作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2023, 49(6): 1551–1561 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.21032

燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选

张 静[1] 高文博[1] 晏 林[1] 张宗文[1,2] 周海涛[3] 吴 斌[1,*]

[1] 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; [2] 国际生物多样性中心, 北京 100081; [3] 张家口市农业科学院, 河北张家口 075000

摘 要: 受气候变化及人类生产活动影响, 世界盐碱地范围不断扩大, 土壤盐碱化现已成为限制农业生产发展的重要因素。燕麦是一种耐盐碱性较强的作物, 为了评价燕麦种质资源耐盐碱性及筛选耐盐碱的燕麦种质, 本研究利用 125 mmol L^{-1} NaCl、Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ (物质的量比为 1∶1∶1)的混合盐碱溶液对 485 份燕麦核心种质材料进行发芽胁迫处理, 测定了发芽期发芽势、发芽率、根长、芽长、根鲜重、芽鲜重、根干重和芽干重 8 项指标, 利用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析及聚类分析等方法对参试燕麦种质进行了耐盐碱综合评价及筛选。结果表明: 盐碱胁迫对测定的 8 项指标均表现出抑制作用; 盐碱胁迫下各指标的隶属函数值之间, 及各指标隶属函数值与综合评价值之间均呈现出极显著的正相关性; 通过主成分分析将 8 项测定指标转换成了 2 个主成分, 累计方差贡献率为 76.926%; 结合隶属函数分析与聚类分析共筛选出 2 份高耐盐碱型的燕麦材料: 燕 1606 和海阔夫斯基 596 号, 将 485 份燕麦种质的耐盐碱性划分成了 5 个等级, 其中高耐盐碱材料 2 份、耐盐碱材料 49 份、中等耐盐碱材料 147 份、盐碱敏感材料 129 份、盐碱极敏感材料 158 份; 综合相关性分析、主成分分析和逐步回归方程结果, 确定芽长作为发芽期燕麦耐盐碱筛选的首选指标, 其次根鲜重、芽鲜重、发芽势和发芽率也是进行发芽期燕麦耐盐碱综合评价及筛选的重要指标。

关键词: 燕麦; 种质资源; 发芽期; 耐盐碱; 综合评价

Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.)

ZHANG Jing[1], GAO Wen-Bo[1], YAN Lin[1], ZHANG Zong-Wen[1,2], ZHOU Hai-Tao[3], and WU Bin[1,*]

[1] Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; [2] Biodiversity International, Beijing 100081, China; [3] Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Zhangjiakou 075000, Hebei, China

Abstract: Affected by climate change and human production activities, the world's salt-alkali land is expanding, and soil salinization has become an important factor limiting the development of agricultural production. Oat is a crop with the strong saline-alkali tolerance. To evaluate the salinity tolerance of oat germplasm resources in China, 485 accessions were stress treated with 125 mmol L^{-1} NaCl, Na_2SO_4, and $NaHCO_3$ (1:1:1 molar concentration) solution at germination stage. Eight growth indexes, including germination potential, germination rate, root length, bud length, root fresh weight, bud fresh weight, root dry weight, and bud dry weight, were identified at the germination stage of oats. A comprehensive evaluation and screening of oat germplasm resources for salt-alkali tolerance was performed by the correlation analysis, principal component analysis, membership function analysis, and cluster analysis. The results showed that salt-alkali inhibited all eight indexes identified, and a significant positive correlation was observed between the affiliation function values of the indexes under salt-alkali tolerance and with the comprehensive evaluation value. Eight evaluation indexes were converted into two comprehensive indexes by principal component analysis, with a cumulative variance contribution of 76.926%. The membership function analysis combined with cluster analysis screened a total of two

本研究由财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-07-A-1), 河北省重点研发计划项目(21326305D), 中国农业科学院科技创新工程项目和农作物种质资源保护与利用专项(2020NWB036-06)资助。

This study was supported by the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-07-A-1), the Key Research and Development Program of Hebei Province (21326305D), the Agricultural Science and Technology Innovation Program (ASTIP) in CAAS, and the Crop Germplasm Resources Protection (2020NWB036-06).

* 通信作者(Corresponding author): 吴斌, E-mail: wubin03@caas.cn

第一作者联系方式: E-mail: zhangjing12290218@163.com

Received (收稿日期): 2022-04-28; Accepted (接受日期): 2022-10-10; Published online (网络出版日期): 2022-11-02.

URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20221101.1656.004.html

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

oat accessions with high salt-alkaline tolerance (Oat 1606 and Heikowski 596) and classified 485 accessions into five classes, including two highly saline-alkaline tolerance, 49 salt-alkaline-tolerant accessions, 147 medium saline-alkaline tolerance accessions, 129 sensitive saline-alkaline accessions, and 158 high saline-alkaline sensitive accessions. The results of correlation analysis, principal component analysis, and stepwise multiple regression analysis, and the bud length was screened as the preferred indicator for the screening of salt-alkali tolerance in germinating oats, followed by root fresh weight, bud fresh weight, germination potential, and germination rate, which were also important indexes for the comprehensive evaluation and screening of salt-alkali tolerance in germinating oats.

Keywords: *Avena sativa* L.; germplasm resources; germination stage; salt-alkali tolerance; comprehensive evaluation

土壤盐碱化是源于气候条件、水文地质、不合理灌溉及长期过量施用化肥等因素, 使得盐分在土壤表层不断的积累形成大量的可溶性盐碱的现象[1]。由于气候变化和人为因素的影响, 世界范围内盐碱土面积平均每年以 1.0×10^6~1.5×10^6 hm^2 的速度增长[2-3]。根据联合国教科文组织和粮农组织的不完全统计, 全世界盐碱地的面积约为 9.54 亿公顷, 约占整个陆地面积的 7% [4]。土壤盐碱化现已成为全球所面临的重大生态危机, 是限制农业可持续发展的重要因素[1,5]。中国盐碱土面积大约有 9913 万公顷, 占全国耕地总面积的 10%, 主要分布在西北、东北西部、华北以及长江以北滨海地区, 遍布全国的 17 个省区, 是土壤盐碱化危害最严重的国家之一[6]。盐碱化使土壤理化性质恶化, 土壤板结、肥力下降, 不利于农作物吸收养分, 对农作物生长发育产生危害, 阻碍作物生长[7]。当土壤中的可溶性盐碱含量超过 0.2%时, 就会对作物产生不同程度的胁迫作用[8]。土地的有限性决定了人们需要对盐碱土壤进行利用与修复, 而通过种植耐盐碱作物对盐碱地进行生物改良, 可以在有效利用盐碱地的同时, 吸收土壤中的矿质元素, 增加空气湿度, 减少地表蒸发, 改善农田小气候, 抑制返盐, 是一种改良盐碱化土壤的重要方法[9-10]。

