

玉米萌发期耐盐性评价及其杂种优势模式分析

赵绍康¹, 刘晓强², 王玉玺², 徐佳睿¹, 邓馨², 郑军³, 王红武³

(¹吉林农业大学农学院, 长春 130118; ²中国科学院植物研究所, 北京 100093; ³中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 为评价不同玉米材料萌发期对盐胁迫的耐受能力, 探讨不同类群杂交模式下玉米杂交种材料萌发期耐盐性, 本研究采用 160 mmol/L 的 NaCl 溶液对 152 份玉米自交系和 303 份杂交种进行盐胁迫处理, 同时以蒸馏水培养为对照, 通过培养皿纸床培养法进行萌发期耐盐性鉴定。结果显示, 盐胁迫处理显著降低了玉米材料的发芽势、发芽率和发芽指数。性状相关性分析发现, 不同性状之间存在极显著的正相关。采用萌发期耐盐率, 并结合聚类分析结果, 将自交系和杂交种材料分别划分 5 个耐盐级别: I 级(高耐, 自交系 4 份、杂交种 17 份)、II 级(耐, 自交系 19 份、杂交种 58 份)、III 级(中耐, 自交系 47 份、杂交种 120 份)、IV 级(敏感, 自交系 33 份、杂交种 71 份)和 V 级(高敏, 自交系 49 份、杂交种 37 份)。根据同源传递片段(IBD, identity-by-descent)分析结果, 将 146 份自交系材料划分为 8 个类群, 不同类群自交系材料耐盐性表现为欧洲母本群>混合血缘群>自 330 群>PB 群>兰卡斯特群>塘四平头群>PA 群>瑞德群。杂交种材料根据父母本材料类群的不同划分为 23 个杂交模式, 其中欧洲母本群×PB 群为萌发期对盐胁迫耐受性的最优杂种优势模式。进一步筛选得到 4 份高耐盐自交系材料和 17 份高耐盐杂交种材料。

关键词: 玉米; 自交系; 杂交种; 萌发期; 耐盐性; 杂种优势模式

Evaluation of Salt Tolerance and Analysis of Their Heterosis Patterns in Maize during Germination Period

ZHAO Shaogeng¹, LIU Xiaoqiang², WANG Yuxi², XU Jiarui¹, DENG Xin², ZHENG Jun³, WANG Hongwu³

(¹College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; ²Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093; ³Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: To evaluate the tolerance of different maize materials to salt stress during the germination period and to explore the salt tolerance of hybrid maize materials from different hybridization patterns during the germination stage. This study used a 160 mmol/L NaCl solution to treat 152 maize inbred lines and 303 hybrid varieties under salt stress. Distilled water culture was used as the control, and salt tolerance during germination was identified using a paper bed culture method in a culture dish. The results showed that salt stress treatment significantly reduced the germination potential, germination rate, and germination index of maize materials. Trait correlation analysis revealed a highly significant positive correlation between different traits. Using the salt tolerance rate during the germination period and combining with the clustering analysis results, the inbred and hybrid materials were divided into five salt tolerance levels: Level I (high tolerance, 4 inbred lines, 17 hybrids), Level II (tolerance, 19 inbred lines, 58 hybrids), Level III (moderate tolerance, 47 inbred lines, 120 hybrids), Level IV (sensitive, 33 inbred lines, 71 hybrids), and Level V (high sensitivity, 49 inbred lines, 37 hybrids). Based on the analysis of identity-by-descent (IBD) segments, 146 inbred line materials were divided into 8 groups. The salt tolerance of different groups of inbred line materials was as follows: European maternal

收稿日期: 2024-04-05 网络出版日期: 2024-10-31

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240405001>

第一作者研究方向为玉米种质资源与创新, E-mail: zsglf123@163.com

通信作者: 郑军, 研究方向为玉米分子育种, E-mail: zhengjun02@caas.cn

王红武, 研究方向为作物遗传育种理论与技术, E-mail: whwzym2000@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1200500)

Foundation project: National Key Research and Development Program of China(2023YFD1200500)

group>Complex group>Inbred line 330 group>PB group>Lancaster group>Tangsipingtou group>PA group>Reid group. The hybrid materials are divided into 23 hybridization patterns based on the different parent material groups, among which European maternal group×PB group is the optimal heterosis pattern for salt stress tolerance during germination. This study identified the salt tolerance of inbred lines and hybrid materials, and selected 4 high salt tolerant inbred line materials and 17 high salt tolerant hybrid materials.

Key words: maize; inbred lines; hybrids; germination stage; salt tolerance; heterosis pattern

随着全球气候变化和土壤盐渍化问题的加剧,作物耐盐性研究受到广泛关注^[1-2]。据统计,全球有超过8亿公顷的土地受到盐碱化影响,占全球土地总面积的6%以上^[3]。预测到2050年全球将有超过一半的可用耕地面临严重的盐碱化问题^[4]。盐胁迫会阻碍作物的正常生长甚至导致植株死亡,从而导致粮食大量减产,严重威胁粮食安全和农业可持续发展^[5-6]。

玉米作为全球产量最高的粮食作物之一,是许多地区的主要食物来源和多种工业产品的主要原料^[7]。然而玉米对盐胁迫中度敏感,土壤盐胁迫已成为限制玉米生产的重要因素之一^[8]。因此,开展玉米种质的耐盐性鉴定,筛选耐盐种质用于玉米品种改良,对促进盐碱地资源利用及玉米栽培具有重要的现实意义。

种子萌发期是决定植物早期形态建立和后期生产的关键时期,也是对盐胁迫非常敏感的时期^[9]。在玉米萌发期的耐盐性研究中,段雅娟等^[10]根据10个与萌发期耐盐性相关的指标,对390份玉米自交系进行萌发期耐盐评价,将材料划分为6类,其中大部分材料表现为盐敏感。高英波等^[11]采用加权隶属函数法和聚类分析,对不同玉米品种的耐盐性进行综合评价,将30个玉米品种分为耐盐性不同的4个类群,并将160 mmol/L NaCl作为玉米萌发期耐盐性鉴定的适宜盐浓度。此外,合理划分自交系优势类群是构建玉米杂种优势利用模式,提高育种效率的基础^[12]。王雪飞等^[13]利用40对玉米核心SSR标记,将来源广泛、遗传多样性丰富的132份爆裂玉米自交系划分为5个杂种优势类群,结合表型性状,从不同类群中筛选优良爆裂玉米自交系材料。刘杭等^[14]采用系谱分析法,将我国2004~2017年28个国审青贮玉米品种分为6个杂种优势群和8种杂种优势模式,明确了4种最具代表性的青贮玉米杂种优势模式:温热I群×瑞德黄、旅大红骨×温热I群、瑞德黄×热带种质、温热I群×高油。前人对玉米材料耐盐鉴定和品种筛选进行过很多研究报道^[15-17],但有关自交系材料类群间耐盐性以及杂种材料杂种优势模式耐盐性的研究较少。

