文章编号:1000-7601(2025)06-0012-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.02

陆地棉萌发期和三叶期耐复合盐种质筛选与鉴定

罗西衡[1],张 彤[1],吴彦卿[1],王培岩[1],田子怡[1],唐 清[1],刘 娇[2],杨延龙[3],韩焕勇[4],雷长英[1],贺道华[1]

(1.西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100; 2.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830091; 3.新疆农业科学院经济作物研究所,新疆 乌鲁木齐 830091; 4.新疆农垦科学院棉花研究所,新疆 石河子 832099)

摘 要:为筛选棉花耐复合盐种质资源,以 166 份棉花种质为试验材料,设置 0.15 mol·L^{-1}和 0.30 mol·L^{-1}复合盐浓度梯度进行胁迫试验。萌发期通过综合排序和模糊隶属函数对种质进行评价,筛选出萌发期耐复合盐品种;将所筛选品种与对照材料'中 9807'、'西农 606'培养至三叶期,在复合盐胁迫下测定叶片形态、叶绿素相对含量、气体交换参数及叶绿素荧光参数,进一步鉴定其耐盐性。结果表明:0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫下大部分材料种子萌发与胚根生长受到明显抑制,发芽势、发芽率、发芽指数、鲜质量、胚根长度较对照组分别下降 72.558%、63.542%、74.737%、52.790%、17.080%,而通过发芽率、鲜质量、胚根长度筛选的 32 份棉花种质萌发过程所受的抑制作用较弱;0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐对棉花种子生长萌发抑制作用明显大于 0.15 mol·L^{-1}浓度,5 个性状较 0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐处理组分别下降 96.247%、90.909%、95.389%、98.097%、97.602%。通过综合评价最终从 32 份棉花种质中筛选出耐盐品种'德 93-04'(编号 X170743)与'4SA-805'(编号 X170523)。三叶期试验表明,品种'德 93-04'、'4SA-805'较对照品种在高浓度复合盐胁迫下仍保持较大叶面积和较强光合能力,印证了两品种在三叶期同样具有较强复合盐耐性。

关键词:陆地棉;种质;复合盐胁迫;萌发期;三叶期

中图分类号:S562 **文献标志码**:A

Screening and identification of upland cotton germplasm with tolerance to compound salt stress at germination and three-leaf stages

LUO Xiheng[1], ZHANG Tong[1], WU Yanqing[1], WANG Peiyan[1], TIAN Ziyi[1], TANG Qing[1], LIU Jiao[2], YANG Yanlong[3], HAN Huanyong[4], LEI Zhangying[1], HE Daohua[1]

(1. *College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Saline-Alkali Land in Arid and Semi-Arid Regions) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumuqi, Xinjiang* 830091, *China*; 3. *Institute of Cash Crop Research, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumuqi, Xinjiang* 830091, *China*; 4. *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science Cotton Research Institute, Shihezi, Xinjiang* 832099, *China*)

Abstract: To screen for cotton genotypes with tolerance to composite salt stress, 166 cotton genotypes were used as experimental materials and subjected to compound salt stress at concentrations of 0.15 mol·L^{-1} and 0.30 mol·L^{-1}. During the germination stage, genotypes were evaluated using comprehensive ranking and fuzzy membership function methods to identify those with greater tolerance. The selected genotypes, along with the control varie-

收稿日期:2025-03-16 **修回日期**:2025-05-23

项目基金:农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室开放基金(YJDKFJJ202403);新疆生产建设兵团自然科学支持计划创新团队项目(2025DB012);新疆维吾尔自治区科学技术厅天山英才培养计划项目(2022TSYCLJ0039);国家自然科学基金项目(32301956)

作者简介:罗西衡(2004-),男,陕西汉中人,本科生,研究方向为棉花耐盐生理和分子机制。E-mail: avasanluo@163.com

通信作者:贺道华(1975-),男,湖北随州人,副教授,主要从事棉花分子遗传与育种研究。E-mail: daohuahe@nwafu.edu.cn

雷长英(1991-),男,陕西麟游人,讲师,主要从事棉花生理和分子机制研究。E-mail: leizhangying@nwafu.edu.cn

ties ‘Zhong 9807’ (salt-tolerant) and ‘Xinong 606’ (salt-sensitive), were grown to the three-leaf stage and subjected to compound salt stress. The measurements of leaf morphology, relative chlorophyll content, gas exchange parameters, and chlorophyll fluorescence were conducted to further assess their tolerance. The results showed that seed germination and embryo root growth were significantly inhibited under 0.15 mol · L^{-1} compound salt-alkali stress in most genotypes. Specifically, the germination vigor, germination rate, germination index, fresh weight, and embryo root length decreased by 72.558%, 63.542%, 74.737%, 52.790%, and 17.080%, respectively, compared with the control group treated with distilled water. However, 32 genotypes screened using germination traits showed relatively mild inhibition. At 0.30 mol · L^{-1} concentration, the inhibitory effects were significantly greater than those observed at 0.15 mol · L^{-1}, with five measured traits showing reductions of 96.247%, 90.909%, 95.389%, 98.097%, and 97.602%, respectively. Through comprehensive evaluation, two compound salt-tolerant genotypes, ‘De 93-04’ (ID: X170743) and ‘4SA-805’ (ID: X170523), were ultimately identified. Three-leaf stage evaluations confirmed that these two genotypes maintained larger leaf areas and higher photosynthetic activity than the controls under high-concentration composite salt stress, indicating their strong tolerance at the seedling stage.

