中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):142-154
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025301

基于叶片光谱和荧光参数与根系形态特征的大豆耐盐性综合评价

李庆阳[1,2],张晓燕[2],梁文香[2],袁晓天[2],周秀秀[1,2],袁星星[1,2],黄璐[2],陈新[1,2],王政[1],薛晨晨[1,2*]
(1.江苏大学生命科学学院,江苏 镇江,212013;
2.江苏省农业科学院经济作物研究所,江苏 南京,210014)

摘要:为建立兼顾地上部和地下部表型的大豆耐盐性评价体系并发掘优异种质,以收集的91份大豆种质为试验材料,在苗期进行150 mmol·L^{-1}NaCl盐胁迫处理,系统测定叶片光谱和荧光参数以及根系形态特征参数,并运用主成分分析和隶属函数分析对大豆的耐盐性进行综合评价。结果表明,91份大豆材料叶片的光谱和荧光参数、根部的形态特征参数之间分别存在一定程度的相关性,其中反映叶片次生代谢产物含量与叶绿素含量的多光谱荧光比值,即相对F_{440}/F_{690}(RF_{440}/F_{690})与相对F_{440}/F_{740}(RF_{440}/F_{740})的相关性最显著,根系的相对根尖数与相对根总长的相关性最显著。主成分分析表明,叶片的16个指标可以提取5个主成分,累计贡献率达83.25%;根系的5个指标可提取2个主成分,累计贡献率达82.63%。进一步利用隶属函数分别计算出叶片与根系的耐盐性综合评价值(*D*值),并分别根据叶片和根系的*D*值筛选出耐盐性强的材料各10份,其中共同筛选出的耐盐材料为5份。通过对筛选到的代表性耐盐材料S88(南通矮脚黄)和盐敏感材料S82(镇江斜角豆)进行表型比较分析,进一步验证了筛选结果的可靠性。本研究表明,将叶片光谱和荧光参数与根系形态特征结合可用于大豆种质耐盐性的鉴定。

关键词:大豆;耐盐性;叶绿素荧光;根系形态;综合评价
中图分类号:S565.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0142-13

OSID

Comprehensive evaluation of soybean germplasm salt tolerance based on leaf spectral phenotypes and root morphological traits

LI Qing-yang[1,2], ZHANG Xiao-yan[2], LIANG Wen-xiang[2], YUAN Xiao-tian[2], ZHOU Xiu-xiu[1,2], YUAN Xing-xing[1,2], HUANG Lu[2], CHEN Xin[1,2], WANG Zheng[1], XUE Chen-chen[1,2*]
(1. *School of Life Science, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*; 2. *Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: To establish a salt tolerance evaluation system for soybeans that accounts for both above-ground and below-ground phenotypes and to identify superior germplasm, a total of 91 soybean accessions were used as materials. At seedling stage, salt stress treatment with 150 mmol·L^{-1} NaCl was applied. Spectral and fluorescence parameters of leaves, as well as root morphological traits, were systematically measured. Principal component analysis and membership function analysis were employed to comprehensively evaluate soybean salt tolerance. Results showed that there were certain correlations among spectral and fluorescence parameters of leaves and root morphological parameters in the 91 soybean materials. Among these, the multispectral fluorescence ratios reflecting the content of leaf secondary metabolites and chlorophyll, namely the relative F_{440}/F_{690} (RF_{440}/F_{690}) and relative F_{440}/F_{740} (RF_{440}/F_{740}), exhibit the most significant correlation, while the correlation between relative root tip number and relative total root length in roots was the most significant. Principal component analysis indicated that 16 leaf indicators could be reduced to 5 principal components, with a cumulative contribution rate of 83.25%; the 5 root indicators could be reduced to 2 principal components, with a cumulative contribution rate of 82.63%. Furthermore, compre-

收稿日期:2025-12-31
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2300100);生物育种钟山实验室项目(ZSBBL);江苏省种业振兴揭榜挂帅项目(JBGS-2021-014)
作者简介:李庆阳(2001-),男,硕士研究生,主要从事大豆耐盐性研究,E-mail: Leeshi1874@163.com
* 通讯作者:薛晨晨(1983-),男,博士,副研究员,主要从事大豆功能育种研究,E-mail: xuecc@jaas.ac.cn

hensive evaluation values (*D*-values) for salt tolerance of leaves and roots were calculated separately using membership function method. Based on the *D*-values of leaves and roots, 10 salt-tolerant materials were screened out from each category, among which 5 salt-tolerant materials were commonly identified. By conducting phenotypic comparative analysis of the representative salt-tolerant material S88 (Nantong Aijiao huang) and salt-sensitive material S82 (Zhenjiang Xiejiao dou), the reliability of the screening results was further verified. This study demonstrates that combining leaf spectral and fluorescence parameters with root morphological traits could be effectively used for identification of soybean salt tolerance.

Key words: soybean; salt stress; chlorophyll fluorescence; root morphology; comprehensive evaluation

土壤盐碱化是限制农作物生产、影响农作物产量的主要因素之一,正随着全球气候变化与不合理的灌溉等因素而持续恶化[1]。土壤中的过量盐分会通过渗透胁迫、离子毒性等途径影响植物体内酶的生理活性,进而影响光合作用[2];同时盐胁迫会影响植物根对土壤养分的吸收,破坏植物根系形态,最终导致植株生长受阻,作物产量下降甚至死亡绝收[3,4]。我国盐碱地约占我国耕地总面积的10%,主要分布在西北内陆、华北平原以及沿海地区等区域,具有分布范围广、分布面积大、影响程度深的特点[5]。其中沿海区域盐碱地因海水浸渍与毛细水带动盐分向土壤表层迁移等特点,导致该区域盐碱土中土壤盐分较高[6]。盐碱地被视为耕地的"后备军",合理利用盐碱地受到高度重视。

大豆(*Glycine max* L.)是不可或缺的植物蛋白与油脂的来源,该特点使得大豆成为重要的粮食作物和经济作物[7]。近年来我国大豆需求量持续增加,大豆进口占比一度达到80%以上[8]。提升我国大豆产能和自给率变得刻不容缓。大豆是中度耐盐作物,利用盐碱地种植大豆具有较高的可行性与较好的应用前景[8],对于增加大豆产量、保障国家粮食安全、提高盐碱地的土地利用率和改善生态等均具有重要意义。

发掘耐盐大豆种质资源是利用盐碱地扩种大豆的基础。当前已围绕大豆耐盐种质资源筛选开展了大量研究,并取得了许多关键性进展。如袁宇婷等[2]在100 mmol·L^{-1} NaCl处理下分别进行了萌发期和苗期耐盐性鉴定,并利用多元统计学分析方法筛选出了铜山白荚壳豆等萌发期与苗期均高度耐盐的种质7份。姚梦楠等[9]分别测定了中盐度和低盐度2种不同盐度下大豆的6个性状指标,通过多种分析方法将86份大豆划分为5个耐盐等级,筛选出高度耐盐种质2份,耐盐种质18份。王莉等[10]以74份大豆为研究材料,在萌发期用150 mmol·L^{-1} NaCl处理,苗期用200 mmol·L^{-1} NaCl处理,通过隶属函数分析和聚类分析将74份大豆材料划分为4类,并建立了对应指标的综合评价预测模型。孟然等[11]以50份大豆种质资源作为研究对象,进行了发芽期、苗期和全生育期的耐盐性鉴定,筛选出了8份高耐盐种质,10份耐盐种质。林峰等[12]使用150 mmol·L^{-1} NaCl对392份大豆进行了苗期耐盐性鉴定,采用单株分类记载法并应用多种分析方法筛选出58份耐盐大豆种质资源。韩岱等[13]采用1.5% NaCl溶液对60份大豆种质资源进行了苗期耐盐性评价,鉴定到耐盐品种12份,中等耐盐品种24份。杜若楠等[14]使用90 mmol·L^{-1} NaCl浓度对来自24个国家的333份大豆种质资源为材料进行种质资源耐盐性鉴定,鉴定出萌发期3份高耐盐种质,7份耐盐种质。