本研究选取152份玉米自交系材料及其杂交组

配获得的303份杂交种材料,在萌发期进行耐盐性鉴定。测定萌发期耐盐率,结合聚类分析进行耐盐性评价,筛选耐盐性强的玉米种质;同时根据同源传递片段(IBM, identity-by-descent)分群结果,比较不同类群自交系材料的耐盐性,以及不同杂种优势模式下杂交种材料的耐盐性。为进一步开展玉米耐盐遗传研究和耐盐玉米杂种优势利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

152份自交系材料:包括146份来源广泛涵盖玉米主要杂种优势群的玉米自交系,以及作为对照的6份骨干亲本自交系(PH6WC、PH4CV、郑58、B73、昌7-2和综31)。303份杂交种材料:包括以上述146份自交系中的D441、S163和DI81三份材料作为父本,与其他143份自交系不完全双列杂交设计组配获得的301份杂交种,以及作为对照的2份杂交种郑单958和先玉335。

1.2 耐盐性鉴定

参照吉林省地方标准DB22T 2621-2017《玉米耐盐碱性鉴定技术规程》^[18]进行耐盐性鉴定。每份材料选用籽粒饱满、大小均匀一致、同批次收获的玉米种子,用75%乙醇消毒1 min,蒸馏水清洗1遍;5%次氯酸钠浸泡10 min消毒,蒸馏水冲洗3遍,晾干备用。将吸胀(对照组用蒸馏水,处理组用160 mmol/L NaCl^[11]溶液吸胀)12 h后的种子,均匀放入铺有滤纸的玻璃皿中,每皿放置20粒,分别用蒸馏水(对照组)和160 mmol/L NaCl溶液(处理组)培养,以溶液浸没过种子1/3为标准,设置3次重复。置于25℃~28℃,8 h光照/16 h黑暗以及60%相对湿度的温室内培养。

以胚根突破种皮2 mm为发芽标准,从发芽第2天起,每24 h观察发芽情况,记录发芽数量,连续记录8 d,待整体发芽数无新增后,根据种子发芽情况计算各指标。

发芽势(%) = 第4天正常发芽种子数/供试种子总数×100%;

发芽率(%) = 第7天正常发芽种子数/供试种子

总数 $\times 100\%$;

发芽指数 $=1.00 \times nd2 + 0.75 \times nd4 + 0.50 \times nd6 + 0.25 \times nd8$,其中,nd2、nd4、nd6、nd8分别为第2、4、6和8天的种子发芽率。

性状相对值 $=X_s/X_N$,式中, X_s 为盐胁迫下测得的各项性状值, X_N 为对照条件下测得的各项性状值。

1.3 耐盐性评价

根据萌发期耐盐率,对材料进行萌发期耐盐性评价^[18],萌发期耐盐率($\%$) $=$ (胁迫处理组发芽指数/对照组发芽指数) $\times 100\%$ 。萌发期耐盐率数值越大,表示材料的耐盐性越强。通过萌发期耐盐率计算欧氏距离,然后利用R语言中hclust函数的ward.D2方法进行聚类分析将供试材料划分5个耐盐级别:I级(高耐)、II级(耐)、III级(中耐)、IV级(敏感)和V级(高敏)。

1.4 同源传递片段(IBD)分析

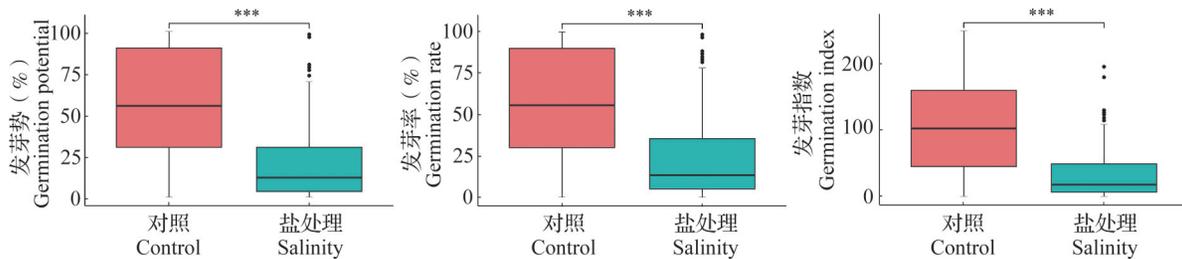
146份供试自交系种子在温室(25℃)培养发芽,幼苗长至五片叶时,取幼嫩玉米叶片,用CTAB

法提取玉米基因组DNA。由北京中玉金标记有限公司利用包含9433个SNP标记的中玉芯1号芯片(10K)进行基因型检测,按照国内几大主要血缘(瑞德、塘四平头等)拆分材料的血缘构成,并将遗传比例最高的血缘作为IBD分群结果。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对自交系材料萌发期性状的影响与性状间相关性分析

与对照条件相比,160 mmol/L NaCl溶液胁迫处理对玉米自交系萌发期不同性状有明显的抑制作用;玉米自交系的平均发芽势、发芽率和发芽指数分别降低64.60%、59.06%和68.16%,差异均达到极显著水平(图1)。对照组发芽势、发芽率和发芽指数的变异系数分别为57.78%、57.59%和65.78%,盐胁迫处理条件下的变异系数分别为111.29%、105.21%和112.27%。盐胁迫处理后,材料各性状的变异系数变大,表明材料间性状差异更加明显。



