

DOI: 10.19462/j.cnki.zgzy.20251020002

基于隶属函数法的高粱幼苗期耐盐性指标综合评价

王润丰^{1,2} 郭冰玲³ 王海莲^{1,2} 赵影星^{1,2} 李成欣⁴ 张华文^{1,2,4}⁽¹⁾山东省农业科学院作物研究所, 济南 250100; ⁽²⁾特色杂粮作物山东省工程研究中心, 山东济南 250100;⁽³⁾烟台大学生命科学学院, 山东烟台 264005; ⁽⁴⁾山东师范大学生命科学学院, 济南 250358)

摘要:为了建立快速、准确、高通量鉴定耐盐高粱种质评价模型,筛选耐盐种质,为高粱耐盐改良育种提供育种材料,对177份高粱核心种质在幼苗期进行100mmol/L盐胁迫处理,测定叶片及根系等10个性状的耐盐系数,采用隶属函数法综合评价高粱种质的耐盐性,利用聚类分析对高粱种质进行耐盐性分级,使用随机森林模型评价耐盐指标重要性,建立苗期耐盐性预测的数学模型。结果表明,100mmol/L盐胁迫对177份高粱种质产生不同程度的胁迫作用,叶片及根系等10个性状的平均耐盐系数为0.545~1.113,其中根直径表现为受盐胁迫有促进作用。隶属函数法计算得到耐盐综合评价 D 值分布于0.091~0.856之间。聚类分析将高粱种质耐盐评价 D 值由高到低划分为5个等级,其中高度耐盐种质2份,耐盐种质25份,中度耐盐种质57份,盐敏感种质54份,高度盐敏感种质39份。随机森林模型鉴定出叶鲜重、叶长、叶干重和根干重等4个显著影响模型的指标。通过对以上4个模型构成的线性方程进行逐步的残差分析,最终确定以叶鲜重和根干重为关键指标的耐盐评价模型,即 $y=0.069+0.332x_1+0.143x_2$ 。研究中筛选出的2份高耐盐种质长挺子(G136)和七叶子(G147)可作为耐盐优异种质用于高粱耐盐遗传育种亲本材料的改良,筛选出的叶鲜重和根干重指标可作为高效、高通量鉴定高粱耐盐性的关键指标。

关键词:高粱;幼苗期;耐盐性;隶属函数;随机森林;线性方程;模型预测

Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance Indices in the Seedling Stage of Sorghum based on Membership Function Method

WANG Runfeng^{1,2}, GUO Bingling³, WANG Hailian^{1,2}, ZHAO Yingxing^{1,2},
LI Chengxin⁴, ZHANG Huawen^{1,2,4}⁽¹⁾Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100; ⁽²⁾Shandong Provincial Engineering ResearchCenter for Featured Minor Crops, Jinan 250100; ⁽³⁾School of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, Shandong;⁽⁴⁾College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250358)

我国现有盐渍化土地面积约9913万 hm^2 ^[1],主要分布在我国新疆、内蒙古、青海、西藏等干旱、半干旱地区,其中,山东省盐渍化土地约占全国盐渍化土地总面积的3%^[2]。盐渍化土地土壤含盐量高,产生渗透胁迫,限制作物水分和养分的吸收与转运,导致作物减产,制约农业生产的高质量发展^[3]。然而,盐渍化土地资源宝贵,具有潜在耕作价值,是我国耕地

“扩容、提质、增效”的重要来源,也是潜在的粮仓^[2]。“十四五”期间,中央一号文件多次提出“以种适地”的要求^[4],即“选育耐盐碱植物适应盐碱地”,标志着我国应对盐渍化土地的策略由化学、物理等措施向更为绿色环保的生物改良措施转变。

高粱是全球仅次于小麦、玉米、水稻和大麦的第五大谷类作物,营养丰富、用途广泛,也是优异的抗逆作物,具有较强的多抗性,如耐旱、耐涝、耐贫瘠等。据报道,部分高粱品种的耐盐性尤为突出,在3%~6%的盐渍化土地上各项指标仍表现良好^[5],

基金项目:国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06-14.5-B23);国家重点研发计划项目(2023YFD1202700,2023YFD1202701);山东省农业科学院农业科技创新工程(CXGC2025B16)

通信作者:张华文

因此,高粱被誉为耐盐“先锋作物”^[6],也是盐渍化土地生物改良不可或缺的重要参与者。进一步筛选、鉴定和培育耐盐性更好的高粱新品种对改良和开发盐渍化土地具有重大意义。孟姿诺等^[7]测定了185份高粱材料芽苗期在150mmol/L盐胁迫下的9个耐盐性指标,利用隶属函数法和线性回归方程找出了高粱芽苗期4个关键耐盐指标发芽势、发芽率、苗长和苗鲜重。张燕等^[8]鉴定了60份高粱材料芽苗期的耐盐性指标,筛选出了高度耐盐和高度盐敏感品种,同时建立了耐盐性预测的数学模型。范娜等^[9]对20份高粱种质在萌发期和幼苗期进行了150mmol/L盐浓度的胁迫处理并评价耐盐性,最终确定了发芽率、发芽势、根长、叶长和植株鲜重为关键鉴定指标。盐胁迫对萌发期和幼苗期的作物生长影响最为显著,萌发期耐盐性决定了作物在盐胁迫条件下的出苗率,而幼苗期耐盐性决定了作物在盐胁迫下的生长发育进程^[4]。

前人大多通过隶属函数法对种质材料进行耐盐性的综合评价,获得不同耐盐性种质,而在建立评价体系时,通常是利用多元线性回归对耐盐生理生化指标进行评价,以确定关键性状。但是,大多数研究并未充分考虑耐盐性状之间的共线性,从而导致评价模型预测失真或不准确。本研究以177份高粱种质为研究对象,在幼苗期给予100mmol/L盐胁迫处理,测定叶片及根系10个重要性状指标,利用隶属函数法、聚类分析和“随机森林”模型对高粱材料和耐盐指标进行筛选,旨在为高粱耐盐改良育种奠定材料基础,建立更为精准的高粱耐盐评价模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料 本试验所用试验材料为177份高粱核心种质资源,由山东省农业科学院作物研究所提供。其中,包含来源于中国的种质146份、来源于美国的16份、来源于印度的11份、来源于墨西哥的3份,以及来源于苏丹的1份(表1)。

1.2 试验方法 挑选外形完整、无瑕疵,大小一致的饱满种子用去离子水浸泡30min,然后转入5%NaClO溶液浸泡种子,消毒10min,用去离子水冲洗种子。处理完的种子放在浸湿的吸水纸上,封装进培养皿中,用封口膜密封,放置于人工气候箱中萌发。萌发条件:昼/夜温度25℃、湿度40%,光照/黑暗时间12h,光照强度12000lx。萌发过程中随时

向培养皿内添加去离子水,萌发7d后,从培养皿中挑选长势一致、健康的幼苗,转移至盛有Hoagland营养液的水培盒中,在人工气候箱继续培养,培养条件同萌发期。待幼苗长至2叶1心时,挑选长势一致、健康的幼苗,向水培盒营养液中添加100mmol/L NaCl,对照组中不添加。继续在人工气候箱中培养,每隔1d更换1次水培盒中的溶液。培养7d后,测定对照组和处理组幼苗的叶长、叶鲜重、叶绿素含量、根长、根鲜重、根表面积、根体积和根直径,120℃干燥后测定叶干重和根干重。每个性状3次重复。

