

玉米苗期耐盐性鉴定技术研究及耐盐自交系筛选

李冉¹, 韩洁楠¹, 上官小川^{1,2}, 周婷芳^{1,2}, 张泽^{1,2}, 潘越¹, 刘倩倩¹, 杨波³,
郝转芳¹, 翁建峰¹, 张德贵¹, 雍洪军¹, 周志强¹, 李新海¹, 李明顺¹

(¹中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; ²黑龙江八一农垦大学农学院, 大庆 163319;

³吉林省农业科学院洮南综合试验站, 洮南 137100)

摘要: 土壤盐碱化使耕地利用率降低, 作物生产受到限制。玉米耐盐种质的鉴定及筛选在盐碱地改良利用中具有重要意义和应用前景。本研究为筛选玉米苗期耐盐鉴定的最适 NaCl 浓度, 选取 16 份代表性自交系进行 0(对照)、100、150、200、250、300 mmol/L NaCl 处理 7 d, 测定株高、根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重和地下部干重 6 个指标, 并记录苗情。结果表明, 盐处理 7 d 后, 与对照相比, 150 mmol/L NaCl 处理的各指标存在显著差异, 并且比其他盐浓度处理的变异系数更大, 由此确定 150 mmol/L 为玉米自交系苗期耐盐鉴定的最适浓度。据此本研究建立了玉米苗期 150 mmol/L NaCl 处理的多指标综合评价耐盐鉴定技术。利用该技术对 76 份玉米自交系进行分析, 通过加权隶属函数法计算耐盐综合评价指数 D 并聚类分析, 将 76 份玉米自交系划分为高耐盐、耐盐、盐敏感及盐高敏 4 个类群, 其中明 71、中 106、四-287 和 8112 苗期耐盐能力较强, 可作为玉米耐盐育种的优异资源; 地上部鲜重耐盐系数与 D 值相关性最高, 可作为玉米自交系苗期耐盐性评价的主要指标。

关键词: 玉米; 苗期; 鉴定技术; 耐盐自交系

Research on Salt Tolerance Identification Technique and Salt Tolerance Inbred Lines Screening of Maize Seedling

LI Ran¹, HAN Jienan¹, SHANGGUAN Xiaochuan^{1,2}, ZHOU Tingfang^{1,2}, ZHANG Ze^{1,2}, PAN Yue¹,
LIU Qianqian¹, YANG Bo³, HAO Zhuanfang¹, WENG Jianfeng¹, ZHANG Degui¹,
YONG Hongjun¹, ZHOU Zhiqiang¹, LI Xinhai¹, LI Mingshun¹

(¹Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ²College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319; ³Taonan Research Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Taonan 137100)

Abstract: Soil salinization and alkalization reduce the usability of arable land and impair crop production. Identifying and selecting maize germplasm showing salt-tolerant is of significant importance in the reclamation and utilization of saline-alkali land. To determine the optimal NaCl concentration for screening salt tolerance in maize seedlings, 16 representative inbred lines were treated with 0 (control), 100, 150, 200, 250, and 300 mmol/L NaCl solutions for seven days. Six indicators, including shoot height, root length, shoot fresh weight, root fresh weight, shoot dry weight and root dry weight, were measured, along with recording the seedling conditions. The results showed that after seven days of salt treatment, significant differences were observed in all indices under 150 mmol/L compared with the control, and the coefficient of variation was greater than at other salt concentrations. Therefore, 150 mmol/L was identified as the optimal concentration for salt tolerance identification in maize inbred lines, and a salt tolerance identification technology was developed. Using this

收稿日期: 2024-02-27 网络出版日期: 2024-09-12

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240227006>

第一作者研究方向为玉米耐盐育种, E-mail: 13569606708@163.com

通信作者: 李明顺, 研究方向为玉米遗传育种, E-mail: limingshun@caas.cn

基金项目: 山东省重点研发计划(2023LZGC010); 中国农业科学院基本科研业务费(CAAS-ZDRW202407)

Foundation projects: Key R&D Program of Shandong (2023LZGC010); Basic Research Fund of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ZDRW202407)

technology, 76 maize inbred lines were analyzed, and a comprehensive salt tolerance evaluation index (D) was calculated using the weighted subordinate function method and cluster analysis. The 76 lines were categorized into four groups: high salt tolerance, salt tolerance, salt sensitivity, and high salt susceptibility. Among them, the inbred lines Ming71, Zhong106, Si-287, and 8112 showed the strongest salt tolerance, serving as valuable resources for salt tolerance maize breeding. The salt tolerance coefficient of the fresh weight of the above-ground tissues showed the highest correlation with the D value and could be used as the primary indicator for evaluating salt tolerance in maize inbred lines during the seedling stage.

Key words: maize; seedling stage; identification technique; salt-tolerant inbred lines

土壤盐渍化会使作物生产受到限制,全球约有 8.33 亿 hm^2 的土壤受到盐渍化的威胁,我国盐渍土总面积为 3690 万 hm^2 ,占全国可利用土地面积的 5.01%^[1]。此外,人类不合理的开发、利用、灌溉等造成耕地次生盐渍化,使可耕地面积进一步减少,严重威胁我国粮食安全^[2]。玉米是我国第一大农作物,是重要的粮食、饲料和工业加工原料^[3]。近年来,我国东北和黄淮海平原等玉米主产区耕地盐渍化日益严重,已成为导致玉米减产的主要非生物胁迫之一^[4]。我国耐盐玉米种质匮乏,耐盐鉴定技术体系不成熟,耐盐玉米品种稀缺,因此,进行玉米耐盐种质遗传改良和新品种选育具有重要的实践意义^[5]。

筛选玉米耐盐种质,进一步选育玉米耐盐品种是利用盐渍土经济有效的途径^[6]。杨晓杰等^[7]对 118 份玉米自交系萌发期和苗期主要形态指标进行综合评价,筛选出耐盐和盐敏感玉米自交系各 5 份。陆程张等^[8]对吉林省 200 份骨干玉米自交系在盐、碱和盐碱混合胁迫下的萌发期和苗期性状进行耐盐系数综合评价,筛选出高耐盐玉米自交系 8 份。王明泉等^[9]采用水培的方法对 153 份玉米自交系进行盐胁迫,通过耐盐系数进行综合分析,筛选出 12 份耐盐性较强的玉米自交系。邓杰等^[10]对 89 份自交系在盐碱胁迫下萌发期 8 个性状进行综合评价,筛选出高耐盐碱自交系 7 份。虽然目前对玉米耐盐种质的筛选开展了较多研究,但由于鉴定体系不统一,可比性差,并且耐盐种质不等同育种材料,耐盐品种筛选仍然面临种质鉴定不充分的困境。因此,进一步标准化耐盐鉴定体系对加快耐盐玉米新品种选育具有重要意义。

玉米耐盐性是多基因控制的数量性状,耐盐性鉴定结果受评价指标和评价方法的影响。玉米苗期对盐胁迫的敏感性比发育后期更敏感,苗期还可以排除外界的干扰在可控环境下进行分析^[11]。Cui

等^[12]研究表明盐碱地和水培条件下表型结果一致,两种环境下耐盐性排名显著正相关,说明采用水培方法进行玉米耐盐性鉴定可靠。生长量是植物响应盐胁迫的直接体现^[13],但单一指标不能全面评价植物的耐盐性^[14-18]。近年来,玉米耐盐性鉴定多通过主成分分析法、隶属函数法及两者结合的方法整合多个耐盐指标进行综合评价^[6,15,18-19],有效提高了鉴定结果的准确性、科学性。

