

网络出版时间:2026-06-29

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260629.1311.008

42 份宁春系列小麦品种萌发期与苗期耐盐性评价

尚亚伟^{1,3}, 张莹浩^{1,3}, 郭宏娜^{1,3}, 艾明军^{1,3}, 徐芳媛^{1,3}, 王骏¹, 黄天荣², 文卿琳^{1,3}

(1. 塔里木大学农学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 新疆农业科学院作物研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;

3. 南疆干旱区特色作物遗传改良与高效生产兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:新疆的南疆地区降水稀少、气候干旱, 耕地不同程度盐渍化, 严重影响小麦生长并导致小麦产量下降, 因此挖掘耐盐种质资源是提升南疆粮食产能的有效途径。本研究以宁夏引黄灌区及周边区域审定的42份春小麦品种为材料, 在 $150\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下测定萌发期、苗期的发芽指标及表型指标, 综合评价42份春小麦品种的耐盐性。结果表明, 大多数小麦品种在萌发期与苗期各指标相对值小于100%, 萌发期发芽势、发芽指数、活力指数的变异系数大于20%; 苗期苗高、地上部分鲜重和干重及根长的变异系数大于20%, 不同性状间呈极显著或显著正相关。通过系统聚类分析将42份春小麦材料划分为3类, 其中耐盐型材料15份, 中间型材料20份, 敏感型材料7份; 宁春3号、宁春8号、宁春9号、宁春12号、宁春35号等耐盐性较好, 表现出较强逆境适应性, 初步验证了跨区域引进宁夏春小麦种质资源的可行性, 为南疆耐盐品种选育提供基础材料与参考。

关键词:春小麦; 萌发期; 苗期; 耐盐性; 综合评价

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)08-1102-08

Evaluation of Salt Tolerance of 42 Ningchun Spring Wheat Varieties at Germination and Seedling Stages

Shang Yawei^{1,3}, Zhang Yinghao^{1,3}, Guo Hongna^{1,3}, Ai Mingjun^{1,3},

Xu Fangyuan^{1,3}, Wang Jun¹, Huang Tianrong², Wen Qinglin^{1,3}

(1. Tarim University Faculty of Agriculture, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Institute of Crop Sciences, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China; 3. Key Laboratory of Genetic Improvement and Efficient Production for Specialty Crops in Arid Southern Xinjiang, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: Xinjiang, especially in the southern Xinjiang region, precipitation is scarce and the climate is arid. Land in this area suffers from varying degrees of salinization, which affects wheat growth and leads to reduced yields. Screening salt-tolerant germplasm resources is an effective approach to improving grain production capacity in southern Xinjiang. In this study, 42 spring wheat varieties approved and released in the Yellow River Irrigation District of Ningxia and its surrounding areas were used as experimental materials. Under $150\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl stress, germination and phenotypic indices were measured at the germination and seedling stages, and relative values of the 13 indices were calculated to comprehensively evaluate the salt tolerance of different varieties. The results showed that the relative values of most indices at the germination and seedling stages were below 100%. The coefficients of variation for germination energy, germination index, and vigor index at the germination stage exceeded 20%. At the seedling stage, the coefficients of variation for seedling height, above-ground

收稿日期: 2026-02-01 修回日期: 2026-04-16

基金项目: 兵团农业关键核心技术攻关项目; 兵团科技计划重大科技项目(2025AA014); 兵团重点领域科技攻关计划项目(2024AB008); 塔里木大学校长基金生物育种专项(TDZKYZ202601)

第一作者 E-mail: sywks2008@163.com(尚亚伟)

通讯作者 E-mail: wqlzky@163.com(文卿琳)

fresh weight, above-ground dry weight, root dry weight, and root length were greater than 20%. Significant positive correlations were observed among the indices. The tested materials were classified into three categories via hierarchical cluster analysis: 15 salt-tolerant genotypes, 20 intermediate genotypes, and 7 sensitive genotypes. Ningchun 3, Ningchun 8, Ningchun 9, Ningchun 12, and Ningchun 35 exhibited superior salt tolerance and strong stress adaptability, which preliminarily verifies the feasibility of cross-regional introduction of Ningchun spring wheat germplasm resources, and providing material basis and methodological reference for breeding new salt-tolerant wheat varieties in southern Xinjiang.