目前,对大豆耐盐性的评价通常基于幼苗存活率、植株生长状况和产量等指标。存在检测周期长、效率低、主观性强和误差大等问题。现代植物表型技术,如热红外成像、近红外光谱和荧光成像技术等,因具有高通量、多维度、智能化、无损等优点而广泛应用于作物生长和生理表型的测定[15]。叶绿素荧光参数等指标能够反映盐胁迫下叶片生长发育和光合作用的变化[3,16],叶片的氮平衡指数等指标、多光谱荧光可检测叶片次生代谢通路对盐胁迫的响应[17]。此外,根系是直接与土壤接触并感知土壤成分变化的器官,根系的形态性状可直接反映作物对盐胁迫的响应。目前上述技术已在植物耐旱、耐热、耐盐和抗病等性状的检测方面进行了应用[3,15-21],然而,相关技术在大豆种质资源耐盐性鉴定方面的应用尚不多见。

本研究通过测定叶片光谱和荧光参数与根系形态特征,利用相关性分析、主成分分析和隶属函数分析等多元统计分析方法,对91份大豆种质的耐盐性进行了综合评价,以期明确对耐盐性有主要贡献的关键叶片和根系形态特征,并筛选出耐盐性强的大豆材料。本研究首次将叶片和根系的表型指标特征相结合来进行大豆耐盐性鉴定,相比传统鉴

定方法具有高效、无损等特点,研究结果可为耐盐大豆种质资源的筛选和育种提供技术支持和材料基础。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究供试大豆种质91份,均由江苏省农业科学院经济作物研究所收集保存,种质编号及名称见附表1(见首页OSID二维码)。

1.2 试验设计

试验于江苏省农业科学院经济作物研究所人工气候室内进行,培养方法参考刘光宇等[22]和周秀文等[23]的方法并且进行一定修改,选取籽粒饱满且大小一致的种子,用1%(*V/V*)次氯酸钠消毒15 min后播种于无菌蛭石中,在避光条件下进行催芽。出芽后将大豆幼苗转移至光照条件下培养,待大豆幼苗的第一片三出复叶完全展开后,选取长势一致的大豆植株转移到水中适应2 d,之后再转移到1/2 Hoagland营养液中适应培养2 d,而后将对照组用3/4 Hoagland营养液培养,将处理组转移至含有150 mmol·L^{-1}的3/4 Hoagland营养液中进行盐处理。每个处理设3个重复。每2 d更换1次营养液,光周期为13 h/ 11 h(光照 / 黑暗),光强600 μmol·m^{-2}·s^{-1},温度为25 ℃/18 ℃(昼/夜)。盐胁迫处理7 d后,从每个生物学重复中随机选取长势一致的幼苗进行叶片和根系指标的测定。

1.3 方法

1.3.1 叶片生理特性指标的测定 使用植物叶绿素多酚测量仪(奥地利PESSL公司,Dualex)测定叶片的氮平衡指数(nitrogen balance index, NBI)、叶绿素指数(chlorophyll, ChI)、类黄酮指数(flavonoid, Flav)、花青素指数(anthocyanin, Anth)。每株幼苗分别测定3片三出复叶,每片三出复叶测3次。

1.3.2 叶绿素荧光和多光谱荧光参数的测定 参考李帅[24]的方法。先将大豆幼苗置于黑暗中暗适应30 min,之后将大豆幼苗置于叶绿素荧光成像系统(捷克PSI植物表型研究公司,FluorCam FC800)内,对第一片三出复叶进行叶绿素荧光参数的测定,每个处理设置3个重复。对数据进行分析后得到暗适应下最小荧光(minimum fluorescence,Fo)、暗适应下最大荧光(maximal fluorescence,Fm)、最大光量子效率(maximal PSII quantum yield, Fv/Fm)、非光化荧光淬灭系数(non-photochemical quenching, NPQ)、光化学淬灭系数(photochemical quenching of PSII, qP)、荧光衰减率(fluorescence decrease ratio, Rfd)共6个指标,每个指标测定3次。

多光谱荧光参数测定:取大豆植株的第一片三出复叶,使用FluorCam FC800叶绿素荧光成像系统进行多光谱荧光参数的测定,每个处理设置3个重复。对数据进行分析后得到F_{440}与F_{520}、F_{690}与F_{740}、F_{440}/F_{690}、F_{440}/F_{740}共6个指标,每个指标测定3次。

1.3.3 根系形态特征参数测定 将植株的新鲜根系剪下之后,使用根系扫描仪(浙江托普云农科技股份有限公司,GXY-A)对根系形态特征进行扫描并储存,之后使用仪器配套的根系表型分析系统获取根总数(total root number,TRN)、根总长(total root length,TRL)、根尖数(root tip number,RTN)、根总表面积(total root surface area,TRSA)、根总体积(total root volume,TRV)5个根系表型指标,每个指标测定3次。

1.4 数据分析

计算各指标的相对值=盐处理测定值/对照测定值,后续在各指标前加字母R(relative)代表相对值,如相对暗适应下最小荧光(relative minimum fluorescence)即为RFo,其余指标以此类推。采用模糊隶属函数法对大豆苗期耐盐性进行综合评价。具体计算公式如下:

隶属函数值$\mu(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$

$i=1,2,3,\cdots n$

式中$\mu(X_i)$表示第i个综合指标的隶属函数值,X_i表示第i个综合指标值,X_{max}表示在i个综合指标中的最大值,X_{min}表示在i个综合指标中的最小值。

$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{m}Pi,i=1,2,3,\cdots,n$$

式中,W_i表示第i个综合指标在所有综合指标中所占权重,P_i表示材料对第i个综合指标的贡献率,$\sum_{i=1}^{m}Pi$为材料主成分的累计贡献率。

$$D=\sum_{i=1}^{m}[\mu(Xi)\times Wi],i=1,2,3,\cdots,n$$

式中,D表示各个材料耐盐水平的综合评价值。

使用Microsoft Excel 2021软件进行数据整理与处理;使用根系表型分析系统ScanWizard EZ软件对根系形态特征进行分析;使用FluorCam 7软件对拍摄的荧光图像与参数进行分析;使用SPSS 26.0软件对数据进行相关性分析、主成分分析、聚类分析和隶属函数分析。采用GraphPad Prism 8.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对大豆幼苗叶片光谱和荧光参数与根系形态特征的影响

对91份大豆种质的多光谱荧光参数、叶绿素荧光参数、叶片生理特性指标以及根系表型参数共21个指标进行分析(表1)。结果表明,RF_{440}/F_{740}的变化范围最大,为0.88~16.17;相对ChI的变化范围最小,为0.31~0.96。其中RFm、RFv/Fm、RqP、RRfd、R690、R740、RNBI、RChI、RTRN、RRTN、RTRL、RTRSA、RTRV共13个指标的平均值均小于1,表明这13个指标在盐处理后出现了下调;而RFo、RNPQ、RF_{440}、RF_{520}、RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}、RFlav、RAnth共8个指标平均值均大于1,表明盐处理后出现了不同程度的上调。各个指标的变异系数均较大,其中RF_{440}/F_{740}的变异系数最大,为69.27%;相对Flav的变异系数最小,为22.54%。

