山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):763-777 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University ( Natural Science Edition ) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.017

# 耐盐玉米自交系筛选体系的构建与应用

尚同文,张笑美,李 渊,田 璐,班 菲,张佳雪,赵雅冉轩,于少伟,赵丫杰,周 超*
山东农业大学生命科学学院,山东 泰安 271018

**摘 要**:本研究使用混合盐体系溶液模拟黄河三角洲地下水组成,采用了浓度为150 mM NaCl与$Na_2SO_4$摩尔比为9∶1的混合盐体系溶液。在玉米苗期,对株高、根长、鲜重、干重以及含水率等指标进行了测定。研究结果显示,盐胁迫对各玉米自交系种质资源样本的生长产生抑制影响,具体表现为抑制株高的增高和根长的增长,同时减少鲜重与干重的积累。而且不同玉米自交系种质资源样本之间的耐盐差异明显。加入了主成分分析和聚类分析方法,将193份玉米自交系种质资源样本划分为抗盐组、耐盐组、敏盐组这三类。其中,耐盐组代表如CIMBL23、CIMBL127等,在盐胁迫下,其株高、根长以及物质积累方面能够保持与对照组相比相对稳健的状态。本研究的结果为耐盐玉米自交系种质资源的筛选工作以及黄河三角洲盐碱地的玉米产业升级与品种改良提供了重要依据,对提高盐碱地玉米种植的产量和品质具有重要意义。

**关键词**:玉米;自交系;苗期;综合耐盐指数;耐盐性
**中图法分类号**:S513.037 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-2324(2026)04-0763-15

# Construction and Application of a Screening System for Salt-Tolerant Maize Inbred Lines

SHANG Tong-wen, ZHANG Xiao-mei, LI Yuan, TIAN Lu, BAN Fei, ZHANG Jia-xue, ZHAO Ya-ran-xuan, YU Shao-wei, ZHAO Ya-jie, ZHOU Chao*
*College of Life Science/Shandong Agricultural University, Taian 271018, China*

**Abstract:** This study simulates the groundwater composition of the Yellow River Delta using a mixed-salt system solution, replicating the "chloride-sulfate type" salinity characteristics of local groundwater. A mixed salt solution with a total concentration of 150 mM and a NaCl-to-$Na_2SO_4$ molar ratio of 9:1 is used. At the maize seedling stage, measurements are taken for plant height, root length, fresh weight, dry weight, and moisture content. These results show that salt stress inhibits the growth of all tested maize inbred germplasm accessions, specifically suppressing increases in plant height and root length, as well as reducing the accumulation of fresh and dry biomass. Meanwhile, distinct differences in salt tolerance are detected among different maize inbred lines. By using principal component analysis (PCA) and cluster analysis, 193 maize inbred germplasm accessions are classified into three groups: salt-resistant, salt-tolerant, and salt-sensitive. Among them, salt-tolerant representatives such as CIMBL23 and CIMBL127 maintain relatively robust plant height, root length and biomass accumulation compared to the control group under salt stress. The findings of this study provide an important scientific basis for screening salt-tolerant maize inbred germplasm resources, and upgrading the maize industry and improving varieties in the saline-alkali soils of the Yellow River Delta, with significant implications for enhancing the yield and quality of maize production in saline-alkali land.

**Keywords:** Maize; inbred lines; seedling stage; comprehensive salt tolerance index; salt tolerance

玉米是重要粮食作物,兼具粮、饲、工业原料等用途。当前面临优良品种少、育繁体系不完善等制约,影响粮食安全[1]。我国盐碱地面积9,913万 $hm^2$,退化耕地66%由盐渍化引起[2]。盐碱土是经过土壤盐化与碱化形成的盐化土和碱化土,导致土壤板结程度较大、土壤结构性差、pH升高和有机质缺乏等现象[3]。山东省盐碱耕地3 863.80 $km^2$,玉米年种植面积超26 666.67 $km^2$,重度盐碱地亩产不足200 kg,较非盐碱地减产超60%[2,4]。黄三角属滨海氯化物盐渍土区,土壤经海水浸渍与蒸发积盐形成矿化度显著的滨海盐渍土,随植被演化为草甸盐土[5,6]。

盐碱地改良以深沟排碱、种稻改碱、淤灌改碱为主[7],盐碱地传统改良措施成本高、成效有

**收稿日期**:2026-03-13 **修回日期**:2026-06-29
**基金项目**:山东省重点研发计划(农业良种工程)(2023LZGC001);山东省自然科学基金面上项目(ZR2023MC107)
**第1作者简介**:尚同文(2000-),男,硕士研究生,研究方向:作物生物育种。E-mail:shangtongwen@126.com
***通讯作者**:Author for correspondence. E-mail:zhouc@sdau.edu.cn

限，因此，区域适应性耐盐种质筛选尤为重要。盐胁迫造成作物离子毒害、渗透胁迫及氧化应激，破坏氧化还原系统，致使活性氧上升，影响生长发育和产量[8,9]。玉米属中度盐敏感作物[10,11]，黄淮海玉米主产区盐渍化加剧，耐盐种质筛选是开发盐碱地的有效途径[12]，对提高玉米耐盐能力、改善玉米品质具有十分重要的意义[13]。

尽管目前的玉米耐盐种质资源筛选已有一定进展，但多数筛选仅限于单一的NaCl或$Na_2SO_4$胁迫[14,15]，并没有适配具有地区特性的协同胁迫，导致耐盐表型在本地的环境条件下稳定性较差[16,17]，对氯离子的转运调控、盐碱胁迫应答通路等关键基因挖掘不足[18-20]。本研究针对黄三角盐碱地地下水的盐分特征[21-23]，选择并配置了150 mM NaCl与$Na_2SO_4$的混合溶液体系，两者摩尔比9∶1，模拟了当地的盐胁迫环境[24-26]。该模拟体系的离子组成与黄三角滨海盐渍土以$Cl^-$、$Na^+$为主[27]，$SO_4^{2-}$次之的盐分特征高度契合，其中$Cl^-$与$Na^+$的占比优势是海水浸渍与蒸发积盐过程的典型体现[28]。本实验对193份玉米自交系苗期14 d的4项表型指标进行了系统性耐盐评估，为耐盐基因挖掘与评价体系完善提供了新的材料与思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本研究种质资源筛选工作所用种质均于2021年12月份在海南省乐东县黄流镇南繁基地完成严格且规范的育繁过程，具体名称见下表：

### 1.2 试验方法

1.2.1 盐溶液体系及配方 基于梯度预实验及东营地下水实测数据，确定NaCl-$Na_2SO_4$摩尔比9∶1、总盐浓度150 mM的混合盐体系，其离子组成与pH（7.43）与当地地下水高度吻合，优于单一盐溶液，为标准化耐盐筛选建立了可重复的可靠条件。盐溶液体系及配方如下：

100 mM $NaHCO_3$溶液：8.4 g/L $NaHCO_3$；

100 mM NaCl溶液：5.844 g/L NaCl；

150 mM $NaHCO_3$溶液：12.6 g/L $NaHCO_3$；

150 mM $Na_2CO_3$溶液：15.9 g/L Na2$CO_3$；

150 mM NaCl溶液：8.766 g/L NaCl；

150 mM $Na_2SO_4$溶液：21.3 g/L $Na_2SO_4$；

100 mM NaCl+$Na_2SO_4$混合盐溶液：5.256 g/L NaCl + 1.42 g/L $Na_2SO_4$；

150 mM NaCl+$Na_2SO_4$混合盐溶液：7.889 g/L NaCl + 2.13 g/L $Na_2SO_4$；

200 mM NaCl+$Na_2SO_4$混合盐溶液：10.519 g/L NaCl + 2.84 g/L $Na_2SO_4$；

250 mM NaCl+$Na_2SO_4$混合盐溶液：13.149 g/L NaCl + 3.55 g/L $Na_2SO_4$。

1.2.2 苗期培养方法及表型性状测量方法 采用10×10×12 cm塑料钵装填蛭石，对照组浇去离子水、处理组浇150 mM混合盐溶液，萌发3 d幼苗胚根向下移栽（4粒/钵），置入人工气候室（27.3 ℃、湿度54.5%、光照≥12 500 lux、16 h/8 h光暗），每5 d补浇对应溶液，持续14 d。

1.2.3 表型指标的测量与计算（植株培养至14 d时测定） 表型测量设置≥10次重复、随机≥5株取均值，株高测茎基至顶叶，根长测主胚根，鲜重称取洗净拭干整株，干重经120 ℃杀青10 min、80 ℃烘干至恒重，含水率=（鲜重−干重）/鲜重×100%。