Keywords: Spring wheat; Germination stage; Seedling stage; Salt tolerance; Comprehensive evaluation

受全球气候变化及不合理灌溉等因素影响,土壤盐渍化不断加剧,预计 2050 年全球超过 50% 的耕地面积可能受到盐渍化威胁^[1-2]。与此同时,全球人口预计将增至 97 亿^[3],对粮食安全生产提出了更为严峻的挑战。中国盐碱地分布广泛,从东部沿海湿润区延伸到西北干旱区^[4],具备农业开发利用潜力的面积约 $3.33 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。新疆盐碱荒地约 $7.73 \times 10^6 \text{ hm}^2$,合理开发利用后每年可新增粮食 $9.5 \times 10^9 \text{ kg}$,是保障国家粮食安全的重要战略后备区^[5]。新疆盐碱地主要分布在南疆,土壤盐分多以氯化物、硫酸盐为主^[6-7],强烈的蒸发导致表层盐分迁移并形成盐壳,制约农业生产力的发展。南疆是新疆小麦的主产区,单产(平均约 $5.55 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)低于全疆平均水平^[8]。小麦是制作拉面、饅等面食的原料,其生产直接关乎区域粮食安全和社会稳定。近年来,国内外学者围绕作物耐盐种质资源的筛选与利用开展了大量研究,多聚焦于早期鉴定方法与核心评价指标的建立。Olimjonova 等^[9]研究指出,种子萌发至幼苗早期是小麦响应盐胁迫最敏感的“临界期”,适于开展早期快速筛选。在此基础上,刘旭等^[10]、Alom 等^[11]通过测定萌发特性、幼苗生长参数,运用多元统计分析方法评估不同材料的耐盐性。Tao 等^[12]发现,在 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,小麦苗期农艺与生理指标中,耐盐型材料茎含水量和茎干重较高;Xu 等^[13]采用水培法计算发芽期与苗期的综合耐盐指数,评价了 70 个不同来源小麦品种在多浓度盐胁迫下的耐盐性,筛选出 SN41、Emam、YN301、JM262 等强耐盐性品种。Zhou 等^[14]认为,盐胁迫浓度大于 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,所有大豆种质的相对萌发率、萌发潜能、根长和芽长均低于对照组。

目前,南疆盐渍地区春小麦的全生育期系统性耐盐综合评价体系还不完善。宁夏引黄灌区及

周边区域与南疆塔里木盆地纬度相近,光热资源相似,农业气候特征具有可比性,为引进宁夏春小麦品种并在南疆开展耐盐性评价与筛选提供了生态学基础。因此,本研究以 42 份宁春系列小麦为材料,在 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下开展萌发期与苗期耐盐性综合评价,以期完善南疆区域小麦耐盐性鉴定方法与评价指标,筛选适应南疆盐碱地小麦生产的耐盐种质资源,为跨区域引种及耐盐品种选育提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

供试品种为宁夏审定的 42 份春小麦品种,对照品种为新疆春小麦主要品种新春 6 号,均由塔里木大学南疆干旱区特色作物遗传改良与高效生产实验室提供。试验设置 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (对照, CK) 和 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl (盐胁迫, ST), 发芽盒尺寸为 $13 \text{ cm} \times 19 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$, 内平铺 3 层滤纸。选用籽粒饱满、均匀的种子,分别于 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸馏水浸种 10 h,用高锰酸钾溶液对种子表面消毒 5 min,蒸馏水冲洗干净后存放备用。在发芽盒滤纸上等距整齐摆放 100 粒种子,放置完毕后使用相应注射器沿发芽盒内壁缓慢注入预设好的处理溶液各 20 mL,使滤纸完全湿润且盒底无明显积液。注入后立即盖上盒盖,将所有发芽盒置于塔里木大学农学院人工气候室内培养,14 h/10 h (昼/夜),温度为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}/20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜),相对湿度 50%~60%。培养期间,每日观察补充对应处理溶液,使盒内滤纸保持湿润。以胚根长 $\geq$ 种子长、胚芽长 $1/2$ 种子长为发芽标准,记录每日发芽的种子数量。设置 3 次重复。培养 7 d 后,从每个品种的对照和盐胁迫处理中分别选取小麦幼苗,测定苗高、茎粗、地上部分鲜重和地下部分鲜重、根长、根数等指标。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 萌发期发芽指标测定

根据统计结果分别计算发芽率(germination rate, GR)、发芽势(germination energy, GE)、发芽指数(germination index, GI)和活力指数(vigor index, VI),公式^[15]如下:

$$GR = 7 \text{ d 发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100\% \quad (1)$$

$$GE = 3 \text{ d 发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100\% \quad (2)$$

$$GI = \sum (G_t / D_t) \quad (3)$$

式中, G_t 为 t 日种子萌发数; D_t 为对应的萌发日数。

$$VI = \text{发芽指数} \times \text{幼苗鲜重} \quad (4)$$

1.2.2 苗期表型指标的测定

叶绿素含量:用 SPAD-502plus 型叶绿素仪(Konica Minolta Optics, 日本, 东京)测量叶绿素相对含量(SPAD 值)。

形态指标:用直尺和游标卡尺分别测量苗高(seedling height, SH)和茎粗(stem diameter, SD)。使用 EPSON 扫描仪(Seiko Epson Corp, 日本, 东京)对根系进行扫描,用 LA-S 软件分析不同品种根系图片,得出根长(root length, RL)和根数(root number, RN)。

