

DOI: 10.11686/cyxb2025242

http://cyxb.magtech.com.cn

袁绍燕, 刘元坤, 蔡世杰, 等. 多样性燕麦种质资源苗期耐盐性综合评价. 草业学报, 2026, 35(6): 49—59.

YUAN Shao-yan, LIU Yuan-kun, CAI Shi-jie, et al. Comprehensive evaluation of the salt tolerance of diverse oat germplasm at the seedling stage. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 49—59.

## 多样性燕麦种质资源苗期耐盐性综合评价

袁绍燕<sup>1</sup>, 刘元坤<sup>1</sup>, 蔡世杰<sup>1</sup>, 雷婷馨<sup>1</sup>, 周萍萍<sup>1,2</sup>, 王俊珍<sup>3\*</sup>, 颜红海<sup>1\*</sup>

(1. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 西昌农业科学研究所高山作物研究站, 四川 西昌 615000)

**摘要:**燕麦是世界重要的饲草作物,在解决我国北方牧场饲草短缺中发挥了重要作用,筛选耐盐种质资源,选育耐盐品种对利用盐碱地生产燕麦饲草,进而增加我国饲草供给具有重要意义。为了评价燕麦种质资源耐盐性及筛选耐盐燕麦种质,本研究利用 150 mmol·L<sup>-1</sup>的 NaCl 溶液对来自 52 个国家的 213 份燕麦种质资源进行为期 7 d 的苗期胁迫处理,测定了根长、苗高、根鲜重、苗鲜重、根干重和苗干重 6 个指标,综合利用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析对燕麦种质资源的苗期耐盐性进行综合评价。结果表明:盐胁迫显著降低了除苗干重外的其他指标( $P < 0.05$ )。各生长指标耐盐系数的变异系数为 12.21%~30.74%,表明该群体具有丰富的耐盐遗传多样性。盐胁迫下各指标之间,及与耐盐指数  $D$  值之间均呈现出极显著的正相关性。通过主成分分析将 6 项测定指标转换成了 3 个主成分,累积方差贡献率为 84.14%。根重和苗重可作为评价燕麦苗期耐盐性的优选指标。基于隶属函数分析与聚类分析将供试燕麦种质划分为 5 个耐盐等级,2 份来自葡萄牙和土耳其的燕麦被鉴定为高度耐盐型的燕麦材料,可作为盐碱地后续利用和耐盐育种的优异资源。值得注意的是,栽培品种与地方品种的耐盐性无显著差异,表明当前燕麦育种尚未将耐盐性作为主要育种目标,尚需加强该性状的遗传改良。本研究建立了系统的燕麦耐盐种质筛选体系,为盐渍化地区燕麦遗传改良和栽培提供了重要材料与技术支撑。

**关键词:**燕麦;耐盐性;苗期;种质资源;综合评价

## Comprehensive evaluation of the salt tolerance of diverse oat germplasm at the seedling stage

YUAN Shao-yan<sup>1</sup>, LIU Yuan-kun<sup>1</sup>, CAI Shi-jie<sup>1</sup>, LEI Ting-xin<sup>1</sup>, ZHOU Ping-ping<sup>1,2</sup>, WANG Jun-zhen<sup>3\*</sup>, YAN Hong-hai<sup>1\*</sup>

1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Research Station of Alpine Crop, Xichang Institute of Agricultural Sciences, Xichang 615000, China

**Abstract:** Oat (*Avena sativa*) is an important forage crop worldwide, and it plays a critical role in alleviating the forage shortage in northern China. Identifying salt-tolerant germplasm and using it to develop salt-tolerant varieties are essential for enhancing China's forage supply through oat production on saline-alkali land. To evaluate the salinity tolerance of oat germplasm lines, a diverse set of 213 oat accessions sourced from 52 countries was subjected to 150 mmol·L<sup>-1</sup> salt stress treatment at the seedling stage for 7 days. Six growth indexes, namely root length, seedling height, root fresh weight, seedling fresh weight, root dry weight, and seedling dry weight, were measured.

收稿日期:2025-06-19;改回日期:2025-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(32460476),四川麦类创新团队(SCCXTD-2025-11)和云南省教育厅科学研究基金项目(2024J0414)资助。

作者简介:袁绍燕(2001—),女,云南大理人,在读硕士。E-mail: 2024714685@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: honghai\_yan@ynau.edu.cn; wangjunzhen108@163.com

A comprehensive evaluation of salt tolerance was conducted using correlation analysis, principal component analysis, membership function analysis, and cluster analysis. The results show that all growth indexes except for seedling dry weight were significantly reduced by salt stress ( $P < 0.05$ ). The values of these growth indexes differed markedly among the salt-treated oat germplasm lines. The coefficient of variation for the salt tolerance coefficient ranged from 12.21% to 30.74%, indicating considerable diversity in this oat germplasm. We detected a significant positive correlation between the growth indexes and the multivariate evaluation value ( $D$  value). Through principal component analysis, the six evaluation indexes were consolidated into three multi-trait indexes with a cumulative variance contribution of 84.14%. Root and seedling weights were identified as the preferred indicators for screening salt tolerance at the seedling stage. The membership function analysis combined with cluster analysis grouped the 213 oat accessions into five classes. Two oat landraces originating from Portugal and Turkey had the highest  $D$  values, and were identified as highly salt tolerant germplasm resources. These germplasm materials represent valuable resources for oat cultivation in saline-alkali soils and for breeding new salt-tolerant oat cultivars. There was no significant difference in salt tolerance between oat cultivars and landraces, suggesting that salt tolerance has not been a primary breeding target for oats. This highlights the need for focused efforts towards breeding salt-tolerant oat varieties. Overall, the results of this study provide a robust framework for screening salt-tolerant oat germplasm materials and identify promising accessions for genetic improvement and cultivation in salinity-affected regions.