### 1.3 数据处理与计算

1.3.1 隶属函数值 隶属函数将株高、鲜重、干重等多维指标整合归一，克服单一指标局限，从多维度精准刻画盐胁迫下种质的综合耐盐水平。其计算公式如下：

$$U(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})(i=1,2,3,\cdots,n)$$

隶属度$U(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$（$i=1,2,3,\cdots,n$），将实测值$X_i$转化为0-1之间的数值，反映该指标在自交系中的相对表现，便于多指标综合评估。

1.3.2 权重 在本研究关于各种质资源耐盐性的综合评价体系中，权重计算的概念与公式如下：

$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{n}P_i(i=1,2.3,\cdots,n)$$

其中$P_i$为第$i$个公因子与耐盐系数的相关系数，据此对各表型指标合理加权，实现更全面精准的耐盐性综合评价。

1.3.3 综合耐盐指数（$D$值） 将上述计算得到的各隶属函数值和相应权重进行整合，其计算公式为：

$$D=\sum_{i=1}^{n}[U(X_i)\times W_i](i=1,2,\cdots,n)$$

整合各指标隶属度与权重，多维精准评估种质耐盐水平。

| 玉米种质材料 Maize germplasm materials | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| CML480 | CML422 | CML130 | CML304 | B110 | CIMBL156 |
| CIMBL81 | SY3073 | YE515 | S1446 | GEMS32 | 7884-4HT |
| CIMBL60 | CML170 | CIMBL86 | ZHI41 | ZH68 | H7H-17 |
| WH413 | TY1 | J4112 | GEMS44 | LIAO05263 | BY809 |
| ZHENG35 | WU109 | GEMS3 | L061F | LA25 | MA244 |
| MA263 | MA228 | MA249 | LA30 | LA31 | MA40 |
| MA44 | LA22 | LA44 | RY729 | 18-599 | CML69 |
| L3180 | CIMBL89 | GEMS59 | ES-40 | GY1007 | CIMBL45 |
| YE8001 | GEMS36 | MA120 | P167 | MA83 | MA65 |
| CIMBL5 | CIMBL6 | CIMBL7 | CIMBL13 | CIMBL15 | CIMBL19 |
| CIMBL43 | CIMBL51 | CIMBL52 | CIMBL56 | CIMBL59 | CIMBL62 |
| CIMBL91 | CIMBL93 | CIMBL99 | CIMBL105 | CIMBL116 | CIMBL120 |
| CIMBL152 | SY1052 | GY798 | LG001 | CML115 | CML139 |
| ZHENG28 | 5213 | BY4960 | GEMS4 | TY4 | B151 |
| K10 | DAN360 | YE52106 | B73 | MO17 | QI319 |
| K12 | 11047 | XUN971 | 07KS4 | CIMBL66 | B113 |
| EN25 | | | | | |
| SW92E114 | CML454 | 7381 | YE478 | CIMBL46 | CIMBL10 |
| M97 | B11 | 1462 | CIMBL2 | CML324 | CIMBL18 |
| BS16 | CIMBL53 | LIAO0138 | BZN | MO113 | GEMS18 |
| GEMS63 | LV28 | ZHENG32 | CML172 | TY5 | GEMS29 |
| MS71 | MA277 | LA49 | LA26 | LA48 | LA37 |
| LA32 | MA37 | LA23 | MA248 | MA27 | LA17 |
| TY6 | TIF7922 | BY4839 | CIMBL25 | GEMS55 | SY1032 |
| CML114 | GEMS33 | SHEN5003 | GEMS10 | ZHENG30 | GEMS39 |
| N68a | 6f202 | Su75 | P138 | MA74 | MA77 |
| CIMBL22 | CIMBL23 | CIMBL28 | CIMBL29 | CIMBL32 | CIMBL42 |
| CIMBL69 | CIMBL70 | CIMBL75 | CIMBL79 | CIMBL82 | CIMBL87 |
| CIMBL122 | CIMBL127 | CIMBL129 | CIMBL139 | CIMBL144 | CIMBL147 |
| CML325 | CML479 | CML493 | CML496 | LIAO05114 | ZAC546 |
| Chang7-2 | CIMBL140 | B104 | Zong31 | Zheng58 | 黄早四 |
| BY804 | 11022 | LX9801 | RP125 | Zheng29 | TY2 |
| 80007 | B114 | PHT55 | CIMBL55 | CIMBL40 | CIMBL77 |

1.3.4 *数据统计分析*　数据经Excel整理后，用SPSS 27计算均值、标准差等统计量，再以R语言ward.D2算法对综合耐盐指数D值进行聚类分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　黄三角盐碱地模拟及混合盐体系溶液的科学性验证

依据黄三角盐碱地氯化物-硫酸盐型水土特征，配制150 mM、NaCl-$Na_2SO_4$摩尔比9∶1的混合盐溶液作为玉米耐盐评价的标准化胁迫体系（表1）。

### 2.2　玉米种质资源苗期耐盐性鉴定

盐胁迫显著抑制玉米幼苗生长，处理组出现矮化、黄化等表型，且种质间耐盐响应差异显著（图1-2）。

表型差异可直观反映种质耐盐能力，简化筛选流程，为耐盐鉴定与品种选育提供支撑（图3）。

各种质资源苗期的表型统计结果如表2所示：

盐胁迫显著抑制株高与根系生长，相关性分析（图4）显示，正常条件下干物质积累与水分、株高协同，含水率与干物质分配呈微弱负相关。盐胁迫未破坏地上部生长与生物量积累的协同关系，但显著强化根长与鲜重的相关性，表明玉米通过根系伸长缓解盐胁迫损伤，与已有研究一致，是作物应对滨海盐碱环境的重要适应策略。[29-31]

对照组叶片黄化为正常衰老过程[32]，属养分转运与微环境波动的可控误差，不影响耐盐鉴定结果（图5）。

盐处理组叶片大面积黄化、卷曲、萎蔫，是渗透胁迫与离子毒害破坏光合系统的典型表现[33]，证明了耐盐鉴定结果的可靠性。

表 1 不同溶液的理化性质
Table 1 Physicochemical properties of different solutions

| 溶液类型 Solution type | 温度/℃ Temperature | 电导率/（ms/cm） Conductivity | 电阻率/（Ω*cm） Resistivity | 溶解性总固体/（g/L） Total dissolved solids | 盐度/% Salinity | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 东营地下水A Dongying Groundwater A | 25 ℃ | 47.61 | 21.2 | 23.53 | 2.85 | 7.03 |
| 东营地下水B Dongying Groundwater B | 25 ℃ | 48.42 | 20.6 | 24.22 | 2.98 | 6.98 |
| 地下水稀释至2倍体积 Groundwater diluted to twice the initial volume | 25 ℃ | 27.44 | 36.5 | 13.69 | 1.62 | 7.28 |
| 地下水稀释至3倍体积 Groundwater diluted to Three the initial volume | 25 ℃ | 19.01 | 53.3 | 9.38 | 1.08 | 7.52 |
| 地下水稀释至4倍体积 Groundwater diluted to Four the initial volume | 25 ℃ | 14.89 | 70.5 | 7.26 | 0.82 | 7.35 |
| 地下水稀释至5倍体积 Groundwater diluted to Five the initial volume | 25 ℃ | 12.65 | 83.4 | 6.09 | 0.68 | 7.24 |
| 100 mM NaCl | 25 ℃ | 9.82 | 105.4 | 4.99 | 0.55 | 7.02 |
| 100 mM $Na_2SO_4$ | 25 ℃ | 14.4 | 69.4 | 7.19 | 0.82 | 6.99 |
| 150 mM NaCl | 25℃ | 14.69 | 68.1 | 7.34 | 0.81 | 6.98 |
| 150 mM $Na_2SO_4$ | 25℃ | 21.6 | 46.4 | 10.79 | 1.23 | 6.99 |
| 150 mMol NaCl+$Na_2SO_4$ 摩尔比=9∶1 | 25℃ | 16.78 | 64.7 | 7.83 | 0.87 | 7.43 |