生物量:将幼苗从茎基部分开使用电子天平依次称量地上部分鲜重(above-ground fresh weight, AFW)与地下部分鲜重(root fresh weight, RFW)。称量完成后样品放入纸袋中,置于 105 °C 烘箱中杀青 30 min 后,温度调至 80 °C 烘干至恒重,冷却后称取地上部分干重(above-ground dry weight, ADW)和地下部分干重(root dry weight, RDW)。

1.2.3 测定数据统计分析

采用 Excel 对萌发期与苗期的各项测定指标的数据进行整理和初步计算,形成春小麦盐胁迫各性状指标的原始数据,用 SPSS 27.0 进行主成分和相关性分析。用 OriginPro 2021 软件根据 D 值绘制聚类分析树状图。

各指标的相对值=(盐胁迫测定值/对照测定值)×100% (5)

式中,相对值表示盐胁迫后各指标相对于正常条件下的变化程度^[15]。采用公式(5)计算各指标的相对值,并用于后续描述性统计、相关性分析、主成分分析及综合耐盐评价(D 值),通过计

算相对值降低不同品种间固有的本底差异,使各品种的盐胁迫响应程度处于同一水平上,从而客观比较不同品种的耐盐性差异。

对不同小麦品种各指标的相对值进行主成分分析,计算隶属函数值,确定权重值,计算耐盐性综合评价 D 值,隶属函数值越大,表明其耐盐性越强。具体计算公式^[16]如下:

$$\text{各综合指标的隶属函数值: } U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中, $U(X_i)$ 表示第 i 个综合指标的隶属函数值, X_i 表示第 i 个综合指标, $X_{\min}$ 与 $X_{\max}$ 分别表示第 i 个综合指标的最小值与最大值。

$$\text{各综合指标的权重: } W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (7)$$

式中, W_i 表示第 i 个评价指标的权重, P_i 表示 i 评价指标的方差贡献率。

综合耐盐评价:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W_i] \quad (8)$$

式中, D 值为各品种在盐胁迫条件下利用综合指标评价所得综合耐盐评价。

2 结果与分析

2.1 不同春小麦品种发芽指标变化

由表 1 可知,盐胁迫下不同小麦品种的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均不同程度下降(相对值小于 100%),表明种子萌发受到普遍抑制。各指标相对值的变异系数范围为 18.74%~25.85%,其中发芽势、发芽指数和活力指数的变异系数均大于 20%,说明不同品种间的主要发芽指标存在较大差异,150 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下可有效区分不同品种萌发期的耐盐性。活力指数既能反映种子发芽率、发芽速度,又能反映生长势及生长活力,所有材料活力指数变化范围为 18.02%~63.92%,不同品种间的种子活力水平存在显著差异,其中活力指数最高的品种是宁春 3 号(63.92%),表明其在盐胁迫下维持高活力的能力最强;活力指数最低的品种是宁春 5 号(18.02%),表明其种子活力受盐胁迫抑制最为明显。此外,同一品种各发芽指标的变化幅度不同,如宁春 53 号发芽率 68.13%,活力指数仅有 20.80%。基于发芽势、发芽率、发芽指数等指标的评估,难以全面反映不同品种耐盐性,因此下一步需结合苗期苗高、生物量、根系等指标进行综合评价。

表 1 NaCl 胁迫下春小麦萌发期各发芽指标描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of germination indices for spring wheat at germination stage under NaCl stress

指标 Index	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
GR/%	95.18	42.22	69.94	0.13	18.74
GE/%	91.14	27.85	62.80	0.16	24.86
GI/%	84.30	30.73	53.78	0.11	20.32
VI/%	63.92	18.02	41.63	0.11	25.85

GR:发芽率;GE:发芽势;GI:发芽指数;VI:活力指数。表中数据均为相对值。下同。

GR: Germination rate; GE: Germination energy; GI: Germination index; VI: Vigor index. All data in the table are relative values. The same in table 2.

2.2 不同春小麦品种苗期表型指标变化及相关性分析

盐胁迫下春小麦苗期各指标的平均值在品种间存在极显著差异($P<0.01$)。其中,地下部分干重受抑制最明显,降幅达 53.18%;根数所受影响较小,降幅仅为 10.12%(表 2)。部分品种茎粗表现有增加趋势(相对值大于 100%),如宁春 50 号茎粗为 106.17%,其余性状(如地上部分鲜重、地上部分干重等)均不同程度下降(相对值小于 100%)。茎粗在盐胁迫下的增加可能与植株在逆境下通过茎秆增粗维持机械支撑能力、或与细胞壁增厚等适应性响应有关。各性状相对值的变异系数较大,最小值为 7.85%,最大值为 39.32%。其中根长(24.77%)、苗高(23.18%)、地上部分鲜重(23.68%)和地上部分干重(20.77%)变异系数大于 20%,表明不同品种间上述指标的耐盐性存在较大差异,对盐胁迫响应敏感,可作为耐盐性鉴定的重要指标。地下部分干重的平均相对值仅为 46.82%,而变异系数却高达 39.32%,为所有指标中最高,反映该性状在不同品种间差异最大,可作为耐盐鉴定的关键指标。