**Key words:** *Avena sativa*; salt tolerance; seedling stage; germplasm resources; comprehensive evaluation

随着全球气候变化以及不合理灌溉,土壤盐碱化已成为全球农业生产的重要限制因素<sup>[1]</sup>。我国是盐碱地大国,各类盐碱地的总面积约为9900万 $\text{hm}^2$ ,占我国总耕地面积的近10.3%,广泛分布在东北内陆、西北内陆及华北沿海地区,是土壤盐碱化危害最严重的国家之一<sup>[2]</sup>。与此同时,随着我国畜牧业的快速发展,饲草需求量持续攀升,饲草供给与土地资源之间的矛盾日益凸显。据《“十四五”全国饲草产业发展规划》测算,我国优质饲草的年缺口量达到4000万t,且随着居民膳食结构升级和畜牧业规模化推进,这一缺口将进一步扩大。然而,在保障主粮作物安全的战略框架下,现有耕地资源优先用于粮食生产,饲草种植空间受到严重挤压。因此利用盐碱地进行饲草生产成为破解资源约束、保障国家粮食与生态安全的有效途径。然而,在盐渍土壤上,作物往往表现为出苗延迟、发芽率降低、幼苗生长发育迟缓,因此筛选耐盐资源,培育耐盐品种是实现战略目标的前提。

燕麦(*Avena sativa*)隶属于禾本科燕麦属,是全球重要的饲草作物,也是我国北方地区传统粮饲兼用作物<sup>[3]</sup>。作为饲草,燕麦兼具生物量大、营养均衡、适应性广等优势,其干物质粗蛋白含量为12%~15%,是反刍动物优质粗饲料的重要来源<sup>[4]</sup>。燕麦具有较强的耐逆能力,可通过其根系作用逐渐改善土壤结构,降低土壤盐碱度,被称为改良盐碱地的先锋作物<sup>[5]</sup>。尽管燕麦具有较强的耐盐性,但当前主栽燕麦品种多针对常规农田选育,耐盐碱性普遍不足,导致盐碱地种植时出苗率低、生物量骤减<sup>[6]</sup>,因此还需要进一步加强燕麦种质资源耐盐性评价,筛选耐盐种质,进而培育耐盐性更强的燕麦饲草品种。

目前已有不少研究对燕麦种质资源的耐盐性进行了评价,并鉴定出一批耐盐性种质<sup>[6-9]</sup>,然而这些研究大多针对燕麦萌发期耐盐性,而对苗期这一对盐胁迫最敏感时期的评价却不多见,仅有少数研究对少量燕麦种质的苗期耐盐性进行了评价<sup>[10-11]</sup>。且有研究表明,萌发期耐盐性与其他生长时期耐盐性并无显著相关关系<sup>[9,12]</sup>。因而开展燕麦种质资源苗期耐盐性系统评价及耐盐种质筛选,对理解燕麦耐盐机制以及耐盐品种选育具有重要意义。基于此,本研究以前期收集到的来自世界52个国家的213份多样性燕麦种质资源为材料,在苗期进行 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 的盐胁迫处理,盐胁迫7d后,测定燕麦幼苗的根长、苗高、根鲜重和干重,以及苗鲜重和干重等能够直接反映耐盐性的形态指标,通过方差分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析等方法对燕麦苗期耐盐性进行综合评价,以期为我国燕麦耐盐品种选育提供遗传资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料选择地理来源广泛、遗传多样性丰富的 213 份燕麦种质资源,均保存于云南农业大学农学与生物技术学院。213 份多样性燕麦资源收集自世界 52 个国家,并根据其地理来源划分为 11 个地理类群<sup>[13]</sup>,包括东亚种质 22 份,中亚种质 11 份,南亚种质 8 份,西亚种质 36 份,非洲种质 12 份,北美洲种质 25 份,南美洲种质 3 份,大洋洲种质 4 份,东欧种质 23 份,中欧地区 15 份,地中海沿岸国家种质 54 份。213 份燕麦种质中包含栽培品种/品系 64 份,地方品种 149 份(表 1)。

表 1 213 份供试燕麦材料地理来源及选育情况

Table 1 Geographical origin and breeding status of the 213 oat germplasm used in this study

来源地 Origin	国家 Country	种质数 量 Germ- plasm number	选育状态 Breeding status		来源地 Origin	国家 Country	种质数量 Germ- plasm number	选育状态 Breeding status	
			育成品种 Cultivar	地方品种 Landrace				育成品种 Cultivar	地方品种 Landrace
东亚 East Asia	中国 China	11	3	8	大洋洲 Oceania	澳大利亚 Australia	4	4	
	蒙古国 Mongolia	10		10	东欧 East Europe	保加利亚 Bulgaria	7	5	2
	朝鲜 North Korea	1		1		捷克 Czech Republic	3	3	
中亚 Central Asia	阿富汗 Afghanistan	6		6		立陶宛 Lithuania	1	1	
	伊朗 Iran	3	1	2		摩尔多瓦 Moldova	1		1
	哈萨克斯坦 Kazakhstan	1		1		波兰 Poland	2	2	
	吉尔吉斯斯坦 Kyrgyzstan	1	1			俄罗斯 Russia	6		6
南亚 South Asia	印度 India	7		7		乌克兰 Ukraine	3		3
	巴基斯坦 Pakistan	1		1	中欧 Central Europe	芬兰 Finland	1	1	
西亚 West Asia	亚美尼亚 Armenia	3	1	2		法国 France	2	1	1
	格鲁吉亚 Georgia	3	1	2		德国 Germany	2	2	
	以色列 Israel	1		1		西班牙 Spain	6	1	5
	阿曼 Oman	3		3		瑞典 Sweden	3	3	
	巴勒斯坦 Palestine	3		3		英国 United Kingdom	1	1	
	叙利亚 Syria	3	1	2	地中海沿岸 Mediterranean	阿尔巴尼亚 Albania	3		3
	土耳其 Turkey	16	1	15		阿尔及利亚 Algeria	4		4
	阿塞拜疆 Azerbaijan	4	1	3		波黑 Bosnia and Herzegovina	13	2	11
非洲 Africa	埃塞俄比亚 Ethiopia	8	1	7		克罗地亚 Croatia	4		4
	南非 South Africa	2		2		塞浦路斯 Cyprus	5	2	3
	乌干达 Uganda	1		1		埃及 Egypt	3		3
	津巴布韦 Zimbabwe	1	1			希腊 Greece	5		5
北美洲 North America	加拿大 Canada	6	6			意大利 Italy	4	2	2
	墨西哥 Mexico	5		5		马其顿 Macedonia	3		3
	美国 United States	14	12	2		摩洛哥 Morocco	5	2	3
南美洲 South America	玻利维亚 Bolivia	2	1	1		葡萄牙 Portugal	1		1
	秘鲁 Peru	1		1		突尼斯 Tunisia	4	1	3