CIMBL23 与 CIMBL127 耐盐性突出，生长指标与对照无显著差异（图 6-7）；CIMBL28、CIMBL59 等高度敏感，耐盐调控能力较弱（图8）。

CIMBL28 与 CIMBL59 因抗氧化防御弱、适应性差而高度盐敏感，各生长指标均显著受到抑制（图9-10）。

### 2.3 各种质资源苗期表型指标主成分、综合耐盐指数（*D* 值）的计算

相对鲜重与干重反映盐胁迫下生物量积累与抗逆能力，经隶属函数标准化后，通过主成分降维提取耐盐关键因子，按贡献率权重计算综合耐盐指数 D 值，实现种质耐盐性的精准量化（表3）。

### 2.4 各种质资源苗期表型指标的聚类分析

综合耐盐指数量化排序 193 份种质，结合苗期表型聚类分析（图 11-12）将其划分为 3 个耐盐类群，实现规模化分类筛选。

经综合耐盐鉴定，共筛选出 30 份优异抗盐玉米种质（表 4、图 13），验证了前期表型分析结论，丰富了耐盐种质资源，为后续耐盐机理研究与品种选育提供核心材料保障。

敏盐组占绝对主导，抗盐与耐盐组占比偏低；抗盐种质调控机制优异，耐盐种质抗逆性中等，敏盐种质耐盐机制缺陷明显。

### 2.5 关于 100 份不同种质资源材料苗期耐盐性与全生育期生产力关联性分析

基于 SNP 构建中心化 IBS 亲缘矩阵，校正小样本群体结构、提升预测精度，该方法无需系谱，可精准反映种质遗传差异，分析结果稳定可靠（图 14）。

RR-BLUP 模型对 8 个苗期性状的预测精度均呈单峰分布，峰值位置各异。RLS 精度最高（均值 0.584 3），唯一超过 0.5 且呈窄峰，其余性状居中，处理组鲜重最差且离散。对照组鲜重与株高精度次高（均值 0.415 7、0.413 1），处理组鲜重精度最低且离散；各性状差异反映遗传力与遗传结构复杂度不同（图 15）。

RLS 精度最高且最稳定（四分位距 0.06，无异常值），处理组鲜重稳定性最差，存在异常值。根长性状处理组优于对照组，株高与鲜重反之，表明盐胁迫对根系性状遗传可预测性更强（图16）。




**图 1 193 份不同种质资源对照组及处理组株高与根长性状的比较**

**Fig. 1 Comparison of plant height and root length between control and treatment groups of 193 germplasm resources**

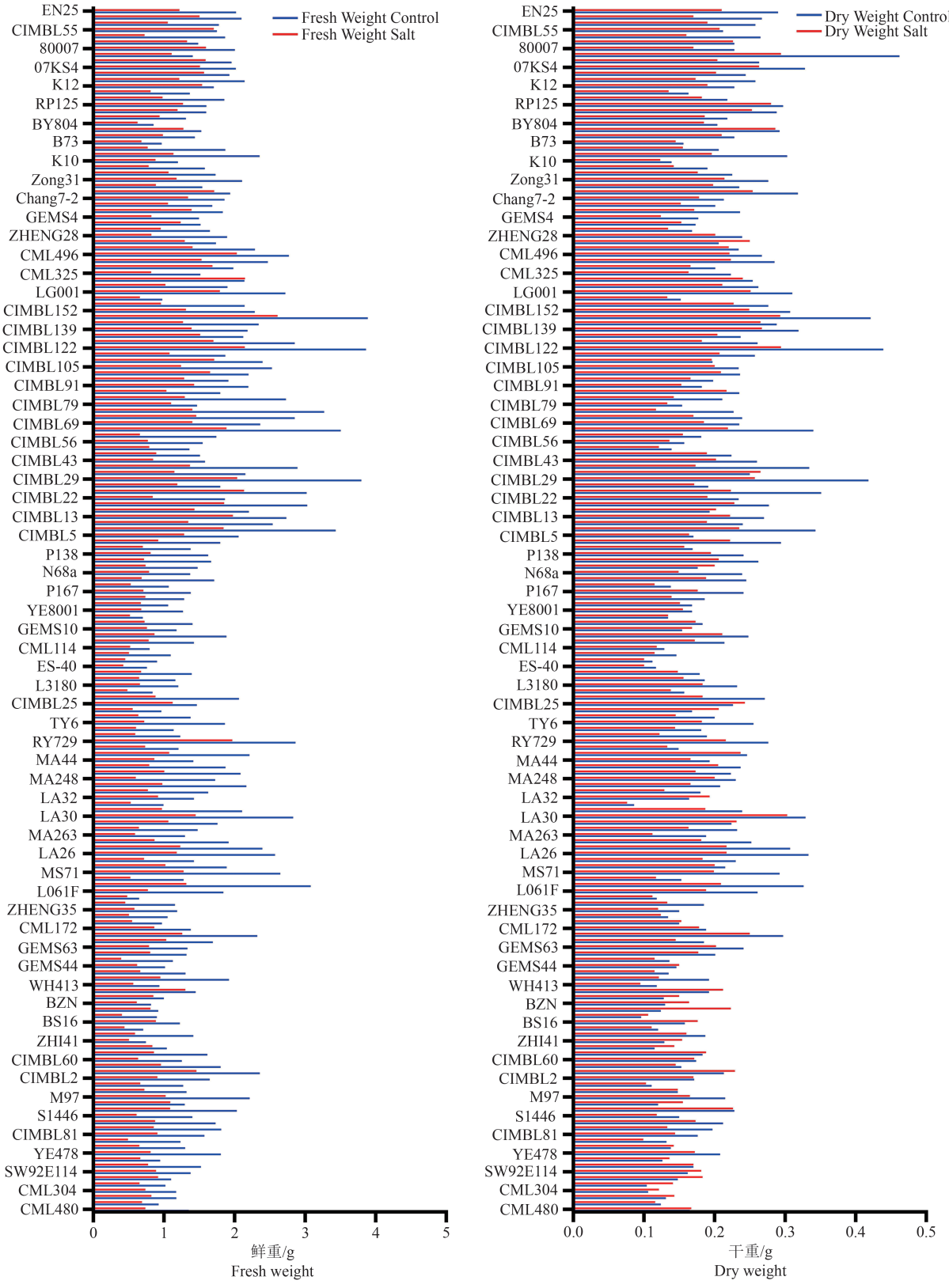



**图 2 193 份不同种质资源对照组及处理组鲜重与干重性状的比较**

**Fig. 2 Comparison of fresh and dry weight between control and treated groups of 193 germplasm resources**




**图3 正常生长及盐处理14 d后玉米幼苗表型（Bar=2 cm）**

**Fig. 3 Phenotypes of maize seedlings under control and salt treatment after 14 days (Bar=2 cm)**

**表2 不同处理下玉米自交系耐盐指标统计分析**

**Table 2 Statistical analysis of salt-tolerance indexes of maize inbred lines under different treatments**

| 处理 Treatment | 耐盐指标 Salt-tolerance index | 最小值 Minimum | 最大值 Maximum | 均值 Average | 标准偏差 Standard deviation | 方差 Variance | 变异系数/% Coefficient of variation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 对照 Control | 单株株高/cm | 12.250 | 44.630 | 25.180 | 6.417 | 41.181 | 25.49 |
| | 单株根长/cm | 10.653 | 40.070 | 22.433 | 5.269 | 27.761 | 23.49 |
| | 单株鲜重/g | 0.648 | 3.888 | 1.727 | 0.635 | 0.404 | 36.78 |
| | 单株干重/g | 0.086 | 0.462 | 0.213 | 0.067 | 0.004 | 31.44 |
| | 含水率/% | 67.171 | 93.056 | 87.159 | 0.030 | 0.001 | 3.47 |
| 150 mM NaCl+$Na_2SO_4$ 摩尔比=9∶1 | 单株株高/cm | 3.250 | 23.520 | 11.562 | 4.806 | 23.102 | 41.57 |
| | 单株根长/cm | 1.024 | 27.990 | 11.555 | 4.966 | 24.662 | 42.98 |
| | 单株鲜重/g | 0.395 | 2.609 | 1.010 | 0.418 | 0.175 | 41.36 |
| | 单株干重/g | 0.076 | 0.303 | 0.178 | 0.045 | 0.002 | 25.35 |
| | 含水率/% | 62.982 | 91.649 | 80.783 | 0.052 | 0.003 | 6.47 |