本研究以具有代表性的 16 份玉米自交系为材料,设置多个 NaCl 浓度进行形态指标比较,最终筛选出苗期耐盐性鉴定的适宜盐胁迫浓度,建立了多指标综合评价的耐盐鉴定技术;进一步利用该技术对 76 份自交系进行相关苗期指标测定,通过加权隶属函数和标准差赋权重法得到耐盐综合评价指数 D,并通过聚类分析筛选耐盐玉米自交系。本研究为进一步规范耐盐鉴定体系提供了数据参考,所鉴定耐盐玉米自交系对育种应用有重要价值。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料由两部分组成,用于筛选适宜盐胁迫浓度的材料包含全国杰出贡献玉米自交系 11 份,分别是 PH6WC、PH4CV、昌 7-2、郑 58、京 724、京 92、齐 319、掖 478、X178、Mo17 和 K10;此外还包括玉米骨干自交系掖 3189、吉 846、PHPR5、B73 和承系 53。用于资源评价的材料为 76 份玉米自交系,由中国农业科学院作物科学研究所提供。已有研究报道证明 X178^[20]、K10^[20]、郑 58^[21]、PH6WC^[22] 和齐 319^[23] 为耐盐玉米自交系,昌 7-2^[21]、PH4CV^[22] 和 Mo17^[7] 为盐敏感自交系。

1.2 试验设计

每份材料挑选 45 粒大小一致且饱满的种子,自来水清洗一遍,去离子水清洗两遍,进行表面消毒(3% H_2O_2 浸泡 30 min),去离子水再洗两遍,饱和

CaSO₄溶液浸泡过夜,将浸泡过的种子均匀地铺在有湿润滤纸的托盘(480 mm×350 mm×41 mm)中,每个托盘铺4份材料,上方罩黑色塑料袋,置于人工培养室催芽,期间及时补充水分,昼夜温度为28℃/26℃,每天光照14 h,黑暗10 h。当种子的主根长至2 cm时将其置于方形滤纸顶端1 cm处,卷成圆筒置于15 L桶中,加入去离子水至容器体积1/2,套黑色塑料袋继续培养。待地上部叶片发绿,长至约4 cm时,揭开黑色塑料袋培养至两叶一心。选取生长一致的幼苗,移入含有1/2 Hogland营养液的培养箱中进行盐处理,每个浓度两个重复,每个重复每份材料移4株幼苗。移苗后第3、6、9天换Hogland营养液及含有NaCl的Hogland营养液^[24]。处理第7天记录苗情,测量株高、根长、地上部鲜重和地下部鲜重,并将样品装入牛皮纸袋中烘干至恒重,测量样品的地上部干重和地下部干重。其中16份代表性

自交系在0、100、150、200、250、300 mmol/L NaCl处理下进行,以筛选出自交系苗期耐盐性鉴定的适宜盐胁迫浓度,进而在适宜盐胁迫浓度下对76份自交系进行苗期耐盐性鉴定。

1.3 指标测定

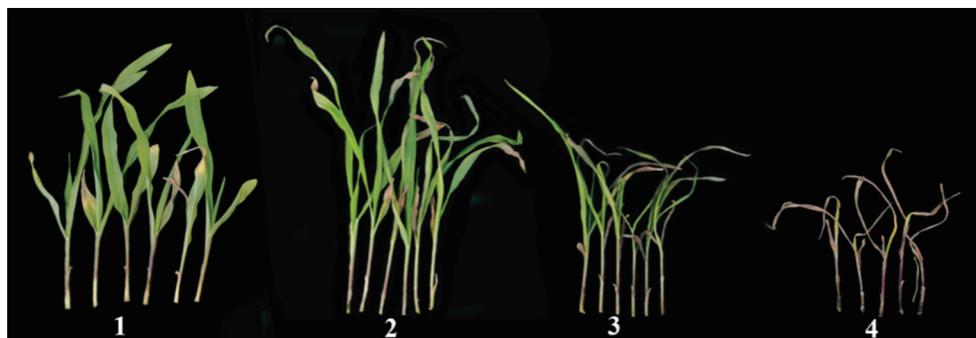
株高:以玉米植株地上部分最高点的拉直高度为准,测定其株高^[25]。

根长:以玉米根系拉直最长为准,测定其根长^[25]。

地上部鲜重、地下部鲜重:盐处理第7天,取完整植株,从根系处剪开以区分地上部和地下部,用蒸馏水洗净,用吸水纸除去表面残留水分后称重,称重后放入牛皮纸袋中。

地上部干重、地下部干重:将上述含有样品的纸袋子放入烘箱中105℃杀青30 min,然后80℃烘干至恒重,称其干重。

苗情:盐处理第7天记录苗情,如图1所示。



1级:倒二叶叶尖发黄,其他叶正常绿色;2级:倒一、倒二叶中1/2至2/3叶片发黄;3级:整片叶发黄,萎蔫;4级:新叶卷曲,其他叶萎蔫,包括死亡情况

Grade 1: The tip of the inverted two leaves is yellow, the other leaves are normal green; Grade 2: 1/2 to 2/3 of the leaves in the first and second leaves are yellow; Grade 3: The whole leaf is yellow and wilting; Grade 4: Curl of new leaves, wilting of other leaves, including death

图1 玉米自交系苗期不同苗情等级的长势情况

Fig.1 The growth of maize inbred lines at different seedling condition levels

1.4 数据分析

玉米苗期耐盐性指标数据取均值进行处理,可以减少材料间固有差异^[26]。以供试材料测定指标为依据,应用模糊数学中的加权隶属函数法计算玉米自交系的耐盐综合评价指数D,并根据D值大小进行K均值聚类分析。采用Excel软件和SPSS 26统计分析软件进行数据处理、方差分析、多重比较、相关性分析和聚类分析。用到的公式^[14]如下。

(1)耐盐系数=盐处理下测定值/对照下测定值。

(2)根据材料各指标的耐盐系数计算隶属函数值: $\mu(X_{ij})=(X_{ij}-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin})$,其中, $\mu(X_{ij})$ 为i材料指标j的隶属值; X_{ij} 表示为i材料j指标的测定值, X_{jmax} 、 X_{jmin} 分别为供试材料中指标耐盐系数的最大值和最小值。