### 1.2 试验方法

**1.2.1 盐胁迫处理** 每个品种随机选取籽粒饱满、大小均一的燕麦种子,采用卷纸法在人工气候箱进行发芽<sup>[14]</sup>,设置条件为光照/黑暗时间 16 h/8 h,温度 25 °C/20 °C。待发芽后,选择生长一致的幼苗转移到装满霍格兰营养液(以河南采菊东篱农业科技有限公司溪青春牌霍格兰配方营养液原料 A、B、C 液为基质,依照霍格兰改良

配方体系确定工作液中各营养成分浓度及铁盐、微量元素母液的添加比例;浓缩液配制按商品操作说明,将A、B、C原料分别溶于去离子水并定容至1 L,制备成100倍浓缩液备用,使用时稀释100倍,配置成1 L标准浓度的霍格兰营养液)的黑色水培盒中,待长至两叶一心时进行盐胁迫处理。前人研究表明,150 mmol·L<sup>-1</sup>的NaCl溶液为燕麦苗期及以后生长时期最佳盐处理浓度<sup>[9]</sup>。因此本研究选择150 mmol·L<sup>-1</sup>的NaCl溶液作为盐胁迫处理浓度。处理时,将NaCl添加至霍格兰营养液中,配制成150 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl的霍格兰营养液,然后替换正常的霍格兰营养液进行胁迫处理。以在正常霍格兰营养液中生长的植株作为对照。盐胁迫处理时间为7 d,为保证盐胁迫浓度,盐胁迫期间每3 d更换一次处理液,对照则更换新鲜的霍格兰营养液。

**1.2.2 表型指标测定** 盐胁迫处理7 d后,对处理组和对照组进行表型测定,包括苗高、根长、苗鲜重、根鲜重、苗干重和根干重。测定根长时,将根系自然平展于测量台,调整主根轴向与刻度尺基准线平行后进行测量;苗高测定以茎基部生长点为起点,至最新展开叶叶尖处为终点。每个材料设置3个重复,每个重复测定12株。使用电子天平(精度0.0001 g)进行鲜/干重测定。由于单个幼苗重量较轻,为了减少误差,从每个重复中随机选择5株混合进行鲜/干重测量。称量前使用滤纸吸干地上部分和地下部分多余液体,然后用剪刀将幼苗分为地上部分(茎叶)和地下部分(根)。测量干重时,首先将样品放在烘箱中进行杀青(105 °C杀青30 min),再转入65 °C恒温干燥箱持续脱水至恒重(48 h),置于干燥器平衡后称量。

### 1.3 数据统计与分析

利用Microsoft Excel对数据进行基础整理,然后利用R 4.4.2语言去除离群值(outlier)。将超过1.5倍上四分位与下四分位差值定义为离群值。再对盐胁迫处理和对照处理各测定指标的最大值、最小值、均值、标准差、变异系数等进行统计分析。最后进行主成分分析、隶属函数分析和聚类分析。

首先,以每个测定指标3次重复的平均值为基础,计算6个测定指标的耐盐系数(salt tolerance coefficient, STC):

$$STC = \frac{\text{盐胁迫条件下被测指标平均值}}{\text{对照条件下被测指标平均值}} \times 100\%$$

随后基于耐盐系数计算隶属函数 $\mu(X_j)$ 。

$$\mu(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: $X_j$ 表示第 $j$ 个指标的耐盐系数, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别表示第 $j$ 个指标中耐盐系数的最大值和最小值, $\mu(X_j)$ 表示第 $j$ 个指标的隶属函数值。

对各指标的隶属函数值进行主成分分析,确定主成分的个数。在进行主成分分析前,先进行适应性检验。适应性检验采用KMO和Bartlett球形检验。主成分分析完成后,计算权重。

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: $W_j$ 表示第 $j$ 个指标的权重, $P_j$ 表示第 $j$ 个评价指标方差贡献率。最后计算各燕麦材料的耐盐指数 $D$ 值(salt tolerance index), $D$ 值越大说明该材料的耐盐性越强。

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j)W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n$$

聚类分析采用欧式聚类法进行聚类。利用双尾 $t$ 检验(two-tailed  $t$ -test)对盐胁迫和对照处理下各测定指标的显著性差异进行检验。采用皮尔逊相关系数对各测定指标的耐盐系数之间,及与 $D$ 值之间的相关性进行检验。采用多重比较对不同地理来源耐盐性差异进行检验。所有分析均在R 4.4.2中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐胁迫对燕麦苗期表型性状的影响

在150 mmol·L<sup>-1</sup>盐胁迫处理下,213份燕麦种质资源苗期各性状变化如表2所示。除苗干重外,盐胁迫下,燕麦种质的根长、苗高、根鲜重、苗鲜重、根干重的平均值均显著低于对照,说明盐胁迫对燕麦生长有显著的抑制

作用。各性状的耐盐系数为 0.84~1.00, 变异系数为 12.21%~30.74%, 说明盐胁迫对各性状的影响不同。盐胁迫对苗鲜重的抑制明显, 与对照相比下降了 15.79%, 说明苗鲜重对盐胁迫最敏感; 盐胁迫对苗干重的抑制作用最小, 苗干重在对照和胁迫处理下没有显著变化。

表 2 213 份燕麦在盐胁迫下 6 个生长性状及耐盐系数

Table 2 Salt tolerance coefficient and 6 growth traits of 213 oat germplasm under salt stress conditions