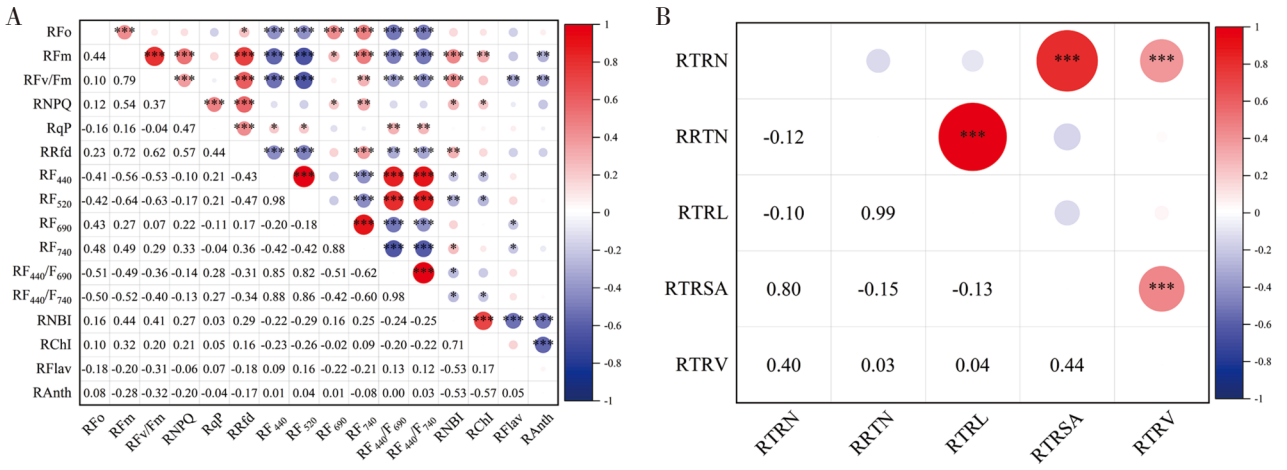
2.2 相关性分析

分别对叶片测得的16个指标和根系测得的5个指标进行相关性分析,结果表明,大部分性状之间呈显著($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$)。在叶片指标的相关性分析中RF_{440}与RF_{520}、RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}均呈极显著正相关;与RF_{740}、RFo、RFm、RFv/Fm、RRfd均呈极显著负相关,与RNPQ、RNBI、RChI呈显著负相关。RF_{520}与RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}均呈极显著正相关,与RF_{740}、RFo、RFm、RFv/Fm、RNPQ、RRfd、RNBI、均呈极显著负相关与RChI呈显著负相关。RF_{690}与RF_{740}、RFo、RFm呈极显著正相关;与RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}呈极显著负相关,与RFlav呈现显著负相关。RF_{740}与RFo、RFm、RFv/Fm、RRfd呈极显著正相关,与RNBI呈显著正相关;与RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}呈极显著负相关,与RFlav呈显著负相关。RF_{440}/F_{690}与RF_{440}/F_{740}呈极显著正相关,与RqP呈显著正相关;与RFo、RFm、RFv/Fm、RRfd均呈极显著负相关,与RNPQ、RNBI呈显著负相关。RF_{440}/F_{740}与RqP呈显著正相关;与RFo、RFm、RFv/Fm、RRfd均呈极显著负相关,RNPQ、RNBI、RChI呈显著负相关。RFo与RFm呈极显著正相关。RFm与RFv/Fm、RNBI、RChI呈极显著正相关,与RRfd呈显著正相关;与RAnth呈显著负相关。RFv/Fm与RNPQ、RRfd、RNBI呈极显著正相关;与RFlav、RAnth呈极显著负相关。RNPQ与RNBI呈极显著正相关,与RChI呈显著正相关。RqP与RRfd呈极显著正相关。RRfd与RNBI呈极显著正相关。RNBI与RFlav呈极显著正相关,与RAnth呈极显著负相关。RChI与RAnth呈极显著负相关(图1A)。在根系指标的相关性分析中,RTRN与RTRSA、RTRV之间,RRTN与RTRL之间,RTRSA与RTRV之间均呈极显著正相关(图1B)。

2.3 主成分分析

对叶片16个表型指标进行主成分分析,结果表明,前5个主成分的贡献率分别为38.78%、16.09%、11.00%、9.63%、7.75%,累积贡献率为83.25%,即可以解释83.25%的变量信息,因此选择前5个主成分代表叶片表型数据进行分析(表2)。

主成分1主要由叶绿素荧光指标RFo、RFm、RFv/Fm、RRfd以及多光谱荧光指标RF_{440}、RF_{520}、



注:A:叶片16个表型指标的相关性分析 B:根系5个表型指标的相关性分析;*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$

Note: A: correlation analysis of 16 leaf phenotypic traits B: correlation analysis of 5 root phenotypic traits; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$

图1 91份大豆种质叶片与根系表型指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of phenotypic traits in leaves and root systems of 91 soybean materials

表1 91份大豆材料叶片和根系各性状指标相对值的变异分析

Table 1 Variation analysis of relative values for various trait indices in leaves and roots of 91 soybean materials

性状 Trait	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数 CV /%
相对暗适应下最小荧光 RFo	0.34	1.95	1.61	1.07	0.29	0.08	26.87
相对暗适应下最大荧光 RFm	0.13	1.17	1.04	0.63	0.25	0.06	39.54
相对最大光量子效率 RFv/Fm	0.20	1.06	0.86	0.70	0.23	0.05	33.14
相对非光化荧光淬灭系数 RNPQ	0.26	2.15	1.89	1.00	0.47	0.22	46.82
相对光化学淬灭系数 RqP	0.28	1.62	1.34	0.79	0.28	0.08	35.24
相对荧光衰减率 RRfd	0.17	1.90	1.73	0.61	0.35	0.12	57.44
相对F_{440} RF_{440}	1.05	5.99	4.93	2.07	0.92	0.84	44.14
相对F_{520} RF_{520}	1.02	8.98	7.96	2.89	1.58	2.50	54.75
相对F_{690} RF_{690}	0.47	1.97	1.50	0.99	0.28	0.08	28.71
相对F_{740} RF_{740}	0.34	1.48	1.14	0.80	0.20	0.04	25.51
相对F_{440}/F_{690} RF440/690	0.72	11.62	10.90	2.32	1.45	2.10	62.41
相对F_{440}/F_{740} $RF_{440}/7_{40}$	0.88	16.17	15.29	2.94	2.04	4.14	69.27
相对氮平衡指数 RNBI	0.20	0.95	0.75	0.50	0.16	0.03	32.08
相对叶绿素指数 RChI	0.31	0.96	0.65	0.57	0.16	0.02	27.26
相对类黄酮指数 RFlav	0.64	2.03	1.39	1.19	0.27	0.07	22.54
相对花青素指数 RAnth	0.81	5.45	4.64	2.33	0.81	0.65	34.66
相对根总数 RTRN	0.14	0.93	0.79	0.64	0.17	0.03	26.80
相对根尖数 RRTN	0.27	1.10	0.83	0.69	0.18	0.03	25.80
相对根总长 RTRL	0.18	1.06	0.88	0.71	0.19	0.04	27.20
相对根总表面积 RTRSA	0.20	1.18	0.99	0.72	0.20	0.04	27.10
相对根总体积 RTRV	0.14	2.81	2.67	0.73	0.34	0.11	46.20

Note: RFo: relative minimum fluorescence; RFm: relative maximal fluorescence; RFv/Fm: relative maximal PSII quantum yield; RNPQ: relative non-photochemical quenching; RqP: photochemical quenching of PSII; RRfd: fluorescence decrease ratio; RF_{440}: relative F_{440}; RF_{520}: Relative F_{520}; RF_{690}: relative F_{690}; RF_{740}: Relative F_{740}; RF_{440}/F_{690}: relative F_{440}/F_{690}; RF_{440}/F_{740}: relative F_{440}/F_{740}; RTRN: relative total root number; RTRL: relative total root length; RRTN: relative root tip number; RTRSA: relative total root surface area; RTRV: relative total root volume; Same as below

RF_{740}、RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}共9个指标决定,其中RFo、RFm、RFv/Fm、RF_{740}对主成分1起正向贡献作用,其余为负向贡献作用。说明多光谱荧光与叶绿素荧光指标可以作为评价和鉴定大豆苗期叶片表型耐盐性的重要指标。主成分2主要描述了RNPQ、qP、RNBI、RAnth,其中叶绿素荧光参数可以作为主成分

1的补充,并且该主成分反映了叶片氮平衡指数、花青素含量在大豆苗期耐盐性鉴定中起到重要作用;主成分3主要由ChI决定;可作为主成分2中关于叶片生理指标的补充;主成分4主要由F_{690}决定,反映了多光谱荧光在大豆叶片响应盐胁迫中起到的关键作用;主成分5主要描述RFlav,可作为主成分2关于叶片物质含量部分的补充。

