

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51071

小偃麦辐射诱变种质芽期和苗期耐盐鉴定、筛选及耐盐指标评价

亓青松¹ 牛翔雨¹ 刘冰可¹ 康 禄¹ 王 琛¹ 封德顺^{1,2,*}

¹ 小麦育种全国重点实验室 / 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; ² 农业农村部作物水分生理与抗旱种质改良重点实验室, 山东泰安 271018

摘 要: 我国盐碱地面积非常广泛, 土壤盐碱化严重限制了作物的生长, 筛选耐盐农作物品种是提高盐碱地利用的重要手段。本研究以 40 份辐射诱变的小偃麦材料、3 份常规品种和小麦-中间偃麦草双体异附加系 SN6306 为试验材料, 以中国春(Chinese Spring, CS)为盐敏感对照、山融 3 号(Shanrong 3, SR3)为抗盐对照, 通过水培培养, 综合分析小麦在水培条件下的表型, 筛选出小麦芽期和苗期最佳盐处理浓度。采用多元统计方法, 对 44 个试验材料进行苗期和芽期耐盐性评价, 将试验材料分为 4 个等级, 其中一级抗盐材料 5 份(A275、A051 等), 二级抗盐材料 31 份(A079、A262 等), 盐敏感材料 7 份(A140、A284 等), 所用的盐敏感对照小麦 CS 为高度敏感。同时, 利用各个材料的抗盐得分与所测生理指标和生物量指标的相对耐盐系数建立了逐步回归方程, D 值 = $0.033 - 0.050 \times K^+ - S + 0.002 \times Na^+ - R + 0.237 \times K^+ - R + 0.176 \times GP + 0.139 \times GR - 0.005 \times PC + 0.197 \times SFW + 0.088 \times WCS - 0.110 \times RDW + 0.242 \times SL + 0.019 \times MRL$ ($R^2 = 0.999$), 确定地上部钾离子含量、地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、发芽势、发芽率、脯氨酸含量、苗鲜重、苗含水量、根干重、苗高、最大根长为筛选小麦抗盐材料的显著影响指标。本研究建立了一个小麦抗盐评价的回归方程, 有助于对小麦抗盐能力进行评估, 筛选出的抗盐和盐敏感材料为进一步分子机制研究以及培育抗盐品种提供了材料基础。

关键词: 培育抗盐品种; 芽期和苗期耐盐性; 辐射诱变; 多元统计; 抗盐评估

Salt tolerance identification, screening and salt tolerance index evaluation of wheat-*Thinopyrum intermedium* radiation mutagenesis germplasm at germination and seedling stage

Qi Qing-Song¹, Niu Xiang-Yu¹, Liu Bing-Ke¹, Kang Lu¹, Wang Chen¹, and Feng De-Shun^{1,2,*}

¹ State Key Laboratory of Wheat Improvement / College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; ² Key Laboratory of Crop Water Physiology and Drought-Tolerance Germplasm Improvement, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tai'an 271018, Shandong, China

Abstract: Saline-alkali land is widespread in China and poses a significant limitation to crop growth. Screening for salt-tolerant crop varieties is a key strategy to enhance the utilization of saline-alkali soils. In this study, 40 radiation-induced wheat-*Thinopyrum intermedium* lines, three conventional wheat varieties, and the wheat-*Th. intermedium* disomic addition line SN6306 were used as experimental materials. Chinese Spring (CS) was used as a salt-sensitive control, and Shanrong 3 (SR3) served as a salt-tolerant control. Phenotypic traits were comprehensively analyzed under hydroponic conditions, and the optimal salt treatment concentrations for both germination and seedling stages were determined. Using multivariate statistical analysis, salt tolerance of the 44 experimental materials was evaluated at the seedling and germination stages. Based on the results, the materials were classified into four salt tolerance levels: five highly salt-tolerant lines (e.g., A275, A051), thirty-one moderately salt-tolerant lines (e.g.,

本研究由 2025 年泰安市科技创新重大专项(国家级重大创新平台配套)项目(GZ-JSGG04), 山东省自然科学基金项目(ZR2023MC199)和山东农业大学“双一流”建设项目(SKL81113)资助。

This study was supported by the Tai'an Major Scientific and Technological Innovation Project (National Major Innovation Platform Support) 2025 (GZ-JSGG04), the Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023MC199) and the Funding for the “Double First Class” Construction Project of Shandong Agricultural University (SKL81113).

* 通信作者(Corresponding author): 封德顺, E-mail: dsfeng@sdau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 2023120037@sdau.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-08-04; Accepted (接受日期): 2025-10-30; Published online (网络出版日期): 2025-11-11.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251111.0900.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A079, A262), seven salt-sensitive lines (e.g., A140, A284), with CS identified as highly sensitive. A stepwise regression model was established using the salt tolerance scores and the relative salt tolerance coefficients of physiological and biomass indices: $D\text{-value} = 0.033 - 0.050 \times K^+ - S + 0.002 \times Na^+ - R + 0.237 \times K^+ - R + 0.176 \times GP + 0.139 \times GR - 0.005 \times PC + 0.197 \times SFW + 0.088 \times WCS - 0.110 \times RDW + 0.242 \times SL + 0.019 \times MRL$ ($R^2 = 0.999$). Significant indicators for identifying salt-tolerant wheat included potassium ion content in shoots and roots, sodium ion content in roots, germination potential and rate, proline content, seedling fresh weight, water content, root dry weight, seedling height, and maximum root length. This study established a reliable regression model for evaluating wheat salt tolerance and identified both salt-tolerant and salt-sensitive lines, providing valuable genetic resources for further research on the molecular mechanisms of salt tolerance and for breeding salt-tolerant wheat varieties.

Keywords: cultivate salt-resistant varieties; salt tolerance at germination and seedling stage; radiation mutagenesis; multivariate statistics; salt resistance evaluation

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国主要的粮食作物,世界上约 40%的人口将小麦作为主要口粮,在我国有将近一半的人口以小麦为主要口粮^[1]。近十几年我国小麦持续增产,在我国粮食安全方面起到了重要的安全保障作用^[2-4]。我国人口不断增长,在这种情况下为了满足我国的粮食需求,需要不断提高小麦产量。据统计,2022 年我国耕地面积 1.28 亿公顷,人均耕地面积 0.09 公顷,仅是世界人均耕地面积的 27%,耕地中盐渍化面积达到 920.9 万公顷,占全国耕地面积 6.62%,充分利用盐碱地可以提高小麦总产量^[5-6]。鉴于土地资源的有限性,尤其是盐碱地对小麦生长的不利影响,筛选抗盐碱小麦品种以适应盐碱地显得尤为重要。这不仅有助于提高盐碱地的利用率,还能进一步保障我国的粮食安全,满足不断增长的人口对粮食的需求。

传统的单指标评价方法,如生物量指标(株高、叶长等)和生理生化指标(钠、钾离子含量、脯氨酸含量等)^[7-10],虽然在一定程度上能够反映小麦的抗盐能力,但往往无法全面评估小麦在复杂盐碱环境下的综合耐盐性。随着评价方法的不断完善,研究者们逐渐采用综合评价方法,如隶属函数法和主成分分析法,以更全面地评估小麦的耐盐特性^[11-13]。

然而,当前大多数研究在综合评价中主要关注发芽率、发芽势、干鲜重、根冠比等常规指标^[14-17],而对与盐碱环境密切相关的地上部和地下部钠、钾离子含量以及脯氨酸含量的综合应用研究较少。钠、钾离子含量作为植物抗逆性的重要生理指标,能够反映植物对盐胁迫的适应能力;而脯氨酸含量则与植物的渗透调节能力密切相关,是评价植物耐盐性的重要生化指标^[18]。因此,将这些关键指标纳入综合评价体系,能够更准确地筛选出适应盐碱环境的小麦种质资源。

本研究将地上部和地下部的钠、钾离子含量以及脯氨酸含量纳入综合评价体系,结合传统指标,

对小麦耐盐特性进行综合评价。这一方法不仅能够更全面地反映小麦的耐盐性,还为盐碱地小麦种质资源的筛选和利用提供了新的思路和依据。小麦芽期和苗期对盐胁迫最为敏感,是早期耐盐性鉴定的关键时期^[19],因此小麦芽期和苗期的耐盐表现可作为小麦不同个体或不同品种早期耐盐性筛选的依据。

本研究选用 3 份常规品种、40 份辐射诱变材料和小麦-中间偃麦草双体异附加系 SN6306 为试验材料,在小麦芽期和苗期进行盐胁迫处理,采用隶属函数、主成分分析、聚类分析等多元分析方法,对 44 份材料进行耐盐等级分类,筛选出高抗和敏感品种。这一方法不仅验证了钠、钾离子含量和脯氨酸含量在评价体系中的有效性,还为耐盐小麦的高效筛选提供了科学依据和方法支持,为后续研究奠定了材料基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料共 44 份,其中 3 份常规品种山农 27 (Shannong 27, SN27)、中国春(Chinese Spring, CS)和山融 3 号(Shanrong 3, SR3),40 份通过 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射诱变小麦-中间偃麦草双体异附加系山农 6306 (Shannong 6306, SN6306)的幼穗并自交获得的 M5 变异材料,以及对照 SN6306^[20]。以上材料均由山东农业大学小麦育种全国重点实验室提供。小麦-中间偃麦草双体异附加系山农 6306 ($2n = 6X + II = 44$)是由高感白粉病小麦品种烟农 15 (AABBDD, $2n = 6X = 42$)与中间偃麦草(*Thinopyrum intermedium*, JJJ⁵J⁸StSt, $2n = 6X = 42$)进行远缘杂交培育而成^[20]。山农 27 是以 6125 为母本、济麦 22 为父本杂交选育的耐旱小麦品种^[21]。