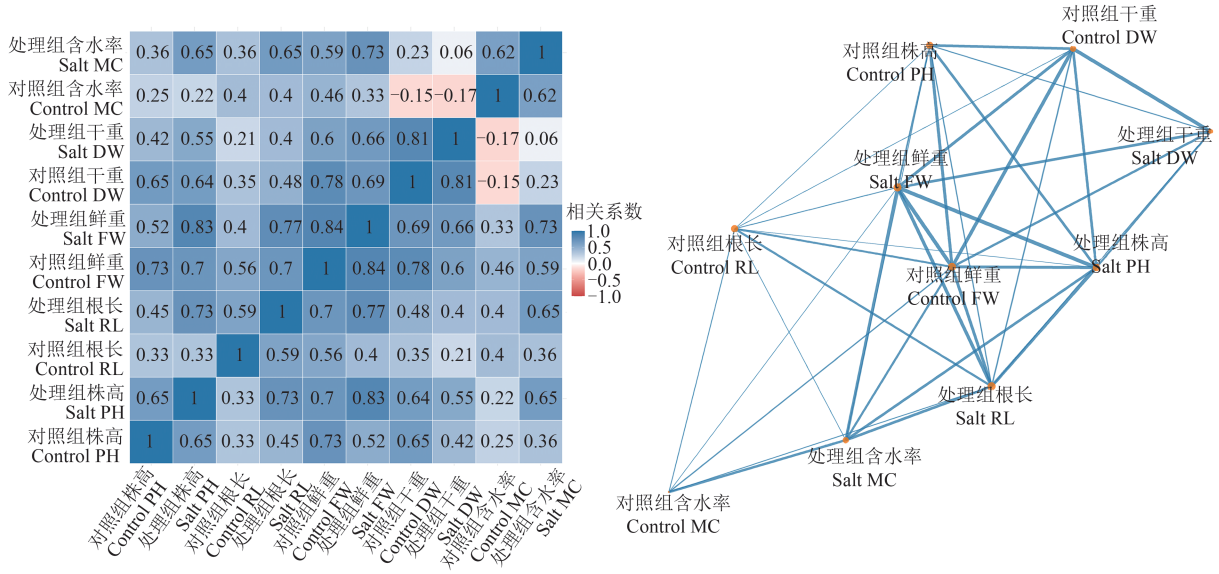
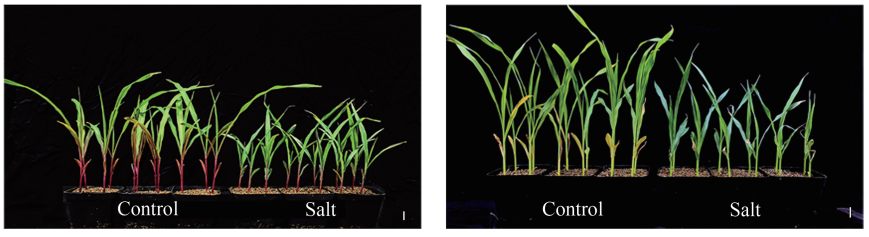



**图 4 株高、根长、鲜重、干重及含水率的相关性统计**

**Fig. 4 Correlation statistics of plant height, root length, fresh weight, dry weight and moisture content**

注：右图红色表示为负相关，蓝色为正相关，节点越大表示关联数越多。

Note: Red indicates negative correlation and blue indicates positive correlation in the right graph. Larger nodes represent more correlations.