对根系5个表型指标进行主成分分析,结果如表3所示,前2个主成分的特征值分别为2.27与1.86,对应贡献率为45.45%、37.18%,累计贡献率为82.63%,即可以解释82.63%的变量信息,因此选择前2个主成分代表根系表型数据进行分析。主成分1主要由RTRN、RTRSA两个指标决定,说明相对根总数、相对根表面积可作为大豆苗期根系表型耐盐性鉴定与评价的主要指标。成分2主要由RRTN、RTRL、RTRV决定,反映了相对根尖数、相对根总长、相对根体积在大豆苗期根系表型耐盐性鉴定中的重要作用。

2.4 隶属函数分析

将91份大豆种质的叶片指标和根系指标分别进行隶属函数分析,计算出相应的隶属函数值和综合评价值*D*值,并分别根据*D*值大小对91份大豆种质进行排序(附表2,见首页OSID二维码)。*D*值代表该种质耐盐性强弱,*D*值越大即耐盐性越强,*D*值越小代表耐盐性越弱。

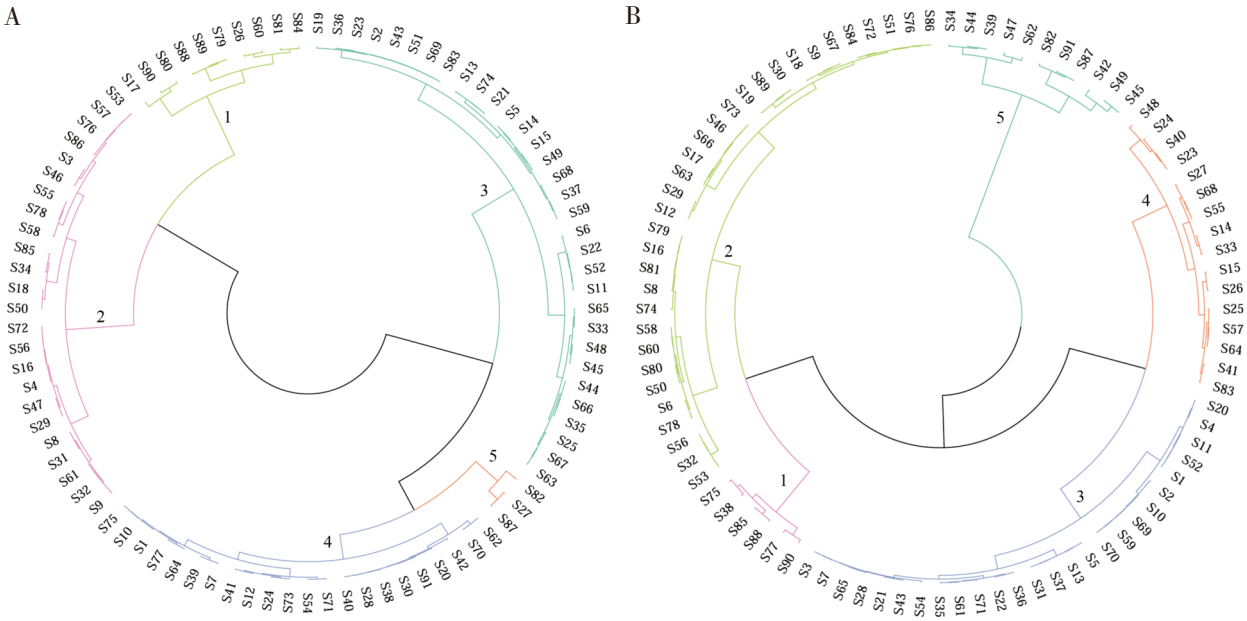
结合隶属函数分析可知,根据叶片的*D*值进行排序,筛选出耐盐性较强的10份材料分别为S89、S79、S88、S81、S84、S26、S60、S90、S80、S17,耐盐性较弱的10份材料为S82、S87、S27、S70、S62、S42、S30、S91、S40、S28。根据根系的*D*值进行排序,筛选出耐盐性较强的10份材料分别为S90、S77、S88、S85、S38、S75、S53、S32、S56、S78、S6;耐盐性较弱的10份材料为S87、S91、S82、S42、S45、S49、S39、S44、S34、S62。因此,根据叶片与根系表型共同鉴定得到耐盐较强的5份材料为S88、S90、S85、S79、S60;耐盐性较弱的5份材料为S82、S87、S91、S42、S62。

2.5 聚类分析

根据叶片与根系*D*值分别对91份大豆种质进行聚类分析,结果如下:根据叶片*D*值将91份大豆材料分为5类(图2A),分别是高度耐盐品种10份;耐盐品种24份;中度耐盐品种32份;盐敏感品种22份;高度敏感品种3份。根据根系*D*值将91份分为5类(图2B),分别是高度耐盐品种6份;耐盐品种32份;中度耐盐品种26份;盐敏感品种16份;高度敏感品种11份。

2.6 耐盐大豆S88与盐敏感大豆S82表型指标的比较

取在叶片指标与根系指标综合鉴定中排名靠前的耐盐材料S88品种和盐敏感材料S82两个极端材料进行各性状对比(图3、6),可以发现盐处理后S88大豆叶片只在叶片边缘出现了一定程度的黄化



注:A:根据叶片D值分为5类;B:根据根系D值分为5类

Note: A: 5 clusters according to D-value of leaf; B: 5 clusters according to D-value of root

图2 91份大豆种质聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis of salt tolerance in 91 soybean materials at the seedling stage

表2 91份大豆材料苗期叶片表型指标各主成分因子得分及贡献率

Table 2 Principal component scores and contribution rates of leaf phenotypic traits in 91 soybean materials at the seedling stage

性状 Trait	因子载荷 Factor loading				
	1	2	3	4	5
相对暗适应下最小荧光 RFo	0.56	−0.31	0.17	0.20	0.09
相对暗适应下最大荧光 RFm	0.82	0.33	0.13	−0.16	−0.06
相对最大光量子效率 RFv/Fm	0.69	0.34	−0.09	−0.26	−0.37
相对非光化荧光淬灭系数 RNPQ	0.42	0.54	0.46	−0.07	0.18
相对光化学淬灭系数 RqP	−0.08	0.61	0.52	−0.22	0.19
相对荧光衰减率 RRfd	0.64	0.43	0.35	−0.32	−0.07
相对F_{440} RF_{440}	−0.83	0.29	0.22	0.34	−0.01
相对F_{520} RF_{520}	−0.87	0.21	0.23	0.33	0.06
相对F_{690} RF_{690}	0.50	−0.28	0.46	0.58	0.16
相对F_{740} RF_{740}	0.70	−0.19	0.40	0.40	0.17
相对F_{440}/F_{690} RF_{440}/F_{690}	−0.84	0.42	0.09	0.01	−0.13
相对F_{440}/F_{740} RF_{440}/F_{740}	−0.86	0.39	0.13	0.09	−0.11
相对氮平衡指数 RNBI	0.51	0.51	−0.35	0.46	−0.17
相对叶绿素指数 RChI	0.37	0.47	−0.54	0.21	0.46
相对类黄酮指数 RFlav	−0.29	−0.09	−0.09	−0.39	0.82
相对花青素指数 RAnth	−0.24	−0.59	0.42	−0.31	−0.15
特征值 Eigenvalue	6.20	2.57	1.76	1.54	1.24
贡献率 Contribution rate /%	38.78	16.09	11.00	9.63	7.75
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	38.78	54.87	65.87	75.50	83.25

表3 大豆苗期根系表型指标各主成分因子得分及贡献率

Table 3 Principal component scores and contribution rates of root phenotypic traits in soybean at the seedling stage

性状 Trait	因子载荷 Factor loading	
	1	2
相对根总数 RTRN	0.76	0.48
相对根尖数 RRTN	−0.66	0.75
相对根总长 RTRL	−0.64	0.76
相对根总表面积 RTRSA	0.79	0.46
相对根总体积 RTRV	0.48	0.52
特征值 Eigenvalue	2.27	1.86
贡献率 Contribution rate /%	45.45	37.18
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	45.45	82.63