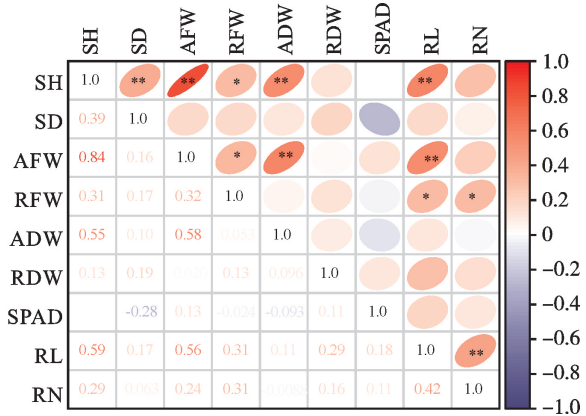
相关性分析热图(图 1)显示,苗高与地上部分鲜重($r=0.84$)、根长($r=0.59$)、地上部分干重($r=0.56$)呈极显著相关。地上部分鲜重与地上部分干重($r=0.59$)、根长($r=0.56$)间均存在极显著相关性。地下部分鲜重与根数($r=0.31$)、根长($r=0.31$)呈显著正相关。根长、根数之间呈显著正相关。茎粗、SPAD 值与其他表型指标关联较弱。结果表明,大多数指标之间存在显著或者极显著相关性,单一相关性分析难直接反映各指标在苗期耐盐性中的作用,还需采用主成分分析等多元综合统计的方法,对不同品种耐盐性进行系统分析分类。

表 2 NaCl 胁迫下春小麦苗期各表型指标的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of phenotypic traits for spring wheat at seedling stage under NaCl stress

指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
SH/%	28.56	95.01	63.79	0.15	23.18
SD/%	70.30	106.17	91.99	0.07	7.85
AFW/%	27.34	85.37	59.98	0.14	23.68
RFW/%	55.38	99.00	84.56	0.11	13.08
ADW/%	31.87	90.24	63.96	0.13	20.77
RDW/%	18.71	85.52	46.82	0.18	39.32
SPAD/%	63.59	96.28	83.67	0.08	9.78
RL/%	27.42	99.02	67.00	0.17	24.77
RN/%	62.86	98.82	89.88	0.09	9.52

SH:苗高;SD:茎粗;AFW:地上部分鲜重;RFW:地下部分鲜重;ADW:地上部分干重;RDW:地下部分干重;SPAD:叶绿素含量;RL:根长;RN:根数。以下图表同。

SH: Seedling height; SD: Stem diameter; AFW: Above-ground fresh weight; RFW: Root fresh weight; ADW: Above-ground dry weight; RDW: Root dry weight; SPAD: SPAD value; RL: Root length; RN: Root number. The same in Fig. 1 and table 3.



* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下有显著相关性。图中所有指标均采用相对值进行相关性分析。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively. All indices shown in the figure are relative values, and the correlation analysis was performed based on these relative values.

图 1 NaCl 胁迫下春小麦各表型指标的相关性分析热图
Fig. 1 Heatmap of correlation analysis for phenotypic traits in spring wheat under NaCl stress

2.3 不同春小麦品种苗期耐盐性主成分分析

以累计贡献率 75%为阈值提取主成分,共获得 4 个相互独立的主成分,贡献率依次为 34.896%、15.914%、13.787%、10.795%,累计贡献率达 75.392%,可作为耐盐鉴定综合指标(表 3)。各主成分的载荷分析显示,第 I 主成分的方差贡献率最高,在苗高(0.910)、地上部分鲜重(0.864)和根长(0.745)上具有较高载荷,可作为评价盐胁迫下生长保持能力的关键指标。第 II 主成分在

表 3 NaCl 胁迫下春小麦各主成分分析
Table 3 Principal component analysis of spring wheat under NaCl stress

指标 Index	主成分 Principal component			
	I	II	III	IV
SH	0.910	−0.215	−0.096	−0.006
SD	0.386	−0.359	0.639	0.142
AFW	0.864	−0.155	−0.351	−0.087
RFW	0.500	0.209	0.322	−0.428
ADW	0.545	−0.531	−0.373	0.221
RDW	0.289	0.305	0.373	0.753
SPAD	0.078	0.646	−0.526	0.238
RL	0.745	0.363	0.032	0.031
RN	0.473	0.515	0.201	−0.294
特征值 Eigenvalue	3.141	1.432	1.241	0.972
贡献率 Contribution ratio/%	34.896	15.914	13.787	10.795
累积贡献率 Cumulative contribution ratio/%	34.896	50.810	64.597	75.392