***代表在 $P < 0.001$ 水平差异显著,下同

*** represents significant difference at $P < 0.001$ level, the same as below

图1 盐胁迫对玉米自交系材料萌发期不同性状的影响

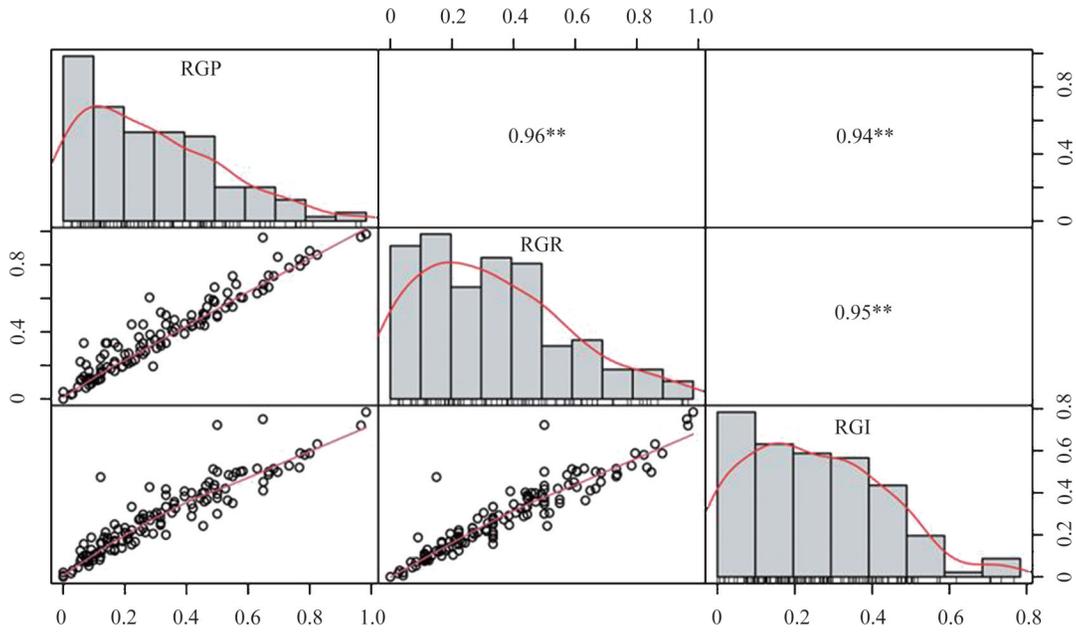
Fig. 1 The impact of salt stress on the germination stage of different traits in maize inbred materials

不同性状相对值的相关性分析发现,相对发芽指数与相对发芽势、相对发芽率的相关系数分别为0.94和0.95;相对发芽势和相对发芽率之间的相关系数为0.96(图2)。相关性分析结果表明,不同性状间均极显著正相关。

2.2 自交系材料萌发期耐盐性评价

为避免信息重叠,客观准确的评价材料萌发期耐盐性,以萌发期耐盐率为基础数据计算欧氏距离,利用R语言的hclust函数中的ward.D2方法进行萌发期自交系材料耐盐性聚类分析。供试的152份自交系材料萌发期耐盐率变化范围为0~78.33%,萌发期耐盐率均值为25.68,均值以上的材料有70份。聚类分析将152份自交系材料分成5类(图3)。结合萌发期耐盐率对材料进行耐盐性评价(表1),第I类为高耐盐材料,共4份(2.6%),萌发期耐盐率范围

为72.00%~78.33%,均值74.39%;第II类为耐盐材料,共19份(12.50%),萌发期耐盐率范围为47.47%~63.11%,均值52.09%;第III类为中耐盐材料,共47份(30.90%),萌发期耐盐率范围为26.95%~45.19%,均值35.38%;第IV类为盐敏感材料,共33份(21.70%),萌发期耐盐率范围为15.69%~25.68%,均值20.29%;第V类为盐高敏材料,共49份(32.20%),萌发期耐盐率范围为0~15.38%,均值6.09%。前两类耐盐材料仅占自交系材料总数的15.1%,而盐敏感材料占材料总数的53.9%,表明玉米自交系材料萌发期耐盐性较差。对照品种中,PH6WC为耐盐材料,郑58为中耐性材料,PH4CV为盐敏感材料,另外3份材料为盐高敏材料。通过聚类分析和耐盐性评价,可以更清楚地了解不同玉米自交系材料的耐盐性表现。

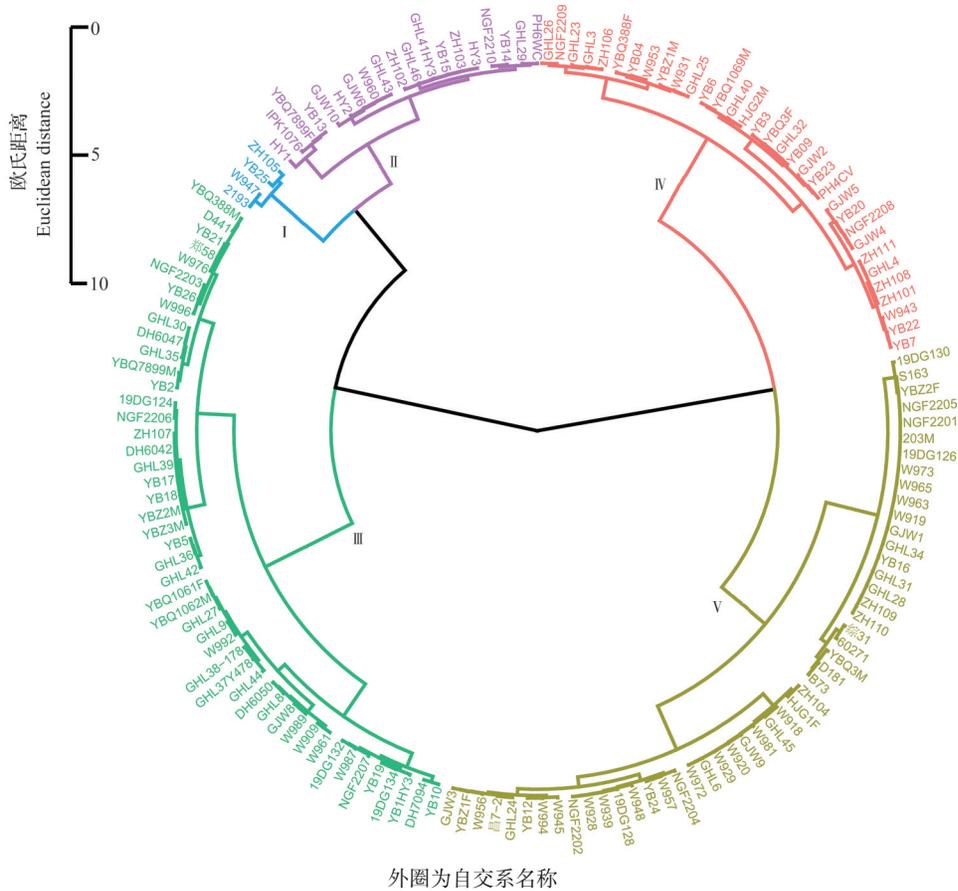


RGP: 相对发芽势; RGR: 相对发芽率; RGI: 相对发芽指数; **代表在 $P < 0.01$ 水平差异显著; 下同

RGP: Relative germination potential; RGR: Relative germination rate; RGI: Relative germination index; ** represents significant difference at $P < 0.001$ level; The same as below

图2 自交系材料萌发期不同性状相对值相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of relative values of different traits during germination of inbred materials



外圈为自交系名称

The content in the outer circle indicates the names of inbred lines

图3 152份玉米自交系萌发期耐盐性聚类分析

Fig. 3 Clustering analysis of salt tolerance during germination of 152 maize inbred lines

表 1 152 份玉米自交系材料萌发期耐盐性分级结果

Table 1 Classification results of salt tolerance during germination of 152 maize inbred lines