与萎缩现象,而S82大豆的整个叶片出现大面积黄化与枯萎表型(图3A)。在多光谱荧光参数方面,盐敏感品种S82的RF_{440}(2.32)、RF_{520}(4.83)远高于耐盐品种(RF_{440}为1.34,RF_{520}为1.20)。结合多光谱荧光成像图来看,盐处理后S82的F_{440}与F_{520}两种荧光强度出现了明显的上升(图3B、C)。同时S82的RF_{690}(0.72)与RF_{740}(0.50)显著低于S88(分别为1.05和0.97),体现在荧光成像图上则为S82的F_{690}、F_{740}两种荧光强度出现了较为明显的下降(图3D、E)。F_{440}/F_{690}与F_{440}/F_{740}两个指标的上升程度可以在一定程度上代表大豆叶片在受胁迫后的损伤程度[24-27],结合盐敏感品种S82的RF_{440}/F_{690}、RF_{440}/F_{740}比值显著高于耐盐品种S88(图3F、G),说明盐敏感品种S82在盐胁迫下的损伤程度明显大于耐盐品种S88。S88品种经过盐处理之后上述指标也出现变化,但总体来看各指标较为稳定。

在叶绿素荧光参数方面,盐处理后耐盐性较弱的S82品种的Fo、Fm、Fv/Fm、NPQ、qP、Rfd均出现了明显下降,结合叶绿素荧光图来看则体现为以上指标的荧光强度均出现明显下降(图4、6)。S88的Fv/Fm在盐处理后出现略微上升(0.93),而S82仅为0.42,表明盐胁迫严重损伤了S82光系统Ⅱ反应中心[28]。此外,S88的RFm(1.00)与RRfd(1.20)均处于较高水平,显示盐胁迫耐盐品种S88仍保持了较好的光合系统活性以及电子传递能力;相反盐敏感品种S82的RFm(0.53)与RRfd(0.22)极低,表明光合活性严重受损。同时S88的NPQ值出现了上升(1.08),表明该品种通过热耗散消耗过剩光



注:A:叶片RGB图像;B:F_{440}荧光图像;C:F_{520}荧光图像;D:F_{690}荧光图像;E:F_{740}荧光图像;F:F_{440}/F_{690}荧光图像;G:F_{440}/F_{740}荧光图像。标尺为4 cm

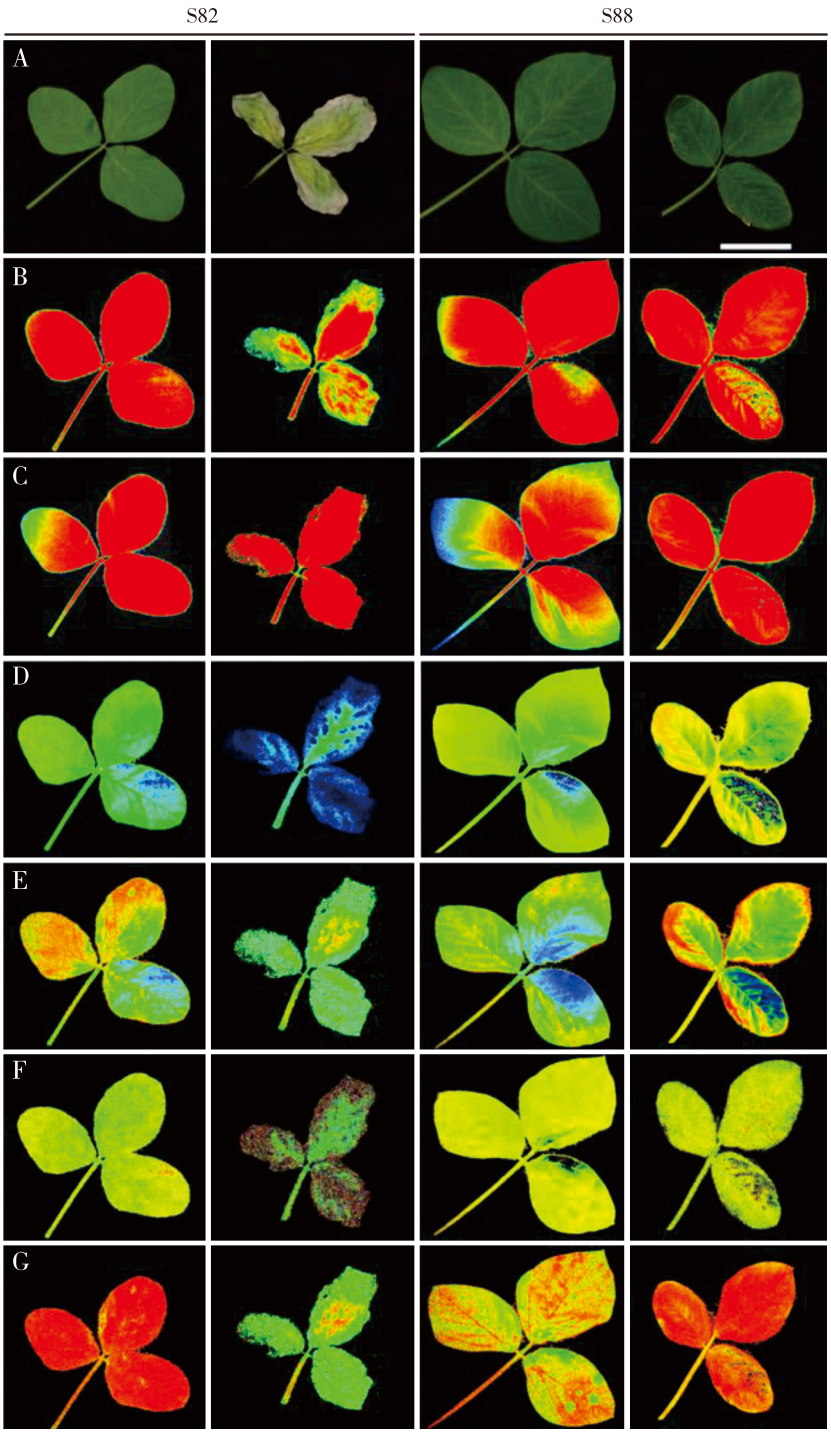
Note: A: leaf RGB image; B: F_{440} fluorescence image; C: F_{520} fluorescence image; D: F_{690} fluorescence image; E: F_{740} fluorescence image; F: F_{440}/F_{690} fluorescence image; G: F_{440}/F_{740} fluorescence image. Bar= 4 cm

图3 耐盐大豆S88与盐敏感大豆S82的叶片多光谱荧光成像

Fig. 3 Multispectral fluorescence imaging of leaves from salt-tolerant soybean S88 and salt-sensitive soybean S82

能的能力出现了明显的上升;而S82品种的RNPQ仅为0.34,即S82品种调节能力则出现了严重损伤[29]。

同时两品种在叶片生理指标中亦存在差异(图5、6):耐盐品种S88的RNBI(0.74)与RChI(0.96)均显著高于盐敏感品种(分别为0.26和0.32),该结果说明S88在盐胁迫之下能更好地维持氮代谢平衡与叶绿素含量。而类黄酮、花青素含量则出现了相反



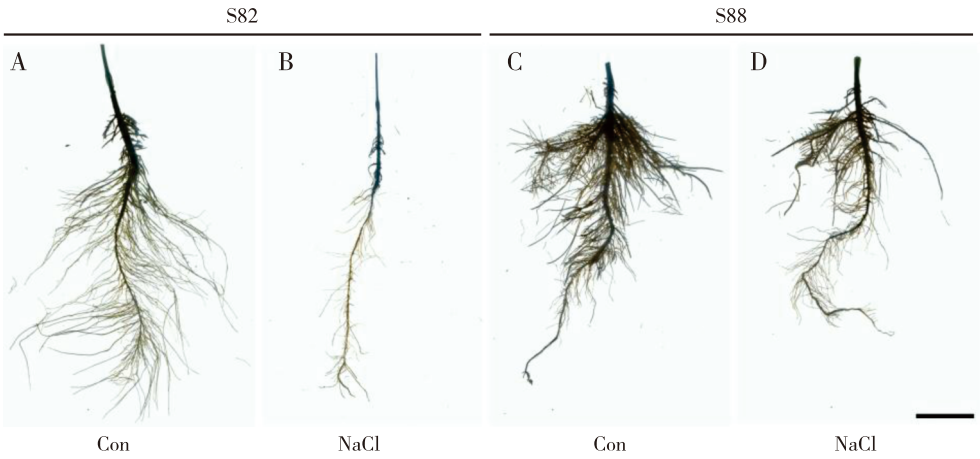
注:A:叶片RGB图像;B:Fm荧光图像;C:Fo荧光图像;D:Fv/Fm荧光图像;E:NPQ荧光图像;F:qP荧光图像;G:Rfd荧光图像。标尺为4 cm