燕麦(*Avena sativa* L.)是禾本科燕麦属粮饲兼用型作物, 根据籽粒类型可分为皮燕麦和裸燕麦, 具有抗旱、抗寒、耐贫瘠等优点, 在中国华北和西北农牧交混地带广泛栽培种植[11], 而这些地区多有盐碱地分布。目前, 国内外在小麦[12-13]、玉米[14]、水稻[15]、大豆[16-17]等作物种质资源耐盐碱鉴定方面已有大量的研究报道。在燕麦耐盐碱性鉴定研究方面, 前人分别对燕麦的耐盐性和耐碱性开展了鉴定研究[18-19], 并且对少量燕麦品种进行了耐盐碱性鉴定[20-21], 这些研究为耐盐碱性燕麦筛选奠定了良好的基础, 但与其它作物相比, 燕麦种质资源的耐盐碱性研究仍然存在一些不足之处: 一是相关燕麦耐盐碱鉴定评价的研究较多侧重于单一的耐盐性或者耐碱性胁迫上, 而盐碱地常存在盐碱共同胁迫的问题, 针对实际生产中存在的混合盐碱胁迫的相关研究较少; 二是缺乏燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价体系, 鉴定评价指标较多且不尽相同, 不同研究结果间难以综合比较; 三是相关研究选取的材料少, 代表性低, 缺乏针对我国现有燕麦种质资源的系统性、大规模耐盐碱性鉴定评价研究。因而开展燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选, 为培育耐盐碱的燕麦品种提供优异亲本, 对于改良修复盐碱土壤, 改善生态环境具有重要意义。本研究以国家作物种质库保存的燕麦种质资源为基础, 选择地理来源广泛、遗传多样性丰富的 485 份燕麦种质资源为材料, 以 NaCl、Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 混合盐碱溶液进行耐盐碱性鉴定, 测定了燕麦种子的发芽势、发芽率、根长、芽长、根鲜重、根干重、芽鲜重和芽干重 8 项指标, 通过方差分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析和隶属函数分析对燕麦种质资源耐盐碱性进行综合评价鉴定, 以明晰中国现有燕麦种质资源耐盐碱性的现状, 筛选出耐盐碱的燕麦种质, 为相关育种研究提供优异亲本材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料选择地理来源广泛、遗传多样性丰富的 485 份燕麦核心种质资源, 均由中国农业科学院国家作物种质库提供, 其中国内种质 345 份, 包括中国华北地区 219 份, 中国东北地区 20 份, 中国西南地区 26 份和中国西北地区 80 份; 国外种质 140 份, 包括东欧地区 43 份, 西欧地区 43 份, 大洋洲地区 11 份, 东北亚地区 9 份, 美洲地区 34 份。

1.2 试验方法

1.2.1 耐盐碱鉴定适宜盐碱浓度的筛选 随机选取本试验材料中的 4 个裸燕麦品种和 4 个皮燕麦品种进行预试验。选用 NaCl、Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ (物质的量比 1∶1∶1)混合盐碱溶液进行盐碱胁迫处理, 盐碱浓度设置 50、75、100、125、150、175 和 200

mmol L^{-1} 7 个水平, 用蒸馏水(CK)作为对照处理。选用籽粒饱满、大小均匀一致的燕麦种子, 浸泡在 1%的次氯酸钠溶液中, 并放在每分钟 180 转的摇床上振荡 15 min, 再用流水冲洗 3~5 min 进行种子消毒处理。消毒完成的种子浸泡在蒸馏水中 3~4 h, 接种前将种子放置在纱布上吸干种子表面水分。发芽采用卷纸发芽法, 每个处理 3 次重复, 采用人工气候箱对供试材料进行培养, 条件为光照/黑暗时间 16 h/8 h, 温度 25℃/20℃。每天添加蒸馏水以弥补水分损失, 调查处理组和对照组的发芽率和发芽势。

1.2.2 耐盐碱性鉴定　　燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价参考《燕麦种质资源描述规范和数据标准》进行, 略有修改[22]。以试验 1.2.1 筛出的最佳盐碱浓度 125 mmol L^{-1} 为耐盐碱鉴定处理浓度, 蒸馏水(CK)为对照, 对 485 份燕麦核心种质进行发芽期耐盐碱性鉴定, 重复 3 次, 每个重复选取 50 粒籽粒饱满、大小均匀一致且完整的燕麦种子, 种子消毒方式、发芽方法及培养条件均与预备试验相同。

1.2.3 高耐盐碱型燕麦品种的极端耐盐碱浓度确定　　对试验 1.2.2 筛选出的高耐盐碱型材料进一步进行极端耐盐碱浓度确定试验, 共设置 5 个处理, 125、150、175 和 200 mmol L^{-1} 的 NaCl、Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ (物质的量比 1∶1∶1)混合盐碱溶液为盐碱胁迫处理, 蒸馏水(CK)作为对照处理, 每个处理 3 次重复, 每个重复选取 50 粒燕麦种子, 消毒方式、发芽方法及培养条件均与预备试验相同。

1.3 指标测定

通过测定燕麦种子发芽期的发芽势(GP)、发芽率(GR)、根长(RL)、芽长(BL)、根鲜重(RFW)、根干重(RDW)、芽鲜重(BFW)和芽干重(BDW) 8 项指标, 综合评价燕麦耐盐碱性。

以根长至少与种子等长, 芽长至少达到种子 1/2 的长度为发芽标准。培养第 4 天统计发芽势, 第 7 天统计发芽率, 发芽势和发芽率参照陈新等[19]的方法按照公式(1)和(2)计算。培养的第 7 天从每份材料的每个重复中随机选取具有代表性的 10 株燕麦幼苗, 用直尺测量最长根长和芽长[19], 将选取的幼苗吸干表面水分后分成地上和地下两部分称量根鲜重和芽鲜重, 再烘干至恒重称量根干重和芽干重。

$$发芽势=\frac{第4天发芽种子数}{供试种子总数}\times 100\% \quad (1)$$

$$发芽率=\frac{第7天发芽种子数}{供试种子总数}\times 100\% \quad (2)$$

1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 进行数据的基础整理, SPSS26.0、R4.1.3 和 Origin 2022 软件对数据进行相关性分析、主成分分析、隶属函数分析以及聚类分析, 具体公式如下[23-24]:

运用公式(3)以每一个测定指标 3 次重复的平均值为基础数据。计算每个测定指标的耐盐碱系数。

$$耐盐碱系数=\frac{盐碱胁迫处理平均值}{对照处理平均值}\times 100\% \quad (3)$$

采用隶属函数分析对 485 份燕麦材料的耐盐碱系数按照公式(4)计算隶属函数值, 式中 X_j 表示第 j 个指标的耐盐碱系数, X_{max}、X_{min} 表示第 j 个指标中耐盐碱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。

$$\mu\left(X_j\right)=\frac{\left(X_j-X_{min}\right)}{\left(X_{max}-X_{min}\right)} \quad j=1,2,3,\cdots,n \quad (4)$$

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, 按照供公式(5)计算权重, 式中 W_j 表示第 j 个指标的权重, P_j 表示第 j 个指标的方差贡献率。

$$W_j=\frac{P_j}{\sum_{j=1}^{n}P_j} \quad j=1,2,3,\cdots,n \quad (5)$$

运用公式(6)计算各材料的综合评价值, 进行燕麦种质资源耐盐碱综合评价, 综合评价值越大说明该材料的耐盐碱性越强。

$$D=\sum_{j-1}^{n}\left[\mu\left(X_j\right)\times W_j\right] \quad j=1,2,3,\cdots,n \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 适宜耐盐碱鉴定的盐碱胁迫浓度确定