CIMBL23 CIMBL127

**图 5 CIMBL23、CIMBL127 正常生长及盐处理 14 d 后玉米幼苗表型（Bar=2 cm）**

**Fig. 5 Phenotypes of CIMBL23 and CIMBL127 under control and salt treatments after 14 d (Bar=2 cm)**

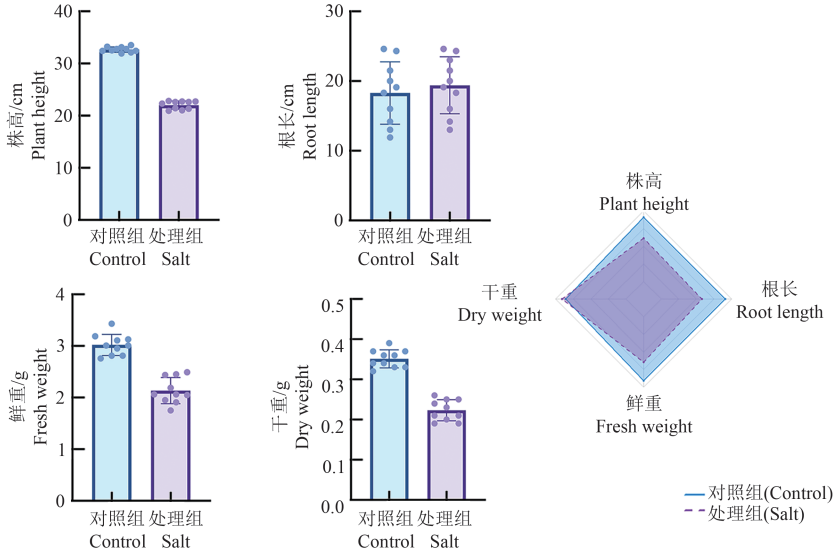



**图 6 CIMBL23 正常生长及盐处理 14 d 后表型数据统计**

**Fig. 6 Statistical analysis of seedling phenotypes of CIMBL23 under control and salt treatments after 14 d**

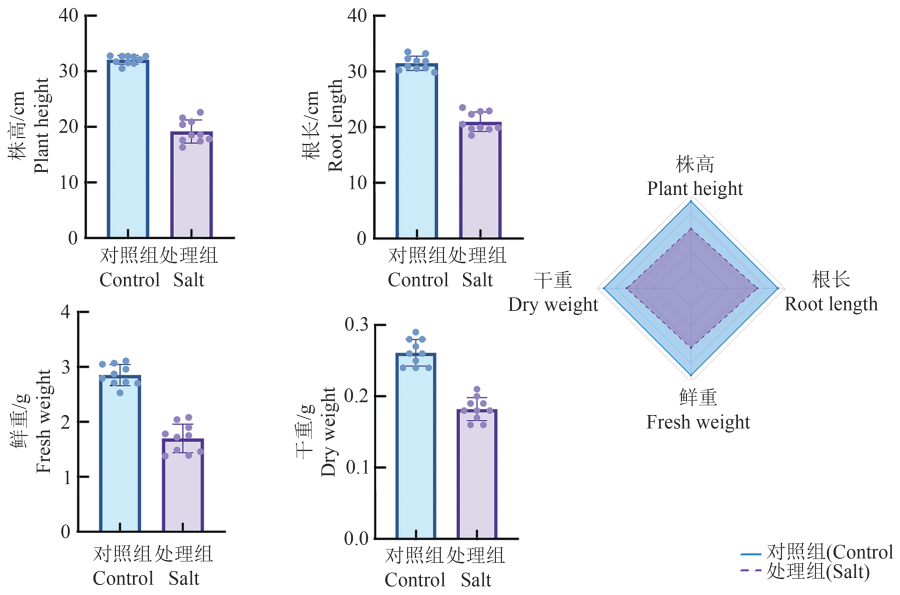



**图 7 CIMBL127 正常生长及盐处理 14 d 后表型数据统计**

**Fig. 7 Statistical analysis of seedling phenotypes of CIMBL127 under control and salt treatments after 14 d**




**图 8 CIMBL28、CIMBL59 正常生长及盐处理 14 d 后玉米幼苗表型(Bar=2 cm)**

**Fig. 8 Phenotypes of CIMBL28 and CIMBL59 under control and salt treatments after 14 d (Bar=2 cm)**

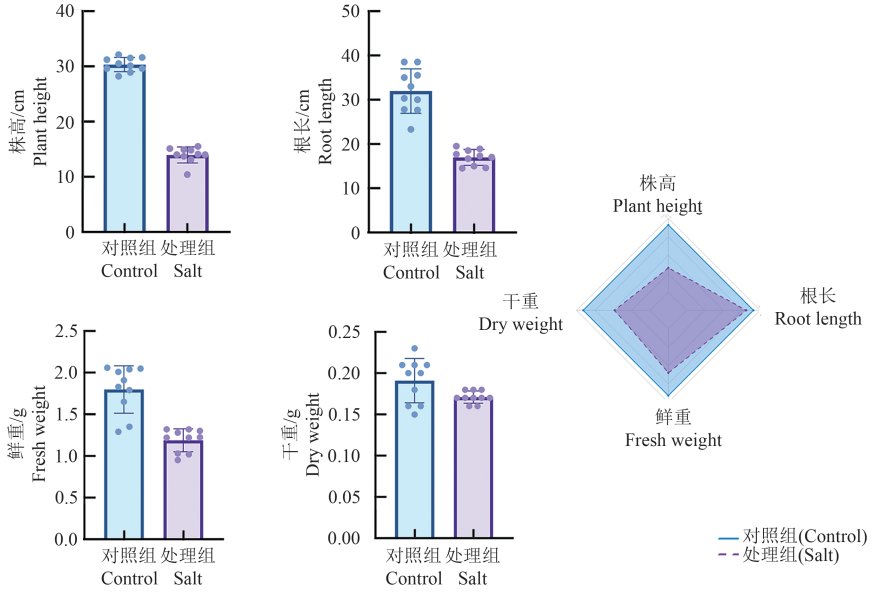



**图 9 CIMBL28 正常生长及盐处理 14 d 后表型数据统计**

**Fig. 9 Statistical analysis of seedling phenotypes of CIMBL28 under control and salt treatments after 14 d**

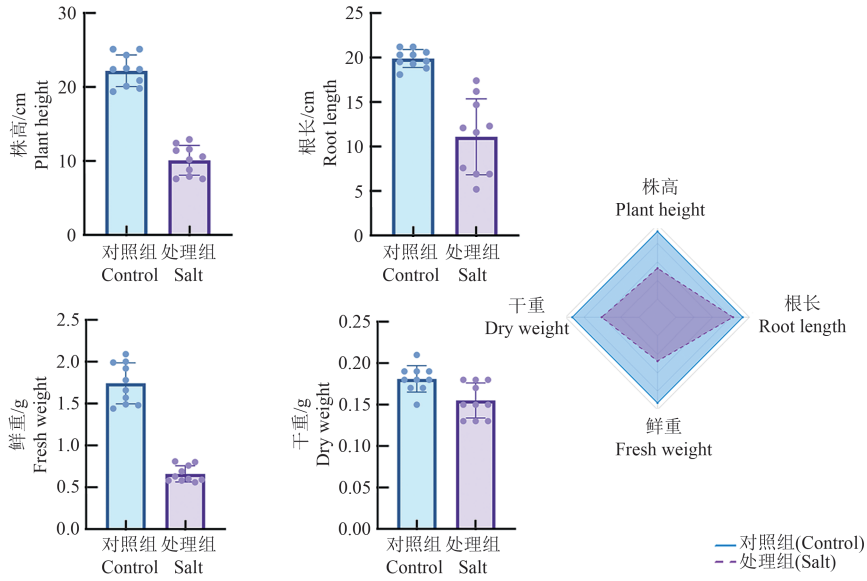



**图 10 CIMBL59 正常生长及盐处理 14 d 后表型数据统计**

**Fig. 10 Statistical analysis of seedling phenotypes of CIMBL59 under control and salt treatments after 14 d**

**表 3 各指标主成分的特征向量及贡献率**

**Table 3 Eigenvectors and contribution rates of principal components of each index**

| 耐盐指标 Salt-tolerance index | 主成分 Principal component | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 相对株高 Relative plant height | 0.325 | 0.037 | 0.033 |
| 相对根长 Relative root length | 0.284 | −0.109 | 1.136 |
| 相对鲜重 Relative fresh weight | 0.280 | 0.401 | −0.436 |