(3)基于各指标的隶属函数值计算变异系数: $CV_j=(标准偏差/平均值)\times 100\%$,其中 CV_j 是指标j隶属函数值的变异系数。

(4)基于各指标的变异系数计算权重: $W_j=CV_j/\sum_1^i CV_j$,其中 W_j 表示指标j的变异系数在总变异系数中所占比率。

(5)基于各指标的隶属函数值和变异系数计算耐盐综合评价指数: $D=\sum_1^i [\mu(X_{ij})W_j]$ 。

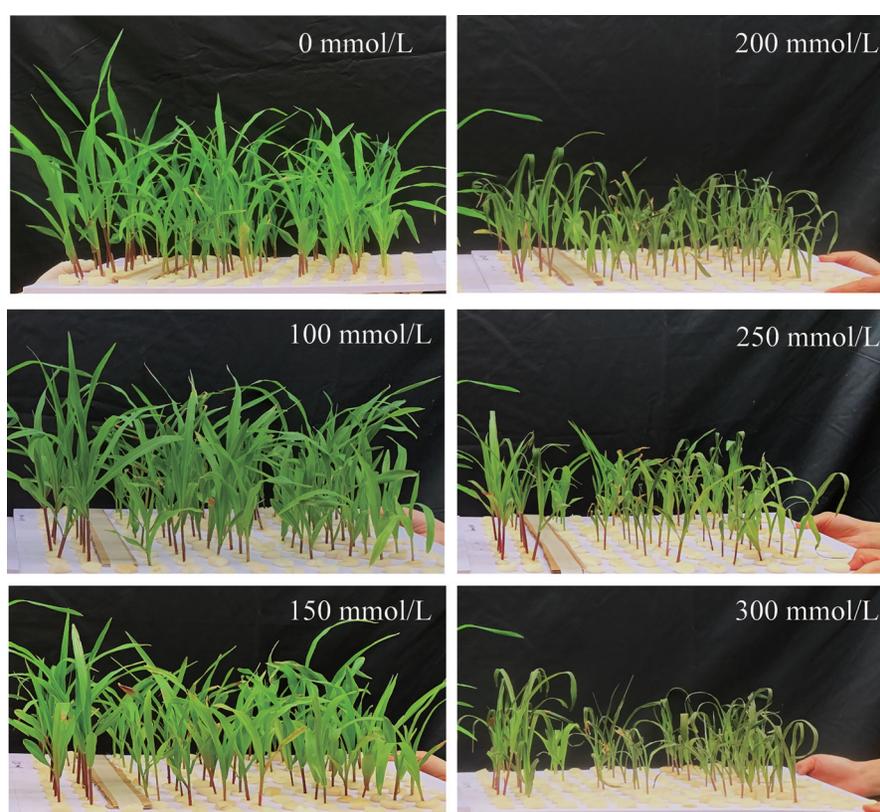
2 结果与分析

2.1 玉米苗期室内耐盐鉴定盐浓度筛选

为了筛选玉米苗期耐盐性鉴定适宜的盐胁迫浓度,选取16份代表性自交系分别在0、100、150、200、250和300 mmol/L NaCl下处理7 d,测定植株

形态指标。在处理第3天时,随着盐浓度的升高,植株生长受到的抑制程度明显不同,200~300 mmol/L NaCl处理的植株明显萎蔫和卷曲,部分材料出现倒伏(图2)。由表1可知,随着盐浓度的升高,苗情等级逐渐升高,说明玉米自交系受到的盐害程度不断增加。对0、100、150、200、250和300 mmol/L NaCl处理下苗情的四分位差进行计算,结果分别为0、1、0.875、1.75、0.5和0,四分位差呈先升高后降低,再升高再降低的趋势,无法直接判断苗期耐盐鉴定最适盐胁迫浓度,因此需借助植株长势情况及指标数据进一步分析。处理第7天时,对照条件(0 mmol/L NaCl处理)下,玉米自交系长势旺盛;在100~

200 mmol/L NaCl处理下,多数植株生长受到抑制,植株变矮小,叶尖发黄,200 mmol/L NaCl处理下37.5%植株苗情等级为4,说明100~200 mmol/L NaCl处理下形态指标具有较高可比性;在250 mmol/L和300 mmol/L NaCl处理下,分别有86.66%和92.86%植株苗情等级为4,K10叶片整体发黄,其他玉米自交系叶片萎蔫或死亡,说明250 mmol/L是绝大多数玉米自交系苗期生长的上限NaCl处理浓度。250 mmol/L和300 mmol/L NaCl处理下,植株萎蔫或死亡、根系易断,造成测定误差大,不适于耐盐鉴定,因此只对0~200 mmol/L NaCl处理下的指标进一步测定。



从左至右的第3列至第10列为自交系材料,每列两份材料,每份材料4株

Columns 3 to 10 from left to right are inbred line materials, with two materials per column and four plants per material

图2 不同盐浓度下处理第3天玉米自交系生长情况

Fig.2 Growth of maize inbred lines on the third day treated with different salt concentrations

表1 不同盐浓度下16份玉米自交系苗情

Table 1 Seedling condition of 16 maize inbred lines under different salt concentrations

序号 Serial number	自交系 Inbred lines	盐浓度(mmol/L) Salt concentration					
		0	100	150	200	250	300
1	齐319	1	2	2	3	4	4
2	掖478	1	2	3	3	/	/
3	掖3189	1	2	2	3	4	4
4	吉846	1	1	2	4	4	4

表 1 (续)

序号 Serial number	自交系 Inbred lines	盐浓度(mmol/L) Salt concentration					
		0	100	150	200	250	300
5	承系 53	1	1	2	3	3	4
6	X178	1	1	1	3	4	4
7	郑 58	1	1	2	4	4	4
8	昌 7-2	1	2	2	4	4	4
9	京 724	1	3	2	2	4	4
10	京 92	1	2	2	4	4	4
11	PH6WC	1	2	2	2	4	4
12	PH4CV	1	2	3	4	4	4
13	PHPR5	1	4	4	4	4	4
14	K10	1	2	2	1	2	2
15	Mo17	1	1	2	3	4	/
16	B73	1	2	3	2	4	4

/表示数据因生长异常而缺失

/ indicates that the data is missing due to abnormal growth

方差分析表明(表 2),与对照相比,6 个指标在不同盐浓度下差异显著,可进一步分析。多重比较表明(表 3),与对照相比,16 份玉米自交系在 100~200 mmol/L NaCl 下株高、根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重和地下部干重均有不同程度的下降。与对照相比,盐浓度为 100 mmol/L 时株高和地上部鲜重显著降低,其他指标无差异,盐浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时各指标

均显著降低。与 100 mmol/L 相比,150 mmol/L NaCl 下根长不受影响,其余 5 个指标均显著降低;200 mmol/L NaCl 下 6 个指标均显著降低。与 150 mmol/L 相比,200 mmol/L NaCl 下根长、地上部鲜重和地下部干重存在显著差异,株高、地下部鲜重和地上部干重无显著差异。以上结果表明 150~200 mmol/L NaCl 为苗期耐盐鉴定的适宜盐胁迫浓度范围。

表 2 不同盐浓度胁迫下玉米苗期指标方差分析

Table 2 Analysis of variance of maize seedling indicators under different salt concentration stresses

指标 Index	差异来源 Sources of differences	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
株高 SH	组间	2719.92	3	906.64	65.82	0
	组内	826.53	60	13.78		
	总计	3546.45	63			
根长 RL	组间	1076.40	3	358.80	9.48	0
	组内	2271.29	60	37.85		
	总计	3347.70	63			
地上部鲜重 SFW	组间	23.04	3	7.68	84.70	0
	组内	5.44	60	0.09		
	总计	28.48	63			
地下部鲜重 RSW	组间	2.92	3	0.97	10.55	0
	组内	5.53	60	0.09		
	总计	8.45	63			

表 2 (续)

指标 Index	差异来源 Sources of differences	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
地上部干重 SDW	组间	0.07	3	0.02	25.17	0
	组内	0.06	60	0		
	总计	0.13	63			
地下部干重 RDW	组间	0.02	3	0.01	14.30	0
	组内	0.02	60	0		
	总计	0.04	63			

SH: Shoot height; RL: Root length; SFW: Shoot fresh weight; RFW: Root fresh weight; SDW: Shoot dry weight; RDW: Root dry weight; The same as below

表 3 不同盐浓度胁迫下玉米苗期指标多重比较

Table 3 Multiple comparisons of maize seedling indicators under different salt stresses

盐浓度(mmol/L) Salt concentration	株高(cm) SH	根长(cm) RL	地上部鲜重(g) SFW	地下部鲜重(g) RFW	地上部干重(g) SDW	地下部干重(g) RDW
0	33.89±1.13a	35.93±2.15a	1.88±0.11a	1.22±0.09a	0.14±0.00a	0.07±0.00a
100	24.28±1.04b	31.68±1.45ab	1.19±0.07b	1.07±0.07a	0.12±0.01a	0.07±0.00a
150	19.37±0.80c	29.34±1.09b	0.64±0.06c	0.80±0.07b	0.07±0.00b	0.06±0.00b
200	16.84±0.63c	24.58±1.22c	0.29±0.02d	0.68±0.05b	0.06±0.00b	0.03±0.00c