性状 Trait	对照组 Control		处理组 Treatment		耐盐系数 Salt tolerance coefficient (STC)	STC 变异系数 Coefficient of variation for STC (%)	显著性 Significant
	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD			
RL (cm)	6.25~23.70	14.08±3.32	6.80~20.20	12.70±2.87	0.90	19.91	***
SH (cm)	18.60~38.70	28.20±3.97	16.50~35.30	25.00±3.84	0.89	12.21	***
RFW (g)	0.007~0.069	0.032±0.010	0.009~0.056	0.028±0.011	0.88	30.74	**
SFW (g)	0.081~0.340	0.190±0.056	0.053~0.280	0.160±0.048	0.84	24.03	***
RDW (g)	0.0016~0.0084	0.0046±0.0013	0.0014~0.0074	0.0041±0.0013	0.89	28.85	***
SDW (g)	0.0074~0.0330	0.0180±0.0054	0.0068~0.0310	0.0180±0.0053	1.00	23.68	ns

注: RL, 根长; SH, 苗高; RFW, 根鲜重; SFW, 苗鲜重; RDW, 根干重; SDW, 苗干重; \*\*\*表示在 0.001 水平下显著, \*\*表示在 0.01 水平显著, ns 表示在 0.05 水平不显著, 下同。

Note: RL, Root length; SH, Seedling height; RFW, Root fresh weight; SFW, Seedling fresh weight; RDW, Root dry weight; SDW, Seedling dry weight; \*\*\* represents significant difference at the 0.001 level, \*\* represents significant difference at the 0.01 level, ns represents non-significant difference at the 0.05 level. The same below.

## 2.2 燕麦耐盐性综合评价

**2.2.1 主成分分析** 对 213 份燕麦种质 6 个性状的隶属函数值进行主成分分析。主成分分析适应性检验和 Bartlett 球形检验结果表明, 所有性状的 KMO 值均超过 0.7 的阈值 (0.77~0.91), Bartlett 球形检验的  $P$  值小于 0.01 的阈值 ( $P=2.9 \times 10^{-135}$ ), 说明各性状之间的关联程度较高, 主成分分析结果可靠。以累积贡献率大于 80% 为阈值提取主成分。结果表明 (表 3), 前 3 个主成分贡献率分别为 60.04%、14.71% 和 9.39%, 累积贡献率达到 84.14%, 可有效反映出 6 项测定指标绝大部分信息。因此, 将测定的 6 项指标转换成 3 个综合指标, 用于下一步耐盐性综合评价值计算。

表 3 燕麦苗期各测定指标耐盐系数的主成分方差贡献率

Table 3 Variance contribution of the principal component derived from the salt tolerance indices of oat seedlings

主成分 Principal component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract square sum load		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution (%)	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution (%)
I	3.60	60.04	60.04	3.60	60.04	60.04
II	0.88	14.71	74.75	0.88	14.71	74.75
III	0.56	9.39	84.14			
IV	0.44	7.41	91.55			
V	0.38	6.30	97.85			
VI	0.13	2.14	100.00			

主成分载荷矩阵能反映出各个评价指标对主成分的影响程度。各主成分的载荷矩阵表明 (表 4), 主成分 I 中载荷较高的 3 个性状分别是苗干重、苗鲜重和根鲜重, 相关系数分别为 0.91、0.88 和 0.80。主成分 II 与根干重的相关性较大, 相关系数为 0.77。主成分 III 与苗鲜重相关性最大。这说明根鲜重和干重, 苗鲜重和干重与耐盐性密切相关。

2.2.2 耐盐指数  $D$  值与各性状之间的相关性  
 采用隶属函数值分析计算耐盐指数  $D$  值,结果显示  $D$  值分布于 0.03~0.80,平均值为 0.50,变异系数达到 21.40%,说明各个供试燕麦材料之间的离散程度较大,也表明该盐胁迫浓度能够较好区分 213 份燕麦种质资源的耐盐性(图 1A)。相关性分析表明(图 1B),除根长和苗高外,其余指标之间均显著正相关。6 个生长指标的隶属函数值均与  $D$  值显著

表 4 6 个生长性状的主成分载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of the 6 growth traits on the principal components

主成分 Principal component	根长 Root length	苗高 Seedling height	根鲜重 Root fresh weight	苗鲜重 Seedling fresh weight	根干重 Root dry weight	苗干重 Seedling dry weight
I	0.700	0.760	0.800	0.880	-0.540	0.910
II	0.410	0.330	-0.100	0.007	0.770	-0.052
III	-0.300	0.250	-0.280	0.310	0.140	0.200