为了确定适宜耐盐碱鉴定的盐碱胁迫浓度, 从 485 份燕麦核心种质中随机选出 4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种进行不同盐碱浓度的试验处理。试验结果如图 1 所示, 随着盐碱浓度的不断增加, 4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种的发芽势和发芽率均呈现出不同程度的下降, 并且不同盐碱浓度下燕麦品种间的发芽势和发芽率存在差异。4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种在低浓度的盐碱浓度处理下与对照的发芽势和发芽率差异较小。当盐碱胁迫浓度大于 100 mmol L^{-1} 时, 4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种间的发芽势和发芽率与对照处理相比均存在显著或极显著差异。当盐碱胁迫浓度大于 150 mmol L^{-1}

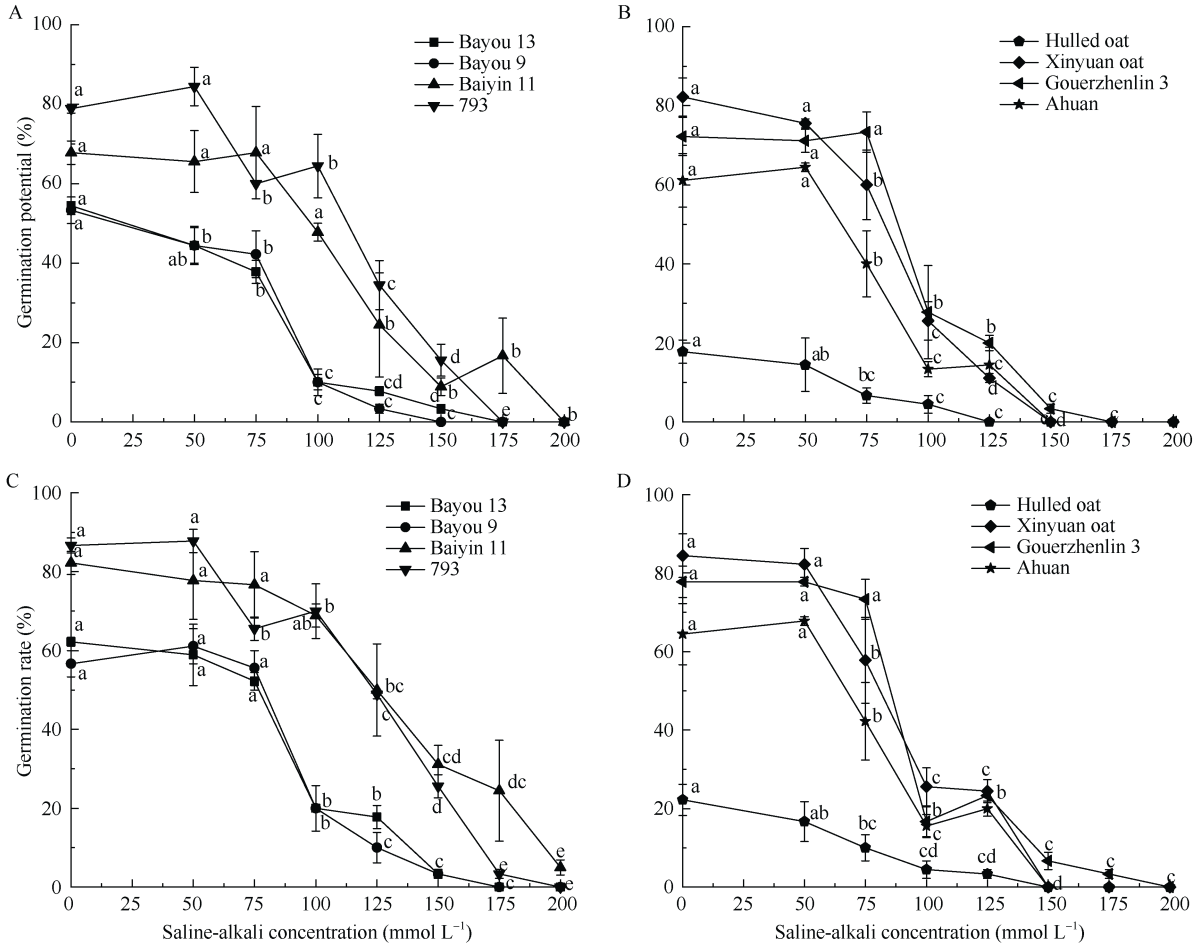


图 1 不同盐碱浓度下 8 份燕麦资源发芽指标变化

Fig. 1 Changes in germination indexes of eight oat germplasm resources under different saline-alkali concentrations

A: 裸燕麦发芽势变化趋势; B: 皮燕麦发芽势变化趋势; C: 裸燕麦发芽率变化趋势; D: 皮燕麦发芽率变化趋势; 同一品种不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

A: the trend of germination potential of Naked oat; B: the trend of germination potential of hulled oat; C: the trend of germination rate of naked oat; D: the trend of germination rate of hulled oat. Different letters of the same variety indicate significant difference between treatments at $P < 0.05$.

时, 4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种的发芽势和发芽率均大幅度下降, 50%燕麦品种的发芽势和发芽率降为 0, 盐碱浓度大于 150 mmol L^{-1} 时燕麦不发芽, 此时浓度已不适合进行燕麦种质的耐盐碱筛选, 而当盐碱浓度为 125 mmol L^{-1} 时, 4 份皮燕麦品种和 4 份裸燕麦品种的发芽势和发芽率与对照相比都表现出显著性或极显著性的差异, 在该盐碱浓度下无论是皮燕麦还是裸燕麦均能够有效的区分出各燕麦材料之间的耐盐碱性, 因此确定 125 mmol L^{-1} 的盐碱浓度为适宜的燕麦种质耐盐碱鉴定浓度。

2.2 盐碱胁迫对燕麦发芽性状的影响

在 125 mmol L^{-1} 混合盐碱胁迫下, 485 份燕麦材料发芽期各性状变化如图 2 和表 1 所示。8 项测定指标发芽势、发芽率、根鲜重、芽鲜重、根干重、芽干重、根长和芽长的平均值在盐碱胁迫下与对照相比都呈现出下降趋势, 说明盐碱胁迫对燕麦种子萌发和幼苗的生长均有不同程度的抑制作用。由表 2 可知盐碱胁迫对根长的抑制作用最明显, 均值为 1.217 cm, 与对照条件下相比下降了 88.85%, 说明根长对盐碱胁迫反应最敏感; 盐碱胁迫对种子的发芽势和发芽率的抑制作用最小, 均值分别为 23.615%和 26.245%, 与对照相比分别下降了 49.83%和 46.85%。

由表 1 中的变异系数可知, 485 份燕麦材料的 8 项测定指标在对照和盐碱胁迫条件下均表现出不同程度的变异。盐碱胁迫处理下各指标间的变异系数均大于对照处理下各个测定指标的变异系数。对照处理下变异系数的变化范围是 12.88%~60.26%, 盐

碱胁迫处理下变异系数变化范围是 35.19%~71.68%, 说明本研究所选用的检测指标显著受到盐碱胁迫的影响, 因此这些指标可以用于耐盐碱性鉴定评价。而这些指标的变异系数变化范围较大, 说明盐碱胁迫对各指标的影响程度不同, 因此不能用单项指标来评价燕麦的耐盐碱性。