表中数据为平均值±标准偏差, 同列中不同小写字母表示显著差异($P<0.05$)

The data in the table are the average ± standard deviation, and different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

变异系数越大表明自交系间指标变化幅度越大, 相应盐胁迫浓度则更适宜耐盐鉴定^[6]。由表 4 可知, 与对照相比, 100 mmol/L NaCl 下根长和地下部鲜重变异系数减小, 其他 4 个指标变异系数增大; 150 mmol/L NaCl 下根长变异系数减小, 其他 5 个指标变异系数增大; 200 mmol/L NaCl 下根长、地下部

鲜重和地下部干重变异系数减小, 其他 3 个指标变异系数增大。与 100 mmol/L 和 200 mmol/L 相比, 150 mmol/L NaCl 下多个指标变异系数增大。以上结果表明 150 mmol/L NaCl 下自交系间苗期指标差异最大, 因此确定其为玉米自交系苗期耐盐性鉴定的适宜盐胁迫浓度。

表 4 不同盐浓度胁迫下玉米苗期指标变异系数

Table 4 Coefficients of variation of maize seedling indicators under different salt concentration stresses

盐浓度(mmol/L) Salt concentration	变异系数(%)Coefficient of variation					
	株高 SH	根长 RL	地上部鲜重 SFW	地下部鲜重 RFW	地上部干重 SDW	地下部干重 RDW
0	13.45	23.95	23.54	30.51	24.47	26.19
100	17.24	18.35	26.17	28.34	32.76	32.91
150	16.62	14.99	38.02	38.45	36.24	37.50
200	15.05	20.00	30.25	29.22	24.86	21.92

2.2 玉米苗期室内耐盐鉴定技术评价

分析对照和 150 mmol/L NaCl 处理下玉米自交系苗期指标, 对 16 份自交系的耐盐性进行综合评

价。根据 16 份玉米自交系苗期指标的耐盐系数, 计算出各指标的隶属值; 同时利用标准差法赋权重, 进而计算自交系的 D 值。分析发现 D 值与苗情呈极

显著负相关,相关性系数为-0.67。以苗情等级为参考,将D值在0.35~0.68之间的自交系划分为耐盐材料,苗情等级为1或2,D值在0.10~0.25之间的划分为不耐盐材料,苗情等级为3或4(表5)。其中X178、K10、郑58、PH6WC、齐319为耐盐玉米自交系,PH4CV为不耐盐自交系,这与前人研究结果一

致^[20-23],说明本研究建立的玉米苗期室内耐盐鉴定技术可信度高。掖478的D值为0.40,被划分为耐盐材料,而其苗情是3,植株地上部发黄,表现为不耐盐,这可能与供试自交系较少,或多数自交系耐盐能力相对较高有关。

表5 16份代表性玉米自交系苗期耐盐性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of salt tolerance of 16 representative maize inbred lines at seedling stage

序号 Serial number	自交系 Inbred lines	株高 耐盐系数 SHR	根长 耐盐系数 RLR	地上部鲜重 耐盐系数 SFWR	地下部鲜重 耐盐系数 RFWR	地上部干重 耐盐系数 SDWR	地下部干重 耐盐系数 RDWR	D值 D value	耐盐等级 Salt tolerance grade	苗情 Seedling condition
11	PH6WC	0.66	0.82	0.42	0.99	0.55	1.06	0.68	耐盐	2
3	掖3189	0.72	0.72	0.44	0.80	0.68	1.01	0.66	耐盐	2
5	承系53	0.62	0.81	0.47	0.73	0.68	0.91	0.62	耐盐	2
8	昌7-2	0.68	0.89	0.36	0.73	0.61	0.90	0.59	耐盐	2
6	X178	0.59	0.82	0.47	0.71	0.65	0.80	0.57	耐盐	1
1	齐319	0.59	0.73	0.41	0.79	0.58	0.92	0.52	耐盐	2
7	郑58	0.57	0.72	0.37	0.73	0.54	0.92	0.45	耐盐	2
9	京724	0.66	0.82	0.30	0.60	0.53	0.92	0.45	耐盐	2
2	掖478	0.54	1.34	0.24	0.48	0.40	0.63	0.40	耐盐	3
4	吉846	0.58	0.93	0.37	0.62	0.44	0.69	0.40	耐盐	2
14	K10	0.56	0.83	0.33	0.66	0.46	0.79	0.38	耐盐	2
15	Mo17	0.55	1.04	0.28	0.56	0.45	0.68	0.37	耐盐	2
10	京92	0.54	0.84	0.35	0.56	0.45	0.83	0.35	耐盐	2
12	PH4CV	0.49	0.68	0.27	0.50	0.64	0.51	0.25	不耐盐	3
16	B73	0.47	0.75	0.23	0.67	0.37	0.73	0.21	不耐盐	3
13	PHPR5	0.39	0.80	0.17	0.45	0.40	0.66	0.10	不耐盐	4

序号同表1

The serial numbers is the same as Table 1; SHR: The ratio of shoot height; RLR: The ratio of root length; SFWR: The ratio of shoot fresh weight; RFWR: The ratio of root fresh weight; SDWR: The ratio of shoot dry weight; RDWR: The ratio of root dry weight; The same as below

2.3 76份玉米自交系苗期指标分析

利用上述玉米苗期室内耐盐鉴定技术,对76份玉米自交系在对照和150 mmol/L NaCl处理(以下简称盐处理)下的苗期指标进行统计分析(表6)。相较于对照,盐处理下6个指标均有极显著差异,说明在盐胁迫下各指标均受到显著影响。对照和盐处理下各指标变异系数范围分别为0.13~0.32和0.14~0.50;与对照相比,盐胁迫导致地下部鲜重变异系数减小,其他5个指标变异系数增大,变异系数大小排序为地上部鲜重>地下部干重>地上部干重=地下部鲜重>根长>株高。

2.4 玉米自交系苗期各指标耐盐系数和综合耐盐评价相关性分析

76份玉米自交系苗期各指标耐盐系数分析见

表7。各指标耐盐系数的平均值介于0.15~0.73之间,其中株高耐盐系数、地上部鲜重耐盐系数和地上部干重耐盐系数分别为0.40、0.15和0.33,根长耐盐系数、地下部鲜重耐盐系数和地下部干重耐盐系数分别为0.73、0.58和0.69,说明与对照相比,盐胁迫后致使地上部变化幅度大于地下部。各指标耐盐系数的变异系数介于0.15~0.52之间,其中地上部鲜重耐盐系数变异系数较大,株高和根长耐盐系数的变异系数最小,说明受盐胁迫影响苗期自交系间地上部鲜重耐盐系数差异最大,同时株高耐盐系数和根长耐盐系数差异最小。

表 6 76 份玉米自交系苗期形态指标分析

Table 6 Analysis of morphological indicators of 76 maize inbred lines at seedling stage