耐盐等级 Salt tolerance level	耐盐评价 Salt tolerance evaluation	数量 Quantity	萌发期耐盐率(%) GTI			百分比(%) Percentage
			均值±标准差 Mean±SD	最小值 Min.	最大值 Max.	
I	高耐	4	74.39±2.96a	72.00	78.33	2.60
II	耐	19	52.09±4.35b	47.47	63.11	12.50
III	中耐	47	35.38±5.27c	26.95	45.19	30.90
IV	敏感	33	20.29±3.03d	15.69	25.68	21.70
V	高敏	49	6.09±5.37e	0	15.38	32.20
总计 Total		152	25.68±18.31	0	78.33	100

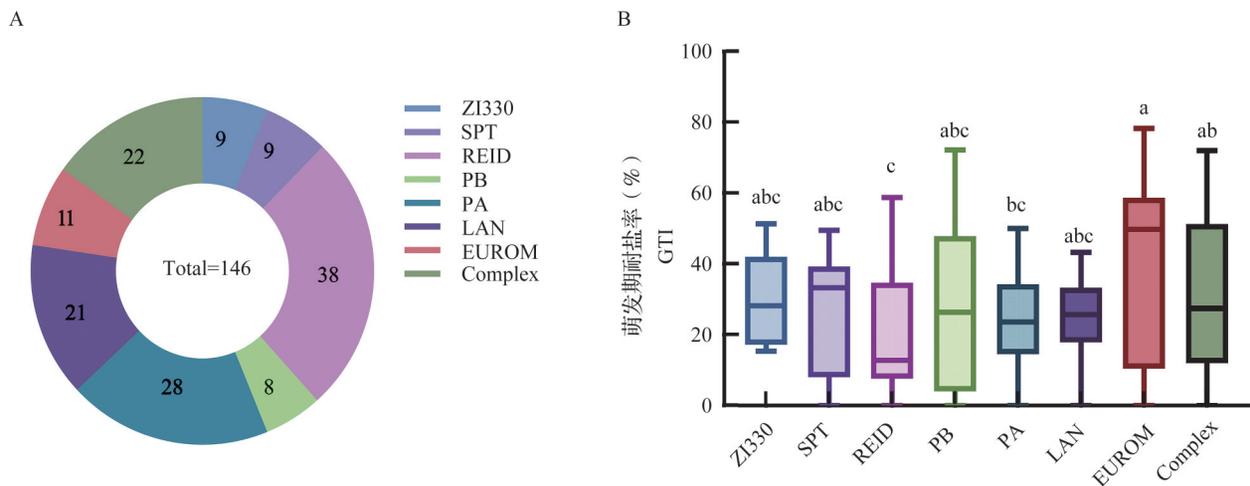
不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$); GTI: Salt tolerance rate at germination stage; The same as below

2.3 自交系不同类群耐盐性评价

IBD 分群结果表明在 146 份自交系材料中, 有 124 份材料分别属于自 330 群(9 份)、塘四平头群(9 份)、瑞德群(38 份)、PB 群(8 份)、PA 群(28 份)、兰卡斯特群(21 份)、欧洲母本群(11 份); 有 22 份材料血缘关系较为复杂, 没有检测出主导的血缘(图 4A)。比较不同 IBD 分群的萌发期耐盐率均值发现, 欧洲母本群与瑞德群、PA 群以及混合血缘群与瑞德群间存在显著差异, 其他类群间不存在显著性差异(图 4B)。对 8 个 IBD 分群自交系材料的耐

盐性进行汇总(表 2), 不同分群的萌发期耐盐率均值排序为欧洲母本群>混合血缘群>自 330 群>PB 群>兰卡斯特群>塘四平头群>PA 群>瑞德群。欧洲母本群的萌发期耐盐率均值最高, 为 38.28%, 类群中耐盐性评价为耐和高耐的自交系占 54.5%。瑞德群的萌发期耐盐率均值最低, 为 19.61%, 类群中耐盐性评价为敏感和高敏的自交系占 65.8%。在实际的玉米耐盐性育种中, 可以重点关注欧洲母本群的材料, 从中挑选出具有较强耐盐性的自交系, 为玉米耐盐遗传改良提供优异的种质资源。



A: 不同 IBD 分群材料份数; B: 不同 IBD 分群间耐盐性差异比较; ZI330: 自 330 群; SPT: 塘四平头群; REID: 瑞德群; PB: PB 群; PA: PA 群; LAN: 兰卡斯特群; EUROM: 欧洲母本群; Complex: 混合血缘群; 下同

A: Number of materials in different IBD clusters; B: Comparison of salt tolerance differences between different IBD clusters; ZI330: Inbred line 330; SPT: Tangsipingtou lineage; REID: Rhett bloodline; PB: PB lineage; PA: PA lineage; LAN: Lancaster lineage; EUROM: European maternal lineage; Complex: Complex lineage; The same as below

图 4 自交系材料不同类群耐盐性比较

Fig. 4 Comparison of salt tolerance among different inbred line groups

表2 玉米自交系材料不同类群耐盐评价

Table 2 Evaluation of salt tolerance in different maize inbred line groups

IBD 分群 IBD group	萌发期耐盐率(%) GTI			耐盐评价 Salt tolerance evaluation
	均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	
欧洲母本群 EUROM	38.28	0	78.33	高耐(2)、耐(4)、中耐(1)、高敏(4)
混合血缘群 Complex	30.63	0	72.00	高耐(1)、耐(6)、中耐(5)、敏感(3)、高敏(7)
自330群 ZI330	29.84	15.39	51.39	耐(2)、中耐(3)、敏感(4)
PB	28.50	0	72.22	高耐(1)、耐(1)、中耐(2)、高敏(4)
兰卡斯特群 LAN	26.22	0	43.33	中耐(10)、敏感(9)、高敏(2)
塘四平头群 SPT	25.83	0	49.53	耐(1)、中耐(4)、敏感(2)、高敏(2)
PA	23.97	0	50.00	耐(2)、中耐(10)、敏感(9)、高敏(7)
瑞德群 REID	19.61	0	58.81	耐(2)、中耐(11)、敏感(5)、高敏(20)

表中括号内数字代表自交系数个数;下同

The numbers of parentheses in the table represent the number of inbred lines; The same as below

2.4 盐胁迫对杂交种材料萌发期性状的影响与性状间相关性分析

与对照条件相比,160 mmol/L NaCl溶液胁迫处理条件下,杂交种材料的平均发芽势、发芽率和发芽指数均出现极显著的下降。其中发芽指数受影响最大,降幅达到47.23%,其次为发芽势,降低35.89%,发芽率的降幅最小,为30.04%(图5)。此

外,通过对对照组和盐胁迫组3个指标的变异系数比较发现,盐胁迫处理后,3个指标的变异系数变大。对照组和盐胁迫组发芽势、发芽率和发芽指数的变异系数的差值分别为25.52%、21.03%和24.54%,盐胁迫处理后杂交种材料发芽势的变异系数变化最大。