Keywords: upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.); germplasm; compound salt stress; germination stage; three-leaf stage

棉花(*Gossypium hirsutum* L.)是我国重要的经济作物,也是产业链延伸最长的农产品[1]。棉花相较于其他作物具有一定耐盐性,是盐碱地开垦种植的先锋作物[2]。随着耕地面积减少,我国棉花生产正逐渐向盐碱地集中[3],选用耐盐棉花品种是提升盐碱地棉花生产潜力和稳产性的有效措施之一。

不同生育期棉花耐盐性可能不同,其中萌发出苗和幼苗阶段是棉花耐盐性筛选的关键时期[4]。由于不同生育时期对盐胁迫响应机理不同,棉花萌发期与三叶期的耐盐性并没有一定的相关性[5]。萌发期耐盐性强的棉花品种,其三叶期耐盐性并不确定。三叶期是棉花盐敏感时期,对该时期棉花幼苗进行盐胁迫处理能反映棉花品种在整个幼苗期的耐盐性[6]。三叶期具有较好耐盐性的棉花品种,若在萌发期耐盐性较差,则很难应用于盐碱地种植。所以在棉花耐盐种质筛选过程中,应综合考虑棉花品种在萌发期与三叶期的耐盐情况,才能选出适应盐碱地的优良品种。

棉花的盐害机理较为复杂,盐碱地的盐分组成通常是多样的,土壤中不同化合物对植物造成盐害的机制也各不相同[7],同时盐胁迫条件下不同品种棉花生理和生物化学响应也存在差异[8]。李昊旻等[9]使用人工海水与 NaCl 对低酚棉种质系进行耐盐性鉴定,证明两种盐胁迫鉴定结果存在较大差异;李双男等[10]采用不同类型的盐碱溶液在棉花种子萌发阶段进行耐盐性鉴定,发现棉花种子在复合盐碱条件下的发芽势和发芽率下降幅度大于中性盐 Na_2SO_4 和 NaCl 处理;许艳超等[11]采用与新疆次生盐碱地盐分组成相似的复合盐对半野生棉进行苗期耐盐性鉴定,发现复合盐与 NaCl 胁迫下的幼苗表现有所不同。简而言之,单一盐胁迫处理耐性鉴定与含有多种盐分的复合盐耐性鉴定存在一定差异。

本研究采用复合盐溶液模拟盐胁迫,对棉花萌发期及三叶期进行耐复合盐胁迫种质鉴定。用0.15 mol · L^{-1}复合盐溶液对 166 份棉花种质进行萌发期胁迫处理,对发芽率、鲜质量和胚根长度进行综合排序,筛选出在 0.15 mol · L^{-1}复合盐胁迫下生长表现良好的棉花品种;对初步筛选的耐盐品种用 0.30 mol · L^{-1}复合盐溶液进行胁迫处理,通过主成分分析和模糊隶属函数等方法对这些棉花种质耐盐性进行综合评价,进一步确定在萌发期具有较好复合盐耐性的棉花品种,三叶期测定盐胁迫下棉花幼苗叶片气体交换参数、叶绿素荧光参数和叶绿素相对含量等指标,进而验证萌发期所选棉花品种耐盐性,筛选适合盐碱地种植的棉花品种。旨为后续挖掘棉花耐复合盐基因以及耐复合盐机理研究提供材料。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2023 年在西北农林科技大学进行。试验鉴定材料共 166 份,均由西北农林科技大学棉花实验室提供,166 份棉花种质包括了来自新疆、黄河和长江流域棉区的 31 份陆地棉品种及 135 份陆地棉品系(即未进行审定、推广种植的陆地棉材料)。试验选择的复合盐溶液配方来源于具有代表性的新疆库尔勒农二师 29 团次生盐碱地土样的离子含量,表 1 中给出了在 0.15、0.30 mol · L^{-1}两种浓度梯度下土壤中的化合物含量[12]。

表1 两种浓度梯度下1 L复合盐溶液所含化合物质量

Table 1 Mass of compounds in 1 L compound salt-alkali solution at two concentration gradients

化合物 Compound	1 L水中所含化合物质量/g Mass of compounds in 1 L of water	
	0.15 mol·L^{-1}	0.30 mol·L^{-1}
$CaCl_2$	5.384	10.767
$NaHCO_3$	0.361	0.722
Na_2SO_4	10.018	20.036
K_2SO_4	0.845	1.690
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	7.171	14.342

1.2 试验设计

将从166份棉花种质中挑选的饱满棉花种子在15% H_2O_2 中浸泡4 h进行消毒处理,用无菌水清洗后晾干。每组40粒采用双层滤纸法[2]进行发芽试验。166份棉花品种萌发期试验设置对照处理与0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐处理,每个处理设置3个重复。培养皿放置在人工恒温培养箱中黑暗条件下催芽2 d,温度为30℃±1℃/28℃±1℃(昼/夜),相对湿度为80%±2%。每隔24 h为对照组(CK)与处理组分别补充水和0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐,在第3 d开始施加光周期为12 h/12 h(30 000 lux光强)的光照。每天统计种子发芽数。第7 d测定每个重复中发芽棉花种子的胚根长度与鲜质量。将测量数据统计计算后,通过对发芽率、鲜质量、胚根长度3个指标综合排序,从166份棉花种质中筛选出0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫下生长发育良好的种质,作为后续0.30 mol·L^{-1}复合盐胁迫试验材料。