1.3 数据统计分析 精准收集对照组和处理组的性状表型数据,按照张舒欣等^[10]的方法,计算各性状的耐盐系数(STC, Saline tolerance coefficient)对其进行耐盐评价,以此为基础,计算每个性状的隶属函数值(F , Membership function value)、因子的权重(W , Weight)和不同高粱种质耐盐综合得分值(D , Composite score)。原始数据在WPS Office中进行初步整理,然后导入R语言中进行方差分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、多元线性回归分析。相关指标的计算公式:

$STC_{ij} = x_{ijT} / x_{ijCK}$,式中 STC_{ij} 为第*i*份种质第*j*个性状的耐盐系数, x_{ijT} 为盐分胁迫条件下第*i*份种质第*j*个性状的表型值,而 x_{ijCK} 为空白对照条件下第*i*份种质第*j*个性状的表型值。 $F(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - x_{jmax}}{x_{jmax} - x_{jmin}}$,式中 $F(x_{ij})$ 为第*i*份种质第*j*个性状的隶属函数值, x_{ij} 为第*i*份种质第*j*个性状的STC值, x_{jmax} 为第*j*个性状STC的最大值, x_{jmin} 为第*j*个性状STC的最小值。 $W_a = \frac{\lambda_a}{\sum_{a=1}^n \lambda_a}$,

式中 W_a 为第*a*个主成分的权重, λ_a 为第*a*个主成分特征根的方差贡献率。 $D_i = \sum_{a=1}^n [F(x_{ij}) \times W_a]$,式中 D_i 为第*i*份种质的耐盐综合得分值,即第*i*份种质全部性状的隶属函数值与对应权重的乘积之和。

2 结果与分析

2.1 耐盐指标性状的表型响应 如图1所示,177份高粱种质在苗期100mmol/L盐胁迫条件下,根直径较对照极显著增加,其余9个性状均极显著降低。对照平均叶长和根长分别是16.109cm、85.293cm,极显著高于盐胁迫状态下的11.056cm和44.636cm。平均叶鲜重、叶干重、根鲜重、根干重在盐胁迫条件下分别为95.670g、14.487g、36.446g