1.2 试验方法

1.2.1 芽期耐盐浓度筛选 选取耐盐材料山融 3

号和敏感材料中国春,分别设置 150、200、250 和 300 mmol L⁻¹ 进行盐胁迫试验。选用籽粒饱满、大小均匀一致的小麦种子,用去离子水冲洗 3 次。将种子置于铺有 2 层滤纸方形透明培养皿(10.0 cm×10.0 cm×1.5 cm)中,每皿 50 粒,3 次重复。于人工气候培养箱(光照 16 h/黑暗 8 h,温度 24℃)中进行培养。每 2 d 更换 1 次盐溶液并记录发芽率,筛选适宜鉴定浓度。

1.2.2 苗期耐盐浓度筛选 选取山融 3 号和中国春 2 个材料,于去离子水中催芽处理 3 d 后转移至含 Hoagland 营养液的 96 孔水培盒中,待幼苗长至二叶一心时,更换为含 0、200 和 300 mmol L⁻¹ NaCl 的 Hoagland 营养液进行盐处理(每周换液 2 次),盐处理 7 d 后观察表型,确定适合小麦苗期耐盐性鉴定的浓度。

1.3 测量指标

本研究共测定 19 项指标(包括生物量指标 12 个、生理和生化指标 7 个),用于隶属函数和主成分分析。

1.3.1 生物量指标 芽期以 1.2.1 中筛选出的浓度作为耐盐评价处理浓度,以去离子水为对照,以根长≥种子长且芽长≥1/2 种子长为发芽标准测量发芽数,培养方法、处理方法与预备试验相同。

发芽势(germination potential, GP, %) = (前 4 d 全部发芽种子数/供试种子总数) × 100% (1)

发芽率(germination rate, GR, %) = (前 7 d 全部发芽种子数/供试种子总数) × 100% (2)

苗期以 1.2.2 中筛选出的浓度作为耐盐评价处理浓度,以 Hoagland 营养液为对照,取盐胁迫 7 d 后的植株,每个材料取 10 株,测量植株苗高(seedling length, SL, cm)、最大根长(maximum root length, MRL, cm)、根鲜重(root fresh weight, RFW, g)、苗鲜重(seedling fresh weight, SFW, g)、根干重(root dry weight, RDW, g)、苗干重(seedling dry weight, SDW, g)、根含水量(root water content, RWC, g)、苗含水量(water content of seedlings, WCS, g)、鲜重根冠比(fresh weight root-shoot ratio, R/S-FW)、干重根冠比(dry weight root-shoot ratio, R/S-DW),培养方法和处理方法与预备试验相同,重复 3 次。

根含水量(g) = 根鲜重 - 根干重 (3)

苗含水量(g) = 苗鲜重 - 苗干重 (4)

鲜重根冠比 = (地下鲜重/地上鲜重) × 100% (5)

干重根冠比 = (地下干重/地上干重) × 100% (6)

1.3.2 生理生化指标 取苗期盐胁迫 7 d 后的植株烘干,对植株地上部钠离子含量(sodium ion content in shoot, Na⁺-S)、地上部钾离子含量(potassium ion content in shoot, K⁺-S)、地下部钠离子含量(sodium ion content in root, Na⁺-R)和地下部钾离子含量(potassium ion content in root, K⁺-R)进行测量,重复 3 次,方法参照王维^[22]的火焰分光光度计法。

地上部钠钾比(the ratio of sodium to potassium in shoot, Na⁺/K⁺-S) = (地上部钠离子含量/地上部钾离子含量) × 100% (7)

地下部钠钾比(the ratio of sodium to potassium in root, Na⁺/K⁺-R) = (地下部钠离子含量/地下部钾离子含量) × 100% (8)

取苗期盐胁迫 5 d 后的植株叶片,进行脯氨酸含量(proline content, PC)测定,方法参考《植物生理学实验指导(第 3 版)》^[23]。

1.3.3 苗期叶片表型鉴定 根据《小麦耐盐性鉴定评价技术规范》(NY/PZT001-2002)把苗期叶片盐胁迫后的表型划分为 0~4 级。0 级:生长正常,无盐害症状;1 级:生长基本正常,有 2~3 片绿叶,叶尖变黄、青枯或萎蔫;2 级:生长受到抑制,剩 2 片绿叶或有 2 片半黄叶;3 级:生长受害,仅剩 1 片绿叶或整株叶片中仅存小部分绿色;4 级:叶片接近或已经死亡。对每个材料的幼苗分别进行小麦叶片的盐害程度鉴定,并计算盐害指数(salt damage level, SDL)^[24]。计算方法如公式(9)。

盐害指数(%) = $\sum(i \times N_i) \times 100 / (4 \times 8)$ (9)

式中, i 为相应盐害级叶数, N_i 为盐害级数,4 为盐害最高级数,8 为每个材料所测植株的数量,试验重复 3 次。

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2021、SPSS 27.0、SPSSAU 进行相对耐盐系数、主成分、隶属函数、聚类及逐步回归等多元统计分析。

指标相对耐盐系数 = 处理值/正常值 (10)

隶属函数值:

$Q(x_{a,b}) = (x_{a,b} - x_{a,min}) / (x_{a,max} - x_{a,min}), a = 1, 2, 3, \dots, n$ (11)

式中, $x_{a,b}$ 表示 b 品种 a 主成分因子得分, $x_{a,max}$ 表示 a 主成分因子得分的最大值, $x_{a,min}$ 表示 a 主成分因子得分的最小值。

权重: $W_a = \frac{P_a}{\sum_{a=1}^n P_a}, a = 1, 2, 3, \dots, n$ (12)

式中, W_a 表示主成分分析后第 a 个主成分的重要程度, P_a 表示第 a 个主成分的贡献率。

小麦耐盐评价指标:

$$D = \sum_{a=1}^n [Q(x_{a,b}) \times W_a], a = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

聚类分析: 根据 D 值, 采用平方欧式距离, 平均联结(组间)的方法进行分类。

逐步回归方程的建立: 以 D 值为因变量, 各个指标的相对耐盐系数为自变量, 采用逐步法进行回归方程的建立。

2 结果与分析

2.1 芽期最佳盐胁迫浓度筛选

为了确定材料芽期最佳盐处理浓度, 对中国春和山融 3 号分别在 150、200、250 和 300 mmol L⁻¹ 的盐浓度下的发芽率进行统计。如图 1 所示, 随着盐浓度的增加, 小麦的发芽率逐渐下降, 当浓度为 300 mmol L⁻¹ 时, 中国春和山融 3 号均基本不发芽, 当盐处理浓度为 250 mmol L⁻¹ 时, 两者发芽率差异最大, 因此将 250 mmol L⁻¹ NaCl 作为发芽率最佳处理浓度。

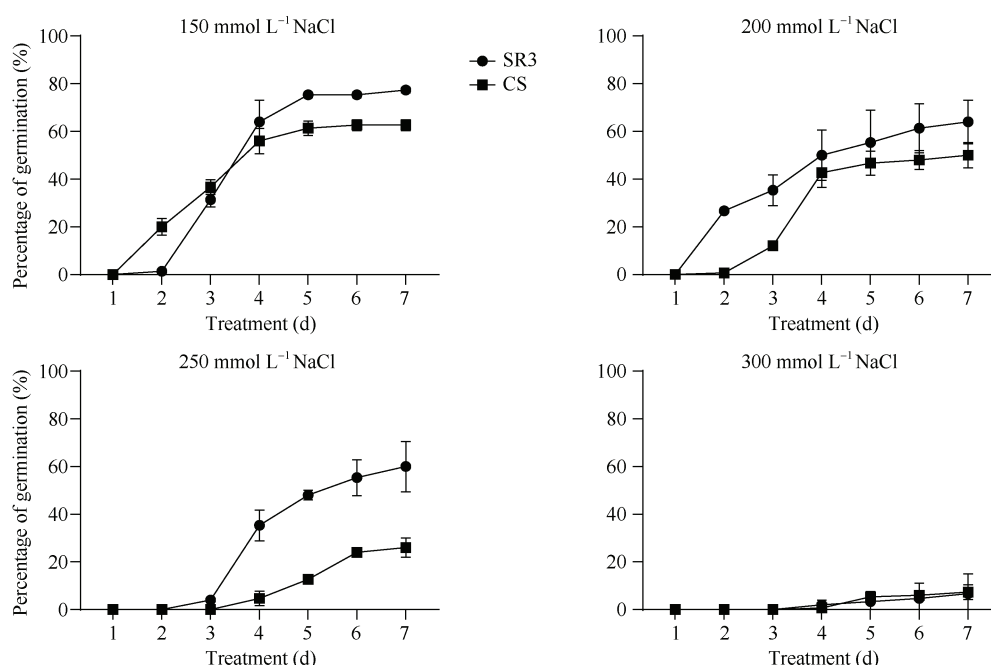


图 1 不同浓度 NaCl 条件下山融 3 号和中国春的发芽率

Fig. 1 Germination rate of Shanrong 3 and Chinese Spring under different NaCl concentrations

SR3: 山融 3 号; CS: 中国春。SR3: Shanrong 3; CS: Chinese Spring.