0.30 mol·L^{-1}复合盐胁迫试验设置对照处理与0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐处理,每个处理设置3个重复。0.30 mol·L^{-1}复合盐胁迫试验棉花种子发芽方法以及环境设置与0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫试验相同。每隔24 h为对照组(CK)与处理组分别补充水和0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐。第7 d统计数据后,通过主成分分析将测量的5个指标(发芽率、发芽势、发芽指数、鲜质量、胚根长度)转化成3个新的综合指标,通过隶属函数值及各综合指标的权重计算出耐盐性综合评价值(D),对0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫筛选的棉花种质资源耐盐性进行评价,筛选出萌发期具有较好复合盐耐性的棉花品种。以耐盐材料'中9807'和敏盐材料'西农606'作为对照,与之前筛选出的耐盐材料一起进行三叶期盐胁迫试验。

三叶期耐复合盐鉴定设置对照处理(CK)、0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐、0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐三个处理,每个处理设置3次重复。各重复在花盆中加入0.8 kg混合土(土∶营养土∶蛭石 = 2∶1∶1)。播种后将花盆放入光照培养箱,温度、相对湿度、光周期设置同上。待植株生长至三叶期,每天向各重复喷施清水或对应浓度复合盐溶液。复合盐胁迫处理10 d后,测定三叶期相关生理指标。

1.3 测定指标

1.3.1 棉花种子的发芽率、发芽势和发芽指数 根据每天统计的各品种萌发种子数,利用以下公式计算各个指标值:发芽率(GR)=第7 d发芽种子数/供试种子数×100%;发芽指数(GI) = $\sum G_t/D_t$,其中G_t为第t天的发芽数,D_t为相应的发芽天数[13],下文所展示的发芽指数均为种子发芽第7 d所统计的发芽指数;发芽势(GV)=第3 d发芽数/供试种子数×100%[14]。

1.3.2 棉花鲜质量与胚根长度 各处理分别使用清水或对应浓度复合盐处理7 d后,将胚根突破种皮并露白的棉花种子下胚根取下,吸干胚根表面的水分后称重,即胚根鲜质量(FM);之后分别将每组所有发芽胚根放入根系扫描仪(LA-S,万深检测科技有限公司,中国)测量胚根总长,并将胚根总长除以每组的发芽数,得到平均胚根长(ERL)。

1.3.3 棉花叶片叶绿素荧光参数与气体交换参数 使用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM2500,WALZ公司,德国)和光合测定仪(LI-6800,LI-COR公司,美国)分别测量棉花叶片荧光与气体交换参数。每个重复选取3株以上植株的上部叶位进行测量。荧光参数主要包括原初光能转化效率(F_v/F_m)、实际光量子产量($\varphi(PS_{II})$)、非光化学淬灭系数(NPQ)。光合测定仪LI-6800叶室环境参数设定为光强1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1}、二氧化碳浓度400 μmol·mol^{-1}、流速500 μmol·s^{-1},温度26℃。稳定后记录净光合速率(A_N)、细胞间CO_2浓度(C_i)、气孔导度(g_{sw})和叶片蒸腾速率(E)等参数。

1.3.4 棉花叶片SPAD值 SPAD为相对叶绿素含量(无单位)[15]。使用便携式叶绿素测量仪(SPAD-250 Plus,MINOLTA公司,日本)测定叶绿素相对含量(SPAD值)。每个重复选取3株以上植株,选取每株植株上部叶片测量SPAD值。相对叶绿素含量估计为叶片5个不同位置的SPAD平均值。

1.3.5 棉花叶片形态特征 采用叶面积仪(Yaxin-1242,北京雅欣理仪科技有限公司,中国)测定叶面积(LA)。每个重复选取3株以上植株,选取每株植株上部叶片测量比叶重(LMA),避开叶片主叶脉用直径为1 cm的打孔器随机取5个圆形叶片样品,装入牛皮纸袋中,放入60℃烘箱48 h后用电子天平称重,比叶重计算公式为:比叶重(g·m^{-2}) = 叶片干物质质量/叶片面积。

1.4　统计分析

通过模糊数学隶属函数法计算评价值(D),对 0.30 mol·L^{-1}盐胁迫处理后 32 份棉花种质进行耐盐性综合评价,计算公式为 $D=\sum[\mu(X_i)\times w_i]$,$i=1,2,\cdots,n$。其中$\mu(X_i)$表示第 i 个综合指标的隶属函数值,计算公式为 $\mu(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$,$i=1,2,\cdots,n$($X_i$ 表示第 i 个综合指标值,X_{min}表示第 i 个综合指标中的最小值,X_{max}表示第 i 个综合指标中的最大值,n 表示参与主成分分析的材料总数),w_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的权重,计算公式为 $w_i=p_i/\sum p_i$,$i=1,2,\cdots,n$(p_i 表示主成分分析中得到的各棉花种质第 i 个综合指标的方差贡献率)[16]。

采用 Microsoft Excel 2021 整理试验数据,使用 SPSS Statistics 25 对试验数据进行统计描述、方差分析、主成分分析、显著性差异以及相关性分析。使用 R 语言"readxl、ggplot2、dplyr"软件包进行数据可视化。