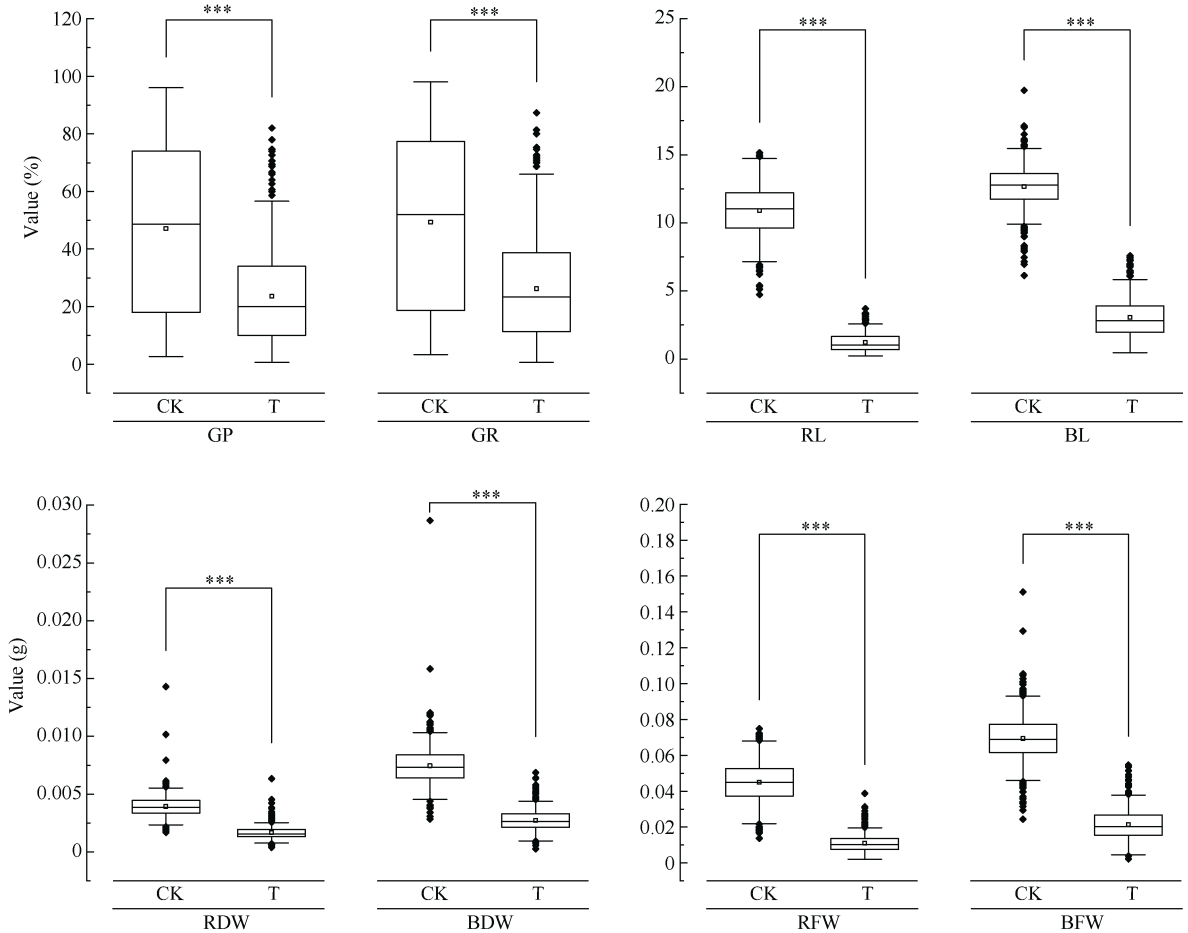


图 2　盐碱胁迫对燕麦发芽期性状的影响

Fig. 2　Effects of salt-alkali stress on germination traits of oat

CK: 对照处理; T: 125 mmol L^{-1} 盐碱胁迫处理; GP: 发芽势; GR: 发芽率; RL: 根长; BL: 芽长; RFW: 根鲜重; BFW: 芽鲜重; RDW: 根干重; BDW: 芽干重; ***: 表示在 0.001 概率水平显著相关。

CK: control treatment; T: 125 mmol L^{-1}saline-alkali stress treatment; GP: germination potential; GR: germination rate; RL: root length; BL: bud length; RFW: root fresh weight; BFW: bud fresh weight; RDW: root dry weight; BDW: bud dry weight; *** indicates significant correlation at the 0.001 probability level.

表 1　485 份燕麦种质在对照和盐碱胁迫条件下各性状描述统计

Table 1　Descriptive statistics of each trait in 485 oat resources under control and saline-alkali tolerance conditions

指标 Indicator	对照处理 Control treatment					盐碱胁迫处理 Saline-alkali stress treatment				
	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV
GP (%)	96.000	2.667	47.073	28.367	60.260	82.000	0.667	23.615	16.928	71.683
GR (%)	98.000	3.333	49.376	29.648	60.046	87.333	0.667	26.245	18.234	69.475
RFW (g)	0.075	0.014	0.045	0.011	25.561	0.039	0.002	0.011	0.005	46.416
BFW (g)	0.151	0.024	0.069	0.014	20.184	0.055	0.002	0.021	0.009	40.769
RDW (g)	0.014	0.002	0.004	0.001	25.507	0.006	0	0.002	0.001	35.188
BDW (g)	0.029	0.003	0.007	0.002	24.505	0.007	0	0.003	0.001	36.322
RL (cm)	15.167	4.733	10.912	1.870	17.133	3.713	0.233	1.217	0.631	51.827
BL (cm)	19.733	6.130	12.655	1.630	12.882	7.587	0.467	3.043	1.397	45.922

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

2.3 燕麦耐盐碱性综合评价

2.3.1 *燕麦发芽期各指标隶属函数值及综合评价值的相关性分析* 如图 3 所示，相关性分析结果表明，燕麦发芽期发芽势、发芽率、根长、芽长、根鲜重、芽鲜重、根干重和芽干重之间存在着极显著正相关，并且与 *D* 值之间也存着极显著正相关。其中芽长的隶属函数值与 *D* 值之间的相关系数最大为 0.81，发芽势、发芽率、根鲜重的隶属函数值与 *D* 值之间也有较大的相关系数(均为 0.80)，表明发芽势、发芽率、根鲜重和根长与 *D* 值之间都存着不少于 80%的重叠信息。可以说这 4 个指标与燕麦的耐盐碱性关系最为密切。相关性分析结果显示，燕麦发芽期各性状之间联系密切且存在着信息的重叠，因此要对其进行降维分析，提取主要的影响因子。