2.2 苗期最佳盐胁迫浓度筛选

选取山融 3 号和中国春, 设置 0、200 和 300 mmol L⁻¹ NaCl 的浓度梯度, 通过观察表型来筛选苗期最佳处理盐浓度。如图 2 和图 3 所示, 在 0 mmol L⁻¹ NaCl 的营养液的处理下, 中国春和山融 3 号小麦材料的幼苗生长发育正常, 叶片盐害指数均为 0。在 200 mmol L⁻¹ NaCl 条件下, 盐胁迫表现出了对小麦幼苗的抑制作用, 2 个材料的叶尖变黄, 中国春和山融 3 号整体植株高度均明显降低, 从整体植株 50 cm 降低至约 30 cm, 但 2 个材料表型和叶片盐害指数之间并无显著差异。在 300 mmol L⁻¹ NaCl 处理下, 盐胁迫对小麦幼苗苗高的抑制作用更加明显, 苗高显著降低, 整体植株高度低于 30 cm, 中国春发黄叶片

增多, 叶片多出现三级盐害症状, 山融 3 号虽然苗高受到抑制, 但发黄叶片较少, 叶片仍表现为一级和二级盐害状态, 与中国春表现出较大差异, 叶片盐害指数极显著低于中国春, 且在 300 mmol L⁻¹ NaCl 处理下, 所有小麦幼苗仍表现为存活状态。综合分析, 将 300 mmol L⁻¹ NaCl 作为小麦苗期的最佳盐胁迫浓度。

2.3 盐胁迫与对照条件下小麦芽期和苗期参数变化分析

通过比较对照条件下和盐胁迫条件下的形态指标可知(表 1), 盐胁迫下供试材料的发芽势、发芽率、苗鲜重、苗干重、苗含水量、根鲜重、根干重、根含水量、苗高、最大根长的最大值、最小值及平均值均小

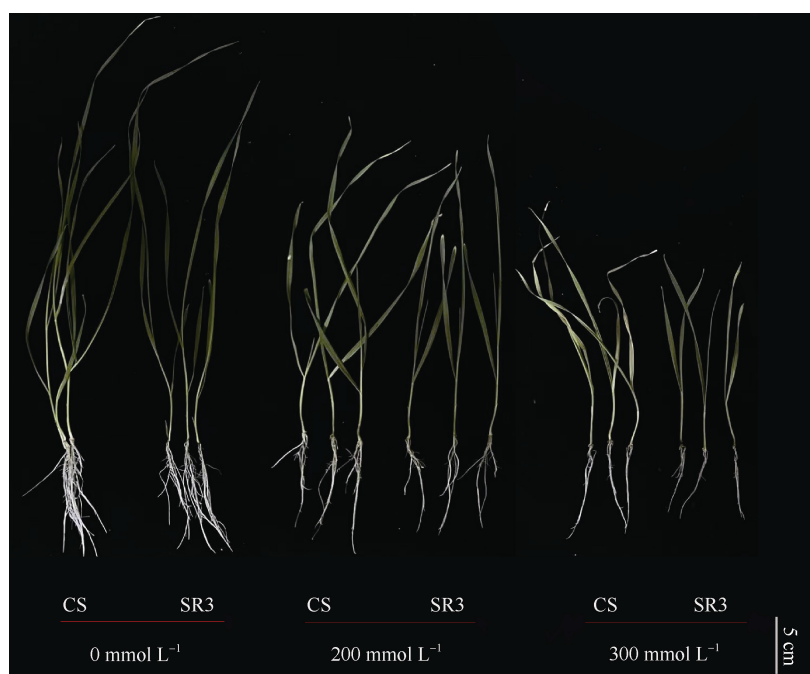


图2 不同盐浓度下中国春和山融3号幼苗的生长状况

Fig. 2 Seedling growth status of Chinese Spring and Shanrong 3 under different salt concentrations

SR3: 山融3号; CS: 中国春。标尺为5 cm。

SR3: Shanrong 3; CS: Chinese Spring. Scale bar = 5 cm.

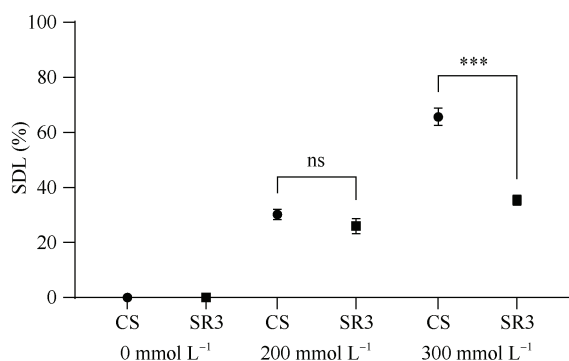


图3 不同盐浓度下中国春和山融3号幼苗的叶片盐害指数

Fig. 3 Leaf salt damage level of Chinese Spring and Shanrong 3 seedlings under different salt concentrations

SR3: 山融3号; CS: 中国春; SDL: 盐害指数。标尺为5 cm。ns代表无显著差异; ***代表在0.001水平显著差异。

SR3: Shanrong 3; CS: Chinese Spring; SDL: salt damage level. Scale bar = 5 cm. ns indicates no significant difference; *** indicates significant difference at $P < 0.001$.

于对照组数值。这表明当小麦受到盐胁迫后,小麦地上部和地下部的生长发育均受到了不同程度的抑制。

从生理指标方面来看,在盐胁迫条件下,幼苗中脯氨酸含量的最大值、最小值及平均值均大于对照,这表明小麦在受到盐胁迫时体内会通过增加脯氨酸含量来积累自身渗透调节物质,增强小麦幼苗对盐胁迫的耐受性。在盐胁迫条件下小麦幼苗的地上部和地下部钠离子含量及地上部和地下部钠钾比的平均值、最

大值、最小值均高于对照,而地上部和地下部钾离子含量的平均值、最大值、最小值均低于对照,说明在盐胁迫的调节下,小麦幼苗体内不断吸收钠离子同时外排钾离子,造成盐胁迫对小麦的离子毒害。

在盐胁迫下,地上部钠钾比和地下部钠钾比的变异系数极高(95.72%和52.93%),可作为筛选耐盐材料的主要依据;脯氨酸含量变异系数为32.70%,同样可以作为耐盐性的重要筛选指标。

2.4 各指标相关性分析

通过对盐胁迫条件下各指标相对耐盐系数之间的相关性分析(表2)发现,地上部钠钾比与地上部钠离子含量呈显著正相关,而与地上部钾离子含量的相关性较小,表明地上部钠钾比主要受地上部钠离子含量的影响。地下部钠钾比与地下部钠离子含量和地下部钾离子含量均呈显著相关,说明地下部钠钾比由地下部钠离子含量和地下部钾离子含量共同调节。

地下部钠钾比与根鲜重、根含水量有一定负相关趋势,但未达到统计学显著(表2)。说明地下部更多反映的是离子平衡状态,而不是直接影响水分含量或鲜重,这类影响可能是间接和渐进的。地下部钠钾比与干重根冠比呈显著负相关(表2),说明植株地下部钠钾比越高,植株处于更高盐胁迫状态,导致更多干物质分配不到根部,根系结构受损或生长受限。

表 1 不同盐胁迫下小麦芽期和苗期各性状的表型分析

Table 1 Phenotypic analysis of wheat traits at germination and seedling stages under different salt stress levels

指标 Index	处理 Treatment	平均值 Average	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)
地上部钠离子含量 $\text{Na}^+\text{-S}$ (mg g^{-1})	T0	1.171	0.142	2.869	0.466	39.79
	T1	73.518	32.145	144.649	21.381	29.08
地上部钾离子含量 $\text{K}^+\text{-S}$ (mg g^{-1})	T0	95.234	65.907	122.815	10.650	11.18
	T1	62.775	5.377	85.689	12.712	20.25
地上部钠钾比 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-S}$	T0	0.012	0.002	0.031	0.005	40.09
	T1	1.282	0.474	14.841	1.227	95.72
地下部钠离子含量 $\text{Na}^+\text{-R}$ (mg g^{-1})	T0	2.430	1.276	8.472	1.366	56.21
	T1	46.727	14.274	101.404	19.842	42.46
地下部钾离子含量 $\text{K}^+\text{-R}$ (mg g^{-1})	T0	44.146	16.082	66.396	12.094	27.40
	T1	9.829	1.424	25.775	5.164	52.54
地下部钠钾比 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-R}$	T0	0.057	0.022	0.159	0.027	47.03
	T1	5.680	1.785	18.487	3.006	52.93
发芽势 GP (%)	T0	86.600	60.000	100.000	0.097	11.23
	T2	35.800	4.000	78.000	0.154	43.16
发芽率 GR (%)	T0	96.200	84.000	100.000	0.034	3.51
	T2	62.800	16.000	90.000	0.178	28.38
脯氨酸含量 PC ($\mu\text{g g}^{-1}$)	T0	50.949	16.318	113.877	24.155	47.41
	T1	259.159	87.261	386.968	84.746	32.70
苗鲜重 SFW (g)	T0	0.367	0.140	0.673	0.093	25.40
	T1	0.188	0.091	0.389	0.052	27.58
苗含水量 WCS (g)	T0	0.334	0.108	0.617	0.088	26.28
	T1	0.160	0.072	0.360	0.049	30.56
根鲜重 RFW (g)	T0	0.086	0.041	0.160	0.025	28.45
	T1	0.067	0.038	0.126	0.020	29.28
根含水量 RWC (g)	T0	0.081	0.037	0.150	0.023	28.98
	T1	0.062	0.034	0.118	0.018	29.67
鲜重根冠比 R/S-FW	T0	0.238	0.177	0.351	0.041	17.22
	T1	0.363	0.185	0.562	0.079	21.68
苗干重 SDW (g)	T0	0.033	0.018	0.057	0.008	24.21
	T1	0.027	0.007	0.013	0.517	23.90
根干重 RDW (g)	T0	0.006	0.003	0.011	0.002	28.59
	T1	0.005	0.002	0.008	0.001	28.67
干重根冠比 R/S-DW	T0	0.173	0.116	0.259	0.030	17.15
	T1	0.165	0.118	0.234	0.027	16.11
苗高 SL (cm)	T0	14.031	5.600	29.400	4.314	30.75
	T1	10.983	4.000	22.700	2.833	25.79
最大根长 MRL (cm)	T0	27.851	12.000	52.100	6.527	23.44
	T1	22.749	9.200	38.500	5.431	23.87