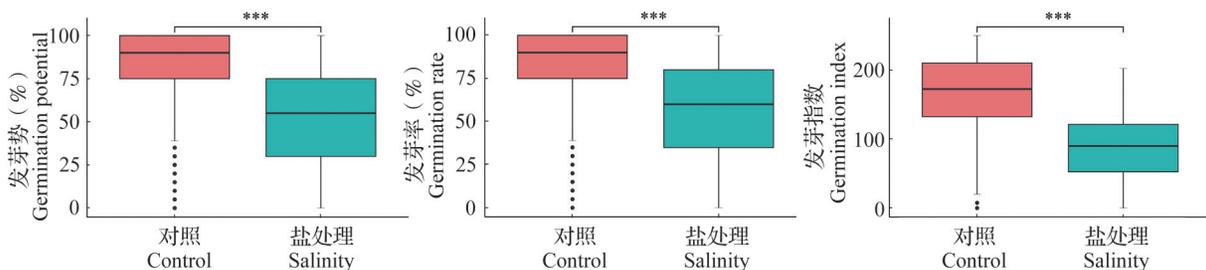


图5 盐胁迫对玉米杂交种材料萌发期性状的影响

Fig. 5 The impact of salt stress on germination traits of maize hybrids

杂交种不同性状相对值相关性分析发现,相对发芽指数和相对发芽势、相对发芽率的相关系数分别为0.93和0.94;相对发芽势和相对发芽率之间的相关系数为0.95。各性状相对值间也存在极显著的正相关(图6)。

2.5 杂交种材料萌发期耐盐性评价

供试303份杂交种材料(包括对照)萌发期耐盐率的变化范围为0~107.06%,萌发期耐盐率均值为50.95%,均值以上的材料有164份。基于萌发期耐盐率进行聚类分析,可将303份材料分为5类,结合萌发期耐盐率对材料进行耐盐性评价(表3)。结果显示,第I类为高耐盐材料,共17份(5.6%),萌发期耐盐率范围为85.39%~107.06%,均值91.52%;第II

类为耐盐材料,共58份(19.1%),萌发期耐盐率范围为66.67%~83.07%,均值72.99%;第III类为中耐盐材料,共120份(39.6%),萌发期耐盐率范围为43.75%~65.91%,均值55.32%;第IV类为盐敏感材料,共71份(23.4%),萌发期耐盐率范围为25.86%~42.86%,均值35.54%;第V类为盐高敏材料,共37份(12.2%),萌发期耐盐率范围为0~25.00%,均值13.16%。对照材料中,郑单958为耐盐材料,先玉335为盐敏感材料。与自交系材料相比,杂交种材料中高耐盐、耐盐、中耐盐和盐敏感材料占比均有所提升,而盐高敏材料占比有所下降,表明杂交种材料的整体耐盐性有所提高。

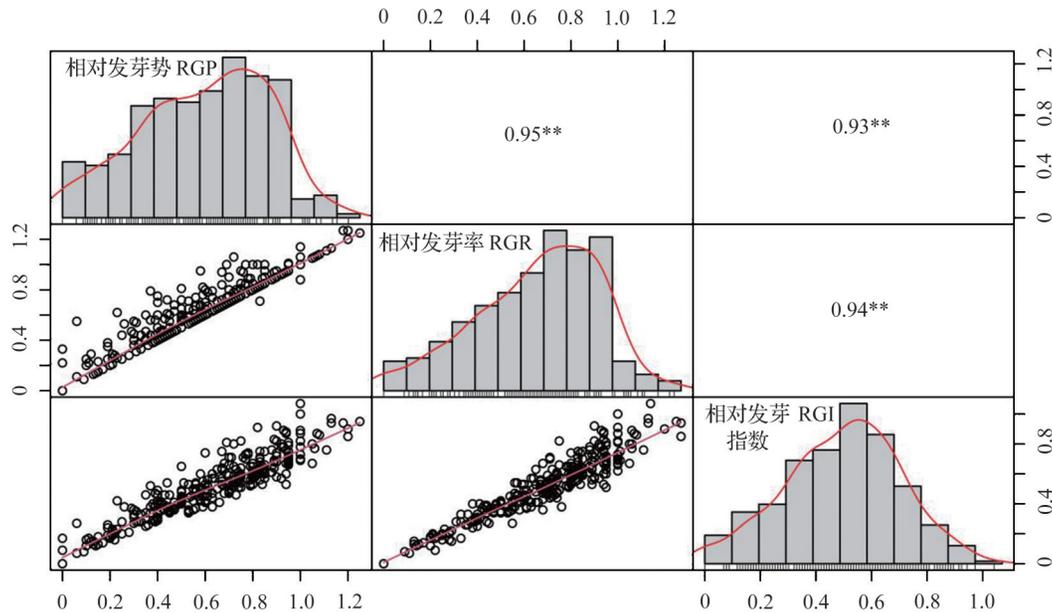


图6 杂交种材料萌发期不同性状相对值相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of relative values of different traits during germination of hybrids

表3 303份玉米杂交种材料萌发期耐盐性分级结果

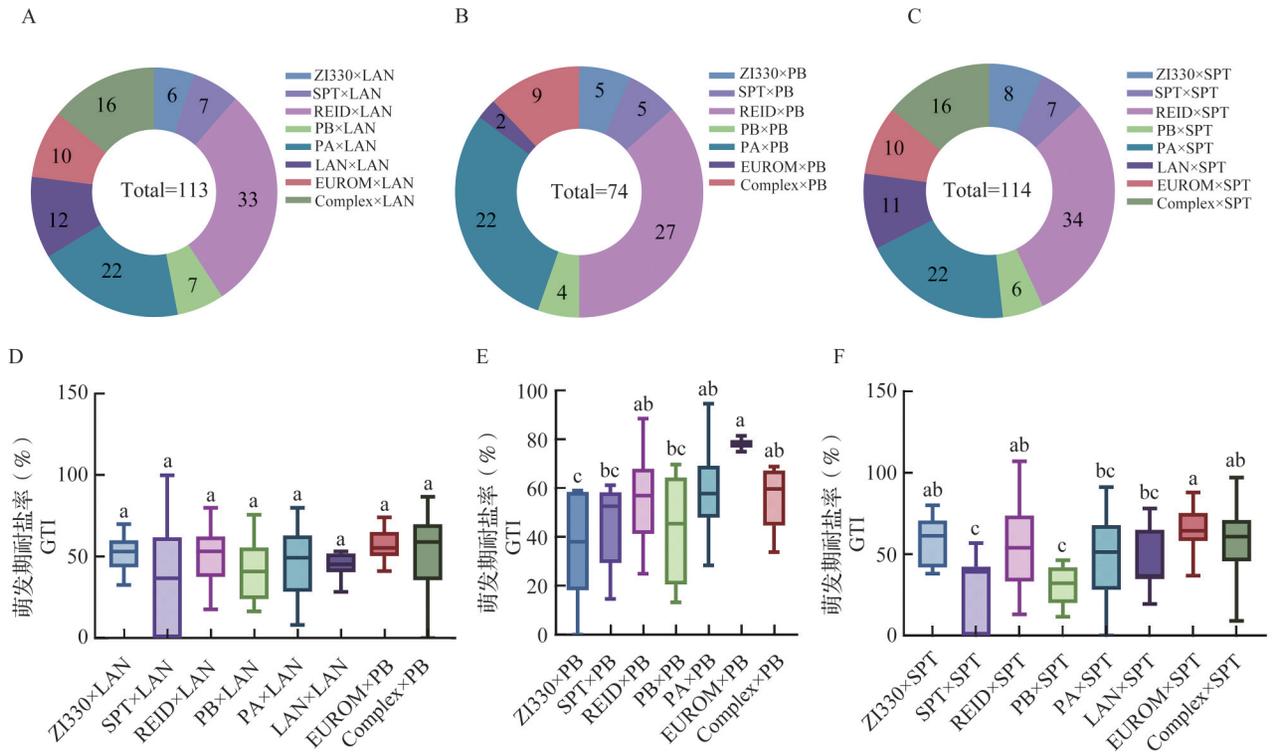
Table 3 Classification results of salt tolerance during germination of 303 maize hybrid lines