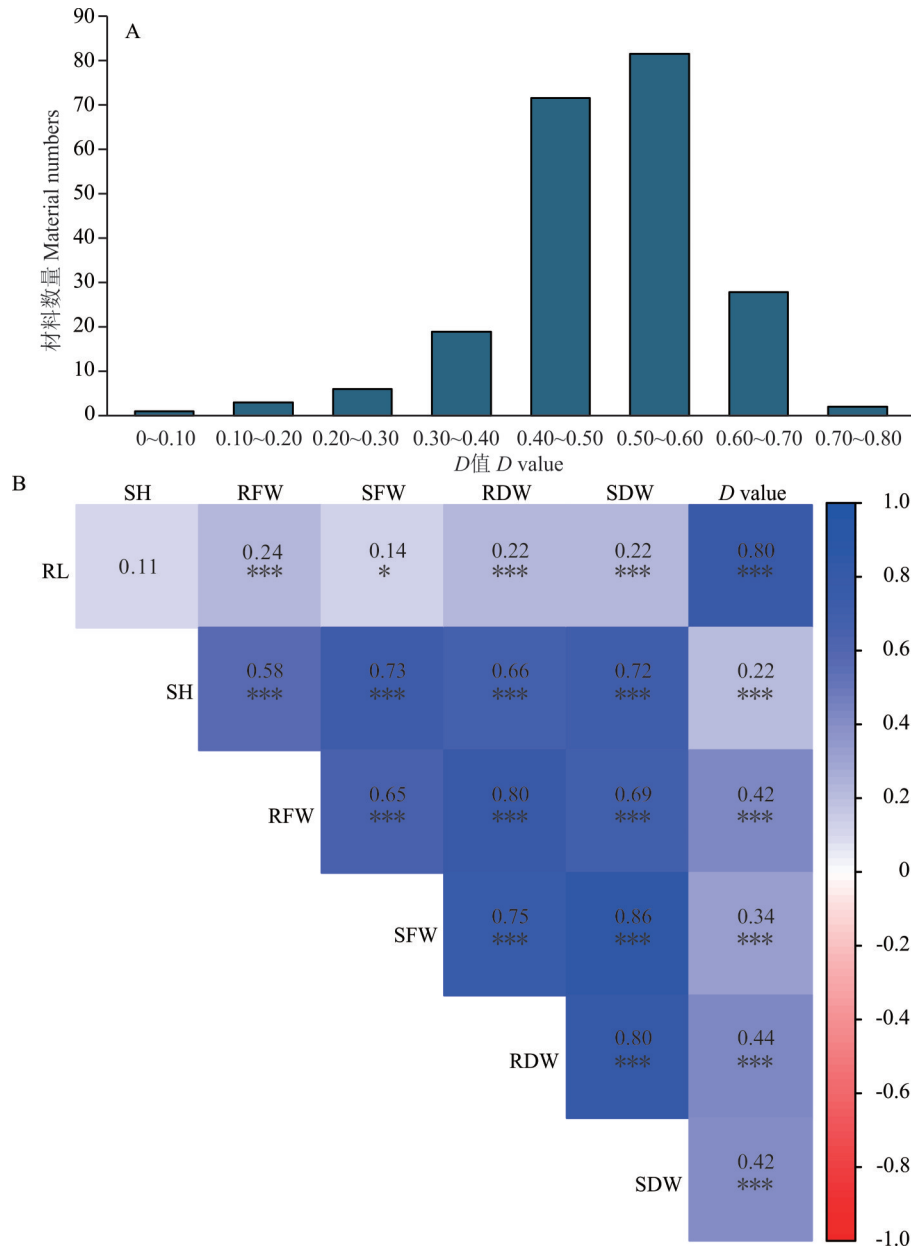


图 1 燕麦 6 个生长性状隶属函数值及  $D$  值间相关关系

Fig. 1 Correlation between the membership function of 6 growth traits and  $D$  values in oat

RL, 根长; SH, 苗高; RFW, 根鲜重; SFW, 苗鲜重; RDW, 根干重; SDW, 苗干重;  $D$  value:  $D$  值。\*\*\*表示在 0.001 水平下显著, \*\*表示在 0.01 水平显著; ns 表示在 0.05 水平不显著。RL, Root length; SH, Seedling height; RFW, Root fresh weight; SFW, Seedling fresh weight; RDW, Root dry weight; SDW, Seedling dry weight. \*\*\* represents significant difference at the 0.001 level, \*\* represents significant difference at the 0.01 level, ns represents non-significant difference at the 0.05 level.

正相关,表明可以用  $D$  值对燕麦的耐盐性进行综合评价。

**2.2.3 燕麦耐盐性聚类分析** 根据计算出的耐盐指数  $D$  值对 213 份燕麦种质资源的耐盐性进行排序,利用系统聚类方法进行聚类分析,结果如图 2 所示。聚类结果将 213 份燕麦分为了 5 个类群,分别代表高度耐盐型、耐盐型、中等耐盐型、盐敏感型、极度盐敏感型。其中高度耐盐类群包含 2 份材料,占供试材料总数的 0.94%, $D$  值分别为 0.80 和 0.74,分别是来自葡萄牙(编号 124)和土耳其(编号 182)的地方品种;耐盐类群包含 103 份材料,占供试材料总数的 48.36%, $D$  值为 0.51~0.69,其中地方品种 74 份,育成品种 29 份;中等耐盐类群  $D$  值为 0.35~0.51,共有 95 份材料,占供试材料总数的 44.60%,包含地方品种 64 份,育成品种 31 份;盐敏感类群有 12 份材料,占供试材料总数的 5.63%, $D$  值为 0.15~0.33,包括地方品种 9 份,育成品种 3 份;极度盐敏感类群只有 1 份,占供