表1 177份高粱种质资源信息

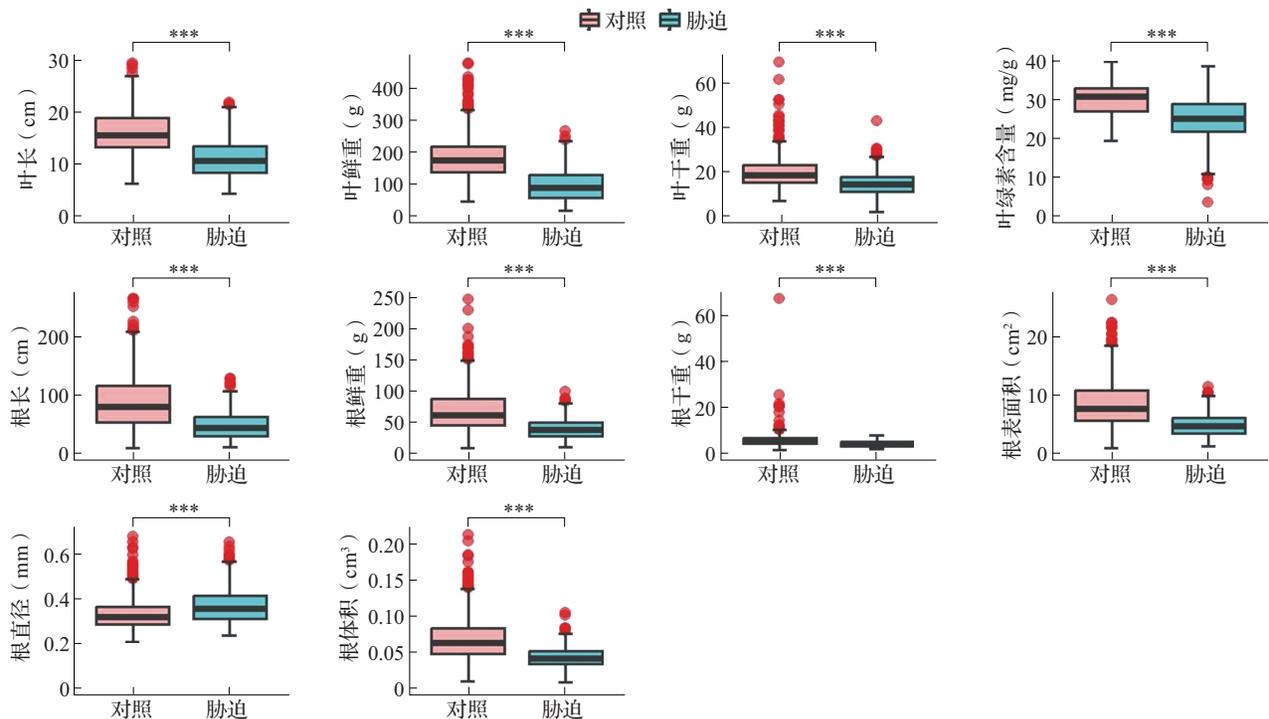
| 编号 | 来源 | 名称 | 编号 | 来源 | 名称 | 编号 | 来源 | 名称 | 编号 | 来源 | 名称 |
|------|----|--------------|------|----|-----------|------|-----|-----------------|------|----|--------|
| G001 | 中国 | 1703B | G046 | 中国 | SR6374 | G091 | 中国 | R352 | G136 | 中国 | 长挺子 |
| G002 | 中国 | 1711B | G047 | 中国 | SR2443 | G092 | 中国 | R354 | G137 | 中国 | 济阳挺杆1 |
| G003 | 中国 | 407B | G048 | 中国 | SR6372 | G093 | 中国 | R105 | G138 | 中国 | 鲁533 |
| G004 | 中国 | 1705B | G049 | 中国 | SR6371 | G094 | 中国 | R357 | G139 | 中国 | 七子叶高粱 |
| G005 | 中国 | 1715B | G050 | 中国 | SR5680 | G095 | 中国 | R366 | G140 | 中国 | 七个叶 |
| G006 | 中国 | 1719B | G051 | 中国 | SR1100 | G096 | 中国 | R403 | G141 | 中国 | 七叶子 |
| G007 | 中国 | 1725B | G052 | 中国 | SR1101 | G097 | 中国 | R525 | G142 | 中国 | 七叶子 |
| G008 | 中国 | 142B | G053 | 中国 | SR6205 | G098 | 中国 | 吉R8917 | G143 | 中国 | 七叶子 |
| G009 | 中国 | 340B | G054 | 中国 | SR5816 | G099 | 印度 | A16026 | G144 | 中国 | 七叶子 |
| G010 | 中国 | 604B | G055 | 中国 | SR6373 | G100 | 印度 | ASR-2 | G145 | 中国 | 七叶子 |
| G011 | 中国 | 658B | G056 | 中国 | R0902-4 | G101 | 印度 | Is18704 | G146 | 中国 | 七叶子 |
| G012 | 中国 | 2055B | G057 | 中国 | R0902-2 | G102 | 印度 | M-66998 | G147 | 中国 | 七叶子 |
| G013 | 印度 | TAM428B | G058 | 中国 | R0710 | G103 | 印度 | M-67162 | G148 | 中国 | 七叶子 |
| G014 | 中国 | 晋长早B | G059 | 中国 | R0902-5 | G104 | 印度 | M-67340 | G149 | 中国 | 七叶白 |
| G015 | 中国 | 117B | G060 | 中国 | R238-2 | G105 | 印度 | R-7 | G150 | 中国 | 七叶红 |
| G016 | 中国 | 2017-3163-3B | G061 | 中国 | R1770 | G106 | 印度 | Sc170 | G151 | 中国 | 七叶高粱 |
| G017 | 中国 | 2017-3136-2B | G062 | 苏丹 | 苏丹-4-1 | G107 | 中国 | 19-3-1-6 | G152 | 中国 | 七叶打锣锤 |
| G018 | 中国 | 1230B | G063 | 中国 | R0904 | G108 | 墨西哥 | ES-189 | G153 | 中国 | 八叶高粱 |
| G019 | 中国 | 4190B | G064 | 中国 | R1778 | G109 | 墨西哥 | ES-230 | G154 | 中国 | 八股杈 |
| G020 | 中国 | 7050B | G065 | 中国 | R0903 | G110 | 中国 | 19-3-1 | G155 | 中国 | 八登叶 |
| G021 | 中国 | 7501B | G066 | 中国 | 晋梁5号 | G111 | 中国 | Sc110-9×Sc120-6 | G156 | 中国 | 九月子高粱 |
| G022 | 中国 | 232EB | G067 | 中国 | 柳R | G112 | 印度 | SC170-14-1 | G157 | 中国 | 九叶子 |
| G023 | 中国 | F4B | G068 | 中国 | 吉R107 | G113 | 印度 | SC170-14 | G158 | 中国 | 九叶子 |
| G024 | 美国 | TX622B | G069 | 中国 | 吉R8917 | G114 | 墨西哥 | SC599-11E | G159 | 中国 | 九叶子 |
| G025 | 中国 | V4B | G070 | 中国 | R1235 | G115 | 美国 | C42a(选系) | G160 | 中国 | 九叶齐 |
| G026 | 中国 | 135B | G071 | 中国 | R4550 | G116 | 美国 | IS-1139C | G161 | 中国 | 九叶 |
| G027 | 中国 | 421B | G072 | 美国 | RTX2783 | G117 | 美国 | IS-1140C | G162 | 中国 | 九叶糙 |
| G038 | 中国 | 4003 | G073 | 中国 | R4545 | G118 | 美国 | IS-1143C | G163 | 中国 | 九节超 |
| G029 | 中国 | 晋辐1号 | G074 | 中国 | L244 | G119 | 美国 | IS-2177c | G164 | 中国 | 九叶齐 |
| G030 | 中国 | 吉恢7384 | G075 | 中国 | L258 | G120 | 美国 | IS-5394C | G165 | 中国 | 小老头矮高粱 |
| G031 | 中国 | 三尺三 | G076 | 中国 | L262 | G121 | 美国 | IS-5530C | G166 | 中国 | 母猪够 |
| G032 | 中国 | 永59 | G077 | 中国 | L416 | G122 | 美国 | IS-6439C | G167 | 中国 | 老母猪不跷脚 |
| G033 | 中国 | 康60 | G078 | 中国 | 4283 | G123 | 美国 | IS-6440C | G168 | 中国 | 红缨子 |
| G034 | 中国 | 水科001 | G079 | 中国 | 4334 | G124 | 美国 | IS-6456C | G169 | 中国 | 二红高粱 |
| G035 | 中国 | 双粒 | G080 | 中国 | 12H467 | G125 | 美国 | IS-8361 | G170 | 中国 | 二红高粱 |
| G036 | 中国 | 帚高粱 | G081 | 中国 | LYP | G126 | 美国 | TAM2566 | G171 | 中国 | 二老瓜座 |
| G037 | 中国 | 654 | G082 | 中国 | 2017-2001 | G127 | 美国 | TxR8508 | G172 | 中国 | 二帽子 |
| G038 | 中国 | 矮四 | G083 | 中国 | 17-2178 | G128 | 美国 | 10112 | G173 | 中国 | 二精子 |
| G039 | 中国 | 辽恢115 | G084 | 中国 | L116 | G129 | 中国 | 长茎黑 | G174 | 中国 | 小气厦屋 |
| G040 | 中国 | 铁恢208 | G085 | 中国 | 南133 | G130 | 中国 | 长挺杆高粱 | G175 | 中国 | 乌鸦座 |
| G041 | 中国 | 铁恢157 | G086 | 中国 | 石红137 | G131 | 中国 | 长挺子 | G176 | 中国 | 五金洞 |
| G042 | 中国 | 5-27 | G087 | 中国 | 石红133 | G132 | 中国 | 长挺子 | G177 | 中国 | 济阳挺杆2 |
| G043 | 中国 | 铁恢6号 | G088 | 中国 | N589 | G133 | 中国 | 长挺子 | | | |
| G044 | 中国 | 0-30 | G089 | 中国 | R1303 | G134 | 中国 | 长挺子 | | | |
| G045 | 中国 | 白平 | G090 | 中国 | R269 | G135 | 中国 | 红亭柳子 | | | |

和 3.389g, 极显著低于对照。此外, 对照平均叶绿素含量为 29.737mg/g, 而在盐胁迫条件显著下降到 24.800mg/g。对照的平均根体积和根表面积为 0.067cm³ 和 8.349cm², 盐胁迫条件下这 2 个性状极显著下降, 分别为 0.041cm³ 和 4.730cm²。与上述性状相反, 在 100mmol/L 盐胁迫条件下平均根直径为 0.370mm, 极显著高于对照(0.337mm)。

如表 2 所示, 177 份高粱种质叶长、叶鲜重、叶干重、叶绿素含量、根长、根鲜重、根干重、根表面积、根直径和根体积等 10 个耐盐性状的耐盐系数分别为

0.697、0.545、0.788、0.843、0.645、0.637、0.744、0.668、1.113 和 0.707。177 份高粱种质中均有耐盐系数最大值超过 1.000 的性状, 说明在某一个或多个性状上存在显著耐盐种质资源。10 个性状耐盐系数的变异系数在 14.130%~56.460% 之间, 由大到小依次为根长 > 根鲜重 > 根表面积 > 根干重 > 叶鲜重 > 根体积 > 叶干重 > 叶长 > 叶绿素含量 > 根直径。10 个苗期性状的耐盐系数为连续分布, 其分布整体呈现出偏态分布的特征, 即偏度 ≠ 0。

2.2 主成分分析和隶属函数值计算 10 个高粱性



箱线图下方线段代表第一四分位数 (~25%), 箱体中横线下方的矩形代表第二四分位数 (~50%), 箱体中间横线代表中位数, 中位数上方的箱体代表第三四分位数 (~75%), 箱体上方线段代表第四四分位数 (~100%), 上下方线段以外圆点代表异常值;

