-1-1-2-2	0.32	80	N1616-5-3-1-1	0.42
32	N1712-3-2-1-1-2	0.53	81	N1711-5-2-1-1	0.41
33	N1712-3-2-2-3-2	0.41	82	N1711-6-1-1	0.62
34	N1713-2-1-2-1-1	0.43	83	N1712-3-2-2-1	0.50
35	N1714-8-2-2-2-2	0.53	84	N1714-1-1-3-1	0.54
36	N1714-9-2-1-2	0.40	85	N1714-14-2-1-1-2	0.44
37	N1714-14-2-1-2-1	0.42	86	N1714-14-2-1-2-1-A	0.48
38	N1714-14-2-1-2-3	0.52	87	CS-2E(2D)	0.22
39	N1714-14-2-3-1	0.52	88	CS-3E(3B)-2	0.36
40	N1714-14-3-1-1	0.28	89	CS-3E(3B)-1	0.41
41	N1715-1-1-1	0.46	90	CS-6E(6B)	0.41
42	N1404-10-2-2-1-2-1-1	0.55	91	CS-7E(7B)	0.38
43	N1404-10-2-2-1-2-3-1-2	0.52	92	CS-3E 附加(CS-3E Addition)	0.44
44	N1404-17-1-2-1-2-1-A	0.56	93	CS-5ES	0.34
45	N1404-17-1-3-1-1-1-A	0.55	94	CS-6EL	0.39
46	N1404-17-1-3-1-1-2-1	0.36	95	CS-7E	0.34
47	N1404-17-1-3-2-1-1	0.44	96	CS-7EL	0.32
48	N1404-17-1-3-3-1-1-2	0.67	97	JM22	0.49
49	N1404-17-1-3-3-1-2	0.45	98	AK58	0.37



Ⅰ:高耐盐材料;Ⅱ:中等耐盐材料;Ⅲ:低耐盐材料;Ⅳ:盐敏感材料;Ⅴ:盐高敏感材料。

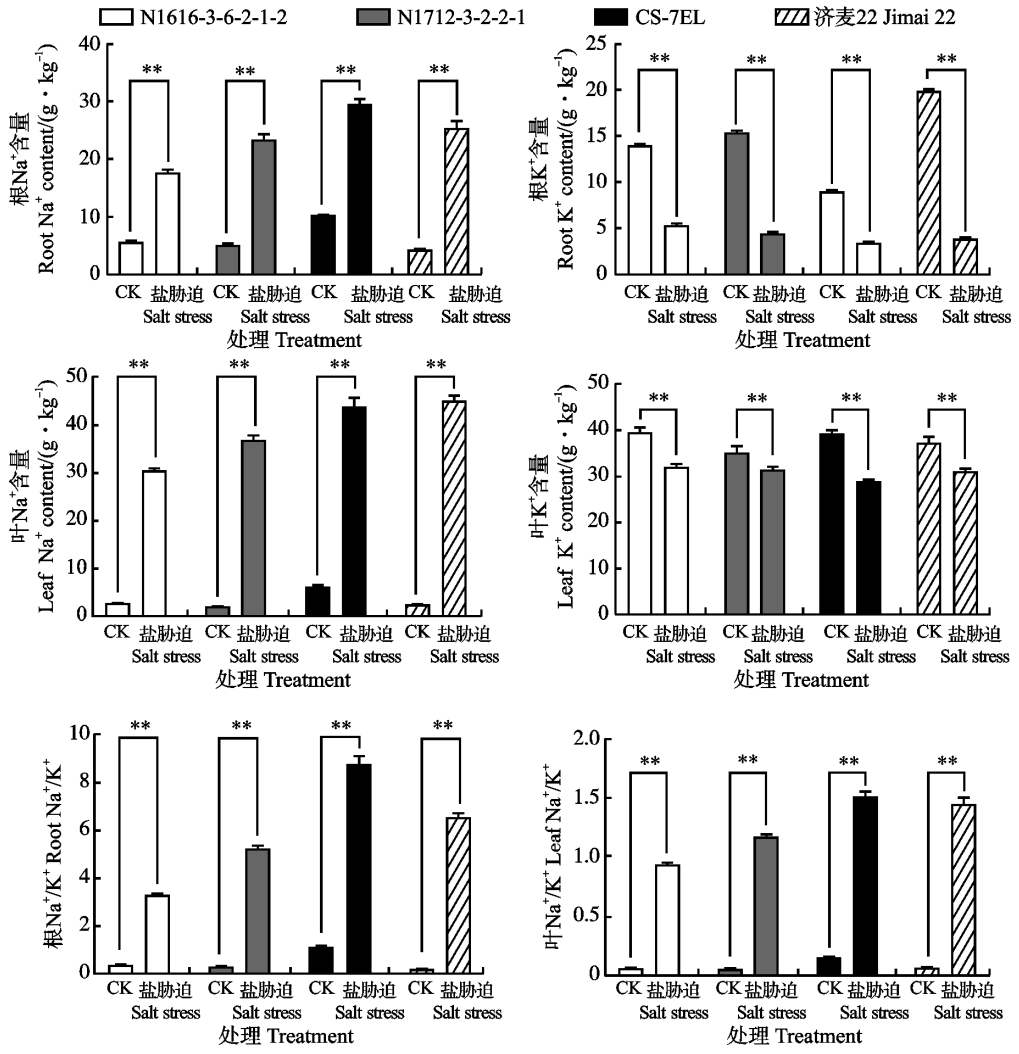
Ⅰ: Highly salt-tolerant materials; Ⅱ: Moderately salt-tolerant materials; Ⅲ: Low salt-tolerant materials; Ⅳ: Salt-sensitive materials; Ⅴ: Salt highly-sensitive materials.