指标 Index	处理 Treatment	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV
株高(cm) SH	对照	52.89	25.90	41.82	5.32	0.13
	盐处理	23.78	11.40	16.57**	2.39	0.14
根长(cm) RL	对照	46.76	24.59	35.87	5.09	0.14
	盐处理	35.46	17.64	26.06**	4.42	0.17
地上部鲜重(g)SFW	对照	5.34	1.08	3.04	0.87	0.29
	盐处理	1.37	0.14	0.44**	0.20	0.50
地上部干重(g)SDW	对照	0.34	0.10	0.20	0.06	0.27
	盐处理	0.12	0.03	0.06**	0.02	0.28
地下部鲜重(g)RFW	对照	2.24	0.46	1.22	0.39	0.32
	盐处理	1.28	0.35	0.68**	0.19	0.28
地下部干重(g)RDW	对照	0.12	0.04	0.07	0.02	0.25
	盐处理	0.09	0.02	0.05**	0.01	0.29

*:表示显著差异($P<0.05$); **:表示极显著差异($P<0.01$); 下同

*: Represent a significant difference ($P<0.05$); **: Represent a very significant difference ($P<0.01$); The same as below

表 7 76 份玉米自交系苗期各指标耐盐系数分析

Table 7 Analysis of salt tolerance coefficient of each index in seeding stage of 76 maize inbred lines

指标耐盐系数 Indicator salt tolerance coefficient	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV
株高耐盐系数 SHR	0.63	0.28	0.40	0.06	0.15
根长耐盐系数 RLR	0.98	0.47	0.73	0.11	0.15
地上部鲜重耐盐系数 SFWR	0.41	0.04	0.15	0.08	0.52
地上部干重耐盐系数 SDWR	0.57	0.14	0.33	0.09	0.29
地下部鲜重耐盐系数 RFWR	0.94	0.21	0.58	0.15	0.25
地下部干重耐盐系数 RDWR	1.36	0.32	0.69	0.20	0.28

根据玉米自交系苗期各指标的耐盐系数,利用标准差赋权重法计算 D 值。各指标权重由大到小的顺序为地上部鲜重>地下部干重>地上部干重>株高>根长>地下部鲜重,即 $0.228>0.174>0.169>0.161>0.137>0.131$ 。由图 3 可知,6 个指标耐盐系数间均呈极显著正相关,并且与 D 值均存在极显著正相关关系,其中地上部鲜重耐盐系数与 D 值相关系数最高,为 0.91,根长耐盐系数与 D 值相关系数最低,为 0.55,而苗情与 D 值呈极显著负相关,相关系数为 -0.56。以上结果表明用 D 值对玉米自交系进行耐盐性综合评价可信度较高,D 值越大,说明自交系的苗期耐盐性越强。

2.5 玉米自交系苗期耐盐性综合分析

利用玉米自交系苗期 D 值进行 K 均值聚类分析,依据苗情等级为 4 个等级,因此将 76 份玉米自交系划分为高度耐盐、耐盐、盐敏感和盐高敏 4 个类群(图 4),其中高度耐盐材料包括明 71、中 106、四-287、8112 四份自交系,D 值变化范围为 0.73~0.89;耐盐材料包括沈 137、明 84、8683 等 8 份自交系,D 值变化范围为 0.55~0.69;盐敏感材料包括 D22、706、4F1 等 32 份自交系,D 值变化范围为 0.35~0.52;盐高敏材料包括龙抗 11、四 144、辽 1412 等 32 份自交系,D 值变化范围为 0.11~0.35。

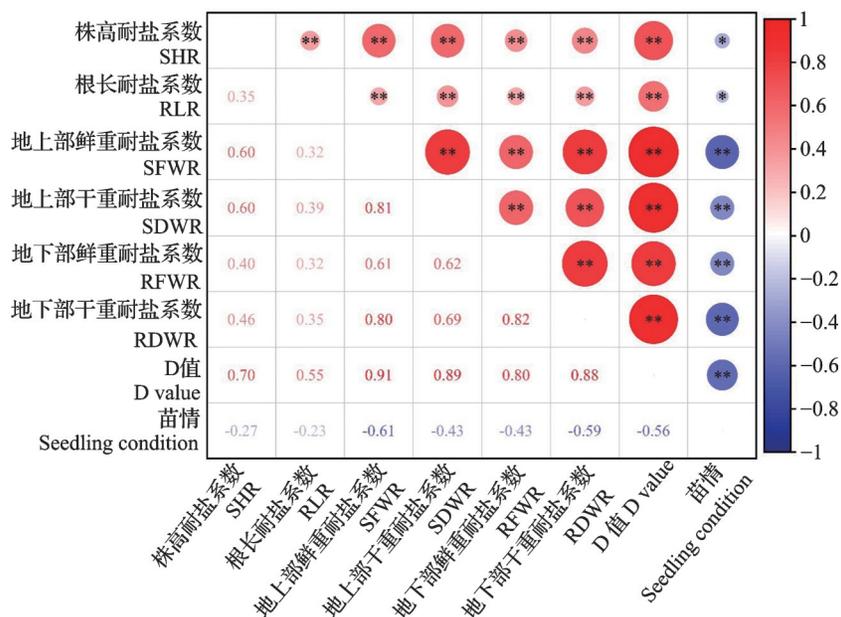
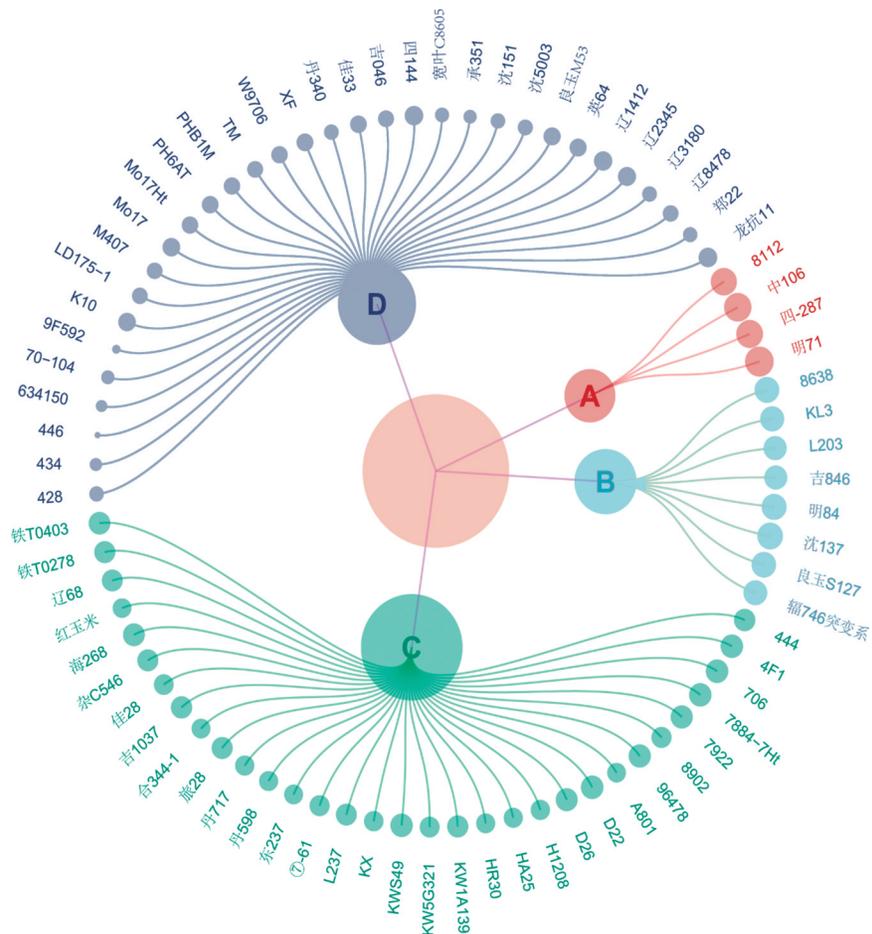