*** 表示在 0.001 水平上存在极显著差异, 下同

图 1 不同高粱种质叶片和根系耐盐指标箱线图

表 2 不同高粱种质叶片和根系耐盐系数统计分析

| 性状 | 耐盐系数 | 标准偏差 | 变异系数(%) | 最小值 | 最大值 | 偏度 | 峰度 |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|--------|
| 叶长 | 0.697 | 0.143 | 20.570 | 0.303 | 1.166 | -0.180 | -0.010 |
| 叶鲜重 | 0.545 | 0.216 | 39.660 | 0.106 | 1.561 | 0.780 | 1.950 |
| 叶干重 | 0.788 | 0.202 | 25.610 | 0.239 | 1.551 | 0.230 | 0.970 |
| 叶绿素含量 | 0.843 | 0.146 | 17.270 | 0.316 | 1.271 | -0.550 | 0.700 |
| 根长 | 0.645 | 0.364 | 56.460 | 0.157 | 3.167 | 2.560 | 12.980 |
| 根鲜重 | 0.637 | 0.305 | 47.880 | 0.184 | 2.182 | 1.860 | 5.750 |
| 根干重 | 0.744 | 0.317 | 42.560 | 0.219 | 2.583 | 1.910 | 7.050 |
| 根表面积 | 0.668 | 0.301 | 44.990 | 0.205 | 2.304 | 1.790 | 5.880 |
| 根直径 | 1.113 | 0.157 | 14.130 | 0.738 | 1.633 | 0.810 | 1.340 |
| 根体积 | 0.707 | 0.265 | 37.510 | 0.238 | 1.970 | 1.480 | 3.800 |

状的表型值通过降维得到了3个累计贡献率87.2%的主成分(表3)。3个主成分的特征根分别为2.526、1.177和0.976,贡献率分别为63.8%、13.8%和9.5%,累计贡献率为87.2%,说明这3个主成分能够反映10个性状原始数据中的主要变异信息,可以用于后续的耐盐综合评价分析。3个主成分的权重分别为0.732、0.159和0.109,用于隶属函数值计算。

表3 前3个主成分的因子荷载矩阵

| 指标 | 主成分1 | 主成分2 | 主成分3 |
|----------|--------|--------|--------|
| 叶长 | 0.301 | 0.454 | 0.072 |
| 叶鲜重 | 0.332 | 0.385 | 0.074 |
| 叶干重 | 0.282 | 0.323 | 0.415 |
| 叶绿素含量 | 0.202 | 0.451 | -0.389 |
| 根长 | 0.353 | -0.302 | -0.170 |
| 根鲜重 | 0.360 | -0.225 | 0.068 |
| 根干重 | 0.363 | -0.123 | 0.142 |
| 根表面积 | 0.365 | -0.304 | -0.042 |
| 根直径 | -0.225 | 0.029 | 0.741 |
| 根体积 | 0.330 | -0.295 | 0.246 |
| 特征根 | 2.526 | 1.177 | 0.976 |
| 贡献率(%) | 63.8 | 13.8 | 9.5 |
| 累计贡献率(%) | 63.8 | 77.7 | 87.2 |
| 权重 | 0.732 | 0.159 | 0.109 |

主成分1在根长、根鲜重、根干重、根表面积上的载荷值较高,反映了根系的生长情况。主成分2在叶长、叶鲜重、叶干重、叶绿素含量上的载荷值较高,反映了叶片的生长情况。主成分3在根直径上的载荷值较高,反映了根系直径的粗细情况。

根据隶属函数值的计算公式,利用每个主成分得分计算对应主成分的隶属函数值,然后与对应的权重相乘,进一步计算综合评价价值 D 值。如表4所示,177份高粱种质的 D 值在0.091~0.856之间,吉R8917(G098)在幼苗期耐盐性最弱,而长挺子(G136)幼苗期耐盐性最强。

2.3 聚类分析 根据耐盐性综合评价价值 D 值,进行K-means聚类分析,结果见表5。177份高粱种质按照耐盐性强弱分为5个类群,第I类群包含2份材料长挺子(G136)和七叶子(G147),为高度耐盐种质。第II类群为耐盐型材料,共25份,占参试材料总数的14.12%。第III类群包含种质数量最多,有57份材料,占比32.20%,耐盐性中等。第IV类

群为盐敏感型材料,共54份,占比30.51%。第V类群为高度盐敏感型种质,包含39份高粱种质,占比22.03%。

苗期100mmol/L盐胁迫条件下,不同耐盐级别高粱种质的农艺性状平均耐盐系数如表6所示。叶长、叶鲜重、叶干重、叶绿素含量、根长、根鲜重、根干重、根表面积和根体积的耐盐系数随耐盐性的降低而降低,而根直径则表现相反,即随着耐盐性降低,其耐盐系数逐渐升高。

2.4 多元回归分析

2.4.1 耐盐性状因子重要性评估 对所有耐盐性状的耐盐综合评价价值 D 值进行线性回归分析,结果如表7所示。所有自变量显著性检验均呈现极显著,说明所有因子对分析模型均有显著贡献。同时, F 检验结果 $P<0.001$,表明该模型整体上有效。与根系相关的自变量因子,如根长、根鲜重、根干重、根表面积和根体积的VIF值(方差膨胀因子)均大于10,表明模型中各因子间存在明显的共线性,影响回归分析模型的准确性。因此,需要对模型中的变量数量进行调整。

为精确确定回归模型中变量的数量,本研究采用随机森林(Random forest)算法对耐盐性综合评价价值 D 值与10个耐盐性状变量进行10000次全因子模型交叉验证分析。模型交叉验证误差值(Cross-validation error)随模型中因子数量的改变而呈现特定的变化趋势。总体而言,误差值随因子数量增加先迅速上升(或下降),继而下降(或上升),最终趋于稳定^[11]。如图2所示,本研究中交叉验证误差值首先随着因子数量的增加而快速上升,当模型中因子数达到3时,交叉验证误差值达到峰值,随后开始下降。当模型中因子数为5时,交叉验证误差值达到拐点,之后随着因子数量的增加而逐渐上升。这一结果表明,模型中适宜包含的变量个数应在5个以内。

随机森林算法提供了模型中变量重要性的检测方法。利用此方法,计算了本研究中10个耐盐性状因子的节点增加值(Increase in node purity),以此作为10个因子的重要性评估依据。节点增加值是指通过残差平方和来衡量因子重要性的指标,反映了各变量对随机森林模型中分类树每个节点上观测值异质性的影响程度^[12-13]。数值越大,表明该变量