耐盐等级 Salt tolerance level	耐盐评价 Salt tolerance evaluation	数量 Quantity	萌发期耐盐率(%)			百分比(%) Percentage
			均值±标准差 Mean±SD	最小值 Min.	最大值 Max.	
I	高耐盐	17	91.52±5.8a	85.39	107.06	5.6
II	耐盐	58	72.99±4.83b	66.67	83.07	19.1
III	中耐	120	55.32±6.19c	43.75	65.91	39.6
IV	敏感	71	35.54±5.02d	25.86	42.86	23.4
V	高敏	37	13.16±8.15e	0	25.00	12.2
总计 Total		303	50.95±21.43	0	107.06	100

2.6 不同杂种优势模式的耐盐性评价分析

根据父母本所属IBD分群对301份杂交种材料进行分类,结果显示以D441(兰卡斯特群)为父本组配了113份杂交种;以S163(塘四平头群)为父本组配了114份杂交种;以D181(PB群)为父本仅组配了74份杂交种(图7A~C)。比较不同杂种优势模式的萌发期耐盐率均值发现,以D441(兰卡斯特群)作为父本的杂种优势模式之间虽然存在一定差异,但并未达到显著水平(图7D);而以D181(PB群)以及S163(塘四平头群)作为父本的杂种优势模式之间则存在显著差异(图7E、F)。通过比较不同父本群

材料萌发期耐盐率均值(表4)发现,PB父本群>塘四平头父本群>兰卡斯特父本群。进一步比较不同父本群内杂种优势模式的萌发期耐盐率均值,结果显示欧洲母本群×兰卡斯特群、欧洲母本群×PB群和欧洲母本群×塘四平头群均表现出最高的耐盐性,且欧洲母本群×PB群>欧洲母本群×塘四平头群>欧洲母本群×兰卡斯特群。对23种不同类群杂交种萌发期耐盐率均值进行排序,最优杂种优势模式为欧洲母本群×PB群;而塘四平头群×塘四平头群、兰卡斯特群×兰卡斯特群和PB群×PB群杂交种材料的耐盐性相对较差。



A~C:分别为以兰卡斯特、PB、塘四平头为父本的不同杂种优势模式材料份数；D~F:分别为以兰卡斯特、PB、塘四平头为父本的不同杂种优势模式耐盐性差异比较

A-C: Represent the number of materials for different heterosis patterns with Lancaster, PB, and Tangsipingtou as male parents, respectively; D-F: Compare the differences in salt tolerance among different heterosis patterns with Lancaster, PB, and Tangsipingtou as male parents, respectively

图7 杂交种材料不同杂种优势模式耐盐性比较

Fig. 7 Comparison of salt tolerance among different hybrid modes of maize hybrids

表4 玉米杂交种材料不同杂种优势模式耐盐评价

Table 4 Evaluation of salt tolerance in different hybrid modes of maize hybrids

父本分群 Paternal group	杂种优势模式 Heterosis model	萌发期耐盐率(%)GTI			耐盐评价 Salt tolerance evaluation
		均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	
兰卡斯特 LAN	EUROM×LAN	57.05	41.15	74.16	耐(2)、中耐(6)、敏感(1)、高敏(1)
	ZI330×LAN	52.21	32.73	70.11	耐(1)、中耐(4)、敏感(1)
	REID×LAN	50.92	17.65	80.00	耐(6)、中耐(16)、敏感(8)、高敏(3)
	Complex×LAN	50.47	0	86.81	高耐(1)、耐(3)、中耐(6)、敏感(3)、高敏(3)
	PA×LAN	46.86	8.11	80.00	耐(4)、中耐(9)、敏感(5)、高敏(4)
	LAN×LAN	44.78	28.38	53.33	耐(1)、中耐(6)、敏感(4)、高敏(1)
	PB×LAN	42.49	16.41	75.86	耐(1)、中耐(2)、敏感(2)、高敏(2)
	SPT×LAN	38.73	0	61.91	高耐(1)、中耐(2)、敏感(1)、高敏(3)
	LAN总计	48.75	0	86.81	高耐(2)、耐(18)、中耐(51)、敏感(25)、高敏(17)
PB	EUROM×PB	78.29	75.00	81.58	耐(2)
	PA×PB	57.44	28.45	94.74	高耐(2)、耐(6)、中耐(9)、敏感(5)
	Complex×PB	56.29	33.89	68.99	耐(3)、中耐(5)、敏感(1)
	REID×PB	55.97	25.00	88.64	高耐(1)、耐(8)、中耐(10)、敏感(7)、高敏(1)
	SPT×PB	45.70	14.68	61.31	中耐(4)、高敏(1)
	PB×PB	43.56	13.33	69.77	耐(1)、中耐(1)、敏感(1)、高敏(1)
	ZI330×PB	38.38	0	59.09	中耐(2)、敏感(2)、高敏(1)
	PB总计	54.50	0	94.74	高耐(3)、耐(20)、中耐(31)、敏感(16)、高敏(4)

表4(续)