图3 玉米自交系苗期各指标耐盐系数与耐盐综合评价指数D的相关性

Fig.3 Correlation between the salt tolerance coefficients of various indicators at seedling stage of maize inbred lines and the comprehensive evaluation index of salt tolerance D



A: 高度耐盐类群; B: 耐盐类群; C: 盐敏感类群; D: 盐高敏类群

A: Highly salt-tolerant group; B: Salt-tolerant group; C: Salt-sensitive group; D: Salt hypersensitive group

图4 76份玉米自交系苗期耐盐性聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of salinity tolerance in 76 maize inbred lines at seedling stage

3 讨论

种质资源是玉米育种的关键和基础,耐盐鉴定是筛选耐盐种质的重要手段^[27]。目前玉米苗期耐盐鉴定中盐浓度选择不统一,本研究比较不同盐浓度下植株苗期形态变化,对建立苗期耐盐精准鉴定体系具有一定意义。陆怡等^[16]通过形态和表型性状结合分析 15 个玉米自交系苗期耐盐性,认为以形态学鉴定为主的耐盐分析直观可靠,但不同材料胁迫临界值差异会影响玉米耐盐性的判断,确定最合适的盐胁迫浓度尤为重要。吕宗环等^[27]认为合适的胁迫浓度能够使各指标在材料间的变异系数和变异幅度最大。阿提开姆·麦麦提等^[15]认为最适鉴定浓度应能够体现玉米幼苗对盐胁迫的响应,同时最适浓度不会使多数幼苗死亡,可确保鉴定结果可靠、准确。李亮等^[28]对不同遗传背景的 200 份玉米自交系、耐盐自交系齐 319 和盐敏感自交系郑 58 进行盐处理,盐浓度越大玉米幼苗生长越矮弱,但在 50 mmol/L NaCl 处理时幼苗表现不明显。郑飞等^[25]分析不同浓度下不同材料的苗情耐盐性,发现 0、100 mmol/L 盐浓度处理下的玉米苗情无显著差异。高英波等^[26]对黄淮海夏玉米区 30 个主推玉米品种在 80、120、160、200、240、280 mmol/L NaCl 处理下的发芽率、发芽势、胚芽长和胚芽重的相对值进行分析,发现 NaCl 浓度在 80~120 mmol/L 时,盐胁迫对不同品种盐害指数影响较小,且盐害指数变化幅度较大,不宜作为耐盐品种鉴选的适宜浓度。因此本研究未设置 50 mmol/L NaCl,选择在 0~300 mmol/L 之间设置 6 个浓度梯度,明确了 150 mmol/L NaCl 为玉米苗期耐盐鉴定最适浓度。

刘丽丽等^[29]利用 52 份不同基因型玉米自交系在 0、150 mmol/L NaCl 浓度下处理,以芽期和苗期 7 个生理指标的耐盐指数和隶属函数综合评价自交系耐盐性,发现幼苗期株高耐盐指数是玉米综合耐盐能力的主要参数。张林等^[17]通过苗期盆栽浇盐碱水的方式,筛选出 200 mmol/L 的 NaCl 和 25 mmol/L 的 Na₂CO₃ 混合浓度是适宜的耐盐碱性鉴定浓度,株高、干重和鲜重变化率与全生育期产量极显著正相关。本研究发现同一 NaCl 浓度下不同指标的变化程度不同,利用单一指标评价耐盐性不可靠,这与前人结论一致^[15-18];6 个苗期指标耐盐系数之间显著相关,与耐盐综合评价指数 D 相关系数为 0.55~0.91,均达到极显著水平,与苗情显著负相关(图 3),鉴定结果可信度高。

前人研究中,玉米耐盐类群聚类主要集中在 4~6 类,例如,阿提开姆·麦麦提等^[15]依据指标的隶属值将 240 份玉米自交系苗期耐盐性划分为 4 级,分别是耐盐、中度耐盐、中度盐敏感和盐敏感;郝德荣等^[30]综合鲜重、干重耐盐系数和苗情的鉴定结果,将 184 份玉米自交系划分为高耐、耐盐、中耐、敏感和高感 5 种类型;付艳等^[13]依据苗情将玉米苗期耐盐性分为 5 类,分别是高耐、耐盐、中耐、敏感和高敏感类型;段雅娟等^[6]依据综合评价指数利用聚类分析将 298 份玉米自交系萌发期耐盐性类群划分为 6 级,分别是高度盐敏感型、中度盐敏感型、盐敏感型、耐盐型、中度耐盐型和高度耐盐型。本研究也尝试根据 D 值由高到低将材料划分为 5 类,每个聚类中的材料数分别为 1、4、15、28、28 份,由于第 1 类只有 1 个材料,故未使用该划分等级进行分析。K 均值聚类法在作物耐盐性^[31-34]、抗旱性^[35-36]评价中均有应用。本研究依据苗情等级为 4 个等级,利用玉米自交系苗期 D 值采用 SPSS 软件中的 K 均值聚类法,将 76 份玉米自交系划分为高度耐盐、耐盐、盐敏感和盐高敏 4 个类群。

选择来源不同、代表性强的玉米自交系进行耐盐鉴定,可使筛选结果更具参考价值^[16]。150 mmol/L NaCl 浓度下,综合耐盐评价结果发现 X178、K10、郑 58、PH6WC 和齐 319 为苗期耐盐玉米自交系,PH4CV 为苗期不耐盐自交系,这与前人研究结果一致^[7,20-23],表明本耐盐鉴定技术评价结果准确。本研究发现,Mo17、中 106 和吉 846 分别为苗期盐高敏、高耐盐和耐盐自交系,杨书华等^[37]以生理生化指标的耐盐碱系数为依据进行综合评价,发现 Mo17、中 106 和吉 846 分别为苗期高感、耐盐和中耐盐材料,与本研究耐盐评价结果相似。本研究中沈 137 和 8112 的耐盐性鉴定结果为耐盐自交系和高耐盐自交系,与郝德荣等^[30]、徐立华等^[23]研究结果一致。本研究在 16 份代表性自交系的苗期耐盐性综合评价中以苗情等级为参考将 K10 和 Mo17 划分为耐盐自交系(D 值为 0.38 和 0.37),而在 76 份自交系的苗期耐盐性综合评价中以 D 为依据将 K10 和 Mo17 划分为盐高敏类群(D 值为 0.3142 和 0.3127),虽然两份材料被划分为不一样的类群,但 D 值大小相近,这与类群划分的依据以及参与耐盐性综合评价的自交系数目有关。综上所述,本研究建立了可信度较高的玉米苗期室内耐盐鉴定技术,鉴定出来的耐盐自交系可在新品种培育中加以利用。

4 结论

本研究通过对16份代表性自交系在0、100、150、200、250、300 mmol/L NaCl梯度处理下苗期指标的分析,发现150 mmol/L是玉米自交系苗期耐盐性鉴定的最适NaCl浓度。在0 mmol/L和150 mmol/L NaCl下对76份玉米自交系进行处理,通过加权隶属函数分析和相关性分析证明玉米株高、根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重和地下部干重的耐盐系数均与耐盐综合评价指数D有显著相关关系,其中地上部鲜重耐盐系数与D值相关性最高;通过聚类分析将76份玉米自交系划分为4个类群,其中高度耐盐材料4份、耐盐材料8份、盐敏感材料32份和盐高敏材料32份。本研究结果为进一步规范玉米苗期耐盐性鉴定体系提供了数据支撑,为玉米耐盐育种提供了材料。