表4 不同高粱种质耐盐综合评价D值和耐盐性排名

| 种质编号 | D值 | 排名 | 种质编号 | D值 | 排名 | 种质编号 | D值 | 排名 |
|------|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|-----|
| G001 | 0.229 | 159 | G060 | 0.464 | 25 | G119 | 0.209 | 168 |
| G002 | 0.282 | 130 | G061 | 0.237 | 155 | G120 | 0.544 | 8 |
| G003 | 0.220 | 162 | G062 | 0.291 | 125 | G121 | 0.290 | 126 |
| G004 | 0.396 | 60 | G063 | 0.394 | 63 | G122 | 0.226 | 160 |
| G005 | 0.283 | 129 | G064 | 0.391 | 67 | G123 | 0.318 | 114 |
| G006 | 0.348 | 94 | G065 | 0.475 | 20 | G124 | 0.394 | 64 |
| G007 | 0.285 | 128 | G066 | 0.204 | 169 | G125 | 0.427 | 43 |
| G008 | 0.281 | 131 | G067 | 0.194 | 170 | G126 | 0.436 | 37 |
| G009 | 0.309 | 120 | G068 | 0.211 | 166 | G127 | 0.424 | 44 |
| G010 | 0.373 | 78 | G069 | 0.325 | 111 | G128 | 0.406 | 52 |
| G011 | 0.326 | 110 | G070 | 0.191 | 171 | G129 | 0.347 | 95 |
| G012 | 0.325 | 112 | G071 | 0.336 | 100 | G130 | 0.526 | 11 |
| G013 | 0.389 | 68 | G072 | 0.248 | 147 | G131 | 0.254 | 145 |
| G014 | 0.333 | 105 | G073 | 0.163 | 173 | G132 | 0.517 | 12 |
| G015 | 0.237 | 156 | G074 | 0.327 | 109 | G133 | 0.379 | 71 |
| G016 | 0.277 | 134 | G075 | 0.356 | 89 | G134 | 0.379 | 72 |
| G017 | 0.357 | 87 | G076 | 0.430 | 42 | G135 | 0.424 | 45 |
| G018 | 0.255 | 144 | G077 | 0.274 | 136 | G136 | 0.856 | 1 |
| G019 | 0.237 | 157 | G078 | 0.261 | 142 | G137 | 0.486 | 19 |
| G020 | 0.391 | 66 | G079 | 0.169 | 172 | G138 | 0.393 | 65 |
| G021 | 0.335 | 102 | G080 | 0.529 | 10 | G139 | 0.334 | 104 |
| G022 | 0.356 | 88 | G081 | 0.106 | 176 | G140 | 0.286 | 127 |
| G023 | 0.472 | 21 | G082 | 0.496 | 16 | G141 | 0.403 | 54 |
| G024 | 0.251 | 146 | G083 | 0.621 | 3 | G142 | 0.373 | 77 |
| G025 | 0.125 | 174 | G084 | 0.437 | 36 | G143 | 0.561 | 5 |
| G026 | 0.217 | 164 | G085 | 0.376 | 75 | G144 | 0.430 | 41 |
| G027 | 0.439 | 33 | G086 | 0.395 | 61 | G145 | 0.334 | 103 |
| G028 | 0.345 | 97 | G087 | 0.340 | 99 | G146 | 0.398 | 57 |
| G029 | 0.332 | 106 | G088 | 0.336 | 101 | G147 | 0.784 | 2 |
| G030 | 0.216 | 165 | G089 | 0.121 | 175 | G148 | 0.219 | 163 |
| G031 | 0.353 | 93 | G090 | 0.280 | 132 | G149 | 0.571 | 4 |
| G032 | 0.386 | 70 | G091 | 0.493 | 18 | G150 | 0.302 | 122 |
| G033 | 0.372 | 79 | G092 | 0.472 | 22 | G151 | 0.261 | 143 |
| G034 | 0.460 | 26 | G093 | 0.263 | 140 | G152 | 0.506 | 14 |
| G035 | 0.247 | 148 | G094 | 0.274 | 135 | G153 | 0.435 | 39 |
| G036 | 0.239 | 153 | G095 | 0.242 | 152 | G154 | 0.397 | 59 |
| G037 | 0.360 | 85 | G096 | 0.400 | 56 | G155 | 0.377 | 73 |
| G038 | 0.354 | 91 | G097 | 0.443 | 32 | G156 | 0.465 | 24 |
| G039 | 0.411 | 50 | G098 | 0.091 | 177 | G157 | 0.439 | 34 |
| G040 | 0.353 | 92 | G099 | 0.511 | 13 | G158 | 0.270 | 137 |
| G041 | 0.549 | 6 | G100 | 0.547 | 7 | G159 | 0.299 | 123 |
| G042 | 0.436 | 38 | G101 | 0.404 | 53 | G160 | 0.459 | 27 |
| G043 | 0.498 | 15 | G102 | 0.401 | 55 | G161 | 0.292 | 124 |
| G044 | 0.452 | 29 | G103 | 0.222 | 161 | G162 | 0.313 | 117 |
| G045 | 0.244 | 151 | G104 | 0.432 | 40 | G163 | 0.395 | 62 |
| G046 | 0.363 | 84 | G105 | 0.438 | 35 | G164 | 0.316 | 115 |
| G047 | 0.354 | 90 | G106 | 0.416 | 46 | G165 | 0.233 | 158 |
| G048 | 0.377 | 74 | G107 | 0.344 | 98 | G166 | 0.238 | 154 |
| G049 | 0.414 | 47 | G108 | 0.455 | 28 | G167 | 0.376 | 76 |
| G050 | 0.364 | 82 | G109 | 0.358 | 86 | G168 | 0.308 | 121 |
| G051 | 0.328 | 107 | G110 | 0.446 | 31 | G169 | 0.467 | 23 |
| G052 | 0.364 | 81 | G111 | 0.211 | 167 | G170 | 0.270 | 138 |
| G053 | 0.263 | 139 | G112 | 0.311 | 119 | G171 | 0.409 | 51 |
| G054 | 0.246 | 149 | G113 | 0.387 | 69 | G172 | 0.451 | 30 |
| G055 | 0.364 | 83 | G114 | 0.533 | 9 | G173 | 0.371 | 80 |
| G056 | 0.494 | 17 | G115 | 0.346 | 96 | G174 | 0.277 | 133 |
| G057 | 0.328 | 108 | G116 | 0.315 | 116 | G175 | 0.320 | 113 |
| G058 | 0.413 | 48 | G117 | 0.398 | 58 | G176 | 0.262 | 141 |
| G059 | 0.411 | 49 | G118 | 0.244 | 150 | G177 | 0.312 | 118 |

表 5 177 份高粱种质资源幼苗期耐盐性聚类分析

| 类群 | 耐盐性 | 种质数量 | 种质编号 |
|-----|-------|------|--|
| I | 高度耐盐 | 2 | G136、G147 |
| II | 耐盐 | 25 | G083、G149、G143、G041、G100、G120、G114、G080、G130、G132、G099、G152、G043、G082、G056、G091、G137、G065、G023、G092、G169、G156、G060、G034、G160 |
| III | 中度耐盐 | 57 | G108、G044、G172、G110、G097、G027、G157、G105、G084、G042、G126、G153、G104、G076、G144、G125、G127、G135、G106、G049、G058、G039、G059、G171、G128、G101、G141、G102、G096、G117、G146、G154、G004、G086、G163、G063、G124、G138、G020、G064、G013、G113、G032、G133、G134、G048、G155、G085、G167、G010、G142、G033、G173、G050、G052、G055、G046 |
| IV | 盐敏感 | 54 | G037、G109、G017、G022、G075、G038、G047、G031、G040、G006、G129、G115、G028、G107、G087、G071、G088、G021、G139、G145、G014、G029、G051、G057、G074、G011、G012、G069、G175、G123、G164、G116、G162、G177、G112、G009、G168、G150、G159、G161、G062、G121、G140、G007、G005、G002、G008、G090、G016、G174、G077、G094、G158、G170 |
| V | 高度盐敏感 | 39 | G053、G093、G176、G078、G151、G018、G131、G024、G072、G035、G054、G045、G118、G095、G036、G166、G015、G019、G061、G165、G001、G122、G103、G003、G148、G026、G030、G068、G111、G119、G066、G067、G070、G079、G073、G025、G089、G081、G098 |