SPAD(0.646)和根数(0.515)上载荷较高。第Ⅲ主成分茎粗(0.639)、地下部分干重(0.373)较相关。第Ⅳ主成分地下部分干重(0.753)独占高载荷,表明根系干物质积累作为一个相对独立的耐盐响应策略,其不同品种间变异较大,可作为关键的鉴别指标。通过主成分分析成功将多个相关性较高的表型指标降维为少数几个相互独立的综合因子,相关因子从不同生物学侧面(整体生长、生理稳态、结构分配)量化了不同品种的耐盐性,

为后续构建基于多维度贡献的隶属函数综合评价模型提供了依据。

基于不同小麦品种的主成分值,采用隶属函数法计算出 42 份春小麦品种苗期的综合耐盐评价价值(D 值)(表 4)。 D 值变化范围为 0.33~0.77,平均值为 0.56,变异系数为 20.75%。进一步说明不同品种间耐盐性存在较大的差异,且数据具有良好的离散度。

2.4 春小麦品种苗期耐盐性评价及分类

基于不同品种的综合评价价值(D 值),通过聚类分析将供试材料划分为耐盐型、中间型和敏感型 3 个类别(图 2)。其中,耐盐型材料有 15 份,占供试材料的 35.71%,其 D 值 ≥ 0.62 ,代表品种有宁春 3 号、宁春 8 号、宁春 9 号、宁春 12 号、宁春 35 号等。中间型材料有 20 份,占 47.62%,其 D 值介于 0.51~0.59 之间,代表品种有宁春 18 号、宁春 43 号、宁春 45 号、宁春 46 号、宁春 53 号等。敏感型材料有 7 份,占 16.67%,其 D 值 ≤ 0.51 ,代表品种有宁春 27 号、宁春 52 号等。结果表明, D 值能够有效区分不同品种的耐盐性水平,可作为综合评价春小麦苗期耐盐能力的可靠指标。

耐盐型品种宁春 9 号、宁春 12 号等的 D 值较高,其亲本来源具有丰富的遗传多样性(表 4)。如宁春 9 号的亲本组合为大头麦/内乡 5 号//73-111-15,其中大头麦为宁夏地方品种,内乡 5 号为河南引进材料,73-111-15 为优异杂交后代。耐盐品种亲本组合的多样性拓宽了品种的遗传基础。

表 4 部分代表性春小麦品种 D 值及耐盐性
Table 4 D value and salt tolerance categories of some representative spring wheat varieties

品种 Variety	亲本组合 Parental combination	D 值 D value	耐盐类别 Salt tolerant category
宁春 9 号 Ningchun 9	大头麦/内乡 5 号//73-111-15	0.77	耐盐型材料 Salt-tolerant type
宁春 12 号 Ningchun 12	广麦 74/黑 80	0.72	
宁春 35 号 Ningchun 35	宁春 16 号/永 A71	0.70	
宁春 8 号 Ningchun 8	明尼 2063	0.69	
宁春 3 号 Ningchun 3	大头麦(6628/96 号)/内乡 5 号	0.69	
宁春 39 号 Ningchun 39	永 833/宁春 4 号	0.69	
宁春 4 号 Ningchun 4	索诺拉 64/宏图	0.68	
宁春 57 号 Ningchun 57	980-13/陇春 4099	0.67	
宁春 56 号 Ningchun 56	宁春 4 号/宁春 27 号	0.66	
宁春 16 号 Ningchun 16	SG(81RS10)/宁春 4 号//宁春 4 号	0.66	
宁春 29 号 Ningchun 29	宁春 4 号//宁春 13/黑 6	0.39	敏感型材料 Sensitive type
宁春 27 号 Ningchun 27	74-4-1/老春麦//会 706-2	0.39	
宁春 52 号 Ningchun 52	永 430/宁作 230	0.38	
宁春 37 号 Ningchun 37	WC-20(品引 1 号)	0.36	
宁春 30 号 Ningchun 30	甘肃临夏南繁队引入系选	0.36	
宁春 14 号 Ningchun 14	永良 5 号/M077	0.34	
宁春 51 号 Ningchun 51	永 3002/宁春 4 号	0.33	