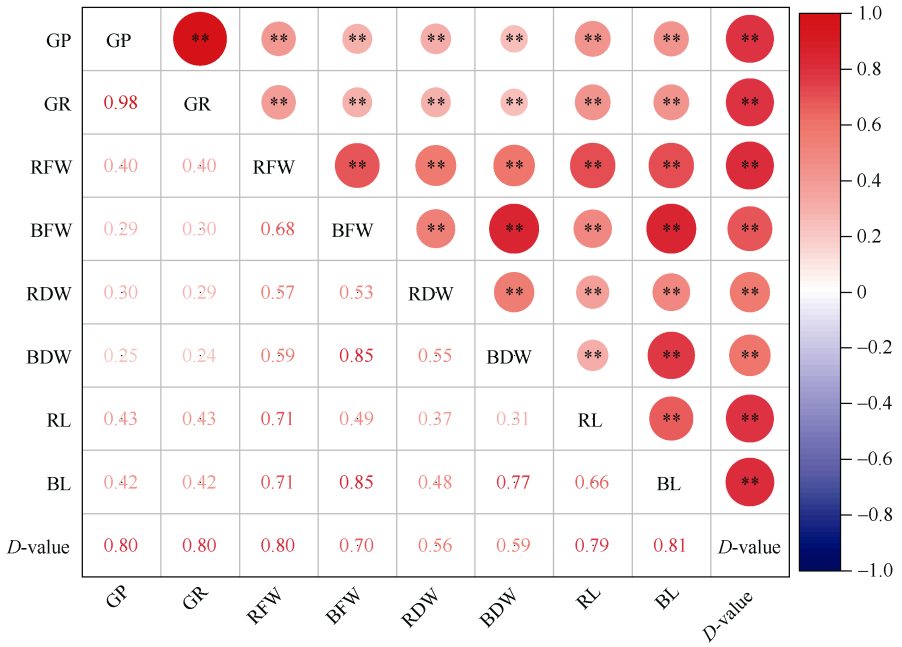


图 3 燕麦各性状隶属函数值及 *D* 值的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of membership function values and *D*-values of various traits in oat

缩写同图 2; *D*-value: 综合评价值; **表示在 0.01 水平上显著相关。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 2; *D*-value: comprehensive evaluation value; ** indicates significant correlation at the 0.01 probability level.

2.3.2 *盐碱胁迫下燕麦发芽期各性状的主成分分析* 由相关性分析结果表明各性状之间存在着极显著正相关，信息重叠性较高，因此对 8 项测定指标进行了主成分分析。通过对燕麦发芽期测定的 8 项指标的隶属函数值进行主成分分析适应性检验和 Bartlett 球形检验，得到的 KMO 值为 0.778，大于 0.7，*P*=0.000，小于 0.01，说明各性状之间的关联程度较高，主成分分析结果可靠。对燕麦性状的隶属函数值进行主成分分析，根据特征值大于 1 以及累积贡献率大于 75%的原则，提取主成分。主成分分析结果如表 2 所示，根据主成分提取原则，选取了前 2 个主成分，第一主成分的特征值为 4.629，方差贡献率为 57.867%；第二主成分的特征值为 1.525，方差贡献率为 19.060%。2 个主成分的累计方差贡献率达到了 76.926%，可有效反映出 8 项测定指标绝大部分信息。因此，将测定的 8 项指标转换成了 2 个综合指标，用于下一步燕麦耐盐碱性综合评价值计算。

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。由表 3 可知，根鲜重、芽鲜重和芽长是第一主成分的主要指标，相关系数分别为 0.847、0.851 和 0.897，该主成分与幼苗的生长密切相关。第二主成分与发芽势和发芽率的相关性较大，相关系数分别为 0.745、0.747，说明该主成分与燕麦的发芽指标较为密切，反映了燕麦种子的发芽情况。

2.3.3 *燕麦耐盐碱性聚类分析* 根据计算出的 *D* 值，对 485 份燕麦种质进行耐盐碱排序，利用系统聚类方法，对其进行聚类分析，结果如图 4 所示。485 份燕麦种质可划分为 5 大类。第 1 类是高耐盐碱型材料有 2 份，占供试材料总数的 0.41%，第 2 类是耐盐碱型材料有 49 份，占供试材料总数的 10.10%；第 3 类是中等耐盐碱型材料有 147 份，占供试材料

表 2　燕麦发芽期各指标的主成分方差贡献率
Table 2　Principal component variance contribution rate of germination indexes of oat

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 rate (%)	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)
1	4.629	57.867	57.867	4.629	57.867	57.867
2	1.525	19.060	76.926	1.525	19.060	76.926
3	0.735	9.186	86.112			
4	0.614	7.669	93.781			
5	0.249	3.115	96.897			
6	0.123	1.538	98.435			
7	0.108	1.352	99.787			
8	0.017	0.213	100.000			

表 3　主成分载荷矩阵
Table 3　Principal component load matrix

主成分 Principal component	GP	GR	RFW	BFW	RDW	BDW	RL	BL
1	0.634	0.632	0.847	0.851	0.669	0.777	0.730	0.897
2	0.745	0.747	–0.111	–0.370	–0.187	–0.423	0.116	–0.187

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.



图 4　485 份燕麦种质资源耐盐碱性聚类分析
Fig. 4　Cluster analysis of salt-alkali tolerance of 485 oat germplasm resources
I: 高耐盐碱型; II: 耐盐碱型; III: 中等耐盐碱型; IV: 盐碱敏感型; V: 盐碱极敏感型。
I: the highly salt-alkaline-tolerant accessions; II: the salt-alkaline-tolerant accessions; III: the medium salt-alkaline-tolerant accessions; IV: the salt-alkaline-sensitive accessions; V: the high salt-alkaline-sensitive accessions.

总数的 30.31%; 第 4 类是盐碱敏感型材料有 129 份, 占供试材料总数的 26.60%, 第 5 类是盐碱极敏感型材料有 158 份, 占供试材料总数的 32.58%。高耐盐碱型的 2 份燕麦材料编号为 411 (海阔夫斯基 596 号)和 413 (燕 1606)。

2.3.4 高耐盐碱型材料盐碱极限浓度鉴定 通过对 485 份燕麦核心种质资源的耐盐碱性鉴定评价, 筛选出了 2 份高耐盐碱型的燕麦材料分别为 411 (海阔夫斯 596 号)和 413 (燕 1606)。如表 4 所示, 411 (海阔夫斯 596 号)发芽势和发芽率在盐碱胁迫为 200 mmol L^{-1} 时降到了 10%以下, 与对照相比表现出显著性差异。413 (燕 1606)的发芽势在盐碱胁迫为 175 mmol L^{-1} 时降低到了 10%以下, 发芽率在 200 mmol L^{-1} 时降到了 10%以下, 与对照相比呈现出显著性差异, 说明这 2 个品种在盐碱胁迫浓度为 175 mmol L^{-1} 时种子发芽才受到严重抑制。

表 4 不同盐碱浓度对燕麦发芽指标的影响
Table 4 Influence of different salt and alkali concentration on oat germination index (%)

盐碱浓度 Saline-alkali concentrations	411 (海阔夫斯 596 号 Heikowski 596)		413 (燕 1606 Oat 1606)	
	GP	GR	GP	GR
CK	51.33 a	52.00 a	52.67 a	54.67 a
125 mmol L^{-1}	34.00 b	39.33 ab	22.00 b	30.67 ab
150 mmol L^{-1}	24.67 bc	30.67 b	20.67 c	27.33 b
175 mmol L^{-1}	18.67 cd	24.67 b	8.00 cd	12.67 b
200 mmol L^{-1}	6.67 d	8.00 c	3.33 d	6.00 c