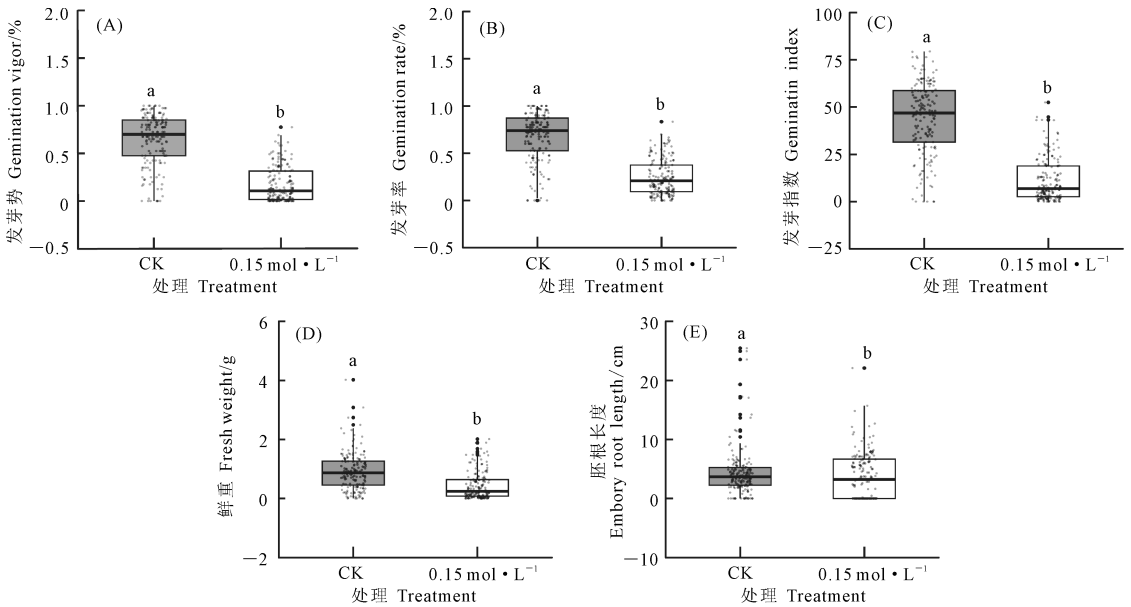
2　结果与分析

2.1　复合盐胁迫对不同棉花品种萌发期发芽指标的影响

2.1.1　166 份棉花种质耐复合盐筛选　由图 1 可以看出,0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫处理对 166 份棉花种质的种子萌发以及胚根生长有显著影响。0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫处理组发芽势、发芽率、发芽指数、鲜质量、胚根长度均较 CK 组显著降低,分别下降 72.558%、63.542%、74.737%、52.790%、17.080%。由表 2 可知,CK 组发芽势、发芽率、发芽指数变异系数范围为 38.065%~47.683%,值得注意的是,鲜质量和胚根长度变异系数较大,分别为 93.649%和 108.657%,说明受试的 166 份棉花种质中不同品种棉花同一处理下胚根形态特征变化较大,故运用单一指标对陆地棉品种耐盐性进行评价并不准确。

经 0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫处理后,166 份棉花种质的 5 项指标变异系数均有所上升,发芽势、鲜质量和胚根长度的变异系数超过 100%。这一现象表明复合盐胁迫对棉花种质的种子萌发及胚根生长产生了显著的差异化影响。具体而言,试验所用 166 份不同棉花种质在面对复合盐胁迫时表现出不同程度的耐受性,部分种质耐盐性较强,受胁迫影响较小;而另一部分种质耐盐性较弱,受胁迫影响较大。这种耐盐性差异导致了 166 份棉花种质整体的变异程度加剧,最终使得各项指标的变异系数显著升高(表 2)。

对发芽势、发芽率、发芽指数、鲜质量、胚根长度进行相关性分析,各项指标之间均呈现极显著的正相关关系。其中发芽指数与发芽率相关性最强($r=0.939$,$P<0.01$),胚根长度与发芽率之间相关性最弱($r=0.575$,$P<0.01$),5 个指标间的相关性具有较高的一致性(表 3)。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

图 1　萌发期复合盐胁迫(0.15 mol·L^{-1})下 166 份棉花种质发芽参数与胚根形态特征差异

Fig.1　Differences in germination parameters and embryonic root morphological characteristics of 166 cotton genotypes at the germination stage under compound salt stress (0.15 mol·L^{-1})

表 2 萌发期 0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫下 166 份棉花种质的表型性状

Table 2 Phenotypic traits of 166 cotton genotypes at the germination stage under compound salt-alkali stress (0.15 mol·L^{-1})

处理 Treatment	统计量 Statistic	发芽势 *GV*/%	发芽率 *GR*/%	发芽指数 *GI*	鲜质量 *FM*/g	胚根长度 *ERL*/cm
对照 Control	最大值 Max	1.000	1.000	157.410	4.023	25.448
	最小值 Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均值 Average	0.645	0.672	44.666	0.932	4.473
	标准差 *SD*	0.271	0.256	21.298	0.642	4.189
	变异系数 *CV*/%	42.054	38.065	47.683	68.853	93.649
盐处理 Salt treatment	最大值 Max	0.775	0.833	52.490	2.013	22.092
	最小值 Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均值 Average	0.177	0.245	11.284	0.440	3.709
	标准差 *SD*	0.184	0.188	11.277	0.467	4.030
	变异系数 *CV*/%	104.110	76.572	99.937	106.120	108.657