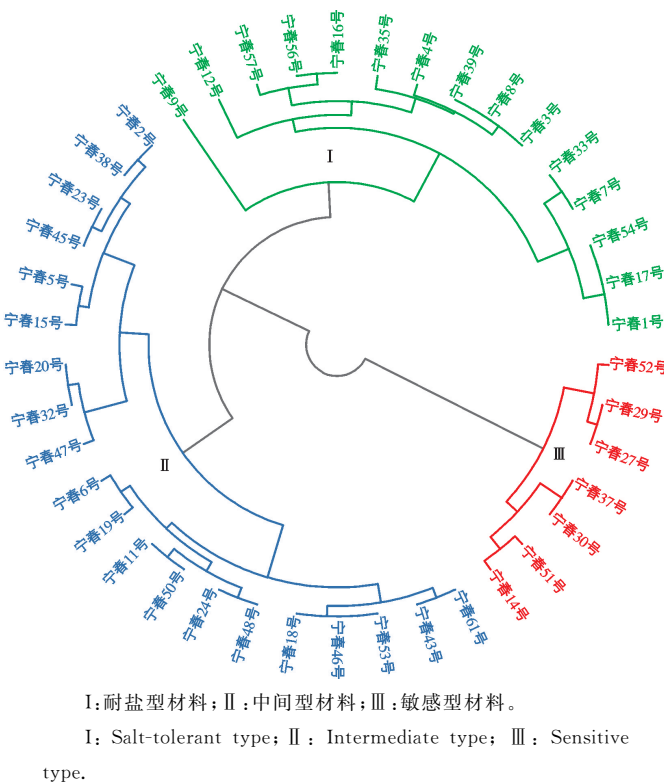


图 2 基于 *D* 值的 42 份春小麦耐盐性聚类分析
Fig. 2 Cluster analysis of salt tolerance in 42 spring wheat varieties based on *D* values

3 讨论

3.1 萌发期耐盐性与种子活力的关系

种子萌发是作物生命周期的起点,是对盐胁迫敏感的早期阶段。土壤盐胁迫会显著抑制种子发芽及幼苗生长^[17]。种子的发芽率、发芽势和活力指数等是衡量农作物种子发芽的基础指标,也是评价种子活力的关键指标^[18]。同时,种子活力水平也受种子成熟度、种子年龄、种子生产环境及贮藏条件等因素影响,基础活力的固有差异可能掩盖或干扰对品种真实遗传耐盐潜力的准确评估。本试验选用同一批次收获、干燥贮藏、发芽率 $\geq 95\%$ 的种子,采用相对值法消除基础活力差异。研究发现,供试材料的发芽率、发芽势及活力指数不同程度下降,其中,活力指数、发芽势的品种间变异幅度最大,可作为萌发期耐盐性评价的指标。活力指数与种子在正常条件下的基础活力呈正相关,种子活力越强,吸水膨胀能力及耐盐性越突出,种子通过自身渗透调节能力适应盐胁迫,其调节能力与种子活力呈正相关。选用同一批次试验材料、基于指标相对值的评价方法,能有效控制种子活力差异带来的误差,提升萌发期种子耐盐鉴

定的准确性与可靠性。

3.2 盐胁迫对小麦苗期生长的影响

苗期是小麦对盐胁迫最敏感的时期,其耐盐性直接影响幼苗正常生长,是保证全苗、齐苗的基础^[19]。因此,苗期是小麦耐盐鉴定的重要时期^[20-21]。马雅琴等^[19]在室内开展引进小麦品种苗期耐盐性鉴定筛选,对表现较好的春小麦材料进行了田间大区生产示范试验。王宏凯等^[22]在不同浓度 NaCl 胁迫下,对小麦苗期农艺性状的表现进行评价,筛选出新冬 39、濮兴 5 号、济麦 21 等耐盐性较强的品种。彭智等^[23]研究发现,盐胁迫对小麦幼苗的生长发育具有显著的抑制作用,不同性状对盐胁迫响应的程度存在差异。本研究中,经 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫处理后,42 份春小麦品种苗期各表型指标,除宁春 17 号、宁春 50 号的茎粗增加外,其他表型指标均低于对照,下降幅度介于 $10.12\%\sim 53.18\%$ 之间,表明盐胁迫对多数表型指标具有抑制作用,这与前人研究结果相符;其中,苗高、地上部分鲜重和干重,及地下部分干重等指标平均降幅均超过 30% ,表明这些指标对盐胁迫响应敏感,可作为耐盐性评价的重要参考。分析还发现,地下部分干重的变异系数 (39.32%) 显著高于地上部分干重 (20.77%),这与李媛媛等^[24]研究结果相符,说明根系干物质积累在不同品种间存在遗传变异,可能与根系构型、离子区隔化能力及水分利用效率的遗传差异有关,地下部分干重可作为筛选具有特异耐盐根系构型品种的敏感指标。小麦苗期地上部分鲜重 (降幅为 40.02%) 受抑制程度明显高于地下部分鲜重 (降幅为 15.44%),这与刘彤彤等^[25]、Chaurasia 等^[26]研究基本相符。也有研究认为地下部性状受到盐胁迫抑制程度高于地上部性状^[21]。不同研究结果之间的差异可能与供试材料的遗传背景、NaCl 胁迫浓度、培养条件等因素有关。