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2

2.3.5 燕麦发芽期耐盐碱回归模型建立及评价指标筛选 为了便于燕麦种质资源的鉴定与筛选, 建立了燕麦耐盐碱多元线性回归数学模型。将 485 份燕麦种质按照 2∶1 的比例随机分成了回归组和检验组 2 组, 回归组 323 份材料 8 个性状的耐盐碱系数作为自变量 X, 耐盐碱性 D 值作为因变量 y, 进行多元逐步回归分析。结合 8 个性状指标的偏回归系数, 最终建立了多元线性回归模型: $y=0.245X_1+0.052X_2+0.171X_3+0.295X_4-0.01$, 方程中 y 代表耐盐碱性 D 值、X_1 代表芽长、X_2 代表发芽势、X_3 代表根鲜重、X_4 代表根长。方程决定系数 $R^2=0.99$, $F=7741.329$, $P<0.01$, 该回归方程对观测数据的真实反映程度为 99%。运用该回归方程计算检验组 162 份材料耐盐碱的预测值, 并与对应的 D 值进行相关性分析, 结果显示相关性系数为 0.996, 两者之间呈极显著正相关, 表明该回归方程能够很好的预测燕麦种质资源的耐盐碱性。在进行燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价时, 试验条件相同的情况下, 只需要测定燕麦发芽期的芽长、发芽势、根鲜重和根干重这 4 个指标, 利用该回归方程计算耐盐碱 D 值, 从而能便捷、高效地评估不同燕麦种质资源的耐盐碱性强弱。

2.4 不同地理来源燕麦种质耐盐碱性评价

根据地理来源的不同将 485 份燕麦种质资源分为 9 组, 对各组种质的耐盐碱性 D 值进行统计分析。结果如表 5 所示, 不同地理来源的燕麦种质资源之间耐盐碱性存在差异, 来自于东北亚地区的燕麦种质资源耐盐碱性最强, 与东欧地区、美洲地区和中

表 5 不同地区燕麦 *D* 值描述统计
Table 5 Description statistics of *D*-value of oat in different areas

地理来源 Geographical origin	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV
中国华北地区 North China	0.041	0.484	0.139 c	0.059	0.424
中国东北地区 Northeast China	0.092	0.415	0.199 ab	0.076	0.382
中国西南地区 Southwest China	0.042	0.162	0.080 d	0.026	0.325
中国西北地区 Northwest China	0.051	0.578	0.173 bc	0.097	0.561
东欧地区 Eastern Europe	0.069	0.712	0.187 bc	0.129	0.690
西欧地区 Western Europe	0.061	0.565	0.229 ab	0.108	0.472
大洋洲地区 Oceanica	0.124	0.355	0.228 ab	0.071	0.311
东北亚地区 Northeast Asia	0.160	0.319	0.244 a	0.057	0.234
美洲地区 The Americas	0.069	0.858	0.183 bc	0.142	0.776

国西北、西南和华北地区资源均存在着显著差异; 来自于中国西南地区的燕麦种质资源的耐盐碱性最弱, 与来源于其他地区的燕麦种质资源均呈显著差异。中国东北和西北地区、欧洲地区、大洋洲地区和美洲地区的燕麦种质资源的耐盐碱性之间差异不显著, 这几个地区的燕麦种质资源耐盐碱性较为一致且耐盐碱程度为中等水平。

3　讨论

土壤盐碱化是世界性的生态环境问题, 盐碱地常可分为盐地、碱地或含多种盐碱成分的混合盐碱地, 中国大面积的盐碱地主要是含有 Na^+、Cl^-、CO_3^{2-}、HCO_3^-、SO_4^{2-}等多种离子的复合盐碱地, 组分复杂, 并且盐化与碱化往往相伴发生[25]。研究表明, 混合盐碱胁迫对作物的危害并不是盐、碱胁迫危害的简单叠加, 其危害程度要远大于单一的盐或碱胁迫, 通过单盐筛选的耐盐性作物并不都适合在盐碱土上生长[26], 因此只采用单一的中性盐或碱性盐进行胁迫试验, 得到的结果对于燕麦耐盐碱机制分析以及育种改良均具有一定的局限性。本研究以 NaCl、Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 混合溶液来模拟盐碱胁迫环境, 进行燕麦耐盐碱性鉴定, 与单一的中性盐或碱性盐相比, 在此条件下筛选出的品种更便于生产利用。

盐碱胁迫对作物不同生长发育时期的影响不同, Hosseini 等[27]、徐玲秀等[28]研究发现大豆在芽期、苗期及花荚期对盐碱的耐受性并不相同, 而且不同生育阶段的耐盐碱性并没有直接的相关性, 水稻[29]中也有类似研究结果, 这说明耐盐碱作物的筛选有赖于不同生育期的系统鉴定。种子发芽期是植株生长发育的初始阶段, 发芽阶段的耐盐碱性对其能否在盐碱地中存活起到至关重要的作用, 而且处于发芽期的作物对盐碱胁迫更为敏感, 影响着作物后期的生长发育[30-31]。在实际生产中, 作物发芽期的耐盐碱性直接决定能否在盐碱胁迫条件下保证较高水平的出苗率, 对作物耐盐碱性评价具有重要参考价值, 同时发芽期鉴定具有耗时短、容量大、操控性强和重复性好等特点, 方便不同研究结果进行比较[32], 因此本研究选择在发芽期对燕麦进行耐盐碱性鉴定评价。

作物的耐盐碱性是一个受多个数量性状控制的复杂性状, 单一的指标并不能够准确地评价作物的耐盐碱性[33-34]。但是对多个指标进行测定, 不仅需要耗费大量的时间、人力、物力和财力, 而且测定的各个指标之间还存在着相关性, 代表信息会出现重叠交叉现象, 也不能很好的评价作物耐盐碱性[35]。因此, 要选取适宜的筛选指标才能避免单一指标或是多个指标鉴定的局限性。本研究选取了 8 个性状, 涵盖了发芽期耐盐碱筛选的所有指标, 综合相关性分析、主成分分析和耐盐碱多元线性回归方程的结果进行了最适宜鉴定指标的筛选。相关性分析显示根长与 D 值的相关系数最大; 其次发芽势、发芽率、根鲜重和芽长。因此, 从相关性分析结果, 可将芽长、发芽势、发芽率和根鲜重作为评价燕麦发芽期耐盐碱性的指标。主成分分析显示第一主成分的方差贡献率为 57.867%, 其中各项性状指标中芽长的载荷数最大; 其次是芽鲜重和根鲜重。第二主成分的方差贡献率为 19.060%, 其中各性状指标中发芽势和发芽率的载荷数最大。因此, 主成分分析结果表明芽长、根鲜重、芽鲜重、发芽势和发芽率可以作为评价燕麦发芽期耐盐碱性的指标。综合相关性分析和主成分分析结果, 本研究表明芽长可作为燕麦发芽期耐盐碱筛选的首选指标, 其次是根鲜重、发芽势和发芽率也是进行燕麦发芽期耐盐碱综合评价及筛选的重要指标。本研究结果与前人筛选出的耐盐碱指标具有相似性。陈新等[19]认为与裸燕麦萌发期耐盐性关系最密切的指标是发芽势和发芽率。付鸾鸿等[21]认为要鉴定燕麦萌发期耐盐碱性的主要指标是发芽势、胚根长和胚根鲜重。斯日古楞等[36]认为与燕麦萌发期耐盐性鉴定最理想的指标是胚芽长和种子萌发指数。同时本研究构建了燕麦耐盐碱性鉴定评价的多元线性回归方程, 筛选出芽长、发芽势、根鲜重和根干重 4 个重要指标可快速评价燕麦种质发芽期耐盐碱性。在相同逆境条件下, 也可测定这 4 项指标, 利用该回归方程快速预测燕麦种质的耐盐碱性, 为燕麦种质资源耐盐碱性鉴定及育种研究提供重要的信息。