图 3　*D* 值聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of *D* values

采用相关性分析、主成分分析、相对耐盐系数及综合耐盐系数相结合的综合评价方法,筛选出宁春 45、济麦 21 等耐盐性较强的品种;刘彤彤等[28]结合多种方法评价山西省主要小麦品种的耐盐性,并按耐盐性高低将各个品种分为耐盐型、中间型、敏感型。本研究以小麦-长穗偃麦草杂交后代幼苗为材料,经盐胁迫处理后测定多项苗期指标,计算各指标耐盐系数,分析苗期各指标相关性,通过主成分分析将 14 项指标整合为 5 个独立的综合指标,最后通过隶属函数法得到综合评价值(*D* 值),该数值可对盐胁迫下小麦各形态指标进行综合性量化,进而实现耐盐性的综合评价。

徐曼等[29]研究发现,随着盐浓度升高,盐胁迫对长穗偃麦草种子萌发的负效应增强,同时盐胁迫会导致长穗偃麦草的光合作用能力下降;在渗透调节过程中,长穗偃麦草体内 K^+ 含量持续下降,Na^+ 含量逐渐上升,二者存在拮抗效应。小麦种质的 Na^+ 外排能力与其耐盐性呈良好的正相关[30]。叶部 K^+/Na^+ 也可作为小麦耐盐性的核心预测指标[31]。在盐胁迫环境中,耐盐小麦材料会维持较高的 K^+ 积累量与较低的 Na^+ 积累量;尽管盐胁迫下所有材料的 K^+/Na^+ 相较于 CK 均极显著降低,但耐盐材料的比值仍显著高于盐敏感材料,表现出良好的耐盐潜力[17]。本研究对比分析也得出相似的结论,在盐胁迫下,耐盐材料根部的 K^+ 含量较高,而 Na^+ 含量较低,且地上部和根系的 Na^+/K^+ 比值均显著低于盐敏感材料,这进一步证实 Na^+/K^+ 比值可作为小麦耐盐性的鉴定指标。



* *：$P<0.01$.