表 3 萌发期棉花发芽参数与胚根形态特征的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of germination parameters and embryonic root morphological characteristics in cotton at the germination stage

性状 Trait	发芽势 *GV*	发芽率 *GR*	发芽指数 *GI*	鲜质量 *FM*	胚根长度 *ERL*
发芽势 *GV*	1				
发芽率 *GR*	0.803**	1			
发芽指数 *GI*	0.873**	0.939**	1		
鲜质量 *FM*	0.899**	0.818**	0.832**	1	
胚根长度 *ERL*	0.618**	0.575**	0.646**	0.647**	1

注：* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。

Note: * and * * indicates significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

通过上述分析，在 0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫下，166 份棉花种质的发芽参数与胚根形态特征分别包含试验棉花种质的不同耐盐信息，选取单一指标难以全面评估 166 份棉花品种的耐盐性。基于此，对发芽率、鲜质量、胚根长度进行综合排序，最终从 166 份棉花品种中选出 32 份在 0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫下生长发育良好的棉花品种。

2.1.2 32 份棉花种质复合盐胁迫筛选 由图 2 可知，0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫处理下，筛选所得的 32 份棉花种质鲜质量与 CK 组无明显差异，提高 2.756%；发芽势、发芽率、发芽指数均显著降低，分别下降 38.199%、30.882%、46.168%；胚根长度则显著提高 16.762%。在 0.30 mol·L^{-1}复合盐胁迫下，32

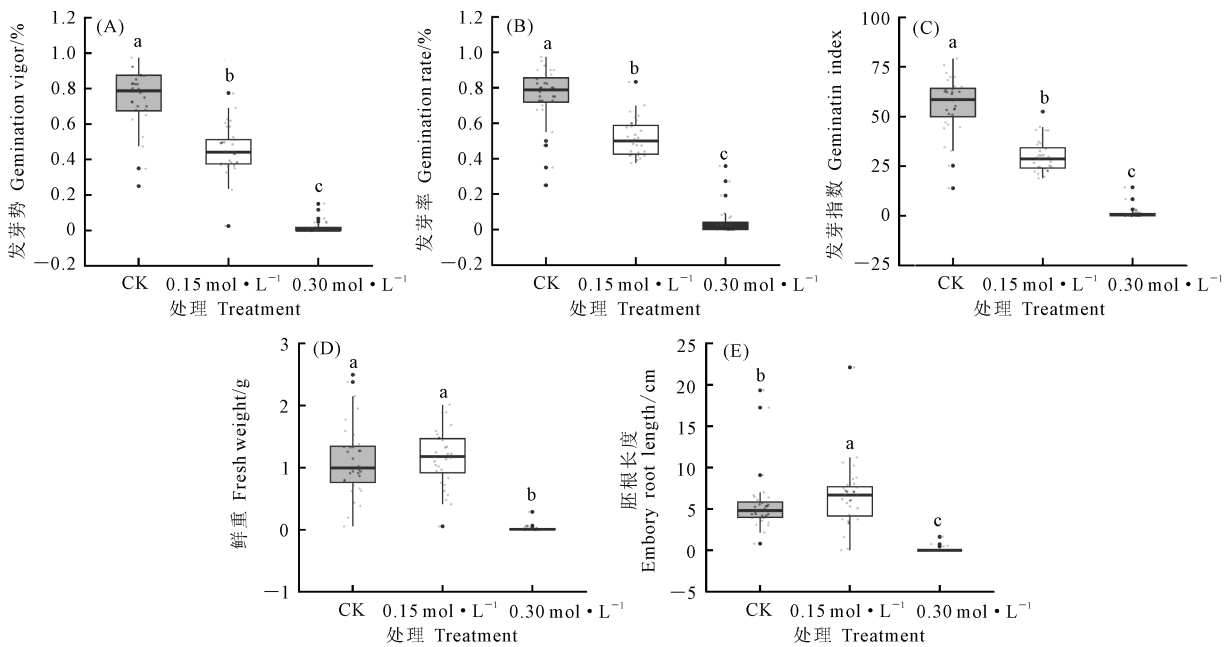


图 2 萌发期复合盐胁迫下 32 份棉花种质发芽参数与胚根形态特征的差异

Fig.2 Differences in germination parameters and embryonic root morphology characteristics of 32 cotton germplasms at germination stage under compound salt stress

份棉花种质 5 项指标均显著低于 CK 组与0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫组(图 2),0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫处理组 5 个性状较 0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫处理组分别下降 96.247%、90.909%、95.389%、98.097%、97.602%。

由表 4 可知,CK 组的 5 项指标变异系数范围为 22.299%~65.409%,表明通过发芽率、鲜质量、胚根长度 3 个指标筛选所得的 32 份棉花种质在种子萌发和胚根生长方面表现相对一致,品种间差异较小。在 0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫下,5 项指标变异系数范围缩小至 20.488%~59.747%,说明该浓度复合盐对这 32 份棉花种质的影响有限,这 32 份棉花种质较其他棉花种质显示出更强的复合盐耐性。然而在 0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫下,变异系数范围大幅增加至 172.829%~270.798%,表明此浓度下品种间差异显著增加,复合盐对这 32 份棉花种质的发芽和胚根生长产生了较强的抑制作用,且不同种质的耐受性表现出了明显的分化。