T0: 0 mmol L⁻¹ NaCl 处理; T1: 300 mmol L⁻¹ NaCl 处理; T2: 250 mmol L⁻¹ NaCl 处理。

T0: 0 mmol L⁻¹ NaCl treatment; T1: 300 mmol L⁻¹ NaCl treatment; T2: 250 mmol L⁻¹ NaCl treatment. $\text{Na}^+\text{-S}$: sodium ion content in shoot; $\text{K}^+\text{-S}$: potassium ion content in shoot; $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-S}$: the ratio of sodium to potassium in shoot; $\text{Na}^+\text{-R}$: sodium ion content in root; $\text{K}^+\text{-R}$: potassium ion content in root; $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-R}$: the ratio of sodium to potassium in root; GP: germination potential; GR: germination rate; PC: proline content; SFW: seedling fresh weight; WCS: water content of seedlings; RFW: root fresh weight; RWC: root-water content; R/S-FW: root-shoot ratio of fresh weight; SDW: seedling dry weight; RDW: root dry weight; R/S-DW: dry weight root-shoot ratio; SL: seedling length; MRL: maximum root length.

表 2 盐处理下不同指标耐盐系数之间的相关性
Table 2 Correlation analysis of salt tolerance coefficient indices under salt treatment

相关性 Correlation	地上 部钠 Na ⁺ -S	地上 部钾 K ⁺ -S	地上 部钠钾比 Na ⁺ /K ⁺ -S	地下 部钠 Na ⁺ -R	地下 部钾 K ⁺ -R	地下 部钠钾比 Na ⁺ / K ⁺ -R	发芽势 GP	发芽率 GR	脯氨酸 含量 PC	苗鲜重 SFW	苗含水量 WCS	根鲜重 RFW	根含水量 RWC	鲜重根 冠比 R/S-FW	苗干重 SDW	根干重 RDW	干重根 冠比 R/S-DW	苗高 SL	最大 根长 MRL
地上部钠 Na ⁺ -S	1.000																		
地上部钾 K ⁺ -S	0.221	1.000																	
地上部钠钾比 Na ⁺ /K ⁺ -S	0.586**	-0.258	1.000																
地下部钠 Na ⁺ -R	-0.076	0.179	-0.085	1.000															
地下部钾 K ⁺ -R	0.148	-0.117	0.131	0.185	1.000														
地下部钠钾比 Na ⁺ /K ⁺ -R	-0.141	0.186	-0.155	0.618**	-0.521**	1.000													
发芽势 GP	0.147	0.022	0.190	0.047	0.228	-0.186	1.000												
发芽率 GR	-0.107	0.012	-0.018	0.107	0.288	-0.149	0.736**	1.000											
脯氨酸含量 PC	-0.060	0.083	-0.215	0.058	-0.178	0.256	-0.286	-0.191	1.000										
苗鲜重 SFW	0.177	-0.072	0.303*	0.059	-0.064	0.069	0.197	0.051	-0.287	1.000									
苗含水量 WCS	0.208	-0.021	0.235	-0.036	-0.032	-0.043	0.149	-0.002	-0.232	0.852**	1.000								
根鲜重 RFW	0.124	0.072	0.044	0.248	0.164	-0.104	0.135	0.008	-0.257	0.121	0.063	1.000							
根含水量 RWC	0.136	0.083	0.049	0.268	0.170	-0.092	0.126	-0.006	-0.250	0.127	0.071	0.999**	1.000						
鲜重根冠比 R/S-FW	-0.096	0.026	-0.214	0.116	0.176	-0.132	-0.134	-0.063	0.168	-0.785**	-0.665**	0.454**	0.452**	1.000					
苗干重 SDW	-0.014	0.046	-0.065	0.052	-0.094	0.103	0.175	0.135	0.216	-0.281	-0.390**	0.329*	0.312*	0.366*	1.000				
根干重 RDW	-0.172	-0.146	-0.103	-0.260	-0.012	-0.263	0.182	0.266	-0.212	-0.093	-0.143	0.329*	0.280	0.187	0.444**	1.000			
干重根冠比 R/S-DW	-0.136	-0.169	-0.036	-0.300*	0.089	-0.353*	-0.001	0.087	-0.422**	0.171	0.248	-0.004	-0.031	-0.157	-0.580**	0.460**	1.000		
苗高 SL	-0.143	-0.095	-0.091	0.166	0.166	0.043	0.052	-0.065	-0.301*	0.209	0.258	-0.116	-0.103	-0.210	-0.403**	-0.240	0.229	1.000	
最大根长 MRL	-0.007	-0.145	0.035	0.117	-0.015	0.189	-0.283	-0.383*	0.145	0.194	0.140	-0.039	-0.027	-0.184	-0.076	-0.258	-0.131	0.084	1.000

缩写同表 1。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。
Abbreviations are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

脯氨酸含量与苗高呈显著负相关, 与干重根冠比呈极显著负相关(表 2), 说明脯氨酸含量越高, 小麦苗高、干重根冠比越低。高脯氨酸含量或代表胁迫越强烈, 植株生长越受限。

在本研究中, 多组变量之间存在显著或极显著相关性。例如, 根鲜重和根含水量之间的高度相关性($r = 0.999^{**}$)表明它们在一定程度上提供了冗余信息。通过主成分分析(principal component analysis, PCA), 可以减少变量的冗余性, 将相关性强的变量合并为少量主成分。

2.5 主成分分析

对 19 个相对指标进行主成分分析(PCA), 根据特征值>1 的标准, 提取到 7 个主成分(表 3), PC1 特征值为 3.496, 方差贡献率为 18.400%, 该成分中苗鲜重、苗含水量、苗干重、苗高及鲜重根冠比等指标载荷较高, 反映了地上部的生物量与生长表现, 命名为“地上部生长与生物量因子”。PC2 特征值为 3.121, 方差贡献率为 16.427%, 该成分与根系活力及萌发相关,

命名为“根系活力与萌发能力因子”。PC3 特征值为 2.360, 方差贡献率为 12.419%, 该成分与地下部钠离子含量、地下部钠钾比和地上部钠离子含量呈显著正相关, 代表钠离子积累与离子平衡, 命名为“钠离子积累与离子平衡因子”。PC4 特征值为 1.817, 方差贡献率为 9.565%, 该主成分主要受到发芽率、发芽势和苗干重的正向影响, 集中体现了种子萌发及早期生长, 命名为“种子萌发与早期生长因子”。PC5 特征值为 1.773, 方差贡献率为 9.331%, 该成分与地上部钠离子含量、地上部钠钾比呈强烈负相关, 同时与地下部钠离子含量呈正相关, 显示其主要反映了植株地上部对盐分的响应, 尤其是钠离子过量积累下的抑制效应, 该因子揭示了不同基因型对盐分胁迫的敏感性, 命名为“地上部钠钾离子胁迫因子”。PC6 特征值为 1.545, 方差贡献率为 8.133%, 该成分的主要载荷为地下部钾离子含量, 命名为“根系钾调节与耐盐机制因子”。PC7 特征值为 1.194, 方差贡献率为 6.286%, 该成分与地上部钾离子含量呈显著负相关, 与最大根长和苗

表 3 各指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of each index

指标 Index	主成分分析 Principal component analysis						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
地上部钠离子含量 $\text{Na}^+\text{-S}$	0.190	0.199	0.374	0.141	-0.668	0.198	-0.323
地上部钾离子含量 $\text{K}^+\text{-S}$	-0.162	-0.103	0.281	0.233	0.115	-0.015	-0.800
地上部钠钾比 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-S}$	0.355	0.257	0.239	0.113	-0.631	0.139	0.188
地下部钠离子含量 $\text{Na}^+\text{-R}$	-0.155	-0.100	0.634	0.126	0.523	0.304	0.105
地下部钾离子含量 $\text{K}^+\text{-R}$	0.023	0.456	-0.053	-0.004	-0.003	0.732	0.170
地下部钠钾比 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-R}$	-0.096	-0.563	0.500	0.172	0.378	-0.241	0.040
发芽势 GP	0.128	0.591	0.038	0.648	0.129	0.041	0.101
发芽率 GR	0.002	0.506	-0.180	0.682	0.314	0.042	0.115
脯氨酸含量 PC	-0.376	-0.578	0.039	0.160	-0.197	-0.042	0.089
苗鲜重 SFW	0.779	0.178	0.418	0.020	0.053	-0.311	0.094
苗含水量 WCS	0.792	0.155	0.313	-0.049	0.024	-0.222	-0.054
根鲜重 RFW	-0.328	0.649	0.531	-0.381	0.082	-0.099	-0.041
根含水量 RWC	-0.319	0.628	0.558	-0.381	0.079	-0.070	-0.049
鲜重根冠比 R/S-FW	-0.844	0.182	-0.054	-0.276	-0.006	0.286	-0.062
苗干重 SDW	-0.687	0.178	0.213	0.271	-0.153	-0.335	0.283
根干重 RDW	-0.273	0.575	-0.337	-0.107	0.076	-0.528	0.109
干重根冠比 R/S-DW	0.423	0.356	-0.512	-0.398	0.226	-0.122	-0.187
苗高 SL	0.448	-0.045	-0.013	-0.189	0.490	0.381	0.032
最大根长 MRL	0.180	-0.367	0.320	-0.354	-0.095	0.042	0.440
方差贡献率 Contribution rate (%)	18.400	16.427	12.419	9.565	9.331	8.133	6.286
权重 Weight (%)	22.839	20.390	15.416	11.873	11.583	10.096	7.803
特征值 Eigenvalue	3.496	3.121	2.360	1.817	1.773	1.545	1.194

缩写同表 1。Abbreviations are the same as those given in Table 1.