图 4 盐胁迫后所选材料钠、钾离子含量变化

Fig. 4 Change of Na^+ and K^+ content of the selected materials under salt stress

4 结论

本研究对 96 份小麦－长穗偃麦草衍生系材料进行 150 mmol·L^{-1} NaCl 胁迫，结果表明，盐胁迫显著抑制供试材料苗期地上部与地下部生长，使苗鲜重、根鲜重等多数指标较 CK 显著下降。通过主成分分析将 14 个指标凝练为 5 类综合指标，累计贡献率达 83.85%，核心关联指标包括苗鲜重、根鲜重、总根长、根系表面积、苗干重、根干重；通过聚类分析将供试材料划分为 5 个耐盐等级，最终筛选出 N1616-3-6-2-1-2、N1712-3-2-2-1 等 7 份优异耐盐种质，且耐盐材料在盐胁迫下更易维持 Na^+/K^+ 稳态。

参考文献：

[1]Long S P, Marshall-Colon A, Zhu X G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential [J]. *Cell*, 2015, 161(1): 56.

[2]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，2019：11.
Li F Q. Association study of saline-alkali resistance related traits at wheat germination stage and selection of germplasm resources [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 11.

[3]王红日. 小麦品种苗期耐盐相关性状的 GWAS 分析[D]. 泰安：山东农业大学，2019：11.
Wang H R. Genome-wide association study (GWAS) for salt tolerant traits at seedling stage in wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 11.

[4]Jafar M Z, Farooq M, Cheema M A, *et al*. Improving the performance of wheat by seed priming under saline conditions [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2012, 198(1): 38.

[5]Wakeel A, Farooq M, Qadir M, *et al*. Potassium substitution by sodium in plants [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30(4): 401.

[6]胡 炎，杨 帆，杨 宁，等. 盐碱地资源分析及利用研究展望[J]. 土壤通报，2023，54(2)：489.
Hu Y, Yang F, Yang N, *et al*. Analysis and prospects of saline-alkali land in China from the perspective of utilization [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 489.

[7]Song F P, Zhuge Y P, Guo X S, *et al*. Optimizing irrigation and fertilization can improve degraded saline soils and increase wheat grain yield [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(1):494.

[8]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*. Evaluation for salt tolerance of wheat cultivars [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012,13(2):189.

[9]时丽冉,白丽荣,吕亚慈,等. 小麦杂交品种衡 9966 苗期耐盐性分析[J]. 作物杂志,2018(6):149.
Shi L R, Bai L R, Lu Y C, *et al*. Analysis of salt tolerance at the seedling stage of wheat hybrid variety Heng 9966 [J]. *Crops*, 2018(6):149.

[10]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.

[11]佟春艳. 筛选耐盐长穗偃麦草种质资源[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2020:11.
Tong C Y. Screening germplasms of *Thinopyrum ponticum* with salt resistance [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020:11.

[12]李宏伟,郑 琪,李 滨,等. 长穗偃麦草分子育种基础研究进展[J]. 植物学报,2022,57(6):792.
Li H W, Zheng Q, Li B, *et al*. Research progress on the aspects of molecular breeding of tall wheatgrass [J]. *Bulletin of Botany*, 2022,57(6):792.

[13]李家洋. 李振声论文选集[M]. 北京:科学出版社,2007:12.
Li J Y. Selected papers of Li Zhensheng [M]. Beijing: Science Press, 2007:12.

[14]李荣娥,冯学赞,谢志霞,等. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心的研究热点与研究方向变化分析:基于文献计量学分析方法[J]. 中国生态农业学报,2021,26(10):1429.
Li R E, Feng X Z, Xie Z X, *et al*. Changes of research hotspots and trend of Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology: Chinese Academy of Sciences based on bibliometric analysis [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,26(10):1429.

[15]孙海栓,张虎虎,程武增,等. 10 个小麦品种在滨海盐碱地的适应性研究[J]. 山东农业科学,2016,48(6):20.
Sun H S, Zhang H H, Cheng W Z, *et al*. Adaptability of ten wheat varieties in coastal saline area [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016,48(6):20.