对 5 个指标进行主成分分析,根据累计贡献率将原 5 个指标的数据转化成 3 个新的相互独立的综合指标,其累计贡献率达到 98.17%(表 5),说明新的综合指标包含了原 5 个指标的大部分统计信息。综合指标 PC1 的方差贡献率为 74.980%,与发芽率(0.931)、发芽势(0.919)、发芽指数(0.980)和鲜质量(0.907)相关性最大,主要反映了棉花种子萌发生长情况。PC1 的高载荷值表明这些变量在第一主成分中具有重要地位,能够很好地代表棉花种子的萌发能力。综合指标 PC2 的方差贡献率为17.795%,与胚根长度(0.860)和鲜质量(-0.378)相关性最大,主要反映了盐胁迫下棉花种子生物量和生长发育情况。PC2 的载荷值表明胚根长度在第二主成分中具有较高的正相关性,而鲜质量则具有较高的负相关性,这说明在盐胁迫条件下,棉花种子生长过程中胚根长度和鲜质量之间可能存在权衡关系。综合指标 PC3 的方差贡献率为 5.372%,与发芽势(-0.371)相关性最大,主要反映了高盐浓度盐胁迫对种子发育影响。PC3 的载荷值表明发芽势在第三主成分中具有较高的负相关性,这可能意味着在高盐浓度下,发芽势受到了较大的抑制作用。

根据综合指标隶属函数值以及方差贡献率计算出耐盐性综合评价值(D),根据 D 值对 32 份棉花种质资源耐盐性进行评价。其中品种‘德 93-04’(编号 X170743,D = 0.862)与‘4SA-805’(编号 X170523,D=0.843)为 32 份种质中耐盐性最好的两个品种(表 6)。

表 4　萌发期 0.30 mol·L^{-1}盐胁迫 32 份棉花种质的表型性状

Table 4　Phenotypic traits of 32 cotton genotypes at the germination stage under compound salt stress (0.30 mol·L^{-1})

处理 Treatment	统计量 Statistic	发芽势 *GV*/%	发芽率 *GR*/%	发芽指数 *GI*	鲜质量 *FM*/g	胚根长度 *ERL*/cm
CK	最大值 Max	0.975	0.975	79.250	2.496	19.322
	最小值 Min	0.250	0.250	13.929	0.055	0.800
	平均值 Average	0.733	0.748	55.801	1.125	5.608
	标准差 *SD*	0.178	0.167	14.428	0.586	3.668
	变异系数 *CV*/%	24.254	22.299	25.856	52.067	65.409
0.15 mol·L^{-1}	最大值 Max	0.775	0.833	52.490	2.013	22.092
	最小值 Min	0.025	0.375	19.002	0.054	0.000
	平均值 Average	0.453	0.517	30.039	1.156	6.548
	标准差 *SD*	0.140	0.106	8.301	0.451	3.912
	变异系数 *CV*/%	30.893	20.488	27.633	39.054	59.747
0.30 mol·L^{-1}	最大值 Max	0.150	0.358	14.387	0.288	1.641
	最小值 Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	平均值 Average	0.017	0.047	1.385	0.022	0.157
	标准差 *SD*	0.035	0.081	2.876	0.052	0.424
	变异系数 *CV*/%	202.401	172.829	207.676	236.983	270.798

表 5　萌发期棉花发芽参数与胚根形态特征的主成分分析

Table 5　Principal component analysis of cotton germination parameters and embryonic root morphological characteristics at the germination stage

指标 Item	特征向量 Eigen vector		
	PC1	PC2	PC3
发芽势 Germination vigor	0.919	-0.008	0.327
发芽率 Germination rate	0.931	0.003	-0.371
发芽指数 Germination index	0.980	-0.088	-0.091
鲜质量 Fresh weight	0.907	-0.378	0.118
胚根长度 Embryo root length	0.505	0.860	0.038
特征值 Eigen value	3.749	0.890	0.269
贡献率 Contribution rate/%	74.980	17.795	5.372
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	74.980	92.775	98.147
权重 Weight	0.764	0.181	0.054

表6 0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐胁迫处理下耐盐材料种质、排名及评价值

Table 6 Ranking and *D* values of salt tolerance genotypes under compound salt stress (0.30 mol·L^{-1})