干重也有一定相关性,反映其主要涉及植株对 K^+ 含量变化的敏感调控和根部结构的响应,可能为一种辅助性调节机制,命名为“地上部钾调节与生长结构因子”。7 个主成分的累计贡献率达 80.561%。

2.6 试验材料耐盐性的综合评价

通过主成分分析得到 7 个主成分因子得分及其权重。根据品种的主成分因子得分(表 4),利用公式(11)得到各个材料的隶属函数值(表 5);根据隶属函数值,利用公式(13)计算各个材料的耐盐性综合评价 D 值及排名(表 6), D 值越高则代表材料的耐盐能

力越强。供试材料的 D 值在 0.259~0.748 之间,根据 D 值层次聚类(采用组间平均联结法)生成的树状图,在距离为 5 的水平上进行切割,将材料分成了 4 个等级。整体抗盐等级分类如图 4 所示,一级材料(D 值 0.659~0.748)为高耐盐材料,共 5 份(A275、A158、A051 等);二级材料(D 值 0.458~0.628)为较耐盐材料,共 31 份(A079、A262、A109 等),占大多数;三级材料为敏感材料(D 值 0.373~0.442),共 7 份(A140、A284、A253 等);四级材料为高度敏感材料(D 值 0.259),共 1 份(CS)。

表 4 不同材料的主成分因子得分
Table 4 Principal component factor scores of different materials

材料 Material	主成分因子得分 Principal component factor score						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
中国春 Chinese Spring	-1.898	-2.358	-0.098	-1.062	-2.497	1.002	-0.364
山农 27 Shannong 27	0.010	1.273	-0.230	-1.880	-1.759	0.021	0.818
山农 6306 Shannong 6306	-0.521	0.734	-0.658	0.171	-0.685	0.109	0.743
山融 3 号 Shanrong 3	0.457	-0.214	-3.213	-1.398	1.198	1.800	0.033
A024	0.474	0.622	-0.101	-0.759	-0.404	-0.201	-0.187
A049	1.985	0.322	-0.329	-1.218	0.009	-1.136	0.239
A050	0.791	0.013	0.154	0.253	0.935	-0.704	-1.028
A051	0.061	1.889	1.228	1.611	-2.219	0.535	0.228
A060	-0.245	0.693	-1.425	1.850	-1.495	0.417	-2.032
A079	-1.201	0.912	0.919	0.721	1.262	0.917	0.340
A092	-0.474	0.815	-0.181	-0.254	-0.450	1.765	1.938
A094	-0.954	1.144	0.863	-0.131	-0.291	-0.230	-1.265
A109	0.349	0.687	0.152	2.300	-1.087	0.075	-0.016
A140	-1.608	-0.855	0.714	0.234	1.144	-1.314	0.347
A149	-0.311	-0.171	0.148	0.586	1.197	0.927	-1.320
A152	2.558	-0.045	0.582	-0.955	-0.686	0.571	0.654
A154	1.341	-1.040	-0.172	0.928	0.920	-1.160	0.740
A156	-0.256	0.602	0.706	-1.599	0.489	-1.532	1.319
A157	0.451	0.278	-0.436	0.756	0.315	-1.490	0.533
A158	1.483	0.763	0.236	1.094	-0.900	0.119	1.486
A219	0.146	0.265	-0.754	-0.703	0.457	-1.364	0.539
A226	-0.392	0.142	-1.730	-0.320	0.018	0.743	0.855
A249	-1.029	0.608	0.667	0.396	1.263	-0.824	0.878
A253	-0.299	-0.104	-1.615	0.417	-0.123	-0.895	-0.399
A256	0.351	0.687	-0.616	-0.501	0.730	-1.119	-0.446
A262	0.655	-0.963	-0.149	1.137	0.321	1.574	0.039
A272	-0.837	0.560	0.618	0.298	0.495	0.034	-1.555
A275	1.451	-0.820	0.737	1.176	1.714	1.747	1.053
A280	-1.696	1.472	-0.636	-0.219	0.412	-0.827	-0.679
A284	-0.050	-0.400	-1.826	0.373	-0.354	-0.265	-0.581
A294	2.160	0.840	0.690	0.010	-0.443	0.763	-1.952

(续表 4)

材料 Material	主成分因子得分 Principal component factor score						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
A350	0.277	-0.153	0.627	-0.126	0.632	0.133	1.322
A352	-0.232	-0.827	-1.094	1.099	0.613	-0.762	-0.147
A356	-0.618	-1.201	0.655	-0.146	0.009	-0.918	-0.559
A359	-1.350	0.438	-1.225	0.199	0.440	0.824	1.481
A371	0.130	0.220	0.731	0.829	0.765	-1.196	-0.326
A372	0.241	-2.460	1.761	0.211	-0.304	-0.065	0.247
A375	0.641	-0.246	0.255	-1.798	-1.131	-1.453	-0.915
A377	-1.158	-0.436	1.097	-0.858	0.172	1.211	1.112
A391	0.304	0.145	0.693	-1.970	1.349	1.712	-2.455
A397	-1.143	0.373	1.442	-0.051	0.093	0.511	-0.486
A404	0.129	-0.150	1.055	-1.117	0.458	0.879	-0.322
A406	0.078	-2.913	-0.801	0.703	-0.639	-0.303	-0.503
A407	-0.250	-1.141	0.562	-0.287	-1.942	-0.633	0.596

表 5 不同材料的隶属函数值
Table 5 Membership function values of different materials

材料 Material	隶属函数值 Membership function value						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
中国春 Chinese Spring	0.000	0.115	0.626	0.213	0.000	0.760	0.476
山农 27 Shannong 27	0.428	0.872	0.600	0.021	0.175	0.466	0.745
山农 6306 Shannong 6306	0.309	0.759	0.514	0.501	0.430	0.492	0.728
山融 3 号 Shanrong 3	0.528	0.562	0.000	0.134	0.877	1.000	0.566
A024	0.532	0.736	0.626	0.284	0.497	0.399	0.516
A049	0.871	0.674	0.580	0.176	0.595	0.119	0.613
A050	0.603	0.609	0.677	0.521	0.815	0.248	0.325
A051	0.439	1.000	0.893	0.839	0.066	0.620	0.611
A060	0.371	0.751	0.359	0.895	0.238	0.585	0.096
A079	0.156	0.797	0.831	0.630	0.893	0.735	0.636
A092	0.320	0.776	0.609	0.402	0.486	0.989	1.000
A094	0.212	0.845	0.819	0.431	0.524	0.391	0.271
A109	0.504	0.750	0.676	1.000	0.335	0.482	0.555
A140	0.065	0.429	0.789	0.516	0.865	0.065	0.638
A149	0.356	0.571	0.676	0.599	0.877	0.738	0.258
A152	1.000	0.597	0.763	0.238	0.430	0.631	0.708
A154	0.727	0.390	0.611	0.679	0.811	0.112	0.727
A156	0.368	0.732	0.788	0.087	0.709	0.000	0.859
A157	0.527	0.664	0.558	0.639	0.668	0.012	0.680
A158	0.759	0.766	0.693	0.718	0.379	0.495	0.897
A219	0.459	0.662	0.494	0.297	0.702	0.050	0.681
A226	0.338	0.636	0.298	0.386	0.597	0.683	0.753
A249	0.195	0.733	0.780	0.554	0.893	0.213	0.759
A253	0.359	0.585	0.321	0.559	0.564	0.191	0.468
A256	0.505	0.750	0.522	0.344	0.766	0.124	0.457
A262	0.573	0.406	0.616	0.728	0.669	0.932	0.568

(续表 5)

材料 Material	隶属函数值 Membership function value						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
A272	0.238	0.723	0.770	0.531	0.711	0.470	0.205
A275	0.752	0.436	0.794	0.737	1.000	0.984	0.798
A280	0.045	0.913	0.518	0.410	0.691	0.212	0.404
A284	0.415	0.523	0.279	0.549	0.509	0.380	0.427
A294	0.911	0.782	0.785	0.464	0.488	0.689	0.114
A350	0.488	0.575	0.772	0.432	0.743	0.499	0.860
A352	0.374	0.434	0.426	0.719	0.739	0.231	0.525
A356	0.287	0.357	0.778	0.427	0.595	0.184	0.431
A359	0.123	0.698	0.400	0.508	0.697	0.707	0.896
A371	0.455	0.653	0.793	0.656	0.775	0.101	0.485
A372	0.480	0.094	1.000	0.511	0.521	0.440	0.615
A375	0.570	0.555	0.697	0.040	0.324	0.023	0.351
A377	0.166	0.516	0.867	0.260	0.634	0.823	0.812
A391	0.494	0.637	0.785	0.000	0.913	0.973	0.000
A397	0.169	0.684	0.936	0.449	0.615	0.613	0.448
A404	0.455	0.575	0.858	0.200	0.702	0.723	0.486
A406	0.443	0.000	0.485	0.626	0.441	0.369	0.444
A407	0.370	0.369	0.759	0.394	0.132	0.270	0.694