| 相对干重 Relative dry weight | −0.035 | 0.706 | 0.217 |
| 相对含水率 Relative moisture content | −0.313 | −0.220 | −0.653 |
| 特征值 Eigenvalue | 2.748 | 1.387 | 0.512 |
| 贡献率/% Contribution rate | 54.959 | 82.707 | 92.940 |

RR-BLUP 迭代过程平稳微幅波动，模型适配度高，RLS 最稳定（变异系数 2.1%），处理组鲜重波动相对最大但仅 4.5%，无漂移（图 17）。

整体而言，迭代过程中预测精度变化平稳，未出现明显收敛或发散现象，表明模型具有较好的稳定性与可靠性。各次预测结果波动幅度小，趋势一致，反映模型在当前数据条件下适配性与稳健性良好。中心化 IBS 亲缘关系矩阵有效校正群体结构、降低群体分化干扰，提升了 RR-BLUP 参数估计的准确性与稳定性。

RR-BLUP 全基因组预测显示盐胁迫下根长遗传可预测性最强（精度 0.5843，变异系数 2.1%），亲缘关系矩阵有效校正群体偏差，交叉验证结果可靠（图 18）。

散点图（图 19）显示，迭代次数与预测精度无线性相关（$R^2$<0.01，回归系数近 0），10 折散点均匀分布、无聚类，折次划分未引入系统偏差。随机分布特征表明，100 次迭代与 10 折交叉验证有效降低随机误差，结果高度可靠。

## 3　讨论

本研究以 150 mM、NaCl-$Na_2SO_4$摩尔比 9∶1 混合盐体系精准模拟黄三角盐胁迫，结合主成分与聚类分析，构建了区域适宜的玉米自交系耐盐性鉴定评价体系。

### 3.1　混合盐溶液的科学性验证

150 mM、NaCl-$Na_2SO_4$摩尔比 9∶1 的混合盐体系在理化指标、离子组成及盐分类型上与黄三角地下水高度一致，精准模拟了田间盐胁迫场景。混合盐体系比单一盐溶液更贴近田间复合胁迫条件，为区域适应性耐盐鉴定提供了更科学可靠的基础。

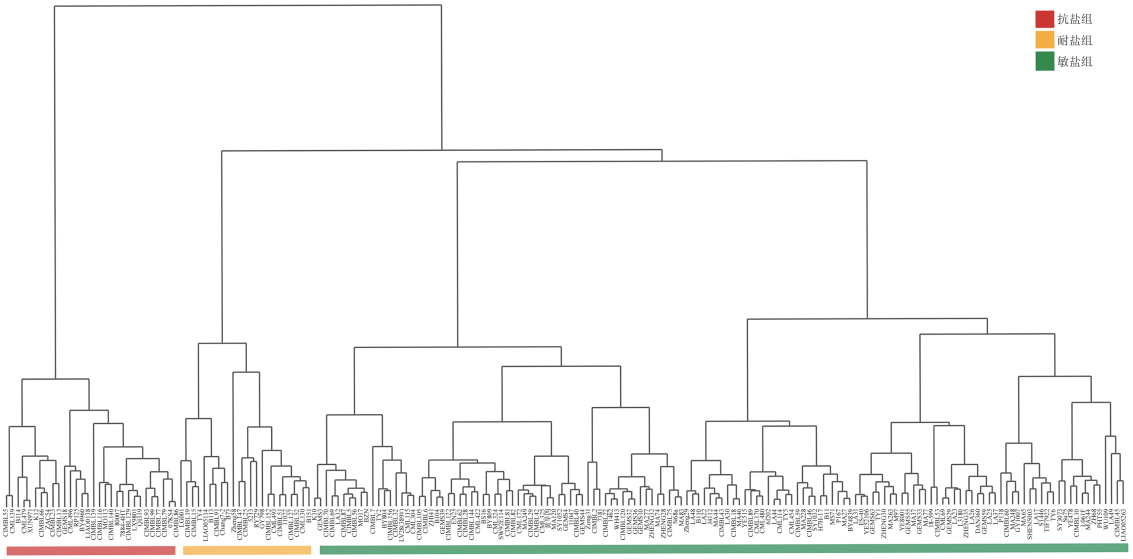



图 11 193 份种质资源苗期耐盐能力聚类图

**Fig. 11 Cluster analysis of salt tolerance at the seedling stage for 193 maize germplasm accessions**

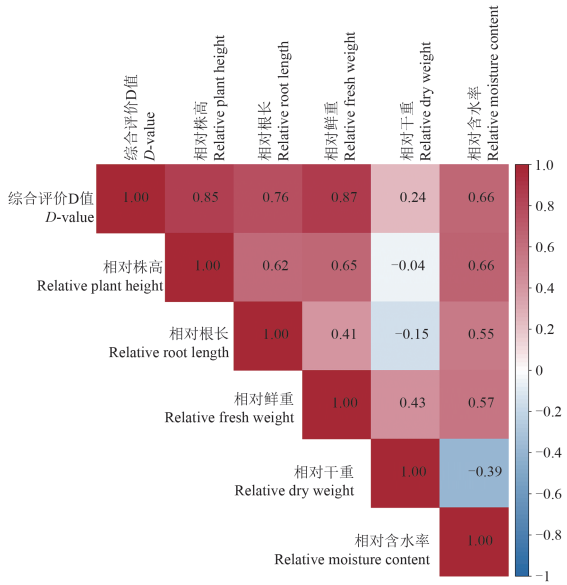



图 12 193 份种质资源苗期耐盐能力相对值相关性分析

**Fig. 12 Correlation analysis of relative values of salt tolerance at seedling stage for 193 germplasm resources**

### 3.2　玉米自交系耐盐性表现及评价指标

盐胁迫显著抑制玉米幼苗生长与物质积累，处理组各表型指标均明显低于对照组。主成分分析表明，株高、根长等为耐盐评价核心变量，前两个主成分包含鲜重、株高与干重信息，累计贡献率 82.707%。也充分表明了上述指标能够清晰地区分不同玉米自交系种质资源耐盐性。193 份种质经聚类分为抗盐组（30 份，15.54%）、耐盐组（23 份，11.91%）和敏盐组（140 份，72.53%），为耐盐种质快速筛选与定向育种提供了依据。