排名 Ranking	种质 Genotype	*D*	品种名称 Variety name	分类 Category	排名 Ranking	种质 Genotype	*D*	品种名称 Variety name	分类 Category
1	X170743	0.862	4SA-805	陆地棉品系 Accession/cultivar	17	X170504	0.217	绵育5号 Mianyu-5	陆地棉品系 Accession/cultivar
2	X170523	0.843	德93-04 De 93-04	陆地棉品系 Accession/cultivar	18	X170076	0.210	Local	陆地棉品系 Accession/cultivar
3	X170321	0.743	冀83-574 Ji 83-574	陆地棉品种 Cultivar	19	X170120	0.207	81024-10-995	陆地棉品系 Accession/cultivar
4	X170058	0.494	AS-1	陆地棉品系 Accession/cultivar	20	X170514	0.207	早松2号 Zaosong-2	陆地棉品系 Accession/cultivar
5	X170016	0.359	未命名 Unnamed	陆地棉品系 Accession/cultivar	21	X170098	0.204	塔引2011-1 Tayin 2011-1	陆地棉品系 Accession/cultivar
6	X170111	0.335	Nazilli 66-100	陆地棉品系 Accession/cultivar	22	X170090	0.157	S-1264	陆地棉品系 Accession/cultivar
7	X170069	0.308	Karoyasy	陆地棉品系 Accession/cultivar	23	X170100	0.154	未命名 Unnamed	陆地棉品系 Accession/cultivar
8	X170817	0.299	先锋BRPR80 Xianfeng BRPR80	陆地棉品系 Accession/cultivar	24	X170473	0.154	京7303 Jing 7303	陆地棉品系 Accession/cultivar
9	X170086	0.295	MD	陆地棉品系 Accession/cultivar	25	X170722	0.154	BS-1	陆地棉品系 Accession/cultivar
10	X170072	0.278	GUAZUNCHO 2 INTA	陆地棉品系 Accession/cultivar	26	X170007	0.154	DP Acala-90	陆地棉品系 Accession/cultivar
11	X170855	0.260	AR672414	陆地棉品系 Accession/cultivar	27	X170618	0.154	马格33-12 Mage 33-12	陆地棉品系 Accession/cultivar
12	X170415	0.232	南京H87-14 Nanjing H87-14	陆地棉品系 Accession/cultivar	28	X170182	0.154	S-1191	陆地棉品系 Accession/cultivar
13	X170061	0.229	ВИР-41 5533y x C-3210	陆地棉品系 Accession/cultivar	29	X170160	0.154	Y53-2	陆地棉品系 Accession/cultivar
14	X170416	0.228	中资9105 Zhongzi 9105	陆地棉品系 Accession/cultivar	30	X170094	0.154	Mugan 375	陆地棉品系 Accession/cultivar
15	X170108	0.227	Chireza	陆地棉品系 Accession/cultivar	31	X170161	0.154	ZB-1091	陆地棉品系 Accession/cultivar
16	X170733	0.223	SP托巴夏INTA SP Tobasha INTA	陆地棉品系 Accession/cultivar	32	X170087	0.154	机彩棉 Jicai cotton	陆地棉品种 Cultivar

2.2 复合盐胁迫对不同棉花品种三叶期生理指标的影响

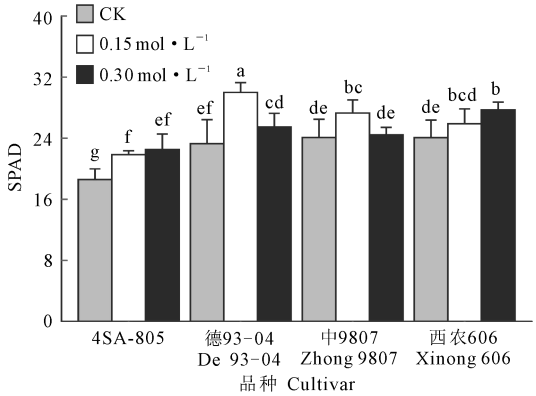
2.2.1 复合盐胁迫对不同棉花品种叶绿素相对含量的影响 由图3可知,随着复合盐浓度的增加,‘4SA-805’与‘西农606’的SPAD值不断上升,0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐处理下,两者的SPAD值显著高于CK组。‘德93-04’和‘中9807’变化趋势相似:0.15 mol·L^{-1}浓度复合盐处理下,两者SPAD值显著高于CK组。然而在0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐处理下,两者的SPAD值较0.15 mol·L^{-1}显著降低,值得注意的是,0.30 mol·L^{-1}浓度下‘德93-04’的SPAD值仍显著高于CK组。

2.2.2 复合盐胁迫对不同棉花品种叶片气体交换参数的影响 由图4可知,随着复合盐浓度的升高,4个品种三叶期叶片气体交换参数均呈现下降趋势。CK处理下‘德93-04’的4个叶片气体交换参数均处于较高水平。在0.15 mol·L^{-1}复合盐胁迫下,‘德93-04’除叶内C_i外,其余3个指标均显著高于对照品种‘中9807’和‘西农606’。而在0.30 mol·L^{-1}复合盐胁迫下,‘德93-04’的大部分气体交换指标与对照品种无显著差异,但其A_N仍显著高于其他3个品种。CK处理下,‘4SA-805’的A_N与g_{sw}显著高于对照品种‘中9807’和‘西农606’,E和C_i与‘西农606’无显著差异但显著高于‘中9807’。复合盐胁迫下‘4SA-805’的g_{sw}、E与C_i均与对照品种无显著差异,但在0.15 mol·L^{-1}浓度下,‘4SA-805’的A_N显著高于对照品种‘中9807’、‘西农606’。

2.2.3 复合盐胁迫对不同棉花品种叶片叶绿素荧光参数的影响 在盐胁迫条件下,不同品种叶绿素荧光指标如图5所示。随着复合盐浓度的增加,4个品种F_v/F_m和$\varphi(PS_{Ⅱ})$均呈现下降趋势,而*NPQ*