表中每个类群高粱种质按照耐盐性由强到弱的顺序进行排列

表 6 不同耐盐等级下苗期性状的耐盐系数

| 耐盐性 | 叶长 | 叶鲜重 | 叶干重 | 叶绿素含量 | 根长 | 根鲜重 | 根干重 | 根表面积 | 根直径 | 根体积 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 高度耐盐 | 1.089 | 1.352 | 1.415 | 1.063 | 2.591 | 1.959 | 2.247 | 2.075 | 0.789 | 1.594 |
| 耐盐 | 0.856 | 0.826 | 1.007 | 0.925 | 1.013 | 1.034 | 1.149 | 1.024 | 1.020 | 1.022 |
| 中度耐盐 | 0.767 | 0.636 | 0.855 | 0.913 | 0.710 | 0.708 | 0.828 | 0.732 | 1.079 | 0.775 |
| 盐敏感 | 0.665 | 0.473 | 0.763 | 0.809 | 0.527 | 0.510 | 0.618 | 0.555 | 1.132 | 0.605 |
| 高度盐敏感 | 0.516 | 0.291 | 0.551 | 0.727 | 0.375 | 0.389 | 0.460 | 0.430 | 1.212 | 0.500 |

的重要性越高。如图 3 所示,自变量重要性排序为:叶鲜重 > 叶长 > 根干重 > 叶干重 > 根鲜重 > 根表面积 > 根长 > 根体积 > 叶绿素含量 > 根直径。显著性检验揭示,只有叶鲜重、叶长、根干重以及叶干重重要性排序具有统计学意义,这说明关于耐盐性综合评价 D 值的回归模型应含有以上 4 个变量。

表 7 全因子回归方程系数和检验结果

| 变量 | 非标准化系数 | t 值 | VIF |
|-------|--------|--------------|--------|
| 常数 | -0.144 | -1234.100*** | - |
| 叶长 | 0.175 | 1801.800*** | 4.429 |
| 叶鲜重 | 0.114 | 1390.700*** | 7.221 |
| 叶干重 | 0.133 | 2099.700*** | 3.743 |
| 叶绿素含量 | 0.090 | 1394.500*** | 2.004 |
| 根长 | 0.012 | 120.900*** | 30.650 |
| 根鲜重 | 0.035 | 431.600*** | 14.038 |
| 根干重 | 0.046 | 673.000*** | 10.696 |
| 根表面积 | 0.023 | 132.800*** | 63.944 |
| 根直径 | 0.025 | 326.400*** | 3.225 |
| 根体积 | 0.040 | 503.700*** | 10.272 |

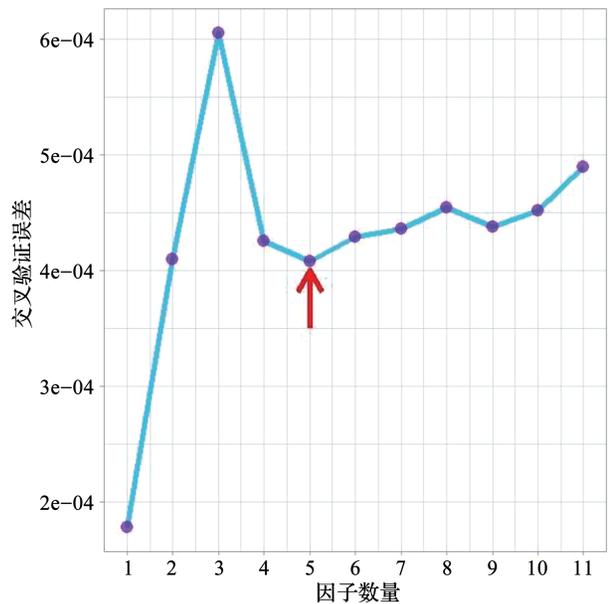
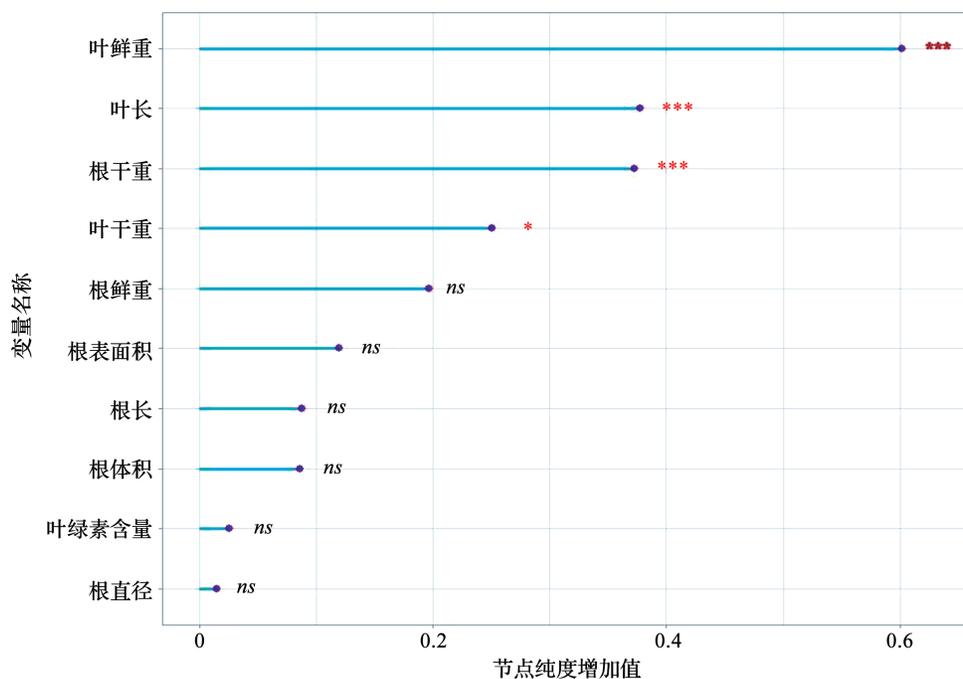


图 2 模型中因子数量对应的交叉验证误差

2.4.2 耐盐性评价模型构建 根据变量的重要性和显著性(图 3),选择叶鲜重、叶长、根干重和叶干重 4 个变量构建 5 个耐盐性评价模型(M1~M5)。对构建的模型进行多元回归检验和残差检验。如表 8 所示,M1 为包含 4 个变量的全变量模型,即叶鲜