评价作物耐盐碱性的指标多种多样, 且各项指标之间存在着一定的线性关系, 使得代表的信息之间出现交叉或重叠。本研究结果也显示了多个指标的耐盐碱系数间存在极显著的相关性, 且不同单项指标的耐盐碱系数在不同种质中的大小排序也有所不同。因此有必要利用综合评价的方法来鉴定耐盐碱这一个复杂的综合性状, 才能较全面、准确及有效地反映出不同种质资源之间的差异性。现阶段运用综合评价的方法鉴定作物的抗逆性已广泛应用与小麦[37]、玉米[38]和大豆[39]等作物中。在小麦抗逆性鉴定方面, 张婷婷等[40]通过主成分分析、隶属函数分析和聚类分析综合评价了 30 份春小麦萌发期和苗期的耐盐碱性, 并成功筛选出 2 份高度耐盐碱的小麦品种。段雅娟等[41]鉴定了玉米萌发期的 10 项生

理指标, 运用主成分分析、隶属函数值分析和聚类分析综合评价了 390 份玉米自交系的耐盐性, 将其划分为了 6 个耐盐等级。在数据处理和耐盐碱性评价过程中, 运用综合评价的方法既减少了指标间代表信息的交叉重叠, 又考虑了综合指标重要性的差异, 避免了单一指标的片面性, 较为科学和系统的反映了种质资源的耐盐碱性差异[42]。本研究基于燕麦发芽期不同性状指标, 采用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析对 485 份燕麦种质资源的耐盐碱能力进行了综合鉴定评价, 筛选出了发芽期高耐盐碱型的 2 份燕麦材料分别是海阔夫斯 596 号基和燕 1606, 2 份材料的 *D* 值分别为 0.712 和 0.858, 且当盐碱浓度提高到 175 mmol L^{-1} 时两者的发芽率才降低到 10%以下。但还需在大田中进一步研究这 2 份材料苗期和成株期的耐盐碱性。这些耐盐碱性材料的鉴定, 为耐盐碱品种的选育和耐盐碱基因的发掘提供了重要资源。

4 结论

在混合盐碱胁迫下燕麦种子的发芽指标和生长指标都受到了抑制。从 485 份燕麦种质资源中筛选出了海阔夫斯基 596 号和燕 1606 两份高耐盐型的种质资源, 为耐盐碱品种的选育和耐盐碱基因的挖掘提供了资源。筛选出了芽长可作为燕麦发芽期耐盐碱筛选的首选指标, 其次是根鲜重、芽鲜重、发芽势和发芽率也是进行燕麦发芽期耐盐碱鉴定评价及筛选的重要指标, 在同等试验条件下可作为燕麦发芽期耐盐碱性鉴定评价及筛选的指标。

References

[1] Allbed A, Kumar L. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Adv Remot Sens*, 2013, 2: 373–385.

[2] Wang S, Sun L, Ling N, Zhu C, Chi F Q, Li W Q, Hao X Y, Bian J Y, Chen L, Wei D. Exploring soil factors determining composition and structure of the bacterial communities in saline-alkali soils of Songnen Plain. *Front Microbiol*, 2020, 10, 2902–2902.

[3] Kovda Victor A. Loss of productive land due to salinization. *J Human Environ*, 1983: 91–93.

[4] 李彬, 王志春, 孙志高, 陈渊, 杨福. 中国盐碱地资源与可持续利用研究. 干旱地区农业研究, 2005, (2): 154–158.
Li B, Wang Z C, Sun Z G, Chen Y, Yang F. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China. *Agric Res Arid Areas*, 2005, (2): 154–158 (in Chinese with Englis abstract).

[5] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, Olson C, Sztein A E, Sparks D L. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 2015, 348: 1261071.

[6] 王遵亲. 中国盐碱土. 北京: 科学出版社, 1993.
Wang Z Q. Saline-alkaline Soils of China. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese).

[7] Zhang W, Chong W, Rui X U E, Wang L J. Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility. *J Integr Agric*, 2019, 18: 1360 –1368.

[8] Doran J C. Australian trees and shrubs: species for land rehabilitation and farm planting in the tropics. *ACIAR Monograph*, 1997, 24: 314–319.

[9] 马晨, 马履一, 刘太祥, 左海军, 张博, 刘寅. 盐碱地改良利用技术研究进展. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28–32.
Ma C, Ma L Y, Liu T X, Zuo H J, Zhang B, Liu Y. Research progress on saline land improvement technology. *World For Res*, 2010, 23(2): 28–32 (in Chinese with English abstract).

[10] 丁海荣, 洪立洲, 杨智青, 王茂文, 朱小梅, 刘冲. 盐碱地及其生物措施改良研究现状. 现代农业科技, 2010, (6): 299–300.
Ding H R, Hong L Z, Yang Z Q, Wang M W, Zhu X M, Liu C. Research status of saline-alkali land and its biological measures improvement. *Mod Agric Sci Technol*, 2010, (6): 299–300 (in Chinese).

[11] 任长忠, 胡跃高. 中国燕麦学. 北京: 中国农业出版社, 2013.
Ren C Z, Hu Y G. Chinese Oatology. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese).

[12] Quamruzzaman M, Manik S M N, Livermore M, Johnson P, Zhou M, Shabala S. Multidimensional screening and evaluation of morpho-physiological indices for salinity stress tolerance in wheat. *J Agron Crop Sci*, 2022, 208: 454–471.

[13] Kingsbury R W, Epstein E. Selection for salt-resistant spring wheat. *Crop Sci*, 1984, 24: 310–315.

[14] Giaveno C D, Ribeiro R V, Souza G M, de Oliveira R F. Screening of tropical maize for salt stress tolerance. *Crop Breed Appl Biotechnol*, 2007, 7: 304–313.

[15] Rasel M, Tahjib-Ul-Arif M, Hossain M A, Hassan L, Farzana S, Brestic M. Screening of salt-tolerant rice landraces by seedling stage phenotyping and dissecting biochemical determinants of tolerance mechanism. *J Plant Growth Regul*, 2021, 40: 1853–1868.

[16] 韩毅强, 高亚梅, 杜艳丽, 张玉先, 杜吉到, 张文慧, 潘绍玉. 大豆耐盐碱种质资源鉴定. 中国油料作物学报, 2021, 43: 1016–1024.
Han Y Q, Gao Y M, Du Y L, Zhang Y X, Du J D, Zhang W H, Pan S Y. Identification of saline-alkali tolerant germplasm resources of soybean during the whole growth stage. *Chin J Oil Crop Sci*, 2021, 43: 1016–1024 (in Chinese with English abstract).