[16]张华宁,刘子会,李国良,等. 盐胁迫下钾吸收途径的抑制对小麦叶片 K^+、Na^+ 含量的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(11):1428.
Zhang H N, Liu Z H, Li G L, *et al*. Effect of TEA/NEM/Ba$(NO_3)_2$ on K^+ and Na^+ content in leaves of wheat seedlings under salt stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017,37(11):1428.

[17]李若璇. 小麦-滨麦、华山新麦草衍生系耐盐种质筛选及分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:26.
Li R X. Screening and analysis of salt-tolerant germplasm of wheat-*Leymus mollis* and *Psathyrostachys huashanica* Keng derivative lines [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024:26.

[18]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.

[19]陈 新,吴 斌,张宗文. 燕麦种质资源重要农艺性状适应性和稳定性评价[J]. 植物遗传资源学报,2016,17(4):577.
Chen X, Wu B, Zhang Z W. Evaluation of adaptability and stability for important agronomic traits of oat(*Avena* spp.) germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016,17(4):577.

[20]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 salinity tolerance at germination and seedling stages in wheat germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013,14(4):620.

[21]朱志华,昌小平,宋景芝. 耐盐性鉴定及其研究[M]//庄巧生. 中国小麦育种研究进展:1991-1995. 北京:中国农业出版社,1996:284.
Zhu Z H, Chang X P, Song J Z. Salt tolerance identification and its research [M]//ZHUANG Q S. Advance in wheat breeding research in China. Beijing: China Agriculture Press, 1996:284.

[22]豆昕桐,王英杰,王华忠,等. 耐盐和盐敏感型小麦品种对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性差异[J]. 生态学报,2021,41(12):4976.
Dou X T, Wang Y J, Wang H Z, *et al*. Physiological response and tolerance difference of two wheat varieties to NaCl stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(12):4976.

[23]刘 青,姚立蓉,马小乐,等. 124 份小麦种质资源萌发期耐盐和抗旱性综合评价 [J]. 甘肃农业大学学报,2026,61(2):56.
Liu Q, Yao L R, Ma X L, *et al*. Comprehensive evaluation of salt and drought resistance of 124 wheat germplasm resources at germination stage [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2026,61(2):56.

[24]陈春舟,马占军,孟亚雄,等. 小麦种质资源抗旱耐盐性评价及种质筛选[J]. 分子植物育种,2021,19(14):4820.
Chen C Z, Ma Z J, Meng Y X, *et al*. Evaluation and screening of wheat germplasm resources for drought and salt tolerance [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021,19(14):4820.

[25]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(8):1076.
Guo C, Hu S Y, Zheng Q H, *et al*. Identification of salinity tolerance of some American wheat germplasm [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015,35(8):1076.

[26]钮福祥,华希新,郭小丁,等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探[J]. 作物学报,1996,22(4):392.
Niu F X, Hua X X, Guo X D, *et al*. Studies on several physiological indexes of the drought resistance of sweet potato and its comprehensive evaluation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996,22(4):392.

[27]王宏凯,赵靖怡,郭宏娜,等. 小麦种质资源耐盐性鉴定[J]. 麦类作物学报,2024,44(2):253.
Wang H K, Zhao J Y, Guo H N, *et al*. Identification of salt tolerance of wheat germplasm resources [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024,44(2):253.

[28]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.

[29]徐 曼. 盐碱胁迫对长穗偃麦草种子萌发、生长及生理特性的影响[D]. 长春:东北师范大学,2020:12.
Xu M. Effects of saline-alkali stresses on seed germination, growth and physiological traits of *Elytrigia elongate* L. [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020:12.

[30]Cuin T A, Bose J, Stefano G, *et al*. Assessing the role of root plasma membrane and tonoplast Na^+/H^+ exchangers in salinity tolerance in wheat: In planta quantification methods [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2011,34(6):947.

[31]Zhu M, Shabala S, Shabala L, *et al*. Evaluating predictive values of various physiological indices for salinity stress tolerance in wheat [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2016,202(2):115.