节点纯度增加值越大代表变量因子重要性越高; *表示在 0.05 水平上存在显著差异, ns 表示无显著差异;下同

图 3 10 个耐盐性状因子重要性评估

表 8 不同线性模型有效性检验对比

| 模型 | 变量 | 残差检验 | | | 交叉验证误差值 | F 值 | 调整 R^2 |
|----|---------------------|----------|----------|-------|------------------------|-----------|----------|
| | | BP 检验 | SW 检验 | DW 检验 | | | |
| M1 | 叶鲜重 + 叶长 + 根干重 + 根长 | 16.546** | 0.960*** | 2.165 | 4.259×10^{-4} | 2257.0*** | 0.981 |
| M2 | 叶鲜重 + 叶长 + 根干重 | 4.057 | 0.991 | 2.225 | 6.162×10^{-4} | 1737.0*** | 0.967 |
| M3 | 叶鲜重 + 叶长 | 3.051 | 0.931*** | 1.930 | 4.059×10^{-4} | 691.7*** | 0.887 |
| M4 | 叶鲜重 + 根干重 | 3.818 | 0.993 | 2.207 | 4.059×10^{-4} | 1749.0*** | 0.952 |
| M5 | 叶鲜重 | 0.117 | 0.931*** | 1.942 | 1.709×10^{-4} | 1127.0*** | 0.865 |

**表示在 0.01 水平上存在极显著差异;BP 检验为残差 Breusch-Pagan 方差齐次性检验;SW 为残差 Shapiro-Wilk 正态性检验;DW 为残差 Durbin-Watson 独立性检验

重 + 叶长 + 根干重 + 根长;M2 为去除根长的模型;M3 和 M4 均为含有 2 个变量,在 M2 的基础上只保留叶鲜重和叶长或根干重的回归模型;M5 只保留叶鲜重变量。 F 检验结果均为极显著,说明模型中的元素对因变量耐盐综合评价 D 值具有解释力,总体模型有效。从 F 值来看,模型的有效性排序为: $M1 > M4 > M2 > M5 > M3$ 。其中, $M1$ 对因变量解释力最强,解释力最低的为 $M3$ 。模型的残差检验结果显示, $M1$ 的 BP 检验值和 SW 检验值均极显著, $M3$ 和 $M5$ 的 SW 检验值极显著,而 DW 检验未检测出显著性模型,即 $M1$ 、 $M3$ 和 $M5$ 模型只通过残差独立性检验而未通过残差方差齐次性检验和残差正态性检验,可排除上述 3 个模型,保留 $M2$ 和 $M4$ 模型。从交叉验证误差值来看,当模型中含有 3 个变量时,

模型的交叉验证误差值高于 2 个变量的模型。 $M4$ 的调整 R^2 相较于 $M2$ 的调整 R^2 只降低了 1.55%。结合模型对因变量的解释力强弱, $M4$ 模型为最佳模型。

相关性分析显示叶鲜重和根干重变量之间的相关性低于其分别与 D 值的相关性(表 9),这表明两者之间存在一定的相斥性,符合回归模型的要求。模型中 2 个自变量和常量的 t 检验值均在 0.001 水平上达极显著,说明各因子存在非零系数。这 2 个自变量的 VIF 值小于 5,可以判定变量间不存在共线性。模型中调整决定系数 R^2 为 0.952,表明此模型对因变量变异的解释率达到 95.2%。此模型 F 值达极显著水平,表明回归方程符合要求。由以上 2 个自变量构成的回归方程为

表9 最优回归方程系数和检验

| 变量 | 与D值的相关系数 | 变量间相关系数 | 非标准化系数 | 标准化系数 | 标准误差 | t值 | VIF |
|-----|----------|----------|--------|-------|-------|-----------|-------|
| 常数 | - | - | 0.069 | - | 0.005 | 13.310*** | - |
| 叶鲜重 | 0.930*** | 0.663*** | 0.332 | 0.647 | 0.012 | 28.280*** | 1.922 |
| 根干重 | 0.857*** | - | 0.143 | 0.409 | 0.008 | 17.880*** | 1.922 |

F值为1749.000***,调整R²为0.952

$y=0.069+0.332x_1+0.143x_2$,式中 x_1 代表叶鲜重, x_2 代表根干重。

3 讨论

盐分胁迫是盐碱地作物种植面临的最棘手的问题,也是造成作物减产的重要因素之一^[14]。盐分胁迫通过抑制根系对水分的吸收引发生理干旱,产生大量自由基,造成氧化还原代谢紊乱,破坏细胞内各种微结构,扰乱正常的生理生化进程;同时,大量Na⁺可扰乱作物体内K⁺/Na⁺离子平衡导致离子毒害,进一步恶化内生稳态,从而显著抑制作物生长发育,导致作物严重减产^[15]。本研究中盐分胁迫对高粱幼苗期10个农艺性状产生了不同程度的抑制作用。同时,也观察到有部分被鉴定的种质材料的性状在盐胁迫下的表型值优于对照组,即性状的耐盐系数>1。这种在逆境条件下生长得到促进或者超额补偿的现象被认为是一种植物的自我保护机制^[16]。从叶部性状和根部性状的耐盐系数表型分布范围来看,约75%高粱种质的叶部性状耐盐系数在0.5~1.0之间,根部性状耐盐系数在0~0.6区间的有超过56%的种质,叶部性状总体上较根部性状数值分布区间小,变异少,说明根系作为感受盐害最直接的部位,对盐害的响应较为敏感^[17]。

作物的耐盐性受多基因与环境条件、生理状态的相互作用,是多种代谢途径和一系列生理生化反应的综合结果^[18]。因此,耐盐性评价需要综合考虑多个性状因素。本研究利用主成分分析、隶属函数法对不同材料的耐盐性强弱进行综合评估,采用线性回归构建耐盐性能评估的数学模型。在构建耐盐评估模型阶段,并未采用常规分析方法,即简单对各性状进行线性回归方程的拟合,而是采取更为严格的方法,对作为自变量的耐盐性状和拟合模型进行评估。按照Ao等^[19]和Tutar等^[20]报导的方法,首先利用随机森林模型评价自变量对模型影响的重要性,排除掉非重要自变量,保留显著影响模型的自变量,随后对重要自变量拟合的回归方程进行评估,即

对模型进行残差检验,以获得最佳耐盐性评估数学模型。通过严格评估模型有效性,确保了对高粱耐盐种质资源筛选的准确性,有助于更加精准地鉴定出耐盐高粱种质。

本研究以100mmol/L盐胁迫处理177份高粱种质资源材料,从中筛选出2份高度耐盐种质长挺子(编号G136)和七叶子(编号G147)。线性回归方程筛选出叶鲜重和根干重2个主要性状,可作为高粱幼苗期大批量耐盐性鉴定的评价指标。

参考文献

- [1]王遵亲.中国盐渍土.北京:科学出版社,1993
- [2]王宝山.盐碱地利用、耐盐作物育种及栽培技术的现状、问题与建议.山东师范大学学报:自然科学版,2025,40(2):123-132
- [3]Shabala S, Wu H H, Bose J. Salt stress sensing and early signaling events in plant roots: Current knowledge and hypothesis. Plant Science, 2015, 241: 109-119
- [4]乔钰岩,于淼,唐玉劼,石贵山,刘新宇,刘晓涵,王新鼎,李扬,王鼎,陈冰媛.粒用高粱幼苗期耐盐打盐碱综合评价与指标鉴定.中国农业科学,2025,58(1):30-42
- [5]王润丰,王海莲,韩云,刘宾,张华文.黄河三角洲地区耐盐碱高粱品种筛选.山东农业科学,2022,54(12):31-36
- [6]王满红,肖梅娟, Irshad A, Nimir E A N, Hanadi I El D, 周桂生, 朱广龙.高粱苗期耐盐性鉴定与评价.中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(6): 52-63
- [7]孟姿诺,付长青,张玲玉,高顺娟,常金华,崔江慧.高粱芽苗期耐盐性评价及耐盐种质筛选.中国农业科学,2025,58(16):3317-3326
- [8]张燕,董俐利,曾桂萍,王睿,周光怡,陈松树,李魁印,任明见.糯高粱芽期耐盐性评价的数学模型研究.作物研究,2023,37(4):354-363
- [9]范娜,白文斌,彭之东,张建华,史丽娟,李光,江佰阳,曹昌林.高粱耐盐种质资源的鉴定与综合评价.中国农学通报,2018,34(10):82-87
- [10]张舒欣,贾紫璇,方涛,刘一凡,赵微,王荣,昌海超,罗芳丽,朱耀军,于飞海.植物抗逆能力评价方法研究进展.生物多样性,2025,33(2):102-114
- [11]Jiao S, Chen W M, Wang J L, Du N N, Li Q P, Wei G H. Soil microbiomes with distinct assemblies through vertical soil profiles drive the cycling of multiple nutrients in reforested ecosystems.