### 3.3　耐盐性评价体系的科学性与可靠性

本研究构建了科学的玉米自交系种质资源的耐盐性评价体系，将多维度数据和隶属函数值进行整合，系统评价了玉米自交系种质资源的整体抗逆水平。通过主成分降维处理的方式，再结合聚类分析划分类群，结果充分证明了该分类体系既具备科学严谨性，又具有实践上的可操作性。

表 4 193 份玉米自交系耐盐性分析

**Table 4 Analysis of salt tolerance in 193 maize inbred lines**

| 耐盐类型 Salt-tolerance type | 数量 Number | *D* 值 *D*-value | 均值 Average | 占比/% Proportion |
|---|---|---|---|---|
| 抗盐组 Highly salt tolerance type | 30 | 0.542 0-0.799 5 | 0.610 7 | 0.155 4 |
| 耐盐组 Moderately salt tolerance type | 23 | 0.469 1-0.540 7 | 0.496 9 | 0.119 1 |
| 敏盐组 Salt sensitive type | 140 | 0.155 9-0.461 1 | 0.344 6 | 0.725 3 |

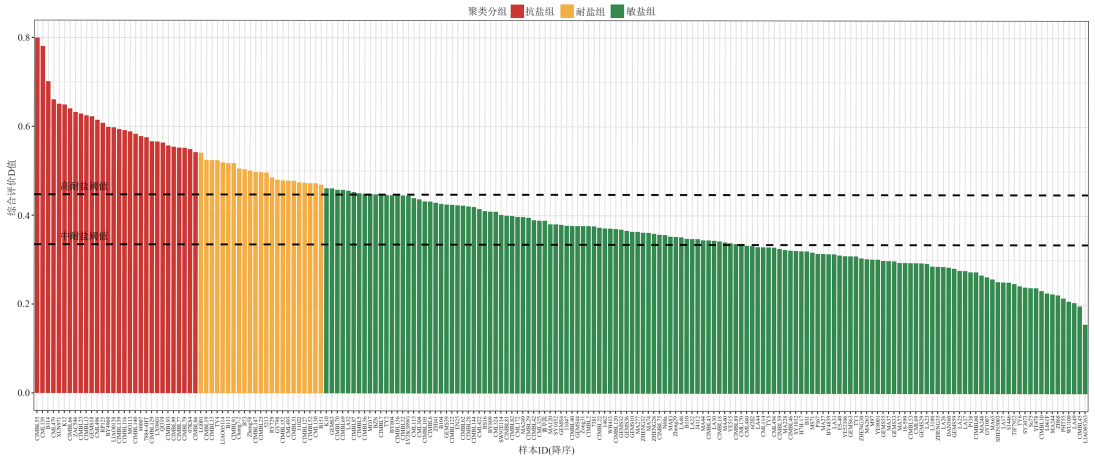



图 13 193 份种质资源耐盐性综合评价 *D* 值图

**Fig. 13 *D*-value for comprehensive salt tolerance evaluation of 193 germplasm resources**

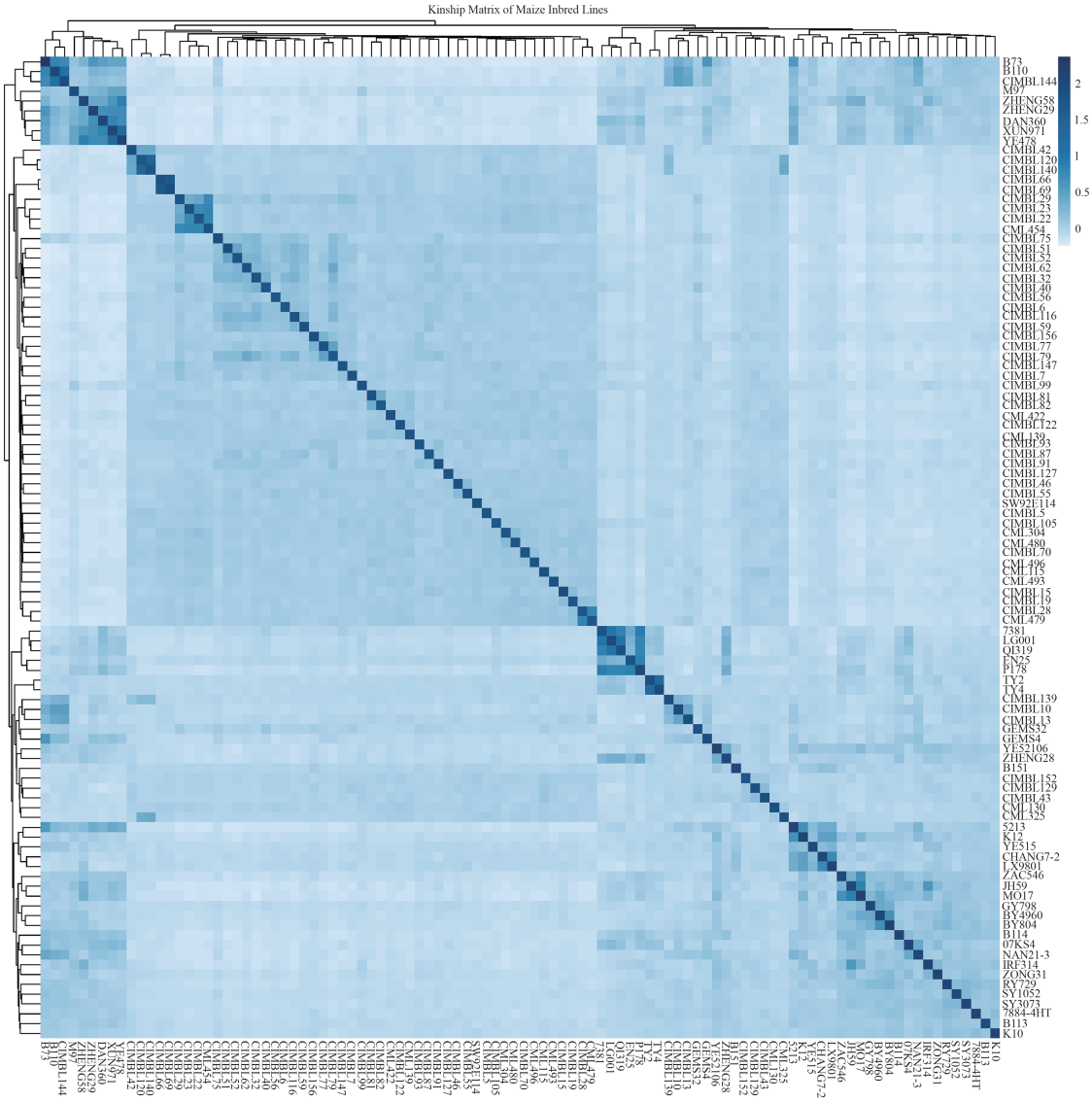



图 14 100 份不同种质资源亲缘关系矩阵

**Fig. 14 Kinship matrix of 100 different germplasm resources**

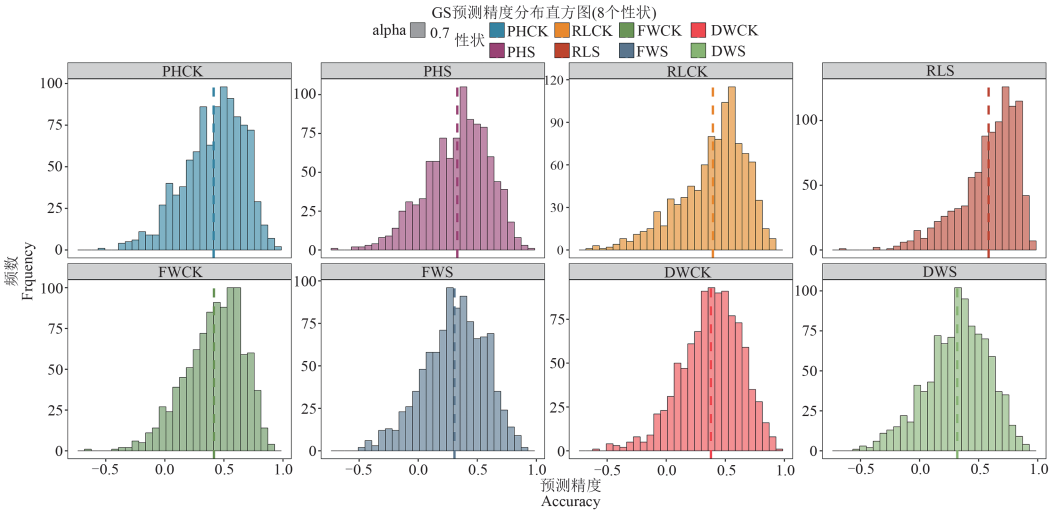



图 15 100 份不同种质资源基于 RR-BLUP 模型下预测精度分布直方图

**Fig. 15 Histogram of prediction accuracy distribution of 100 germplasm resources based on RR-BLUP model**

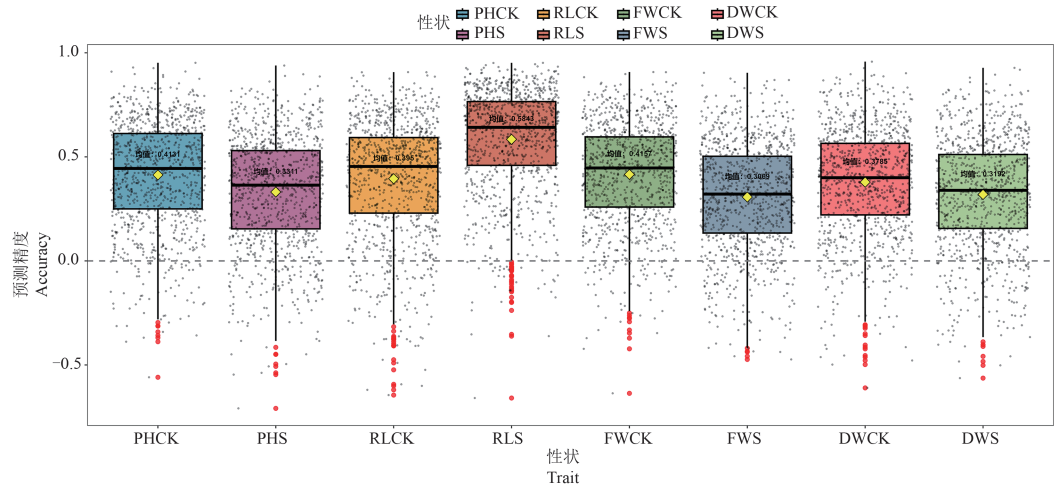



图 16 100 份不同种质资源基于 RR-BLUP 模型下预测精度对比箱线图

**Fig. 16 Box-and-whisker plot for comparing prediction accuracies of 100 germplasm resources based on RR-BLUP model**

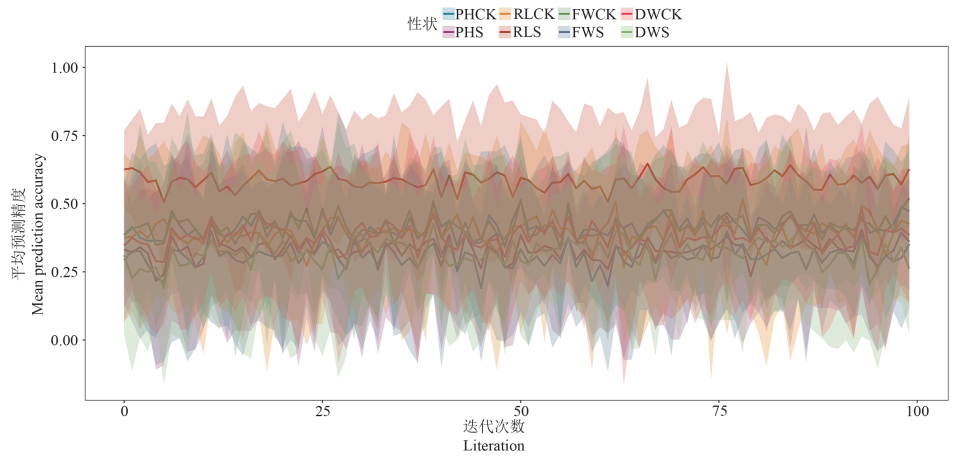



图 17 100 份不同种质资源基于 RR-BLUP 模型下迭代次数对全基因组选择预测精度的影响趋势

**Fig. 17 Trend of the effect of iteration number on genomic selection prediction accuracy in 100 germplasm accessions based on RR-BLUP model**

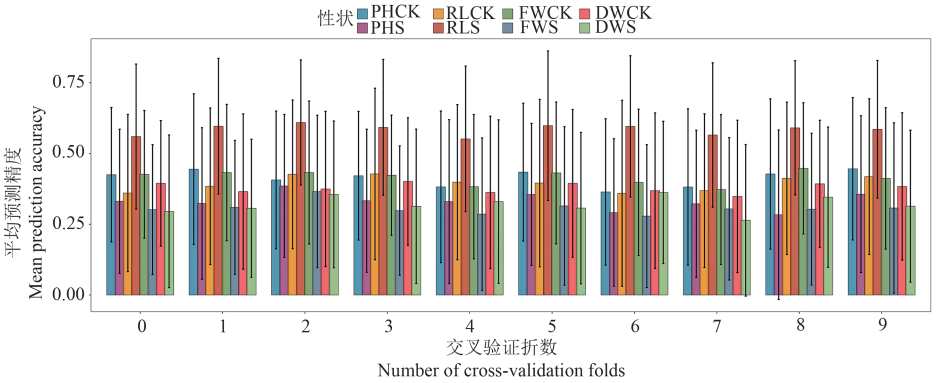



**图 18 100 份不同种质资源基于 RR-BLUP 模型下 10 折交叉验证各折平均精度对比**

**Fig. 18 Comparison of mean prediction accuracy across folds under 10-fold cross-validation in 100 germplasm accessions based on RR-BLUP model**