父本分群 Paternal group	杂种优势模式 Heterosis model	萌发期耐盐率(%)GTI			耐盐评价 Salt tolerance evaluation
		均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	
塘四平头 SPT	EUROM×SPT	65.75	36.79	87.93	高耐(2)、耐(2)、中耐(5)、敏感(1)
	ZI330×SPT	58.80	38.00	80.00	耐(4)、中耐(2)、敏感(2)
	Complex×SPT	56.08	9.09	97.06	高耐(2)、耐(3)、中耐(8)、敏感(1)、高敏(2)
	REID×SPT	55.25	13.04	107.06	高耐(6)、耐(4)、中耐(13)、敏感(7)、高敏(4)
	PA×SPT	48.00	0	91.18	高耐(2)、耐(4)、中耐(6)、敏感(6)、高敏(4)
	LAN×SPT	45.36	19.44	78.00	耐(2)、中耐(2)、敏感(5)、高敏(2)
	PB×SPT	30.92	11.54	46.32	中耐(1)、敏感(3)、高敏(2)
	SPT×SPT	29.45	0	56.76	中耐(1)、敏感(4)、高敏(2)
	SPT 总计	51.32	0	107.06	高耐(12)、耐(19)、中耐(38)、敏感(29)、高敏(16)

3 讨论

3.1 玉米材料萌发期耐盐性评价中盐溶液浓度选择

适宜的盐溶液浓度是保证有效区分不同玉米自交系萌发期耐盐能力的基础。对于玉米在盐溶液中的耐受性,谷思玉等^[19]研究认为,玉米可以抵抗低浓度的盐溶液胁迫,而且盐溶液中少量的氯离子还可以促进种子的萌发;但随着盐溶液浓度的增加,钠离子的盐害作用以及过多氯离子的毒害作用,使得植物的自我保护机制受到破坏,因此出现显著的抑制作用。不同的盐溶液浓度对玉米萌发期影响不同,本研究参照高英波等^[11]的研究采用160 mmol/L NaCl作为盐处理条件下的盐溶液浓度进行萌发期耐盐性鉴定。

3.2 玉米材料萌发期耐盐性评价及种质筛选

对玉米种质资源进行合理的耐盐鉴定,筛选耐盐种质是耐盐育种的重要环节,而种子萌发期作为植物生命历程的起点,对其耐盐性进行鉴定具有重要意义^[20]。萌发期耐盐鉴定不仅具有受环境影响小和能容纳较多资源的特点,且方法简单、操作简便易行,因此是目前鉴定种质资源耐盐性的重要方法^[21]。对作物萌发期进行耐盐鉴定,通常采用发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、芽长等指标,并利用主成分分析或加权隶属函数的方法,对各指标进行综合评价^[22-24]。陈新等^[25]对裸燕麦萌发期进行耐盐性鉴定认为,采用多种鉴定指标评价作物耐盐性时,应考察鉴定指标之间是否存在信息重叠。刘杰等^[26]基于综合评价D值和相对发芽率对81份玉米杂交种材料的耐冷性进行评价,发现两种方法都能将材料准确划分为5类,且聚类结果高

度一致。因此,刘杰等^[26]认为在大量材料的初步评估中,可以采用相对发芽率作为鉴定耐冷性的主要指标。王兴荣等^[27]分别利用芽期发芽率抗旱系数和加权抗旱系数划分材料的抗旱等级,发现二者结果相差不大,认为在芽期抗旱鉴定过程中,用发芽率的高低来评价种质的抗旱性可大幅度减少工作量。因此,在萌发期,可以采用单一的鉴定指标进行大量材料的快速鉴定和初步筛选。本研究测定了玉米材料的发芽势、发芽率和发芽指数,相关性分析表明,性状间存在极显著的正相关关系。采用加权隶属函数法进行耐盐性评价,很难克服指标间信息重叠带来的影响。因此,参照吉林省地方标准《DB22T 2621-2017 玉米耐盐碱性鉴定技术规程》^[18],采用萌发期耐盐率对材料进行耐盐评价,并结合聚类分析结果将材料划分为5类。自交系材料中,耐盐评价为耐盐和高耐材料有23份,占总数的15.1%;杂交种材料有75份,占材料总数的24.8%。分级评价筛选到的萌发期优异耐盐种质,能有效应用于育种中。

3.3 玉米不同血缘与杂种优势模式下耐盐性分析

玉米自交系杂种优势群的划分是构建杂种优势模式的重要依据和提高育种效率的基础^[28]。武斌等^[29]为了解53份玉米自交系的苗期耐旱性,利用SSR标记结合系谱资料和育种实践,将53份自交系划分为兰卡斯特、BSSS、旅大红骨、PA、塘四平头和PB共6个亚群,并发现BSSS、PB和四平头亚群为重要的耐旱种质类群。本研究根据IBD分群结果,将自交系材料分为8个类群。通过比较不同类群萌发期耐盐率均值发现欧洲母本群>混合血缘群>自330群>PB群>兰卡斯特群>塘四平头群>PA群>瑞德群,这一结果与郝德荣等^[30]的研究结果大致相

符。在所有的类群中,欧洲母本群材料的耐盐性最强,并且类群内耐盐评价在耐盐及以上的材料占比最大,在后续的耐盐育种中应多关注。杂交种材料则根据父母本所属类群不同被分为不同的杂种优势模式。在所有的杂交类群中,欧洲母本群×PB群表现出最优的耐盐性;相比之下,同类群间的杂交后代耐盐性普遍较弱,表明在进行玉米耐盐杂交种选育时,应尽量从耐盐性强的类群间挑选自交系材料进行杂交,避免同类群间组配杂交种。由于本研究仅为萌发期耐盐鉴定,因此后续还需对苗期和全生育期的耐盐性进行进一步验证,以确保鉴定结果的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] Ray D K, Gerber J S, MacDonald G K, West P C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5989-5989
- [2] Cao Y B, Zhou X Y, Song H F, Zhang M, Jiang C F. Advances in deciphering salt tolerance mechanism in maize. *The Crop Journal*, 2023, 11(4): 1001-1010
- [3] Munns R. Genes and salt tolerance: Bringing them together. *The New Phytologist*. 2005, 167(3): 645-663
- [4] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 2003, 218(1): 1-14
- [5] Munns R, James R A, Läuchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5): 1025-1043
- [6] Zhao S, Zhang Q, Liu M, Zhou H, Ma C, Wang P. Regulation of plant responses to salt stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(9): 4609-4609
- [7] Yang Z, Cao Y, Shi Y, Qin F, Jiang C, Yang S. Genetic and molecular exploration of maize environmental stress resilience: Toward sustainable agriculture. *Molecular Plant*, 2023, 16(10): 1496-1517
- [8] Muhammad F, Mubshar H, Abdul W, Kadambot H M. Salt stress in maize: Effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 461-481
- [9] Li H, Yue H, Li L, Liu Y, Zhang H, Wang J, Jiang X. Seed biostimulant *Bacillus* sp. MGW9 improves the salt tolerance of maize during seed germination. *AMB Express*, 2021, 11(1): 74-74
- [10] 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 of maize inbred lines at germination stage. *Journal of Crops*, 2022(1): 213-219
- [11] 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
- [12] 彭泽斌, 刘新芝, 傅骏骅, 李连城, 黄长玲. 玉米自交系杂种优势类群与杂优模式构建的初步研究. *作物学报*, 1998, 24(6): 711-717
- Peng Z B, Liu X Z, Fu J H, Li L C, Huang C L. A preliminary study on the classification of heterosis groups and the construction of heterosis models of maize inbred lines. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6): 711-717
- [13] 王雪飞, 李婷婷, 郑云霄, 李召辉, 贾晓艳, 赵永锋, 祝丽英, 宋伟彬, 郭晋杰. 132份爆裂玉米自交系的相关性状鉴定及杂种优势类群划分. *中国农业大学学报*, 2023, 28(5): 25-33
- Wang X F, Li T T, Zheng Y X, Li Z H, Jia X Y, Zhao Y F, Zhu L Y, Song W B, Guo J J. Identification of related traits and classification of heterotic groups for 132 popcorn inbred lines. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 25-33
- [14] 刘杭, 侯乐新, 王方明, 张玉强, 李建生, 丁宁. 我国青贮玉米育种现状和遗传改良策略. *玉米科学*, 2021, 29(1): 1-7
- Liu H, Hou L X, Wang F M, Zhang Y Q, Li J S, Ding N. Genetic improvement status and strategies of silage maize in China. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(1): 1-7
- [15] 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
- [16] 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评. *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
- [17] 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
- [18] 李晓辉, 张春宵, 金峰学, 孙伟, 李淑芳, 李万军, 刘文平, 王吉艳, 郭嘉, 袁英, 刘文国, 路明, 孙传波, 刘艳芝. DB22/T 2621-