表 6 不同材料的 D 值及排名Table 6 D -value and rankings of different materials

材料 Material	D 值 D -value	排序 Rank	材料 Material	D 值 D -value	排序 Rank
A275	0.748	1	A377	0.527	23
A158	0.685	2	A256	0.526	24
A294	0.678	3	山农 6306 Shannong 6306	0.520	25
A152	0.665	4	A094	0.519	26
A051	0.659	5	A359	0.514	27
A079	0.628	6	A156	0.514	28
A109	0.622	7	山融 3 号 Shanrong 3	0.498	29
A262	0.611	8	A372	0.496	30
A092	0.607	9	山农 27 Shannong 27	0.496	31
A350	0.603	10	A226	0.496	32
A154	0.582	11	A060	0.494	33
A049	0.575	12	A219	0.491	34
A371	0.575	13	A352	0.475	35
A050	0.573	14	A280	0.458	36
A404	0.569	15	A140	0.442	37
A149	0.569	16	A284	0.440	38
A391	0.568	17	A253	0.438	39
A249	0.564	18	A356	0.430	40
A157	0.549	19	A375	0.423	41
A397	0.544	20	A407	0.420	42
A024	0.540	21	A406	0.373	43
A272	0.529	22	中国春 Chinese Spring	0.259	44

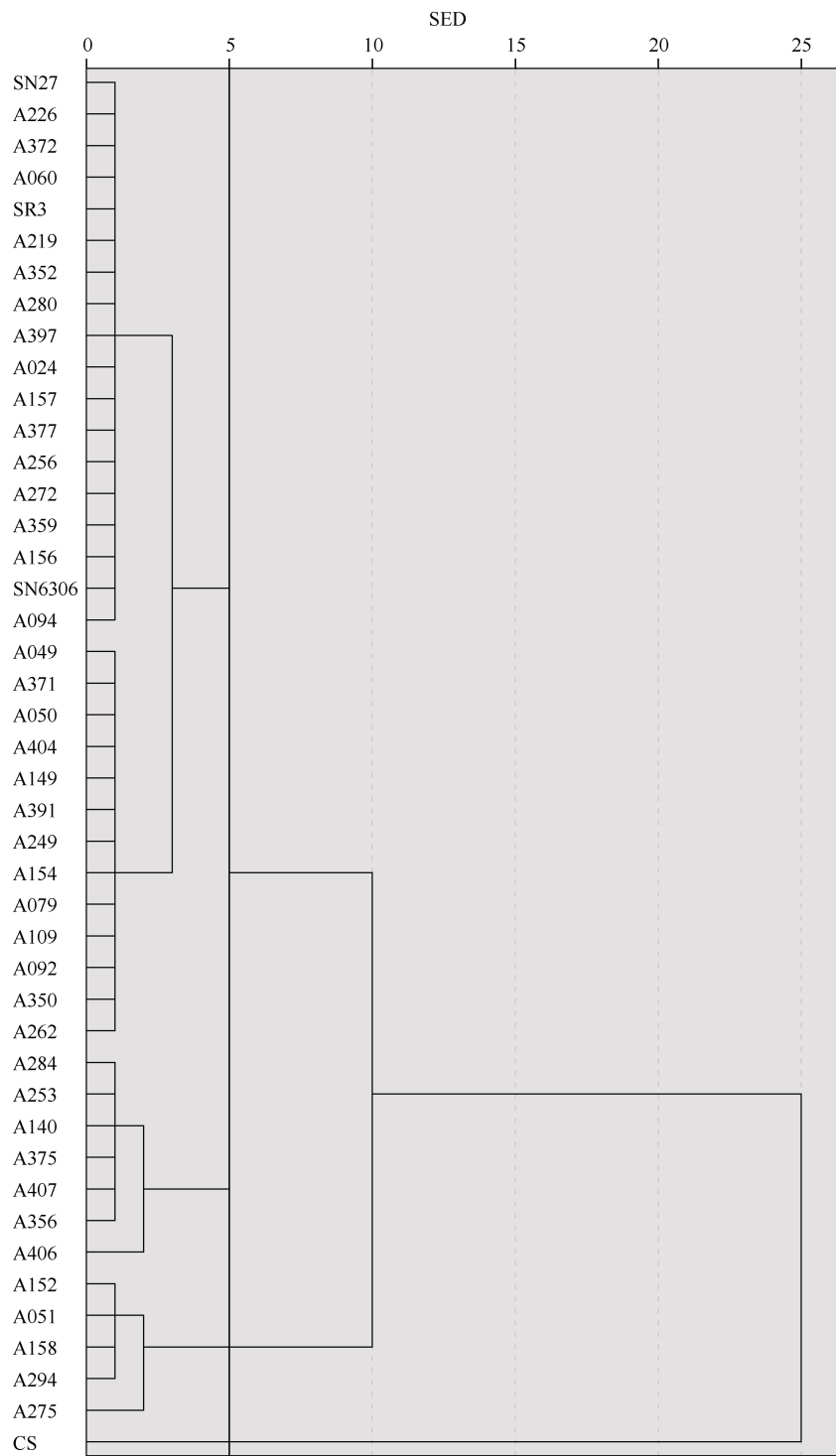


图 4 44 份材料的耐盐性综合评价 D 值的聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of D -value for salt tolerance among forty-four materials
SED: 平方欧式距离; SR3: 山融 3 号; CS: 中国春; SN27: 山农 27; SN6306: 山农 6306。
SED: squared euclidean distance; SR3: Shanrong 3; CS: Chinese Spring; SN27: Shannong 27; SN6306: Shannong 6306.

2.7 逐步回归方程的建立与指标筛选

为了筛选小麦芽期和苗期的抗盐指标以及建立小麦耐盐评价数学模型, 将 19 个所测指标相对耐盐系数作为自变量, D 值作为因变量, 剔除方差膨胀系

数(variance inflation factor, VIF) ≥ 5 的自变量, 建立线性逐步回归方程, 最终余下地上部钾离子含量、地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、发芽势、发芽率、脯氨酸含量、苗鲜重、苗含水量、根干重、

苗高、最大根长共11项指标,得到小麦芽期和苗期耐盐性计算公式: $D \text{ 值} = 0.033 - 0.050 \times K^+ - S + 0.002 \times Na^+ - R + 0.237 \times K^+ - R + 0.176 \times GP + 0.139 \times GR - 0.005 \times PC + 0.197 \times SFW + 0.088 \times WCS - 0.110 \times RDW + 0.242 \times SL + 0.019 \times MRL$, 该方程 $R^2 = 0.999$, $P < 0.01$, 意味着该方程可以解释 D 值 99.9% 的变化原因。对抗盐回归方程分析可得, 地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、发芽势、发芽率、苗鲜重、苗含水量、苗高、最大根长的相对值对 D 值产生显著的正向影响, 地上部钾离子含量、脯氨酸含量、根干重的相对值会对 D 值产生显著的负向影响。

3 讨论

3.1 盐胁迫下小麦芽期和苗期耐盐性鉴定评价体系

种子萌发是小麦整个生育阶段的起始, 提高小麦苗期的耐盐性、促进小麦生长对提高盐碱地小麦产量和品质具有重要意义。作物在不同时期的抗盐能力不同, 目前在作物芽期和苗期抗盐能力方面已有了大量研究^[25-27]。植物芽期的抗盐能力决定其出苗率, 植株苗期抗盐能力则决定其能否正常成长到生育期。高玉刚^[28]对燕麦芽期和苗期的性状指标相对值进行聚类分析, 将供试的 63 个品种分为 4 类。王晓歌等^[29]用浓度为 300 mmol L^{-1} NaCl 溶液对 58 份棉花材料进行苗期盐胁迫处理, 利用多元统计的方法分析将材料分为 5 个等级。蒋优等^[30]通过室内模拟盐胁迫环境并进行多元统计分析, 将 11 项指标降维至 3 个综合指标, 通过聚类分析将 94 份种质资源分为五大类。本研究通过利用敏感材料中国春与抗盐材料山融 3 号的发芽率与苗期叶片表型筛选出两者差异最大的 NaCl 处理浓度分别为 250 mmol L^{-1} 与 300 mmol L^{-1} , 可能在 200 mmol L^{-1} 和 300 mmol L^{-1} 之间存在更加适宜筛选的盐浓度, 但在芽期 250 mmol L^{-1} NaCl 处理和苗期 300 mmol L^{-1} NaCl 处理条件下, 中国春和山融 3 号明显差异, 仍证明了此处理浓度的适用性。大田鉴定法有利于真实反映盐胁迫与环境的互作效应, 直接关联最终产量与农艺性状, 但同时存在环境异质性与试验误差、盐分浓度与分布的不可控性等局限性, 本研究采用的水培培养方式具有盐胁迫环境的高度可控性与精确性、根际环境的无障碍观测与根系表型精准分析、排除土壤复杂因子干扰、试验的高通量与可重复性等优点, 水培筛选适用于大量种质资源的初步评估, 前