Note: A: leaf RGB image; B: Fm fluorescence image; C: Fo fluorescence image; D: Fv/Fm fluorescence image; E: NPQ fluorescence image; F: qP fluorescence image; G: Rfd fluorescence image. Bar= 4 cm

图4 耐盐大豆S88与盐敏感大豆S82的叶片叶绿素荧光成像

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence imaging of leaves from salt-tolerant soybean S88 and salt-sensitive soybean S82

的趋势:即盐敏感S82进行了花青素(5.45)的积累,花青素作为抗氧化物质的一种,能帮助植物清除可能会造成氧化损伤的活性氧[30],而S88的RAnth则相对保持平衡状态(0.81)。根系形态指标鉴定中也得到了类似的结果:S88品种的所有根系指标相对值均接近或大于1,说明该品种在盐胁迫下仍能维持相对正常的根系生长;而S82的所有根系指标相对值均小于1,其中RTRV(0.14)、RTRSA(0.21)、RTRN(0.25)更是出现了显著的下降,表明盐胁迫严重抑制了S82的根系正常发育[31]。

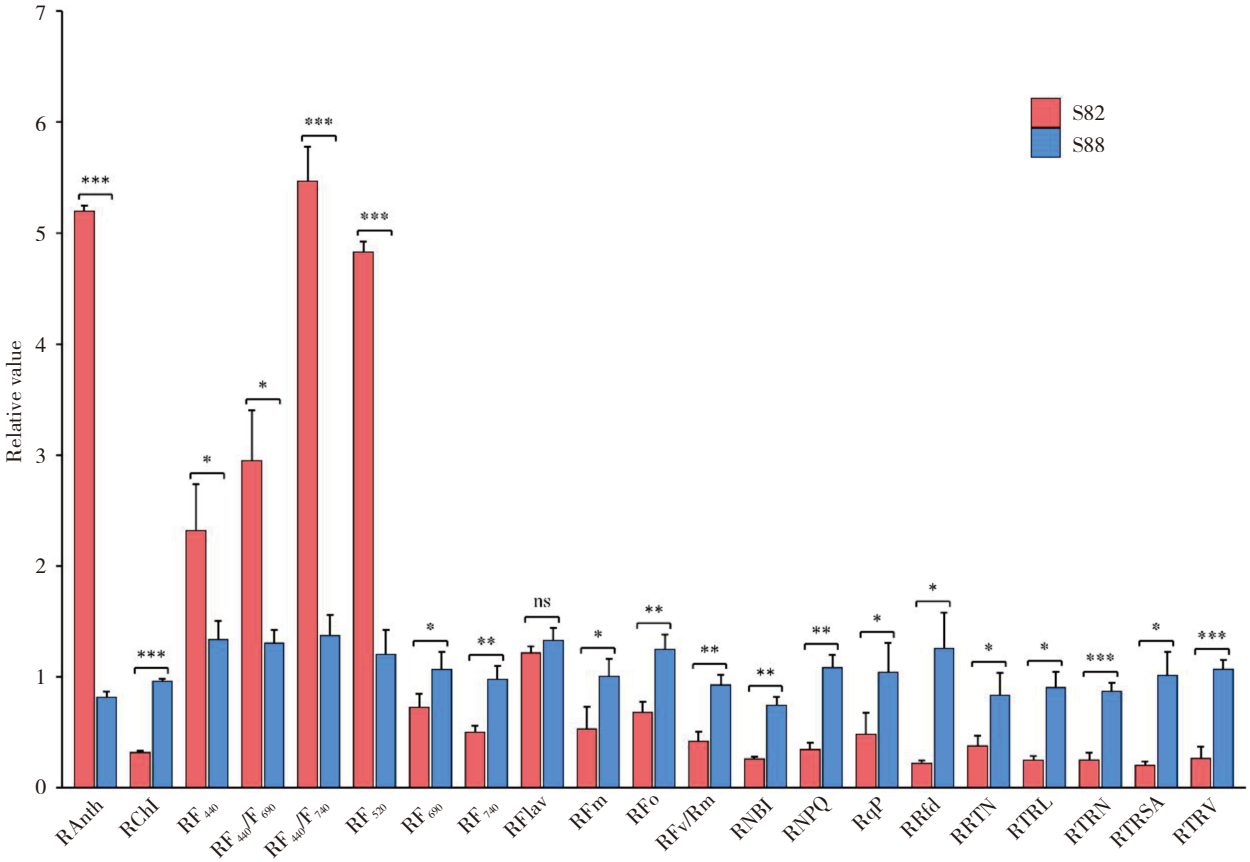


注:A:S82对照组;B:S82盐处理组;C:S88对照组D:S88盐处理组。标尺为5 cm

Note: A: S82 control group; B: S82 salt-treated group; C: S88 control group; D: S88 salt-treated group. Bar= 5 cm

图5 耐盐大豆S88与盐敏感大豆S82的根系形态

Fig. 5 Root system morphology of salt-tolerant soybean S88 and salt-sensitive soybean S82



注:RFo:相对暗适应下最小荧光;RFm:相对暗适应下最大荧光;RFv/Fm:相对最大光量子效率;RNPQ:相对非光化学荧光淬灭系数;RqP:相对光化学淬灭系数;RRfd:相对荧光衰减率;RF_{440}:相对F_{440};RF_{520}:相对F_{520};RF_{690}:相对F_{690};RF_{740}:相对F_{740};RF_{440}/F_{690}:相对F_{440}/F_{690};RF_{440}/F_{740}:相对F_{440}/F_{740};RNBI:相对氮平衡指数;RChI:相对叶绿素指数;RFlav:相对类黄酮指数;RAnth:相对花青素指数;RTRN:相对根总数;RRTN:相对根尖数;RTRL:相对根总长;RTRSA:相对根总表面积;RTRV:相对根总体积。***为$p<0.001$,**为$p<0.01$,*为$p<0.05$。

Note: RFo: Relative minimum fluorescence; RFm: Relative maximal fluorescence; RFv/Fm: Relative maximal PSII quantum yield; RNPQ: Relative non-photochemical quenching; RqP: photochemical quenching of PSII; RRfd: fluorescence decrease ratio; RF_{440}: Relative F_{440}; RF_{520}: Relative F_{520}; RF_{690}: Relative F_{690}; RF_{740}: Relative F_{740}; RF_{440}/F_{690}: Relative F_{440}/F_{690}; RF_{440}/F_{740}: Relative F_{440}/F_{740}; RTRN: Relative total root number; RTRL: Relative total root length; RRTN: Relative root tip number; RTRSA: Relative total root surface area; RTRV: Relative total root volume. ***: $p<0.001$, **: $p<0.01$, *: $p<0.05$.