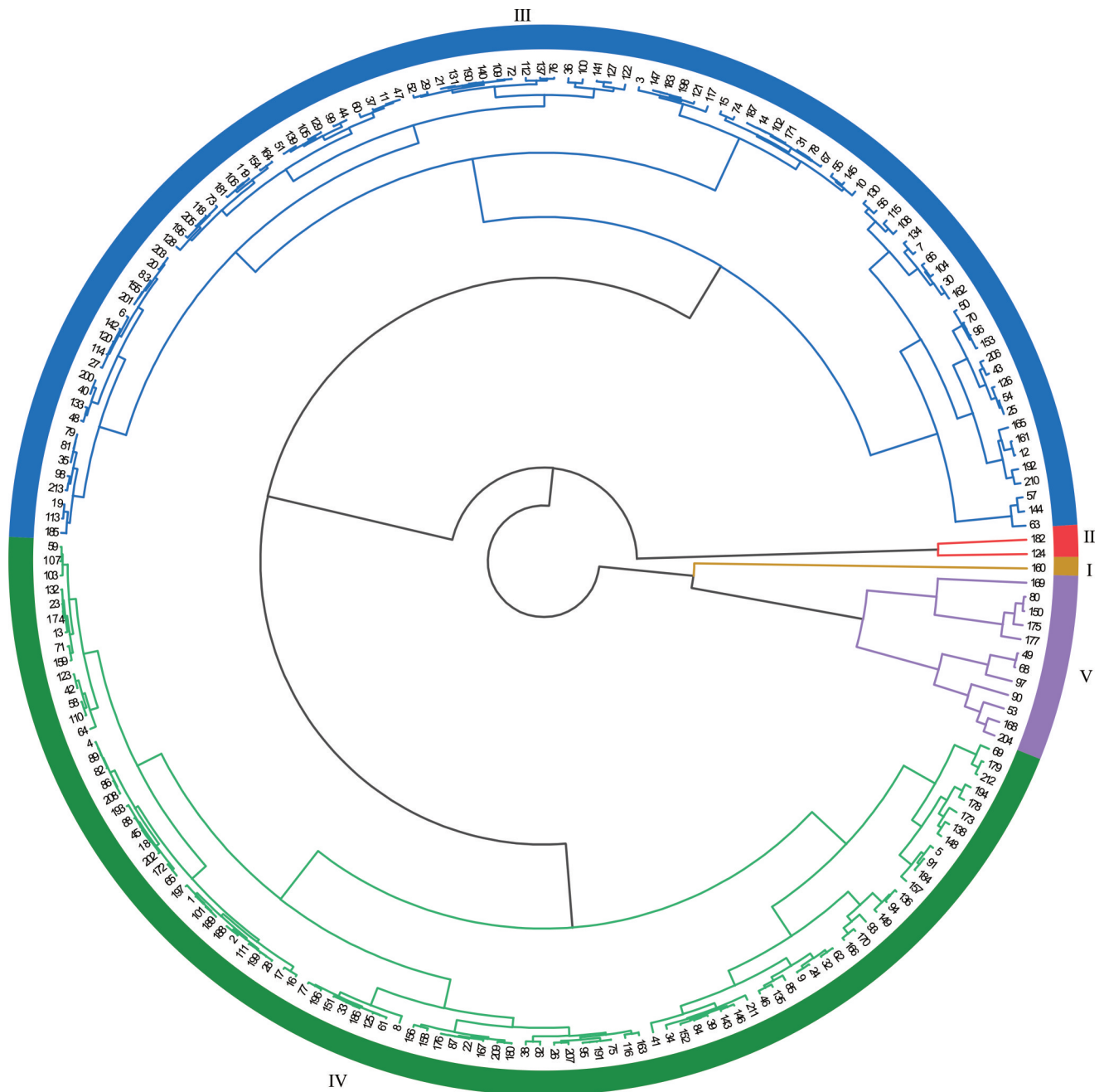


图 2 基于综合评价  $D$  值的 213 份燕麦种质的耐盐性聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of salt tolerance of 213 oat germplasm based on the  $D$  values

I: 高度耐盐型; II: 耐盐型; III: 中等耐盐型; IV: 盐敏感型; V: 极度盐敏感型。 I: High salt-tolerant; II: Salt-tolerant; III: Moderate salt-tolerant; IV: Salt-sensitive; V: High salt-sensitive.

试材料总数的 0.47%,  $D$  值为 0.035, 为来自波兰的育成品种。

**2.2.4 不同地理来源以及不同选育状态燕麦种质耐盐性评价** 根据地理来源以及选育状态(地方品种与育成品种)将燕麦分为不同类群。方差分析表明(表 5), 不同地理来源以及不同选育状态燕麦种质耐盐指数平均值无显著差异, 但从变异系数上看(表 6), 来自东欧的燕麦材料耐盐性变异最大, 为 33.30%, 其次是来自中欧和非

表 5 不同地理来源和选育状态燕麦耐盐性指数方差分析

Table 5 Analysis of variance for salt tolerance index of oats from different origins and with different breeding status

变异来源 Source of variation	自由度 Degrees of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	$F$ 值 $F$ value	$P$ 值 $P$ value
地理来源 Geographic origin (O)	10	0.0840	0.0084	0.72	0.71
选育状态 Breeding status (B)	1	0.0068	0.0068	0.58	0.45
O×B	11	0.0840	0.0076	0.65	0.78
误差 Error	201	2.3500	0.0120		

表 6 不同地区以及不同选育状态燕麦种质资源耐盐指数  $D$  值变异情况

Table 6 Variation in salt tolerance index ( $D$  value) of oats from different regions and with different breeding status

项目 Item	范围 Range	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)	
地理来源 Geographic origin	东亚 East Asia	0.38~0.64	0.50	0.07	14.00
	中亚 Central Asia	0.33~0.65	0.51	0.09	17.60
	南亚 South Asia	0.32~0.56	0.47	0.09	19.20
	西亚 West Asia	0.26~0.74	0.52	0.09	17.30
	中欧 Central Europe	0.20~0.65	0.50	0.12	24.00
	东欧 East Europe	0.03~0.68	0.48	0.16	33.30
	地中海沿岸 Mediterranean	0.20~0.80	0.50	0.11	22.00
	北美洲 North America	0.28~0.66	0.49	0.09	18.40
	南美洲 South America	0.51~0.66	0.59	0.08	13.60
	非洲 Africa	0.26~0.64	0.50	0.12	24.00
	大洋洲 Oceania	0.42~0.46	0.45	0.02	4.44
选育状态 Breeding status	地方品种 Landrace	0.20~0.80	0.50	0.10	20.50
	育成品种 Cultivar	0.03~0.69	0.50	0.12	23.56

洲的燕麦种质, 均为 24.00%, 说明这些地区的燕麦耐盐性变异较为丰富。地方品种和育成品种耐盐性无显著差异, 这说明目前大多数育种项目并未将耐盐性作为主要育种目标之一。

### 3 讨论

#### 3.1 盐胁迫对燕麦苗期生长的影响

研究表明, 盐胁迫会降低植物幼苗对水分的吸收能力, 且当过量盐离子进入植物体内, 会破坏植物细胞功能, 降低光合作用进而抑制幼苗生长, 表现为株高降低, 根长变短, 根数变少<sup>[15-16]</sup>。本研究中, 在 150 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 溶液胁迫处理下, 213 份燕麦种质的根长、苗高、根鲜重、苗鲜重和根干重显著降低, 说明盐胁迫处理显著抑制了燕麦幼苗的生长。但燕麦苗干重并未显著降低, 这可能与胁迫处理的时间有关。因为盐胁迫对植物幼苗生长的影响与胁迫的浓度和时间直接相关; 在拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 中, 低浓度盐胁迫不仅不抑制拟南芥幼苗生长, 反而促进拟南芥侧根生长, 进而增加苗干重<sup>[17-18]</sup>。在小麦 (*Triticum aestivum*) 中, 同样发现随着盐胁迫浓度的增加, 小麦幼苗的最大根长、根鲜重、根总长、根尖数、苗长、苗鲜重表现出降低的趋势, 但根干重和苗干重呈先降低后升高的趋势<sup>[19]</sup>。盐胁迫时, 植物可通过将 Na<sup>+</sup> 滞留于根部, 或从茎基部排除, 来减少对地上部分的伤害<sup>[20-21]</sup>。本研究观察到大多数燕麦种质在盐胁迫处理 7 d 后有大量 NaCl 从燕麦茎基部析出(结果未展示), 说明燕麦普遍