参考文献

- [1] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 李荣亮, 吴大真. 土壤盐渍化及治理研究进展. 中国农村水利水电, 2023, (6): 202-208
Zhao Z Z, Chen J S, Peng E R, Li R L, Wu D Z. Research progress on soil salinization and management. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 202-208
- [2] 张海欧. 浅析中国盐渍土分布及演变特征. 农业与技术, 2022, 42 (5): 104-107
Zhang H O. Analysis on the distribution and evolution characteristics of saline soil in China. Agriculture and Technology, 2022, 42 (5): 104-107
- [3] 王振华, 刘文国, 高世斌, 李新海. 玉米种业的昨天、今天和明天. 中国畜牧业, 2021(19): 26-32
Wang Z H, Liu W G, Gao S B, Li X H. Maize seed industry yesterday, today and tomorrow. China Animal Industry, 2021 (19): 26-32
- [4] 姜佩弦, 张凯, 王艺桥, 张鸣, 曹一博, 蒋才富. 玉米耐盐分子机制研究进展. 植物遗传资源学报, 2022, 23 (1): 49-60
Jiang P X, Zhang K, Wang Y Q, Zhang M, Cao Y B, Jiang C F. Recent advance of molecular understanding of salt tolerance in maize. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23 (1): 49-60
- [5] 沈丹丹, 程文, 王志武, 卢增斌, 赵苏娴, 丁照华, 张恩盈. 我国玉米耐盐种质研究现状与展望. 山东农业科学, 2018, 50 (11): 163-167
Shen D D, Cheng W, Wang Z W, Lu Z B, Zhao S X, Ding Z H, Zhang E Y. Research advances and prospects of salt tolerant maize germplasms in China. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50 (11): 163-167
- [6] 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, Wang C B, Liu B M, Liu C H. Identification of salt tolerance in maize inbred lines during germination. Crops, 2022(1): 213-219
- [7] 杨晓杰, 李旭业, 王海艳, 于侃超, 杨建宇. 玉米自交系耐盐种质的筛选及耐盐性评价. 玉米科学, 2014, 22 (4): 19-25
Yao X J, Li X Y, Wang H Y, Yu K C, Yang J Y. Screening of maize inbred line varieties with salt tolerance and the evaluation. Journal of Maize Sciences, 2014, 22 (4): 19-25
- [8] 陆程张, 张春宵, 李淑芳, 李万军, 刘学岩, 郑大浩, 李晓辉. 吉林省200份骨干玉米自交系的芽、苗期耐盐碱性综合鉴定. 东北农业科学, 2022, 47 (1): 26-30, 50
Lu C Z, Zhang C X, Li S F, Li W J, Liu X Y, Zheng D H, Li X H. Comprehensive identification and evaluation on saline-alkaline tolerance of 200 maize elite inbred lines at bud and seedling stages in Jilin province. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47 (1): 26-30, 50
- [9] 王明泉, 李春霞, 龚士琛, 闫淑琴, 李国良, 扈光辉, 苏俊, 任洪雷, 杨剑飞, 张翼飞, 杨克军. 玉米自交系苗期耐盐性鉴定及筛选研究. 中国农学通报, 2018, 34 (12): 30-35
Wang M Q, Li C X, Gong S C, Yan S Q, Li G L, Hu G H, Su J, Ren H L, Yang J F, Zhang Y F, Yang K J. Salt-tolerance identification and screening of maize Inbred lines at seedling stage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34 (12): 30-35
- [10] 邓杰, 孙丽芳, 王霞, 于洋, 姚明明, 徐荣琼, 高树仁. 89份玉米自交系萌发期耐盐碱性综合评价. 玉米科学, 2020, 28 (4): 15-21
Deng J, Sun L F, Wang X, Yu Y, Yao M M, Xu R Q, Gao S R. Comprehensive evaluation of salt tolerance and alkalinity of 89 maize inbred lines during germination. Journal of Maize Sciences, 2020, 28 (4): 15-21
- [11] Luo M J, Zhang Y X, Chen K, Kong M S, Song W, Lu B S, Shi Y X, Zhao Y X, Zhao J R. Mapping of quantitative trait loci for seedling salt tolerance in maize. Molecular Breeding, 2019, 39 (5): 1-12
- [12] Cui D Z, Wu D D, Somarathna Y, Xu C Y, Li S, Li P, Zhang H, Chen H B, Zhao L. QTL mapping for salt tolerance based on SNP markers at the seedling stage in maize (*Zea mays* L.). Euphytica, 2015, 203 (2): 273-283
- [13] 付艳, 高树仁, 王振华. 玉米种质苗期耐盐性的评价. 玉米科学, 2009, 17 (1): 36-39, 50
Fu Y, Gao S R, Wang Z H. Evaluation of salt tolerance of maize germplasm in seedling stage. Journal of Maize Sciences, 2009, 17 (1): 36-39, 50
- [14] 刘鸿, 张富来, 田慧娟, 胡梦婷, 李瑞峰, 杨旭东, 张丹. 不同玉米品种萌发期及苗期的耐盐性研究. 种子, 2023, 42 (3): 56-62, 69
Liu H, Zhang F L, Tian H J, Hu M T, Li R F, Yang X D, Zhang D. Study on salt tolerance of different maize varieties at germination and seedling stages. Seed, 2023, 42 (3): 56-62, 69
- [15] 阿提开姆·麦麦提, 顾炜, 于典司, 瞿静涛, 关媛, 况慧云, 王