图6 耐盐大豆S88与盐敏感大豆S82的各指标对比

Fig. 6 Comparison of indicators between salt-tolerant soybean S88 and salt-sensitive soybean S82

3 讨论与结论

基于我国广大面积的盐碱地已成为限制农业生产潜力的重要因素这一现状,对如大豆等本身即具有一定耐盐性的作物进行筛选、选育耐盐种质对于有效利用盐碱地资源具有重大意义[25]。然而实现大豆耐盐种质资源的精准高效鉴定并非易事。大量研究表明,大豆在不同的生长发育阶段(如萌发期、苗期等)对盐胁迫的响应可能存在显著差异,如某些在萌发期表现为耐盐的种质,其苗期耐盐性并不突出[2,26]。同时传统的单一鉴定方法或指标往往难以全面真实地反映某一大豆种质的耐盐能力。因此,要想实现对大豆种质资源进行高效精准的耐盐性鉴定,关键在于建立一套与目标生长发育阶段相适应,明确胁迫强度与胁迫时期,兼具可靠性与可操作性的表型筛选指标与标准化评价体系。

目前在大豆耐盐性鉴定方面已经有许多相关研究工作,但目前研究的指标主要集中在植株生长指标与农艺性状,比如株高、根长、根干重与鲜重、主茎节数等,如袁宇婷等[2]在100 mmol·L^{-1} NaCl处理下对大豆幼苗的SPAD值、株高、根长、地上部鲜重、鲜重、地上部干重、根干重进行了综合评价,发现地上部鲜重、根长、根干重、SPAD值可用于大豆苗期耐盐性的评估。姚梦楠等[9]在中盐度和低盐度两种不同生长条件下对大豆的株高、主茎节数、单株有效荚数、底荚高、有效分枝数、产量共6个指标进行了包括隶属函数分析在内的综合评价,发现产量、有效分枝数和主茎节数可作为衡量大豆耐盐性的主要指标。韩岱等[13]在1.5% NaCl模拟盐胁迫的环境下进行了大豆苗期耐盐性综合评价,测定了株高、茎节数、茎秆直径、分枝数、叶柄长度、叶长、叶宽、地上部鲜重、地上部干重共9个指标,最终发现地上部分干重、叶长、分枝数可作为大豆耐盐性评价与筛选的重要指标。王莉等[10]分别在150 mmol·L^{-1} NaCl、200 mmol·L^{-1} NaCl下对萌发期和苗期进行了盐处理,测定了地上部鲜重和干重、地下部鲜重和干重、全株干重、全株鲜重、地下含水量、地上含水量、根冠比、苗高10个指标最终筛选出全株干重、全株鲜重、根冠比、苗高、地上含水量、地下部鲜重6个指标可以作为萌发期耐盐评价指标。孟然等[11]先使用1.5% NaCl浓度下模拟盐胁迫环境,测定了大豆苗期的株高、SPAD值、叶面积、地上部与地下部的鲜重与干重、MDA含量、PRO含量以及SOD活性共10个指标;之后还在0.9% NaCl胁迫下对大豆全生育期的株高、主茎节数、底荚高度、有效分枝、单株粒数、单株荚数、单株粒重与百粒重共8个指标进行了综合分析,最终发现植株的叶面积、株高、SPAD、地下部分鲜重、地下部分干重、相对PRO含量以及SOD活性这7个指标可用于筛选大豆苗期耐盐性;全生育期耐盐性则可以用相对株高、相对单株数、相对单株粒重来衡量与鉴定。

以上侧重于农艺性状的指标不仅对植株本身具有一定的破坏性,如根干重与鲜重需要将植株根部剪断并且进行烘干,后续很难再衔接其他试验操作;因此,类似的一次性检测方法难以展示植株受胁迫时相关鉴定指标的动态变化过程;而如果是采取同一批次的其他植株进行另外指标鉴定则可能因不同植株间存在的差异而对结果产生干扰。此外大多农艺性状检测指标所需周期长、费时费力,在面对大批量试验材料的时候难以高效而精准的完成。

现代高效的植物表型鉴定技术因其高通量、无损化等优点现已成为作物生长检测与生理生化指标测定的重要工具。本文所使用的叶绿素荧光技术能无损化地检测盐胁迫条件下叶片光合系统Ⅱ的电子传递速率等信息,进而反映盐胁迫对光合系统的损伤程度[32];多光谱荧光技术同样作为无损的指标检测方法,可以测量植物叶片被不同波长的光激发后发射出的不同荧光信号强度(如F_{440}、F_{520}等),进而反映叶片次生代谢产物以及胁迫相关的化合物变化[33]。根系作为直接感知土壤环境变化的器官,在受胁迫后的长度、根尖数、表面积等形态特征的变化程度可以作为评价植株耐盐能力的重要指标[34,35]。随着全球盐渍化土壤面积扩大与我国大豆需求日益增长,利用高效的植物表型鉴定技术来快速筛选耐盐大豆新品种变得尤为迫切。

与袁宇婷通过对大豆苗期进行农艺性状耐盐性鉴定筛选出的前10份材料[2]相比,本文根据叶片与根系表型共同鉴定得到耐盐性较强的5份材料中有4份材料表现出相似的耐盐性,分别为S88(南通矮脚黄)、S90(贡豆19)、S85(徐8107)、S79(铜山西皮),表明以上4份大豆材料其耐盐性在农艺性状与叶片和根系表型中均有体现,而S60(新沂大白皮)在前人的研究中并未表现出较强的耐盐性(耐盐等级归为2级),该结果可能与通过农艺性状指标进行耐盐性鉴定和通过叶片和根系表型指标进行鉴定所展示出的耐盐性不完全一致有关。耐盐性较弱的大豆材料也出现了两次耐盐性鉴定不完全一致的情况,袁宇婷鉴定出的10份苗期耐盐性较弱的大

豆材料中,本文鉴定出的S82(镇江斜角豆)、S87(崇明大豆)、S91(ZDD 4533)3份材料与前人研究结果相重合,而S42(铜山小平顶五)、S62(新沂土浣)与先前研究结果存在差异。以上结果表明农艺性状与本文所使用的基于叶片和根系表型鉴定的方法可在一定程度上相互印证、互为补充,从而进一步增强耐盐性鉴定结果的可靠性。评价结果发现同一材料在叶片指标和根系指标各自评价中的排序并不一致,如S90在根系排名第1,但叶片排名第8;而S89在叶片排名第1,根系中仅排名第22;同时也发现S79、S88等材料在两种指标排名均靠前,且表现出较为均衡的综合耐盐性。这种叶片与根系排序不一致的情况可能说明大豆对盐胁迫的响应在地上部(叶片)和地下部(根系)中分别存在相对独立但存在一定联系的调控机制,对于大豆植株的耐盐性鉴定需要结合地上部和地下部一起来分析,即应从多个不同方面的指标入手进行联合分析,以期获得可靠的耐盐性鉴定结果。

盐处理后,盐敏感品种S82代表次生代谢产物含量的F_{440}与F_{520}两种荧光强度出现了明显升高(图3、6),并且叶片生理指标中的类黄酮与花青素等次生代谢产物含量的上升也印证了这一结论。花青素等物质可以作为抗氧化剂来清除因盐胁迫而产生的大量活性氧,表明S82曾通过上调次生代谢产物来抵御盐胁迫带来的损害。与此同时代表叶绿素含量的F_{690}与F_{740}的大幅度下降与能代表植物受胁迫损伤程度的F_{440}/F_{690}、F_{440}/F_{740}的大幅上升均表明S82品种受到盐胁迫的严重损伤。结合叶绿素荧光参数(图4、6),S82品种的代表光合活性与光合结构完整性的相关参数均出现明显下降,进一步印证了盐胁迫对于该品种的严重损伤;而耐盐性较强的S88品种的以上参数大多保持稳定,同时通过热耗散形式消耗多余光能的能力(NPQ)还有所上升,表明盐胁迫未对该品种造成严重损伤。综合叶片荧光指标、生理指标以及根系指标来看,耐盐品种S88通过维持稳定的光保护机制、光合系统活性与完整的光合系统结构、较好的氮平衡代谢能力,稳定的次生代谢产物含量以及较为完整且功能良好的根系形态而实现了在盐胁迫下相对稳定的生长。从指标数据来看即体现为Fv/Fm、NPQ、Rfd等叶绿素荧光参数在盐处理之后相比于对照组未出现大幅度下降,代表植物防御相关的次生代谢产物的多光谱荧光指标F_{440}、F_{520}[36]与代表植株受胁迫损伤程度的F_{440}/F_{690}、F_{440}/F_{740}相比于对照组未出现显著上升,代表叶绿素含量的F_{690}、F_{740}与对照组相比未出现显著降低。叶片生理指标方面,代表氮代谢能力的NBI,代表叶绿素含量的ChI与对照组相比无大幅降低,代表类黄酮与花青素含量的Flav与Anth与对照组相比未见大幅上升。根系指标则体现为相关参数保持稳定,相比对照组未出现显著减少。而盐敏感品种S82则因光合结构受损、光保护机制损伤、氮平衡代谢失衡、可能由氧化胁迫而引起的花青素大量积累以及受盐胁迫影响而发育不良的根系结构而导致植株整体生理功能的严重损伤[37]。两品种在叶片与根系指标方面存在的巨大差异可作为大豆相关指标耐盐性鉴定的重要参考,并可用于大豆耐盐性的快速鉴定与材料筛选。