[17] 李春红, 姚兴东, 鞠宝韬, 朱明月, 王海英, 张惠君, 敖雪, 于翠梅, 谢甫绨, 宋书宏. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选. 中国农业科学, 2014, 47: 2927–2939.
Li C H, Yao X D, Ju B T, Zhu M Y, Wang H Y, Zhang H J, Ao X, Yu C M, Xie F D, Song S H. Analysis of shade-tolerance and determination of shade-tolerance evaluation indicators in different soybean genotypes. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 2927–2939 (in Chinese with English abstract).

[18] Bai J, Yan W, Wang Y, Yin Q, Liu J, Wight C, Ma B. Screening oat genotypes for tolerance to salinity and alkalinity. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 1302.

[19] 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: 2038–2046.
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. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 2038–2046 (in Chinese with English abstract).

[20] 杨科, 张保军, 胡银岗, 王淑华, 薛晓峰. 混合盐碱胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 188–192.
Yang K, Zhang B J, Hu Y G, Wang S H, Xue X F. Effects of complex saline-alkali stress on seeds germination and physiological and biochemical characteristics of oat seedlings. *Agric Res Arid Areas*, 2009, 27(3): 188–192 (in Chinese with English abstract).

[21] 付鸾鸿, 于崧, 于立河, 薛盈文, 郭伟. 不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选. 作物杂志, 2018, (6): 27–35.
Fu L H, Yu S, Yu L H, Xue Y W, Guo W. Analysis of salt-alkali tolerance and screening of identification indexes of different Oat at germination stage. *Crops*, 2018, (6): 27–35 (in Chinese with English abstract).

[22] 郑殿生, 王晓鸣, 张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Zheng D S, Wang X M, Zhang J. Description Specification and Data Standard for Oat Germplasm Resources. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese).

[23] 梁潇, 侯向阳, 王艳荣, 任卫波, 赵青山, 王照兰, 李怡, 武自念. 羊草种质资源耐盐碱性综合评价. 中国草地学报, 2019, 41(3): 1–9.
Liang X, Hou X Y, Wang Y R, Ren W B, Zhao Q S, Wang Z L, Li Y, Wu Z N. Comprehensive evaluation on saline-alkali tolerance of *Leymus chinensis* germplasm resources. *Grass China*, 2019, 41(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).

[24] 陈二影, 王润丰, 秦岭, 杨延兵, 黎飞飞, 张华文, 王海莲, 刘宾, 孔清华, 管延安. 谷子芽期耐盐碱综合鉴定及评价. 作物学报, 2020, 46: 1591–1604.
Chen E Y, Wang R F, Qin L, Yang Y B, Li F F, Zhang H W, Wang H L, Liu B, Kong Q H, Guan Y A. Comprehensive identification and evaluation of saline-alkali tolerance of Foxtail millet at bud stage. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1591–1604 (in Chinese with English abstract).

[25] 赵可夫. 植物抗盐生理. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. pp 3–4.
Zhao K F. Plant Salt Resistance Physiology. Beijing: Science and Technology of China Press, 1993. pp 3–4 (in Chinese).

[26] 王佺珍, 刘倩, 高娅妮, 柳旭. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展. 生态学报, 2017, 37: 5565–5577.
Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, Liu X. Review on the mechanism of the responses to saline-alkali stress in plants. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 5565–5577 (in Chinese with English abstract).

[27] Hosseini M K, Powell A A, Bingham I J. Comparison of the seed germination and early seedling growth of soybean in saline conditions. *Seed Sci Res*, 2002, 12: 165–172.

[28] 徐玲秀. 大豆种质资源不同生育时期耐碱性评价. 东北农业大学硕士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2018.
Xu L X. Evaluation of Alkali Tolerance of Soybean Germplasm Resources at Different Growth Stages. MS Thesis of Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang, China, 2018 (in Chinese with English abstract).

[29] Zhu G Y, Kinet J M, Lutts S. Characterization of rice (*Oryza sativa* L.) F_3 populations selected for salt resistance: I. Physiological behavior during vegetative growth. *Euphytica*, 2001, 121: 251–263.

[30] Khan A A, Rao S A, McNeilly T. Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica*, 2003, 131: 81–89.

[31] Verma O P S, Yadava R B R. Salt tolerance of some oats (*Avena sativa* L.) varieties at germination and seedling stage. *J Agron Crop Sci*, 1986, 156: 123–127.

[32] Huang R. Research progress on plant tolerance to soil salinity and alkalinity in sorghum. *J Integr Agric*, 2018, 17: 739–746.

[33] 马晓军, 金峰学, 杨姗, 杨德光, 李晓辉. 作物耐盐碱数量性状基因座(QTL)定位. 分子植物育种, 2015, 13: 221–227.
Ma X J, Jin F X, Yang S, Yang D G, Li X H. Mapping QTLs for salt and alkaline tolerance in crops. *Mol Plant Breed*, 2015, 13: 221–227 (in Chinese with English abstract).

[34] Trachsel S, Messmer R, Stamp P, Ruta N, Hund A. QTLs for early vigor of tropical maize. *Mol Breed*, 2010, 25: 91–103.

[35] Tuyen D D, Zhang H M, Xu D H. Validation and high-resolution mapping of a major quantitative trait locus for alkaline salt tolerance in soybean using residual heterozygous line. *Mol Breed*, 2013, 31: 79–86.

[36] 斯日古楞, 张玉霞, 马群, 邓丽媛, 董航源. 8 个饲用燕麦品种萌发期耐盐性综合评价. 草原与草坪, 2020, 40(6): 118–123.
Siriguleng, Zhang Y X, Ma Q, Deng L Y, Dong H Y. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 8 forage oat varieties. *Grassland Turf*, 2020, 40(6): 118–123 (in Chinese with English abstract).

[37] Khosravi S, Azizinezhad R, Baghizadeh A, Maleki M. Evaluation and comparison of drought tolerance in some wild diploid populations, tetraploid and hexaploid cultivars of wheat using stress tolerance indices. *Acta Agric Sloven*, 2020, 115: 105–112.

[38] Zhang W, Zhao Z, Bai G, Fu F. Study and evaluation of drought resistance of different genotype maize inbred lines. *Front Agric China*, 2008, 2: 428–434.

[39] Li G, Zhang H Y, Ji L, Zhao E, Liu J, Li L, Zhang J. Comprehensive evaluation on drought-resistance of different soybean varieties. *J Appl Ecol*, 2006, 17: 2408–2412.

[40] 张婷婷, 于崧, 于立河, 李琳, 金珊珊, 郭建华, 张静. 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, Li L, Jin S S, Guo J H, Zhang J. Saline-alkali tolerance identification and varieties (lines) screening of spring wheat in Songnen Plain. *J Triticeae Crops*, 2016, 36: 1008–1019 (in Chinese with English abstract).

[41] 段雅娟, 曹士亮, 于滔, 李文跃, 杨耿斌, 王成波, 刘宝民, 刘长华. 玉米自交系萌发期耐盐性鉴定. 作物杂志, 2022, (1): 213–219.
Duan Y J, Cao S L, Yu T, Li W Y, Yang G B, Liu B M, Liu C H. Identification of salt tolerance during germination of maize in-bred lines. *Crops*, 2022, (1): 213–219 (in Chinese with English abstract).

[42] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述. 统计与决策, 2004, (11): 119–121.
Yu X F, Fu D. Summary of multi-index comprehensive evaluation methods. *Stat Dec*, 2004, (11): 119–121 (in Chinese).