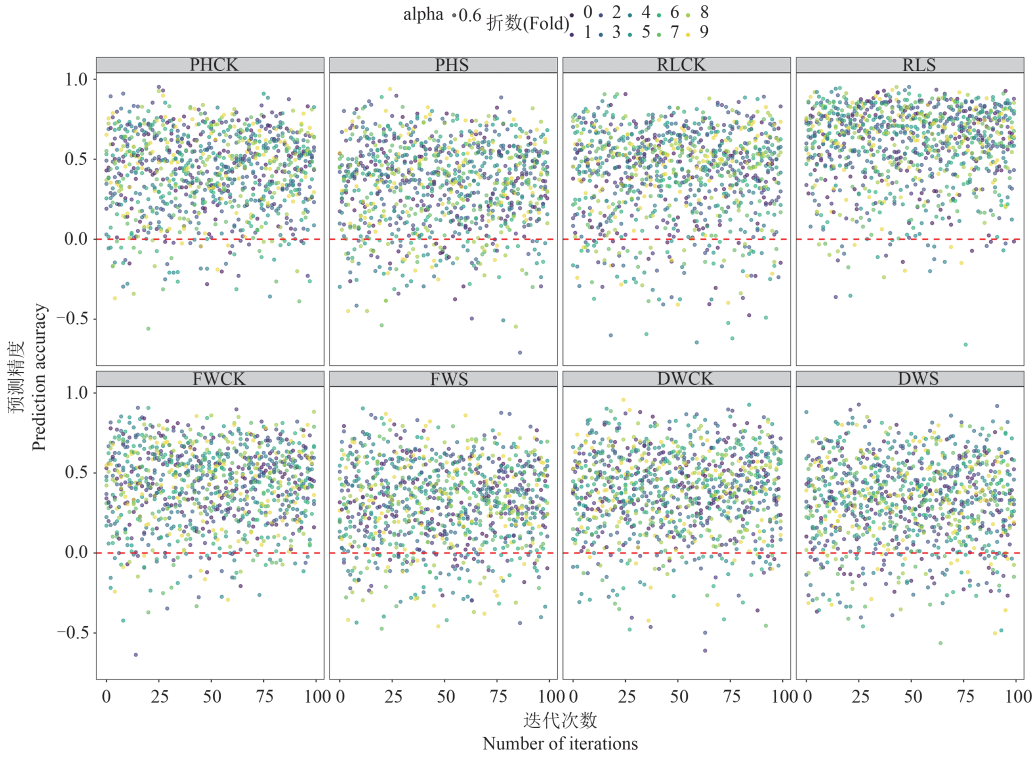



**图 19 100 份不同种质资源基于 RR-BLUP 模型下迭代次数与预测精度散点图**

**Fig. 19 Scatter plot of iteration number and prediction accuracy for 100 diverse germplasms based on RR-BLUP model**

### 3.4 本研究的应用前景

筛选的耐盐种质为黄三角盐碱地规模化种植与综合治理提供了可直接应用的亲本材料与理论依据。CIMBL23、CIMBL127 等耐盐自交系在盐胁迫下根系活力强、生物量积累快，可直接作为骨干亲本加速黄三角及同类盐碱区高产抗逆玉米品种选育。建立的盐胁迫模拟体系与多维评价方法，为小麦、高粱等作物的耐盐机制解析与抗逆种质创新提供了可借鉴的技术路线。

## 4 结论

本研究以黄河三角洲滨海盐碱地氯化物-硫酸盐组成为依据，成功构建了适配该区域地域特性的 150 mM NaCl 与 $Na_2SO_4$ 摩尔比 9∶1 混合盐胁迫玉米苗期耐盐性筛选体系，并基于该体系制定发布了相关团体标准，实现了区域特色耐盐玉米种质筛选的标准化与规范化[34]。

从 193 份种质中精准筛选出 CIMBL23、CIMBL127（强耐盐，各指标稳定）与 CIMBL28、

CIMBL59（盐敏感，生长严重受抑）共4份极端材料。本研究构建的区域适配性筛选体系、制定的团体标准，以及筛选获得的优异耐盐与敏盐种质材料，为黄河三角洲盐碱地耐盐玉米新品种选育提供了科学的技术方法与优异的种质资源，有力支撑区域盐碱地玉米产业的提质升级[35]。

## 参考文献


[1] 李建芬. 玉米生产制约因素分析及对策[J]. 种子世界,2010(01): 10.

[2] 杨赵昱,刘吉利,吕 雯,等. 盐胁迫对不同品种玉米苗期生长生理的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(19):127-133.

[3] 董晓兵,刘 辉,王永辉,等. 羊草改良黄三角盐碱地的效果评价[J]. 草原与草业,2025,37(02):9-13.

[4] 董红云,朱振林,李新华,等. 山东省盐碱地分布、改良利用现状与治理成效潜力分析[J]. 山东农业科学,2017,49(05):134-139.

[5] 范晓梅,刘高焕,唐志鹏,等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报,2010,24(01):139-144.

[6] 姚荣江,杨劲松,刘广明. EM3在黄河三角洲地区土壤盐渍化快速检测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究,2008(01):67-73.

[7] 张凌云. 黄河三角洲地区盐碱地主要改良措施分析[J]. 安徽农业科学,2007(17): 5266+5309.

[8] 姜佩弦,张 凯,王艺桥,等. 玉米耐盐分子机制研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2022,23(01):49-60.

[9] 杜希龙. 玉米响应盐胁迫的比较转录组学分析与植物耐盐机制研究[D]. 天津:天津大学, 2017.

[10] 孙 浩,张保望,李宗新,等. 夏玉米品种盐碱胁迫耐受能力评价[J]. 玉米科学,2016,24(01):81-87.

[11] 李 亮,高明波,于清涛. 耐盐玉米自交系的鉴定[J]. 黑龙江农业科学,2017(02):14-17.

[12] 郝德荣,程玉静,冒宇翔,等. 玉米种质耐盐性鉴定体系筛选和耐盐性评价[J]. 金陵科技学院学报, 2014, 30(03):53-57.

[13] 郭玉敏,张云华,井 涛,等. 过表达玉米转录因子ZmWRKY101基因提高拟南芥植株的耐盐力[J]. 植物生理学报,2020,56(09):1921-1932.

[14] 刘俊宇,张春宵,孙 博,等. 基于脯氨酸相关指标动态监测玉米苗期盐碱胁迫伤害[J]. 玉米科学,2024,32(07):55-64.

[15] 孙 博,张春宵,刘俊宇,等. 基于Na+、K+相关指标动态监测玉米苗期盐碱胁迫伤害[J]. 玉米科学,2025,33(01):46-55.

[16] 张翠玉,徐晓丽,周长明,等. 盐胁迫条件下不同施氮水平对玉米苗期生理特性的影响[J]. 玉米科学,2024,32(07):46-54.

[17] 赵 斌,赵永星,李双丹,等. 玉米苗期耐盐胁迫的筛选及综合评价[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2024,52(05):1-7.

[18] 韩昊泽,朱兴建,张 超,等. 种衣剂添加黑曲霉对盐胁迫下玉米苗期生长的影响[J]. 大麦与谷类科学,2024,41(01):36-42+48.

[19] 万文华,白明兴,雷恭鑫,等. 外源NO和SA处理对玉米苗期盐胁迫的缓解效应[J]. 甘肃农业大学学报,2024,59(03):108-116+128.

[20] 张 军,戈 丹,刘 玉,等. 盐胁迫对玉米苗期光合性能和保护酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(15):10-14.

[21] 张术伟. 黄三角濒海区土壤水盐耦合关系及时空特征[D]. 泰安:山东农业大学,2023.

[22] 赵 铭. 黄三角濒海区土壤盐分的影响因素及预测模拟[D]. 泰安:山东农业大学, 2023.

[23] 左 强,吴 训,石建初,等. 黄河三角洲滨海盐碱地可持续利用的水土资源约束与均衡配置策略[J]. 中国工程科学,2023,25(04):169-179.

[24] 戴魁冠,王猛猛,李 勃,等. 加气微咸水对黄三角盐碱土壤水肥盐运移特性影响研究[J]. 灌溉排水学报,2025,44(04):100-107.

[25] 刘利宁,张长锋,马长健,等. 咸水灌溉改良滨海盐碱地的适用性研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文),2025,33(10):1909-1921.

[26] 邵秋玲,谢小丁,马文刚. 黄河三角洲滨海盐碱地葡萄行间绿肥种植试验[J]. 现代农业科技,2025(19): 38-39+42.

[27] 王 悦,张志凯,崔长磊,等. 东营市黄三角中度盐碱地马铃薯高代品系比较试验[C]. 中国作物学会马铃薯专业委员会. 马铃薯产业与大食物观(2024). 国家马铃薯工程技术研究中心;乐陵希森马铃薯产业集团有限公司,2024:260-264.

[28] 颜思彤,朱济邹,张 翔,等. 滨海盐碱地泡田期灌排方式对土壤含盐量和水稻产量的影响[J]. 中国稻米,2025,31(05):76-80.

[29] 高 利,王 术,籍 强,等. AMF对盐胁迫下玉米生理及生长影响研究[J]. 广西植物, 2026,46(05):814-822.

[30] 王 欣,褚文轩,金晓彤,等. 基于主成分和隶属函数分析的玉米芽苗期耐盐性评价及指标筛选[J]. 山东农业科学,2026,58(02):50-59.

[31] 齐儒春,王 静,张晋美,等. 宁夏引黄灌区盐碱地耐盐青贮玉米品种筛选[J]. 中国农学通报,2025,41(24):20-29.

[32] 李 兵,周培禄,王金龙,等. 盐胁迫对不同品种玉米苗期根系生长与构型的影响[J]. 湖南生态科学学报,2025,12(02):59-65.

[33] 刘国永,周雪雁,蒋才富,等. 植物耐盐碱胁迫分子机制研究进展:从模式植物到玉米[J]. 科学通报,2025,70(25):4272-4287.

[34] 山东标准化协会. T/SDAS 1053-2024 玉米自交系萌发期及苗期耐盐性评价技术规程 [S]. 济南: 山东标准化协会, 2024.

[35] 张海艳,万连步,李宗新,等. 东营盐碱地适宜玉米品种的苗期筛选研究[J]. 种子,2018,37(04):99-101.