通过本研究发现91份大豆种质的耐盐性具有较丰富的变异,并且叶片光谱和荧光参数之间、根系形态特征参数之间分别具有不同程度的相关性。通过主成分分析和隶属函数分析,筛选出耐盐较强的材料5份,分别为S88(南通矮脚黄)、S90(贡豆19)、S85(徐8107)、S79(铜山西皮)、S60(新沂大白皮)。本研究揭示了将叶片光谱、荧光参数和根系形态特征参数相结合筛选耐盐大豆种质的可行性,筛选出的耐盐种质为耐盐大豆新品种的选育提供了材料基础。

参考文献:

[1] Zhang M X, Bai R, Nan M, et al. Evaluation of salt tolerance of oat cultivars and the mechanism of adaptation to salinity[J]. J Plant Physiol, 2022, 273: 153708. DOI:10.1016/j.jplph.2022.153708.

[2] 袁宇婷, 张晓燕, 吴谷丰, 等. 基于主成分和隶属函数分析的大豆种质资源耐盐性综合评价[J]. 大豆科学, 2025, 44(1): 22-32.

[3] Bhandari S R, Kim Y H, Lee J G. Detection of temperature stress using chlorophyll fluorescence parameters and stress-related chlorophyll and proline content in paprika (*Capsicum annuum* L.) seedlings[J]. Hortic Sci Technol, 2018, 36(5): 619-629. DOI:10.12972/kjhst.20180062.

[4] Zhao S S, Zhang Q K, Liu M Y, et al. Regulation of plant responses to salt stress[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(9): 4609. DOI:10.3390/ijms22094609.

[5] 刘俊峰, 郭诗梦, 孙杰, 等. 水稻对盐碱胁迫的响应及其调控措施研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(18): 28-34. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.004.

[6] 吕航, 赵月, 龚绪龙, 等. 我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 25-43. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.004. DOI:

10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202407052.
[7] 张兆宁, 李江辉, 赵怡宇, 等. 不同程度盐胁迫下大豆萌发期耐盐性鉴定[J]. 大豆科学, 2023, 42(3): 335-343.
[8] 高慧芳, 朱振荣. 我国大豆贸易的问题研究及对策建议[J]. 黑龙江粮食, 2024(2): 16-18.
[9] 姚梦楠, 王永强, 周恩强, 等. 86份大豆种质成熟期耐盐性评价[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(7): 59-67. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2025.07.008.
[10] 王莉, 张丽蓉, 曹金龙, 等. 西北地区大豆耐盐种质资源的筛选与综合评价[J/OL]. 中国油料作物学报, 1-9[2025-12-30]. DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2025103.
[11] 孟然, 李赵嘉, 冯薇, 等. 大豆不同生育时期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选[J]. 作物学报, 2025, 51(8): 1991-2008.
[12] 林峰,赵慧艳,史飞飞,等.大豆种质资源苗期耐盐鉴定及遗传多样性分析[J].植物遗传资源学报,2024,25(6):945-956. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.20231128003.
[13] 韩岱, 时晓磊, 丁孙磊, 等. 60份大豆种质资源苗期耐盐性鉴定评价[J]. 大豆科学, 2023, 42(4): 494-505.
[14] 杜若楠, 张睿, 唐晓东, 等. 盐胁迫下国内外333份大豆种质资源的种子萌发特性及耐盐性评价[J]. 大豆科学, 2025, 44(4): 59-65.
[15] 陈程程, 吴佳平, 于合龙. 光智农业数据感知技术的前沿进展与发展趋势——从光学传感器到智能决策系统[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(5): 1-16.
[16] 董贞芬,门宇恒,邹秋滢,等.叶绿素荧光成像在植物生长环境胁迫中的应用[J].沈阳农业大学学报,2019,50(2):250-256.
[17] Montero R, Pérez-Bueno M L, Barón M, et al. Alterations in primary and secondary metabolism in *Vitis vinifera* 'Malvasía de Banyalbufar' upon infection with Grapevine leafroll-associated virus 3[J]. Physiol Plant, 2016, 157(4): 442-52. DOI:10.1111/ppl.12440.
[18] 姚洁妮. 基于叶绿素荧光动力学和多光谱荧光成像的拟南芥干旱胁迫响应表型分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
[19] 魏子朝, 卢苗, 雷文晔, 等. 一种融合叶绿素荧光技术与可见-近红外光谱的番茄幼苗热胁迫无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(6): 1613-1619.
[20] 李灵慧, 吴然然, 陈景斌, 等. 绿豆对尾孢菌叶斑病的生理生化响应及病害早期检测[J]. 上海农业学报, 2022, 38(6): 9-14. DOI: 10.15955/j.issn1000-3924.2022.06.02.
[21] 何太平, 李玥炯, 胡学礼, 等. 金沙江干热河谷生境干湿季4种兰科植物叶绿素荧光特性差异分析[J]. 山东农业科学, 2025, 57(1): 68-73. DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2025.01.009.
[22] 刘光宇, 关荣霞, 常汝镇, 等. 大豆不同器官Na^+含量与苗期耐盐性的相关分析[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1266-1273.
[23] 周秀文, 张晓蕊, 孙贺祥, 等. 大豆种质萌发期和苗期耐盐性评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(3): 257-264.
[24] 李帅. 叶绿素荧光与多光谱荧光成像技术在绿豆盐胁迫表型分析中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. DOI: 10.27244/d.cnki.gnjnu.2020.000970.
[25] 王春雨, 朱冠雄, 田艺心, 等. 大豆耐盐碱生理机制及种质筛选研究进展[J]. 大豆科学, 2024, 43(1): 107-113.
[26] Guan R X, Guo X Y, Qu Y, et al. Salt tolerance in soybeans: focus on screening methods and genetics[J]. Plants, 2024, 13(1): 97. DOI:10.3390/plants13010097.
[27] 袁宇婷. 大豆耐盐种质资源筛选及耐盐机理的初步探究[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
[28] 孙芹, 徐学欣, 邓肖, 等. 盐胁迫对小麦苗期荧光特性的影响及综合评价[J]. 农学学报, 2022, 12(6): 5-13.
[29] 佘汉基, 李鹏飞, 薛立, 等. 3种园林植物响应盐胁迫的荧光特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(8): 54-59. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.08.010.
[30] Li C J, Shi L, Li X, et al. ECAP is a key negative regulator mediating different pathways to modulate salt stress-induced anthocyanin biosynthesis in *Arabidopsis*[J]. New Phytol, 2022, 233(5): 2216-2231. DOI: 10.1111/nph.17937.
[31] 金洁. 大豆盐胁迫响应的生理及分子机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
[32] 许基磊, 汪兴中, 范吉标. 盐胁迫诱导野大豆生理和光合作用的变化[J]. 植物科学学报, 2022, 40(6): 829-838.
[33] Lichtenthaler H K. Multi-colour fluorescence imaging of photosynthetic activity and plant stress[J]. Photosynthetica, 2021, 59: 364-380. DOI:10.32615/ps.2021.020.
[34] 石广成, 杨万明, 杜维俊, 等. 大豆耐盐种质的筛选及其耐盐生理特性分析[J]. 生物技术通报, 2022, 38(4): 174-183. DOI: 10.13560/j. cnki. biotech. bull.1985.2021-0843.
[35] 刘莹. 大豆根区逆境耐性的鉴定和相关根系性状的遗传分析与QTL定位[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
[36] Barón M, Pineda M, Pérez-Bueno M L. Picturing pathogen infection in plants[J]. Z Für Naturforschung C, 2016, 71(9/10): 355-368. DOI:10.1515/znc-2016-0134.
[37] 黄琼. 盐胁迫对栽培大豆和野生大豆及其杂交后代幼苗的生理效应比较[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.

(责任编辑:郭学兰)