(下转第107页)

品质,综合表现最佳,可进一步扩大推广面积。“濮麦”系列品种单产稳步提高,籽粒品质不断提升,但兼抗品种欠缺,未来育种目标应聚焦高产、优质协同,利用现代育种技术(如分子标记辅助选择)重点提升赤霉病、白粉病抗性,选育千粒重高但株高适中、熟期适宜的新种质,降低倒伏风险,以适应不同麦区的茬口要求。

参考文献

- [1] 葛娜. 河南濮阳市优质小麦种植及常见病虫害防治技术. 农业工程技术, 2025, 45 (13): 90-91
- [2] 葛冬冬, 王粤生, 王长有, 陈春环, 刘新伦, 邓平川, 李停栋, 王弘, 郑祥博, 杨海波, 吉万全, 赵继新. 2011-2024年黄淮冬麦区南片国审小麦品种产量、品质及抗病性分析. 麦类作物学报, 2025, 45 (9): 1180-1189
- [3] 高艳梅, 景茂雅, 陈薇薇, 张萌, 张永清, 王志敏. 近 20 年来中国小麦品种产量和品质性状变化分析. 麦类作物学报, 2024, 44 (9): 1152-1160
- [4] 张程昱, 吴漫, 吕良松, 王玉龙, 王黎明. 2017—2022 年河南省审定小麦品种产量性状与抗病性变异分析. 天津农业科学, 2025, 31 (5): 16-21
- [5] 晁漫宁, 王勛, 张玉坤, 马庆, 朱利广. 2018-2024 年安徽省小麦区试冬性组小麦品质性状及抗病性分析. 陕西农业科学, 2025, 71 (9): 71-77, 83
- [6] 高燕, 彭涛, 成东梅, 赵伟峰, 于金林, 黄莎莎. 河南省小麦品种主要性状分析及综合评价指标构建. 种子, 2025, 44 (6): 158-164
- [7] 宋家永. 河南省小麦品种系列结构分析. 河南农业科学, 2008, 37 (8): 43-45
- [8] 王士坤, 杨丽娟, 王映红, 董响, 任星旭, 周思远, 李永珍, 张玉红, 蒋志凯. 新麦系列品种系谱及育种思路. 种子科技, 2021, 39 (21): 26-28
- [9] 江伟, 张晓, 刘大同, 高德荣, 张勇, 李曼, 寿路路, 陆成彬. 小麦品质性状相关性分析及主成分分析. 江苏农业科学, 2023, 51 (16): 43-48
- [10] 张凡, 杨春玲, 韩勇, 侯军红. 基于主成分分析和同异分析法的小麦产量与品质综合评价. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2022, 53 (4): 503-509
- [11] 韩雪, 孔欣欣, 杨丹丹, 赵国轩, 苏亚中, 赵鹏飞, 金建猛, 邱学领, 于俊杰, 赵国建. 基于主成分分析的 72 份中筋强小麦面粉加工品质综合评价. 中国种业, 2024 (5): 72-78
- [12] 杨红旗, 李磊, 董薇, 梁慧珍, 郝仰坤. 刍议我国种子事业法制化建设. 种子科技, 2022, 40 (13): 130-132
- [13] 张会芳, 燕照玲, 刘海礁, 段俊枝, 陈海燕, 郭燕, 王楠, 杨翠苹, 齐红志. 河南省联合体试验小麦品种综合性状分析与评价. 河南农业科学, 2024, 53 (7): 35-43
- [14] 吴漫. 2017-2022 年河南省审定小麦品种及其主要目标性状变异分析. 洛阳: 河南科技大学, 2024
- [15] 张华崇, 赵树琪, 闫振华, 黄晓莉, 戴宝生, 李蔚. 湖北省近 20 年审定小麦品种的产量、品质性状及抗病性分析. 麦类作物学报, 2021, 41 (11): 1356-1364
- [16] 刘明杰. 小麦抗病基因聚合材料抗性鉴定和抗病基因的分子检测. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025

(收稿日期: 2025-10-14)

(上接第 101 页)

- Microbiome, 2018, 6: 146
- [12] Edwards J A, Santos-Medellin C M, Liechty Z S, Nguyen B, Lurie E, Eason S, Phillips G, Sundaresan V. Compositional shifts in root-associated bacterial and archaeal microbiota track the plant life cycle in field-grown rice. *PLoS Biology*, 2018, 16: e2003862
- [13] Zhang J Y, Zhang N, Liu Y X, Zhang X N, Hu B, Qin Y, Xu H R, Wang H, Guo X X, Qian J M, Wang W, Zhang P F, Jin T, Chu C C, Bai Y. Root microbiota shift in rice correlates with resident time in the field and developmental stage. *Science China-Life Sciences*, 2018, 61 (6): 613-621
- [14] 杨国宝, 周家杰, 江敏, 范琦伍, 王丽华. 160 个高粱品种(系)的耐盐性鉴定. 西昌学院学报: 自然科学版, 2019, 33 (3): 1-7, 45
- [15] 朱广龙, 武启迪, 钱寅森, 张网定, 任志强, 周桂生. 盐胁迫对高粱生长与生理特征的影响及耐盐调控机理研究进展. 江苏农业科学, 2023, 51 (14): 49-57
- [16] 温刘君, 朴顺姬, 易津. 4 种小麦族牧草种子耐盐补偿生长特性研究. 中国草地学报, 2009, 31 (6): 30-32, 38
- [17] 楚乐乐, 罗成科, 田蕾, 张银霞, 杨淑琴, 李培富. 植物对碱胁迫适应机制的研究进展. 植物遗传资源学报, 2019, 20 (4): 836-844
- [18] Irik H A, Bikmaz G. Effect of different salinity on seed germination, growth parameters and biochemical contents of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds cultivars. *Scientific Reports*, 2024, 14: 6929
- [19] Ao Y L, Li H Q, Zhu L P, Ali S, Yang Z G. The linear random forest algorithm and its advantages in machine learning assisted logging regression modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174: 776-789
- [20] Tutar H, Celik S, Er H, Gönülal E. Impact of morphological traits and irrigation levels on fresh herbage yield of sorghum x sudangrass hybrid: Modelling data mining techniques. *PLoS ONE*, 2025, 20: e0318230

(收稿日期: 2025-10-20)