3.3 基于综合评价体系的小麦苗期耐盐评价方法

耐盐性鉴定是对农作物耐盐能力的科学评价,是有效开展耐盐种质资源筛选与品种培育工作的前提^[27]。小麦种质资源丰富,全球基因库中保存的小麦种质资源超过 85 万份^[28]。小麦耐盐性是受多基因控制的复杂数量性状,其响应盐胁迫涉及形态结构与生理代谢的协同调控,建立高效、准确的早期鉴定体系对提高种质筛选、耐盐育种效率尤为关键。前人在室内受控环境下,使用盆栽或水培方式,采用主成分分析、隶属函数分析

与聚类分析等多元统计方法,对萌发期和苗期的多项指标进行综合评价,能够鉴定不同种质资源的耐盐能力,已成功应用于小麦、水稻、棉花等作物抗旱^[29]、耐盐^[30]等抗逆评价。本研究采用 150 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫,在该盐胁迫下不同小麦品种各指标均受到不同程度的影响,各指标的隶属函数值、权重及贡献率在不同品种间均有不同。因此,可采用综合评价法对不同春小麦品种的耐盐性进行鉴定。

3.4 耐盐品种亲本遗传来源分析

在评估不同品种萌发期与苗期耐盐性差异的基础上,本研究分析了耐盐品种的亲本组合来源,以探讨耐盐性在不同来源遗传背景间的传递规律及聚合潜力。宁夏引黄灌区及周边区域审定的春小麦品种耐盐性与其亲本遗传来源密切相关,这可能是长期适应盐渍逆境并形成稳定耐盐性的原因。地方品种中可能有耐盐相关优异等位基因,可通过杂交导入现代品种,有助于耐盐性状的聚合与累加。本研究发现,宁春 4 号是宁春 39 号、宁春 16 号等多个耐盐品种的共同亲本,表明其具备较高的一般配合力、稳定的遗传传递力与广泛的生态适应性,在宁夏春小麦耐盐育种中发挥了骨干亲本作用。耐盐品种宁春 56 号由耐盐型品种宁春 4 号与敏感性型品种宁春 27 号杂交选育而成,但其后代宁春 56 号仍表现出较强耐盐性,表明其耐盐性状可能并非由单一显性基因简单控制,而可能涉及隐性基因互补或上位效应。类似现象在水稻中亦有报道,Wang 等^[31]利用耐盐粳稻品种 Jiucailing 与盐敏感籼稻品种 IR26 杂交来源的重组自交系(RIL)群体,在不同盐浓度下检测到 22 个 QTLs(11 个主效、11 个上位性),其中 5 个主效 QTLs 可能为新耐盐位点,高耐盐株系携带 6~8 个来自 Jiucailing 的正向等位基因。小麦耐盐性除地理起源外,还受品种自身遗传背景与多重生理机制协同调控。因此,室内筛选出的耐盐品种能否在南疆盐渍地稳定发挥耐盐潜力,需通过田间生产条件进行验证。已有研究采用大田种植的方法,在新疆生态条件下对引自宁夏的春小麦品种的主要农艺性状与产量的关系进行了探讨,提出了引种改良的主要方向^[32]。本课题组正在南疆喀什、阿拉尔市开展全生育期田间试验,后续将结合产量、农艺性状等指标,对室内筛选结果进行综合验证。

本研究初步验证了宁夏 42 份春小麦品种跨

区域引种至南疆盐渍环境的可行性。其活力指数、苗高、地上部分干重、根长可作为南疆春小麦耐盐性早期鉴定的关键指标。参试材料中,宁春 3 号、宁春 8 号、宁春 9 号、宁春 12 号、宁春 35 号等品种耐盐能力较强,可为南疆盐碱地小麦生产及耐盐育种提供材料基础。

参考文献:

- [1]Jamil A, Riaz S, Ashraf M, *et al.* Gene expression profiling of plants under salt stress [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30(5): 435.
- [2]Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam M M, *et al.* Potential use of halophytes to remediate saline soils [J]. *BioMed Research International*, 2014, 2014(1): 589341.
- [3]Chhabra V, Sreethu S, Kaur G, *et al.* Response of wheat crop to water-logged conditions under different land configurations and nutrient management [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 7168.
- [4]曹晓凤, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336.
Cao X F, Sun B, Chen H B, *et al.* Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 336.
- [5]冯起, 尹鑫卫, 朱猛, 等. 统筹推进西北地区盐碱地综合治理利用: 现状、挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(12): 2060.
Feng Q, Yin X W, Zhu M, *et al.* Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in Northwest China: Conditions, challenges, and recommendations [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(12): 2060.
- [6]吕宁, 石磊, 戴显余, 等. 新疆盐碱地治理利用研究回顾与启示[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(12): 1.
Lü N, Shi L, Dai Y Y, *et al.* Reclamation of saline-alkali soils in Xinjiang: A review [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(12): 1.
- [7]付秋萍, 张江辉, 王全九, 等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展, 2007(8): 1091.
Fu Q P, Zhang J H, Wang Q J, *et al.* Analysis of soil salinity variation characteristics in the Tarim Basin [J]. *Progress in Natural Science*, 2007(8): 1091.
- [8]方辉, 丁银灯, 范贵强, 等. 新疆南疆小麦产业发展的现状及品质特性分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(S1): 75.
Fang H, Ding Y D, Fan G Q, *et al.* Research report on the development status of wheat industry in southern Xinjiang [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(S1): 75.
- [9]Olimjonova S G, Djabbarov I, Sobirov F. Salt tolerance based on morphological variability in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 2024, 56(6): 2430.
- [10]刘旭, 史娟, 张学勇, 等. 小麦耐盐种质的筛选鉴定和耐盐基因的标记[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 948.
Liu X, Shi J, Zhang X Y, *et al.* Screening salt tolerance germ-