存在将多余盐分从韧皮部外排这一耐盐机制。与此同时,燕麦幼苗在盐胁迫时会产生渗透调节物质,如可溶性糖、脯氨酸等来消除活性氧等的积累,降低对细胞的伤害<sup>[22-23]</sup>,因而尽管盐胁迫 7 d 显著降低了苗高和苗鲜重,但可能尚未对干物质的积累造成显著影响。

### 3.2 燕麦苗期耐盐性评价方法

作物的耐盐性是一个受多基因控制的复杂数量性状。在受到盐胁迫后,燕麦会通过多种形态和生理途径的协同作用来应答胁迫环境,由于不同燕麦品种对盐胁迫的响应机制不同,因此不同指标对盐胁迫的敏感性不同,所以应采取多种指标综合评价的方法而不是单一指标来进行评价,从而合理有效地区分不同基因型间的耐盐性差异<sup>[6,10]</sup>。基于隶属函数法的抗逆性综合评价法已被成功应用于包括燕麦在内的多种作物的抗逆评价,并成功筛选到多个耐逆种质资源<sup>[6,8,10,19,24]</sup>。

本研究对包括根长、苗高、根鲜重、苗鲜重、根干重和苗干重在内的 6 个性状进行了统计,相关性分析表明这些性状之间都存在显著的相关关系,但性状间的相关性各不相同,说明各性状对盐胁迫的响应表现不一致,也证实利用单一性状进行燕麦苗期耐盐性评价的局限性,因此采用综合耐盐指数  $D$  值,可以较好地反映各品种的苗期耐盐性。利用主成分分析和隶属函数分析,本研究筛选出了 103 份耐盐和 2 份高耐盐种质。然而,这些结果是在室内试验中得到的,还需要进一步通过田间试验进行验证。

耐盐综合评价法虽然能够全面地评价作物的耐盐能力,但测量的性状较多,工作量较大,不适宜用于对大量材料的快速鉴定,而通过对不同耐盐性状进行分析,可以筛选出能快速、有代表性反映燕麦耐盐性的指标。本研究通过主成分分析发现苗干重、苗鲜重和根鲜重对前 3 个主成分的方差贡献率最大。前人研究也表明根重和苗重与耐盐性密切相关<sup>[25-26]</sup>。对 286 份甘蓝型油菜 (*Brassica napus*) 种质苗期耐盐性进行评价时发现,根鲜重解释了大部分第一主成分的变异<sup>[25]</sup>;对不同茄子 (*Solanum melongena*) 品种苗期耐盐性评价时同样发现地上部分鲜重、根鲜重对方差变异的贡献较大<sup>[26]</sup>。这些结果说明根鲜重与干重,苗鲜重与干重可以作为评价燕麦苗期耐盐性的指标,用于快速评价燕麦苗期耐盐性。

### 3.3 地理来源和育种选择对燕麦耐盐性的影响

植物的耐盐性与其生境密切相关。大量研究表明,生长在沿海海滨区域的种质耐盐性显著高于其他非盐碱地区。来自沿海地区的田菁 (*Sesbania bispinosa*) 耐盐性显著高于内陆非盐碱地区<sup>[27]</sup>;大豆耐盐基因单倍型分布与其种质的地理分布吻合<sup>[28]</sup>。张静等<sup>[6]</sup>对燕麦种质资源萌发期耐盐性分析发现不同地理来源的燕麦种质耐盐性存在差别,来自东北亚地区的燕麦种质资源耐盐性最强,而来自中国西南地区的燕麦种质资源的耐盐碱性最弱。本研究也对不同地理来源的燕麦种质的耐盐性进行了比较,结果却表明不同地理来源的燕麦种质耐盐指数均值间无显著差异,但来自东欧的燕麦材料耐盐性变异最大,多样性最为丰富。现代育种过程中,产量和品质是最主要的育种目标<sup>[29-30]</sup>。由于现代农业生产多在常规农田中进行,因此多数耐逆相关基因并未受到重点选择,甚至在人工选育过程中丧失了亲本中的耐逆基因<sup>[31]</sup>。研究发现中国现代小麦品种中携带的耐盐基因位点数量随着选育进程不断减少<sup>[31]</sup>;番茄 (*Solanum lycopersicum*) 的野生祖先醋栗番茄具有较强的耐盐性,但人工驯化过程主要关注番茄产量,导致番茄的耐盐性减弱<sup>[32]</sup>。本研究中,燕麦地方品种与育成品种的耐盐性无显著差异,表明尽管燕麦的耐盐性并未随着选育进程的深入逐渐丧失,但并未将耐盐性作为育种目标进行选择。随着土地盐渍化范围的不断扩大,在未来的燕麦品种选育中应该将耐盐性作为品种选育的目标之一,以增强燕麦的环境适应性。

## 4 结论

本研究在  $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  浓度处理下测定了 213 份燕麦种质苗期耐盐性相关形态指标,利用相关性分析、主成分分析和隶属函数法对多样性燕麦种质的耐盐性进行了综合评价,筛选出 2 份高耐盐种质资源,可作为候选耐盐燕麦品种选育的亲本;筛选出根鲜重、苗鲜重、根干重和苗干重可作为燕麦苗期耐盐性筛选的优选指标。

## 参考文献 References:

- [1] Hassani A, Azapagic A, Shokri N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century.