人多通过水培法对小麦进行苗期耐盐鉴定^[31-33]。本研究综合前人方法通过水培耐盐试验, 将地上部钠离子含量、地上部钾离子含量、地上部钠钾比、地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、地下部钠钾比、发芽势、发芽率、脯氨酸含量、苗鲜重、苗含水量、根鲜重、根含水量、鲜重根冠比、苗干重、根干重、干重根冠比、苗高和最大根长 19 个指标的相对值进行相关性分析, 对 44 份材料进行主成分分析和隶属函数分析, 通过聚类分析将 44 份材料分为 4 个等级。

3.2 小麦抗盐指标的研究

作物耐盐性存在复杂的生理机制, 盐胁迫会引起作物发生一系列生物量指标、生理生化指标的变化, 不同发育阶段存在不同的针对性鉴定指标。张军等^[34]研究发现, 小麦的最大根长、根体积、根干重和根冠比随着盐胁迫强度的增加呈下降趋势。孙现军等^[35]进行逐步回归分析, 将倒二叶叶长、总叶片数、株高、倒二叶叶绿素含量、根长和根干重作为 1.2% 持续盐胁迫下大豆种质资源苗期鉴定评价指标。前人通过大量研究将脯氨酸含量、过氧化氢 (H_2O_2) 等作为响应植物耐盐胁迫变化指标^[36-38]。植物盐胁迫研究中的分析方法, 伴随统计技术的进步, 已由单一指标的评估演进为整合多个生物量及生理生化指标的综合评价。小麦的生物量指标与生理生化指标均能反映小麦的抗盐性, 将两者结合综合分析才能充分体现小麦的抗盐性, 同时并不是所有指标都适用于小麦苗期和芽期的耐盐性鉴定。本研究将生物量指标和生理生化指标综合进行测量分析得到 D 值, 建立了小麦抗盐逐步回归方程, 筛选到了 4 个生理生化指标(地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、地上部钾离子含量、脯氨酸含量)和 7 个生物量指标(发芽势、发芽率、苗鲜重、苗含水量、苗高、最大根长、根干重)的相对值。本研究筛选出的指标中地上部钾离子含量与陈家婷等^[39]研究结果一致, 同时本试验通过逐步回归法在建立耐盐评价方程时对耐盐指标进行筛选并赋予影响系数, 可以对耐盐能力相近的材料进行进一步评价。

目前通过辐射诱变和远缘杂交创制抗盐材料方面已有相关研究^[40-42], 本研究鉴定的附加系 SN6306 鉴定为 2 级耐盐种质(D 值 = 0.520), 但在其诱变系中鉴定到了更加耐盐的 1 级耐盐种质(D 值 0.659~0.748), 同时也存在 D 值低于 0.520 的小偃麦辐射诱变材料, 本实验室通过转录组和细胞学等方式, 发

现在小偃麦辐射诱变后代存在基因变异和染色体易位等现象,同时对辐射诱变后代在室内盐处理后进行表型分析和盐碱地农艺性状调查,发现确实存在叶色、高度、根长等整体表型优于 SN6306 的材料,推测辐射诱变后代出现 1 级耐盐材料是 ^{60}Co - γ 辐射所致。本研究发现, SN6306 (D 值= 0.520)在苗期和芽期的耐盐性优于本试验中采用的抗盐对照 SR3 (D 值= 0.498),对这 2 个材料在东营盐碱地进行田间调查发现,在全盐量为 0.3%~0.5%的盐碱地中这 2 个材料在成熟期均表现出耐盐性,符合 2 级抗盐材料的表现,且与在正常田间的农艺性状相比, SN6306 的整体长势受到较弱抑制,本研究的田间试验结果与实验室 D 值评价结果相符。

本研究仅对小麦芽期和苗期的 19 个抗盐指标进行了分析,关于小麦抗盐的指标还有根数量、根毛、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量等,因此在加入小麦其他指标分析后得到的回归方程能否保持较好的拟合性和抗盐材料的等级还有待进一步研究。此外,本试验在室内进行,后期需结合大田试验数据进行进一步分析筛选适合在盐碱地种植的品种。

4 结论

本研究通过发芽率试验和表型试验筛选出芽期和苗期的最适筛选盐浓度分别为 250 mmol L^{-1} 和 300 mmol L^{-1} ,通过多元统计分析方法将 44 个小麦材料分为 4 类,筛选到 5 个高抗盐种质材料,并建立了在该条件下小麦综合抗盐能力 D 值的逐步回归方程: D 值= $0.033-0.050\times\text{K}^+-\text{S}+0.002\times\text{Na}^+-\text{R}+0.237\times\text{K}^+-\text{R}+0.176\times\text{GP}+0.139\times\text{GR}-0.005\times\text{PC}+0.197\times\text{SFW}+0.088\times\text{WCS}-0.110\times\text{RDW}+0.242\times\text{SL}+0.019\times\text{MRL}$,筛选出地上部钾离子含量、地下部钠离子含量、地下部钾离子含量、发芽势、发芽率、脯氨酸含量、苗鲜重、苗含水量、根干重、苗高和最大根长共 11 个显著影响抗盐能力的指标,验证了生理指标和生物量指标相结合的方法能够更全面、更准确地反映小麦在盐胁迫下的耐盐性。

References

- [1] 卢春燕. 我国小麦生产现状与提高小麦生产能力的思考. 南方农业, 2021, 15(30): 177-178.
Lu C Y. Current situation of wheat production in China and thoughts on improving wheat production capacity. South China Agric, 2021, 15(30): 177-178 (in Chinese with English abstract).
- [2] 蒋赞, 张丽丽, 薛平, 等. 我国小麦产业发展情况及国际经验借鉴. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 1-10.
Jiang Y, Zhang L L, Xue P, et al. Development status of wheat industry in China and international experience for reference. J Agric Sci Technol, 2021, 23(7): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [3] 蒋赞, 王秀东. 我国小麦产业发展现状问题及对策浅析. 南方农业, 2020, 14(31): 31-34.
Jiang Y, Wang X D. Analysis on the current problems and countermeasures of wheat industry. South China Agric, 2020, 14(31): 31-34 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张浩. 关于中国小麦生产成本现状分析与展望. 农业与技术, 2021, 41(23): 139-143.
Zhang H. Analysis and prospect on wheat production cost in China. Agric Technol, 2021, 41(23): 139-143 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31: 345-353.
Liu X J, Guo K, Feng X H, et al. Exploration on efficient utilization of saline-alkali land in agriculture. Chin J Eco-Agric, 2023, 31: 345-353 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述. 地理学报, 2011, 66: 673-684.
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land. Acta Geogr Sin, 2011, 66: 673-684 (in Chinese with English abstract).
- [7] 董宏图, 解超杰, 侯佩臣, 等. 高盐胁迫下小麦幼苗离子吸收动态及耐盐性筛选. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 762-770.
Dong H T, Xie C J, Hou P C, et al. Dynamic of ionic absorption and salt tolerance screening in wheat seedling under salt stress. Chin J Eco-Agric, 2021, 29: 762-770 (in Chinese with English abstract).
- [8] 逆晋松, 童文杰, 王玉浩, 等. 河套灌区小麦耐盐性指标筛选与评价. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 54-60.
Ti J S, Tong W J, Wang Y H, et al. Screening and evaluation of salinity tolerance index for wheat in Hetao irrigation district. J China Agric Univ, 2013, 18(6): 54-60 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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. 新疆农业科学, 2013, 50: 809-816.
Liu E L, Jin P, Ma L, et al. Study on screening out salt tolerance indexes of Xinjiang winter wheat and their relevant analysis and evaluation. Xinjiang Agric Sci, 2013, 50: 809-816 (in Chinese with English abstract).
- [10] 孟祥浩, 林琪, 张玉梅, 等. 盐胁迫对小麦萌发的影响及耐盐指标的筛选. 华北农学报, 2014, 29(4): 175-180.
Meng X H, Lin Q, Zhang Y M, et al. Effect of salt stress on germination of wheat and screening of salt tolerance indices. Acta Agric Boreali-Sin, 2014, 29(4): 175-180 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张莹莹, 赵明辉, 孟祥海, 等. 55 份衡麦系列种质资源萌发期耐盐性筛选与鉴定. 山西农业科学, 2025, 53(2): 92-100.
Zhang Y Y, Zhao M H, Meng X H, et al. Screening and identification of salt tolerance of 55 Hengmai wheat accessions of germplasms at germination stage. J Shanxi Agric Sci, 2025, 53(2): 92-100 (in Chinese with English abstract).