- 慧, 吴鹏昊, 郑洪建. 基于隶属函数法的玉米种质资源苗期耐盐性评价. 上海农业学报, 2023, 39 (5): 54-60
- Atikaimu M M T, Gu W, Yu D S, Qu J T, Guan Y, Kuang H Y, Wang H, Wu P H, Zheng H J. Evaluation of salt tolerance of maize germplasm resources at seedling stage based on membership function method. Acta Agricultural Shanghai, 2023, 39 (5): 54-60
- [16] 陆怡, 戴毅, 江薇, 陈云, 邓德祥, 吴美琴, 陈建民, 高勇. 玉米自交系苗期耐盐性筛选. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 36 (3): 62-67
- Lu Y, Dai Y, Jiang W, Chen Y, Deng D X, Wu M Q, Chen J M, Gao Y. Screening for salt-tolerance of maize inbred lines in seedling stage. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2015, 36 (3): 62-67
- [17] 张林, 杨剑飞, 于立伟, 于晶, 王军军, 王振华, 刘显君. 玉米苗期耐盐碱鉴定体系优化及 50 份美国自交系耐盐碱性鉴定. 种子, 2016, 35 (5): 94-98
- Zhang L, Yang J F, Yu L W, Yu J, Wang J J, Wang Z H, Liu X J. Optimization of saline-alkaline tolerance identification system of maize at seedling stage and identification of 50 American inbred lines. Seed, 2016, 35 (5): 94-98
- [18] 薛天源, 鲁金春子, 何思晓, 余忆, 陈敬东, 文静, 沈金雄, 傅廷栋, 曾长立, 万何平. 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
- Xue T Y, Lu J C Z, He S X, Yu Y, Chen J D, Wen J, Shen J X, Fu T D, Zeng C L, Wan H P. Comprehensive evaluation of 286 accessions of *Brassica Napus* germplasm at seedling stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 356-372
- [19] 刘春荣, 张国新, 王秀萍. 主成分分析及隶属函数法综合评价玉米苗期耐盐性. 安徽农业科学, 2015, 43 (28): 13-14
- Liu C R, Zhang G X, Wang X P. Principal component analysis and membership function method to evaluate salt tolerance in seedling stage of corn. Journal of Anhui Agricultural Science, 2015, 43 (28): 13-14
- [20] Zhang M, Liang X Y, Wang L M, Cao Y B, Song W B, Shi J P, Lai J S, Jiang C F. A HAK family Na⁺ transporter confers natural variation of salt tolerance in maize. Nature Plants, 2019, 5 (12): 1297-1308
- [21] Zhang M, Cao Y B, Wang Z P, Wang Z Q, Shi J, Liang X Y, Song W B, Chen Q J, Lai J S, Jiang C F. A retrotransposon in an HKT1 family sodium transporter causes variation of leaf Na⁺ exclusion and salt tolerance in maize. The New phytologist, 2018, 217 (3): 1161-1176
- [22] Luo M J, Zhao Y X, Zhang R Y, Xing J F, Duan M X, Li J N, Wang N S, Wang W G, Zhang S S, Chen Z H, Zhang H S, Shi Z, Song W, Zhao J R. Mapping of a major QTL for salt tolerance of mature field-grown maize plants based on SNP markers. BMC Plant Biology, 2017, 17 (1): 140
- [23] 徐立华, 阴卫军, 周柱华, 邢延菊, 许方佐. 细胞工程技术培育玉米耐盐自交系. 作物杂志, 2006(4): 26-28
- Xu L H, Yin W J, Zhou Z H, Xing Y J, Xu F Z. Cultivation of salt-tolerant maize inbred lines by cell engineering. Crops, 2006(4): 26-28
- [24] Han J N, Wang L F, Zheng H Y, Pan X Y, Li H Y, Chen F J, Li X X. ZD958 is a low-nitrogen-efficient maize hybrid at the seedling stage among five maize and two teosinte lines. Planta, 2015, 242 (4): 935-949
- [25] 郑飞, 陈艳萍, 孟庆长, 赵文明, 孔令杰, 袁建华. 7 份玉米自交系耐盐性鉴定. 江苏农业科学, 2012, 40 (12): 112-115
- Zheng F, Chen Y P, Meng Q C, Zhao W M, Kong L J, Yuan J H. Identification of salt tolerance in 7 maize inbred lines. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40 (12): 112-115
- [26] 高英波, 张慧, 薛艳芳, 匡朴, 钱欣, 代红翠, 李源方, 王竹, 韩小伟, 李宗新. 不同夏玉米品种耐盐性综合评价与耐盐品种筛选. 玉米科学, 2020, 28 (2): 33-40
- Gao Y B, Zhang H, Xue Y F, Kuang P, Qian X, Dai H C, Li Y F, Wang Z, Han X W, Li Z X. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerance accessions of different summer maize varieties. Journal of Maize Sciences, 2020, 28 (2): 33-40
- [27] 吕宗环, 韩康妮, 杜晓芬, 王智兰, 李禹欣, 连世超, 张林义, 王军. 谷子萌发期耐盐种质鉴定及应用. 植物科学学报, 2024, 42(1): 75-84
- Lyu Z H, Han K N, Du X F, Wang Z L, Li Y X, Lian S C, Zhang L Y, Wang J. Identification and application of salt-tolerant germplasm in germination stage of millet. Plant Science Journal, 2024, 42(1): 75-84
- [28] 李亮, 高明波, 于清涛. 耐盐玉米自交系的鉴定. 黑龙江农业科学, 2017(2): 14-17
- Li L, Gao M B, Yu Q T. Salt tolerance identification of maize inbred lines. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2017 (2): 14-17
- [29] 刘丽丽, 乔梓启, 杜明, 王宝山. 一种基于综合指标的耐盐方程式准确预测玉米耐盐性. 植物生理学报, 2022, 58 (2): 458-468
- Liu L L, Qiao Z Q, Du M, Wang B S. A salt tolerance equation based on comprehensive indexes accurately predicts salt tolerance of maize inbred lines. Plant Physiology Journal, 2022, 58 (2): 458-468
- [30] 郝德荣, 程玉静, 冒宇翔, 薛林, 陆虎华, 陈国清, 石明亮, 黄小兰, 张振良, 周广飞. 玉米种质耐盐性鉴定体系筛选和耐盐性评价. 金陵科技学院学报, 2014, 30 (3): 53-57
- Hao D R, Cheng Y J, Mao Y X, Xue L, Lu H H, Chen G Q, Shi M L, Huang X L, Zhang Z L, Zhou G F. Screening of identification system and evaluation for salt tolerance of maize germplasms. Journal of Jinling Institute of Technology, 2014, 30 (3): 53-57
- [31] 王秀华, 张寒, 潘香逾, 刘国锋, 赵岩. 玉米成株期耐盐性评价与耐盐资源筛选. 分子植物育种, 2020(2): 685-692
- Wang X H, Zhang H, Pan X Y, Liu G F, Zhao Y. Evaluation of salt tolerance and selection of salt tolerant germplasm in maize at adult stage. Molecular Plant Breeding, 2020 (2): 685-692
- [32] 韩小伟, 刘国利, 张峰, 张国顺, 冯玉在, 张会光, 李宗新, 张

- 慧, 韩文亮, 高英波. 夏玉米品种田间耐盐性综合评价及鉴定. 江苏农业科学, 2022(18):194-200
Han X W, Liu G L, Zhang F, Zhang G S, Feng Y Z, Zhang H G, Li Z X, Zhang H, Han W L, Gao Y B. Comprehensive evaluation and selection of field salt tolerance of summer maize varieties. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022(18):194-200
- [33] 张寒, 潘香逾, 王秀华, 李家丽, 姜慧新, 赵岩. 苜蓿萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选. 草地学报, 2018, 26 (3): 666-672
Zhang H, Pan X Y, Wang X H, Li J L, Jiang H X, Zhao Y. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant germplasm of Alfalfa (*Medicago*) at germination stage. *Acat Agrestia Science*, 2018, 26 (3):666-672
- [34] 王晓春, 杨天辉, 王川, 杨炜迪, 高婷. 复合盐碱胁迫对苜蓿种子萌发的影响及耐盐碱性评价. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2023, 44 (3): 112-119
Wang X C, Yang T H, Wang C, Yang W D, Gao T. Effect of complex salt-alkali stress on the seed germination and evaluation of saline-alkaline tolerance of alfalfa. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2023, 44 (3): 112-119
- [35] 陈卫国, 张政, 史雨刚, 曹亚萍, 王曙光, 李宏, 孙黛珍. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价. 作物杂志, 2020(4): 53-63
Chen W G, Zhang Z, Shi Y G, Cao Y P, Wang S G, Li H, Sun D Z. Drought-Tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources. *Crops*, 2020(4):53-63
- [36] 王艺焯, 李成, 康洪彪, 陈阳, 王兆娟, 杨毅成, 苏二虎, 王瑞莲, 王志刚. 玉米种质资源抗旱性评价方法鉴评与抗旱资源筛选. 玉米科学, 2022, 30 (6): 19-29
Wang Y X, Li C, Kang H B, Chen Y, Wang Z J, Yang Y C, Su E H, Wang E L, Wang Z G. Evaluation on drought resistance methods of maize germplasm and selection of drought resistance resources. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30 (6):19-29
- [37] 杨书华, 张春宵, 朴明鑫, 赵泽双, 杨德光, 李万军, 刘文国, 李晓辉. 69 份玉米自交系的苗期耐盐碱性分析. 种子, 2011, 30 (3): 1-6
Yang S H, Zhang C X, Pu M X, Zhao Z S, Yang D G, Li W J, Liu W G, Li X H. Analysis salt and alkaline tolerance of sixty-nine maize inbred lines at seedling stage. *Seed*, 2011, 30 (3): 1-6