- Nature Communications, 2021, 12(1): 6663.
- [2] 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. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 336–348.  
曹晓风, 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. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 336–348.
- [3] Ye X L, Gan Z, Wan Y, *et al.* Advances and perspectives in forage oat breeding. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2): 160–177.  
叶雪玲, 甘圳, 万燕, 等. 饲用燕麦育种研究进展与展望. *草业学报*, 2023, 32(2): 160–177.
- [4] Kaur H, Goyal M, Kaur A, *et al.* Nutritional and yield potential of oat (*Avena sativa* L.) genotypes in dual-purpose crop system. *Cereal Research Communications*, 2023, 51(4): 969–980.
- [5] Ren C Z, Cui L, He F, *et al.* Construction and development of China oat and buckwheat industrial technology system. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 524–532.  
任长忠, 崔林, 何峰, 等. 我国燕麦荞麦产业技术体系建设与发展. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(4): 524–532.
- [6] Zhang J, Gao W B, Yan L, *et al.* Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6): 1551–1561.  
张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选. *作物学报*, 2023, 49(6): 1551–1561.
- [7] Luo Z N, Zhao G Q, Liu H. The comprehensive evaluation of salt tolerance for 24 oat cultivars. *Grassland and Turf*, 2012, 32(1): 34–38.  
罗志娜, 赵桂琴, 刘欢. 24个燕麦品种种子萌发耐盐性综合评价. *草原与草坪*, 2012, 32(1): 34–38.
- [8] Chen X, Zhang Z W, Wu B. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked oat (*Avena nuda* L.) at germination stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 2038–2046.  
陈新, 张宗文, 吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 2038–2046.
- [9] Bai J H, Yan W K, Wang Y Q, *et al.* Screening oat genotypes for tolerance to salinity and alkalinity. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1302.
- [10] Zhang M X, Bai R, Nan M, *et al.* Evaluation of salt tolerance of oat cultivars and the mechanism of adaptation to salinity. *Journal of Plant Physiology*, 2022, 273: 153708.
- [11] Shahid A, Richa P, Rajesh K S, *et al.* Salinity, alkalinity and their combined stress effects on germination and seedling growth attributes in oats (*Avena sativa*). *Crop and Pasture Science*, 2023, 74(11): 1094–1102.
- [12] Pecetti L, Tlahig S, Confalonieri M, *et al.* A comparison of procedures for evaluating and selecting alfalfa landrace germplasm for tolerance to salinity. *Crop Science*, 2024, 64(4): 2143–2157.
- [13] Diederichsen A. Assessments of genetic diversity within a world collection of cultivated hexaploid oat (*Avena sativa* L.) based on qualitative morphological characters. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2008, 55(3): 419–440.
- [14] Ma J, Lin Y, Tang S, *et al.* A genome-wide association study of coleoptile length in different Chinese wheat landraces. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 677.
- [15] Hao S H, Wang Y R, Yan Y X, *et al.* A review on plant responses to salt stress and their mechanisms of salt resistance. *Horticulturae*, 2021, 7(6): 132.
- [16] Atta K, Mondal S, Gorai S, *et al.* Impacts of salinity stress on crop plants: Improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1241736.
- [17] Zolla G, Heimer Y M, Barak S. Mild salinity stimulates a stress-induced morphogenic response in *Arabidopsis thaliana* roots. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(1): 211–224.
- [18] Julkowska M M, Hoefsloot H C J, Mol S, *et al.* Capturing *Arabidopsis* root architecture dynamics with root-fit reveals diversity in responses to salinity. *Plant Physiology*, 2014, 166(3): 1387–1402.
- [19] Gao K O, 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. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(9): 1115–1124.  
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(9): 1115–1124.
- [20] Benito B, Haro R, Amtmann A, *et al.* The twins  $K^+$  and  $Na^+$  in plants. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 723–731.
- [21] Balasubramaniam T, Shen G, Esmaeili N, *et al.* Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 2023, 12(12): 2253.

- [22] Liu L Y, Han G D, Nagaoka T, *et al.* A comparative study of the growth and physiological parameters of two oat (*Avena sativa* L.) lines under salinity stress. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66(6): 847–853.
- [23] Chen X J, Xu Z S, Zhao B P, *et al.* Physiological and proteomic analysis responsive mechanisms for salt stress in oat. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 891674.
- [24] 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. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(3): 25–33.  
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.
- [25] Xue T Y, Lu J C Z, He S X, *et al.* Comprehensive evaluation on saline-alkali tolerance of 286 *Brassica napus* germplasm at seedling stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(3): 356–372.  
薛天源, 鲁金春子, 何思晓, 等. 286 份甘蓝型油菜种质苗期耐盐碱性综合评价. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(3): 356–372.
- [26] Zou M, Tao T, Tian S B, *et al.* Evaluation of salt tolerance in the seedling stage of 139 eggplant germplasm resources for rootstock. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(2): 23–29.  
邹敏, 陶涛, 田时炳, 等. 139 份砧用茄子种质资源苗期耐盐性评价. *干旱地区农业研究*, 2025, 43(2): 23–29.
- [27] Huang G, Wang X F, Liu C L, *et al.* Genomic variation underpins genetic divergence and differing salt resilience in *Sesbania bispinosa*. *Advanced Science*, 2025, 12(32): e02600.
- [28] Guan R X, Qu Y, Guo Y, *et al.* Salinity tolerance in soybean is modulated by natural variation in *GmSALT3*. *The Plant Journal*, 2014, 80(6): 937–950.
- [29] Bailey-Serres J, Parker J E, Ainsworth E A, *et al.* Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*, 2019, 575(7781): 109–118.
- [30] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, *et al.* Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(1): 13–24.
- [31] Li L, Peng Z, Mao X G, *et al.* Genetic insights into natural variation underlying salt tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(4): 1135–1150.
- [32] Lian Q, Li S, Kan S L, *et al.* Association analysis provides insights into plant mitonuclear interactions. *Molecular Biology and Evolution*, 2024, 41(2): msae028.