- [12] 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. 麦类作物学报, 2024, 44: 1115–1124.
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 Triticeae Crops, 2024, 44: 1115–1124 (in Chinese with English abstract).
- [13] 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. 中国农业科技导报, 2021, 23(3): 25–33.
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 Agric Sci Technol, 2021, 23(3): 25–33 (in Chinese with English abstract).
- [14] 韩冉, 解树斌, 李欣, 等. 耐盐小麦种质筛选、鉴定与评价. 山东农业科学, 2020, 52(9): 12–18.
Han R, Xie S B, Li X, et al. Screening, identification and evaluation of salt-tolerant wheat germplasms. Shandong Agric Sci, 2020, 52(9): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张婷婷, 于崧, 于立河, 等. 松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选. 麦类作物学报, 2016, 36: 1008–1019.
Zhang T T, Yu S, Yu L H, et al. Saline-alkaline tolerance identification and varieties (lines) screening of spring wheat in Songnen Plain. J Triticeae Crops, 2016, 36: 1008–1019 (in Chinese with English abstract).
- [16] 库尼都孜阿依·吐尔汗, 任毅, 颜安, 等. 新疆冬小麦品种萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质的筛选. 新疆农业科学, 2020, 57: 20–31.
Turhan K, Ren Y, Yan A, et al. Comprehensive evaluation and screening of salt tolerance in winter wheat varieties at germination stage in Xinjiang. Xinjiang Agric Sci, 2020, 57: 20–31 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴秀宁, 赵麟, 徐芳琴, 等. 盐胁迫下黑小麦的萌发特性及耐盐评价指标与耐盐种质的筛选. 贵州农业科学, 2023, 51(3): 19–26.
Wu X N, Zhao L, Xu F Q, et al. Germination characteristics of black wheat and screening of salt tolerance evaluation indexes and salt tolerance germplasm under salt stress. Guizhou Agric Sci, 2023, 51(3): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- [18] 苏寒, 王金涛, 董心亮, 等. 不同质量浓度咸水灌溉对冬小麦产量和生理生化特性的影响. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 1–9.
Su H, Wang J T, Dong X L, et al. Effects of different saline water irrigation on yield, physiological and biochemical traits of winter wheat. J Irrig Drain, 2021, 40(8): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王芳, 段迪, 段培, 等. 不同耐盐性小麦胚芽鞘伸长对NaCl胁迫的响应. 作物学报, 2007, 33: 2053–2058.
Wang F, Duan D, Duan P, et al. Coleoptile elongation response of different salt-tolerant wheat cultivars to NaCl stress. Acta Agron Sin, 2007, 33: 2053–2058 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王文杰. ^{60}Co - γ 辐射诱变小偃麦后代的抗白粉病、耐盐性及品质分析. 山东农业大学硕士学位论文, 山东泰安, 2024.
Wang W J. Analysis of Powdery Mildew Resistance, Salt Tolerance and Quality of *Trititrigia* Progenies Induced by ^{60}Co - γ Radiation. MS Thesis of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [21] 黄承彦, 楚秀生. 山东小麦图鉴第二卷-育成品种. 北京: 中国农业出版社, 2024. p 336.
- [22] 王维. 小麦耐盐种质的筛选鉴定及利用. 山东农业大学硕士学位论文, 山东泰安, 2021.
Wang W. Screening, Identification and Utilization of Salt-tolerant Wheat Germplasm. MS Thesis of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第3版). 北京: 高等教育出版社, 2014. pp 258–260.
Zhang Z L, Qu W J. Experimental Guide for Plant Physiology, 3rd edn. Beijing: Higher Education Press, 2014. pp 258–260 (in Chinese).
- [24] 赵玮. 小麦 α/β 水解酶 *ABHD6* 基因的生物信息学分析及耐盐小麦的筛选鉴定. 山东农业大学硕士学位论文, 山东泰安, 2024.
Zhao W. Bioinformatics Analysis of Wheat α/β Hydrolase *ABHD6* Gene and Screening and Identification of Salt-tolerant Wheat. MS Thesis of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李申. 耐低钾和抗盐水稻种质资源的筛选与评价. 南京农业大学硕士学位论文, 江苏南京, 2021.
Li S. Screening and Evaluation of Rice Germplasm Resources for Resistance to Low Potassium and Salt Stress. MS Thesis of Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘吉, 黄梦桑, 赵敏华, 等. NaCl胁迫对菠菜萌发和苗期生理特性的影响. 上海师范大学学报(自然科学版), 2022, 51(1): 1–8.
Liu J, Huang M S, Zhao M H, et al. Effects of NaCl stress on seed germination and the physiological characteristics of spinach. J Shanghai Norm Univ (Nat Sci), 2022, 51(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张子怡. microRNA在水稻抗逆性状中的研究进展. 农学报, 2020, 10(11): 1–6.
Zhang Z Y. microRNA in stress resistance characters of rice: research progress. J Agric, 2020, 10(11): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [28] 高玉刚. 基于转录组和代谢组联合分析燕麦响应盐碱胁迫的机制研究. 黑龙江八一农垦大学博士学位论文, 黑龙江大庆, 2022.
Gao Y G. Study on the Responses of Ota to Saline-alkali Stress Based on Transcriptome and Metabolome Joint Analysis. PhD Dissertation of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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. 山东农业科学, 2025, 57(2): 29–37.
Wang X G, Gao L Y, Deng Y S, et al. Identification and evaluation of cotton salt tolerance during germination and seedling stages. Shandong Agric Sci, 2025, 57(2): 29–37 (in Chinese with English abstract).
- [30] 蒋优, 马雪融, 张博, 等. 苏丹草种子萌发期耐盐性评价及耐盐种质筛选. 作物学报, 2025, 51: 835–844.
Jiang Y, Ma X R, Zhang B, et al. Evaluation of salt tolerance and

- screening of salt-tolerant germplasm of *Sorghum sudanese* during seed germination period. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 835–844 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈宏, 许娜丽, 朱保磊, 等. 腐植酸钾盐对盐碱胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的影响. *腐植酸*, 2025(3): 28–34.
Chen H, Xu N L, Zhu B L, et al. Effects of potassium humate salts on seed germination and seedling growth of wheat under saline-alkali stress. *Humic Acid*, 2025(3): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王掌军, 赵梓翔, 张雪婷, 等. 宁夏春麦区小麦品种(系)耐盐性鉴定及种质筛选. *南方农业学报*, 2025, 56: 1651–1662.
Wang Z J, Zhao Z X, Zhang X T, et al. Identification of wheat varieties (lines) for salt tolerance and screening of germplasm in Ningxia spring wheat region. *J South Agric*, 2025, 56: 1651–1662 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李若璇. 小麦—滨麦、华山新麦草衍生系耐盐种质筛选及分析. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2024.
Li R X. Screening and Analysis of Salt-tolerant Germplasm of Wheat-*Leymus mollis* and *Psathyrostachys huashanica* Keng Derivative Lines. MS Thesis of Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, China, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [34] 张军, 吴秀宁, 王新军. 盐胁迫对小麦幼苗根系生长的影响. *商洛学院学报*, 2016, 30(4): 52–55.
Zhang J, Wu X N, Wang X J. Effects of salt stress on root growth of wheat at its seedling stage. *J Shangluo Univ*, 2016, 30(4): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- [35] 孙现军, 胡正, 姜雪敏, 等. 大豆种质资源苗期耐盐性鉴定评价与筛选. *作物学报*, 2024, 50: 2179–2186.
Sun X J, Hu Z, Jiang X M, et al. Identification, evaluation and screening of salt-tolerant of soybean germplasm resources at seedling stage. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 2179–2186 (in Chinese with English abstract).
- [36] 刘欣玥, 郭潇阳, 王欣茹, 等. 大豆萌发期耐盐性鉴定方法建立及耐盐大豆资源筛选. *作物学报*, 2024, 50: 2122–2130.
Liu X Y, Guo X Y, Wang X R, et al. Establishment of screening method for salt tolerance at germination stage and identification of salt-tolerant germplasms in soybean. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 2122–2130 (in Chinese with English abstract).
- [37] 耿玉珂, 周宜君, 丁宁, 等. 植物耐盐突变体筛选与耐盐转基因研究. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 18(4): 10–17.
Geng Y K, Zhou Y J, Ding N, et al. Selection of salt-tolerant mutant and research on salt-tolerant transgenic in plant. *J Minzu Univ China (Nat Sci Edn)*, 2009, 18(4): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- [38] 龙海婷, 荆桂花, 鹿美航, 等. 新型钙镁硅复合无机材料对盐胁迫下小麦幼苗生长的影响. *河北科技师范学院学报*, 2024, 38(1): 29–36.
Long H T, Jing G H, Lu M H, et al. Effects of novel calcium magnesium silicon composite inorganic materials on growth of wheat seedlings under salt stress. *J Hebei Norm Univ Sci Technol*, 2024, 38(1): 29–36 (in Chinese with English abstract).
- [39] 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. *作物学报*, 2024, 50: 1193–1206.
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. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 1193–1206 (in Chinese with English abstract).
- [40] 乔麟铁, 张潇文, 李世姣, 等. 小偃麦渗入系苗期耐盐鉴定与分子标记评价. *山东农业科学*, 2021, 53(5): 69–73.
Qiao L Y, Zhang X W, Li S J, et al. Salt-tolerance identification at seedling stage and molecular marker evaluation of wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines. *Shandong Agric Sci*, 2021, 53(5): 69–73 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李红, 李波, 杨翌. ^{60}Co - γ 辐射对谷稗幼苗抗盐碱生理特性及抗氧化酶活性的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2019(8): 127–130.
Li H, Li B, Yang Z. Effects of ^{60}Co - γ radiation on resistance to saline physiological characteristics and antioxidant enzyme activities of hiedani seedlings. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2019(8): 127–130 (in Chinese).
- [42] 贾玉芳, 陈曙, 柴明良. γ 射线对沟叶结缕草愈伤组织再生和耐盐性的影响. *草业学报*, 2010, 19(5): 25–30.
Jia Y F, Chen S, Chai M L. Effect of γ -irradiation on callus regeneration and salt tolerance in *Manilagrass*. *Acta Pratac Sin*, 2010, 19(5): 25–30 (in Chinese with English abstract).