- 2017 玉米耐盐碱性鉴定技术规程. 长春: 吉林省质量技术监督局, 2017
- Li X H, Zhang C X, Jin F X, Sun W, Li S F, Li W J, Liu W P, Wang J Y, Guo J, Yuan Y, Liu W G, Lu M, Sun C B, Liu Y Z. DB22/T 2621-2017 Technical specification for identification of salt and alkali tolerance of maize. Changchun: Jilin Provincial Quality and Technical Supervision Bureau, 2017
- [19] 谷思玉, 周连仁, 王佳佳. 不同品种玉米萌发期耐盐性的比较. 中国农学通报, 2011, 27(33): 34-39
- Gu S Y, Zhou L R, Wang J J. Relatives of salt tolerance of different kinds inbred lines of maize in embryoism. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (33): 34-39
- [20] 籍贵苏, 杜瑞恒, 刘国庆, 李素英, 侯升林, 吕芑, 马雪, 张之越, 赵全民. 高粱耐盐性评价方法研究及耐盐碱资源的筛选. 植物遗传资源学报, 2013, 14 (1): 25-30
- Ji G S, Du R H, Liu G Q, Li S Y, Hou S L, Lv P, Ma X, Zhang Z Y, Zhao Q M. Methodology and screen of saline-alkaline tolerance in sorghum accessions. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14 (1): 25-30
- [21] 陈波, 张燕, 蔡光泽, 王安虎, 华劲松, 郑传刚. 玉米地方品种耐盐性鉴定及评价指标筛选. 湖北农业科学, 2012, 51 (21): 4722-4727
- Chen B, Zhang Y, Cai G Z, Wang A H, Hua J S, Zheng C G. Screening of evaluation indices for salt tolerance of maize local varieties. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51 (21): 4722-4727
- [22] 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
- [23] 张海艳, 赵海军. 不同品种玉米萌发期和苗期耐盐性综合评价. 玉米科学, 2016, 24 (5): 61-67
- Zhang H Y, Zhao H J. Comprehensive evaluation of salt tolerance of different corn varieties at the germination and seedling stages. Journal of Maize Sciences, 2016, 24 (5): 61-67
- [24] 于莹, 张树权, 郭永利, 姚玉波, 周菲, 赵东升, 刘继忠, 李文华. 31 份玉米自交系萌发期耐盐碱性综合评价. 东北农业大学学报, 2018, 49 (9): 9-19
- Yu Y, Zhang S Q, Guo Y L, Yao Y B, Zhou F, Zhao D S, Liu J Z, Li W H. Comprehensive evaluation of saline-alkaline tolerance of 31 maize inbred lines at germination stage. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49 (9): 9-19
- [25] 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
- 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
- [26] 刘杰, 张春宵, 李淑芳, 曹铁华, 梁烜赫, 刘学岩, 马永鑫, 郑大浩, 李晓辉. 81 份玉米杂交种萌发期耐冷性的鉴定和评价. 玉米科学, 2020, 28 (5): 20-26, 31
- Liu J, Zhang C X, Li S F, Cao T H, Liang X H, Liu X Y, Ma Y X, Zheng D H, Li X H. Identification and evaluation of eighty-one hybrids for chilling tolerance at maize germination stage. Journal of Maize Sciences, 2020, 28 (5): 20-26, 31
- [27] 王兴荣, 刘章雄, 张彦军, 李玥, 李永生, 苟作旺, 祁旭升, 邱丽娟. 大豆种质资源不同生育时期抗旱性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2021, 22 (6): 1582-1594
- Wang X R, Liu Z X, Zhang Y J, Li Y, Li Y S, Gou Z W, Qi X S, Qiu L J. Evaluation on drought resistance of soybean germplasm resources at multiple growth periods. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22 (6): 1582-1594
- [28] 许洛, 李中建, 王绍新, 王宝宝, 徐立平, 冯健英, 陈莉. 外引青贮玉米自交系的遗传关系分析. 玉米科学, 2023, 31 (4): 15-23
- Xu L, Li Z J, Wang S X, Wang B B, Xu L P, Feng J Y, Chen L. Genetic relationship analysis of inbred lines of silage maize introduced abroad. Journal of Maize Sciences, 2023, 31 (4): 15-23
- [29] 武斌, 李新海, 肖木辑, 谢传晓, 郝转芳, 李明顺, 张世煌. 53 份玉米自交系的苗期耐旱性分析. 中国农业科学, 2007, 40(4): 665-676
- Wu B, Li X H, Xiao M J, Xie C X, Hao C F, Li M S, Zhang S H. Genetic variation in fifty-three maize inbred lines in relation to drought tolerance at seedling stage. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 665-676
- [30] 郝德荣, 程玉静, 徐辰武, 冒宇翔, 彭长俊, 薛林. 玉米耐盐种质筛选及群体遗传结构分析. 植物遗传资源学报, 2013, 14 (6): 1153-1160
- Hao D R, Cheng Y J, Xu C W, Mao Y X, Peng C J, Xue L. Screening of maize germplasm for salt-tolerance and evaluation of population genetic structure. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14 (6): 1153-1160