- plasm and tagging the tolerance gene(s) using microsatellite (SSR) markers in wheat [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2001, 43(9): 948.
- [11] Alom R, Abu Hasan M, Islam M R, *et al.* Germination characters and early seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under salt stress conditions [J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2016, 19(5): 383.
- [12] Tao R R, Ding J F, Li C Y, *et al.* Evaluating and screening of agro-physiological indices for salinity stress tolerance in wheat at the seedling stage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 646175.
- [13] Xu Y J, Weng X L, Jiang L Q, *et al.* Screening and evaluation of salt-tolerant wheat germplasm based on the main morphological indices at the germination and seedling stages [J]. *Plants*, 2024, 13(22): 3201.
- [14] Zhou X Y, Tian Y M, Qu Z P, *et al.* Comparing the salt tolerance of different spring soybean varieties at the germination stage [J]. *Plants*, 2023, 12(15): 2789.
- [15] 王兴州, 时晓磊, 张恒, 等. 引进春小麦品种萌发期耐盐性鉴定及评价[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(6): 1353.
- Wang X Z, Shi X L, Zhang H, *et al.* Identification and evaluation of salt tolerance at germination stage of introduced spring wheat varieties [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(6): 1353.
- [16] 高坤奥, 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(9): 1115.
- Gao S A, Tian R M, Jia H N, *et al.* Identification of salt tolerance of 236 wheat germplasm at seedling stage and screening of salt tolerance indicators [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(9): 1115.
- [17] El Sabagh A, Islam M S, Skalicky M, *et al.* Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies [J]. *Frontiers in Agronomy*, 2021, 3: 661932.
- [18] 赵旭, 王林权, 周春菊, 等. 盐胁迫对不同基因型冬小麦发芽和出苗的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 108.
- Zhao X, Wang L Q, Zhou C J, *et al.* Effects of salt stress on germination and emergence of different winter wheat genotypes [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 108.
- [19] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价[J]. *作物学报*, 2005, 31(1): 58.
- Ma Y Q, Weng Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(1): 58.
- [20] 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.
- [21] Khan R W A, Khan R S A, Awan F S, *et al.* Genome-wide association studies of seedling quantitative trait loci against salt tolerance in wheat [J]. *Frontiers in Genetics*, 2022, 13: 946869.
- [22] 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.
- [23] 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 salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 638.
- [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(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.
- [25] 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.
- [26] Chaurasia S, Kumar A, Singh A K. Comprehensive evaluation of morpho-physiological and ionic traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under salinity stress [J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1765.
- [27] 陈家婷, 白欣, 谷雨杰, 等. 小麦芽期和苗期耐盐鉴定方法的适用性评价[J]. *作物学报*, 2024, 50(5): 1193.
- Chen J T, Bai X, Gu Y J, *et al.* Applicability evaluation of screen methods to identify salt tolerance in wheat at germination and seedling stages [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5): 1193.
- [28] Berkner M O, Schulthess A W, Zhao Y S, *et al.* Choosing the right tool: Leveraging of plant genetic resources in wheat (*Triticum aestivum* L.) benefits from selection of a suitable genomic prediction model [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, 135(12): 4391.
- [29] 乔志新, 张杰道, 王雨, 等. 干旱胁迫下冬小麦不同品种萌发特性差异的研究[J]. *作物学报*, 2024, 50(6): 1568.
- Qiao Z X, Zhang J D, Wang Y, *et al.* Difference in germination characteristics of different winter wheat cultivars under drought stress [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(6): 1568.
- [30] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651.
- [31] Wang Z F, Cheng J P, Chen Z W, *et al.* Identification of QTLs with main, epistatic and QTL $\times$ environment interaction effects for salt tolerance in rice seedlings under different salinity conditions [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(4): 807.
- [32] 李召锋, 杨新军, 费聪, 等. 滴灌条件下新甘宁春小麦产量构成因素分析及改良[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(3): 436.
- Li Z F, Yang X J, Fei C, *et al.* Study on the yield components of spring wheat from Xinjiang, Gansu, Ningxia under drip irrigation and improvement of the wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(3): 436.