则呈现上升趋势。‘西农 606’在不同浓度复合盐处理下一直保持较高 F_v/F_m。相较于 CK 组,‘德 93-04’与‘西农 606’在 0.30 mol · L^{-1}浓度复合盐处理下 F_v/F_m显著降低,‘4SA-805’与‘中 9807’的 F_v/F_m虽有下降,但其差异并不显著。随着复合盐浓度的增加,4 个品种的 *NPQ* 均有所上升,但变化不显著。0.30 mol · L^{-1}浓度复合盐胁迫下‘德 93-04’的 *NPQ* 显著高于‘4SA-805’与‘西农 606’。随着复合盐浓度的增加,4 个品种的 $\varphi(PS_{Ⅱ})$均有所下降。0.30 mol · L^{-1}浓度复合盐胁迫条件下,‘中 9807’与‘西农 606’的 $\varphi(PS_{Ⅱ})$较 CK 组显著下降,而‘4SA-805’与‘德 93-04’的下降趋势并不显著。

2.2.4　复合盐胁迫对不同棉花品种叶片形态特征的影响　由图 6 可知,CK 处理下 4 个品种 *LMA* 无显著差异;0.15 mol · L^{-1}浓度复合盐处理下,‘西农 606’叶片 *LMA* 显著低于‘中 9807’,其他 3 个品种 *LMA* 无显著差异;0.30 mol · L^{-1}浓度复合盐处理下 4 个品种棉花 *LMA* 无显著差异;CK 处理下,‘中 9807’的 *LA* 显著低于其他 3 个品种,其他 3 个品种间 *LA* 无显著差异;0.15 mol · L^{-1}复合盐浓度下,‘中 9807’的 *LA* 显著低于其他 3 个品种,其他 3 个品种间 *LA* 无显著差异;0.30 mol · L^{-1}复合盐浓度下,‘西农 606’的 *LA* 显著降低,筛选品种‘4SA-805’与‘德 93-04’的 *LA* 显著高于对照品种‘中 9807’与‘西农 606’。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),图中数值为平均值±标准差。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$), and the values in the figure are means ± standard deviation. The same below.

图 3　复合盐胁迫对三叶期棉花叶片相对叶绿素含量的影响

Fig.3　Effects on the relative chlorophyll content of cotton leaves under compound salt stress at the three-leaf stage

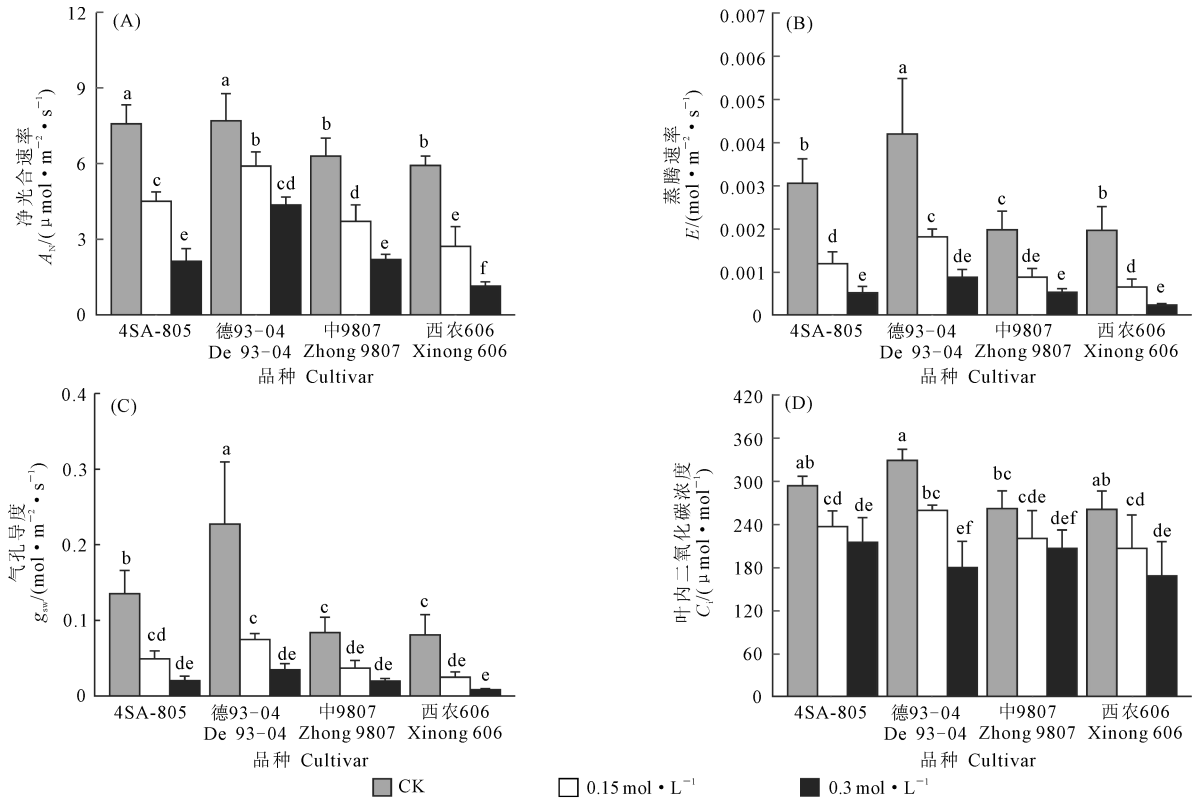


图 4　复合盐胁迫(0.15 mol · L^{-1}与 0.30 mol · L^{-1})对三叶期棉花叶片气体交换参数的影响

Fig.4　Effects on gas exchange parameters in cotton under complex salt stress (0.15 mol · L^{-1} and 0.30 mol · L^{-1}) at the three-leaf stage

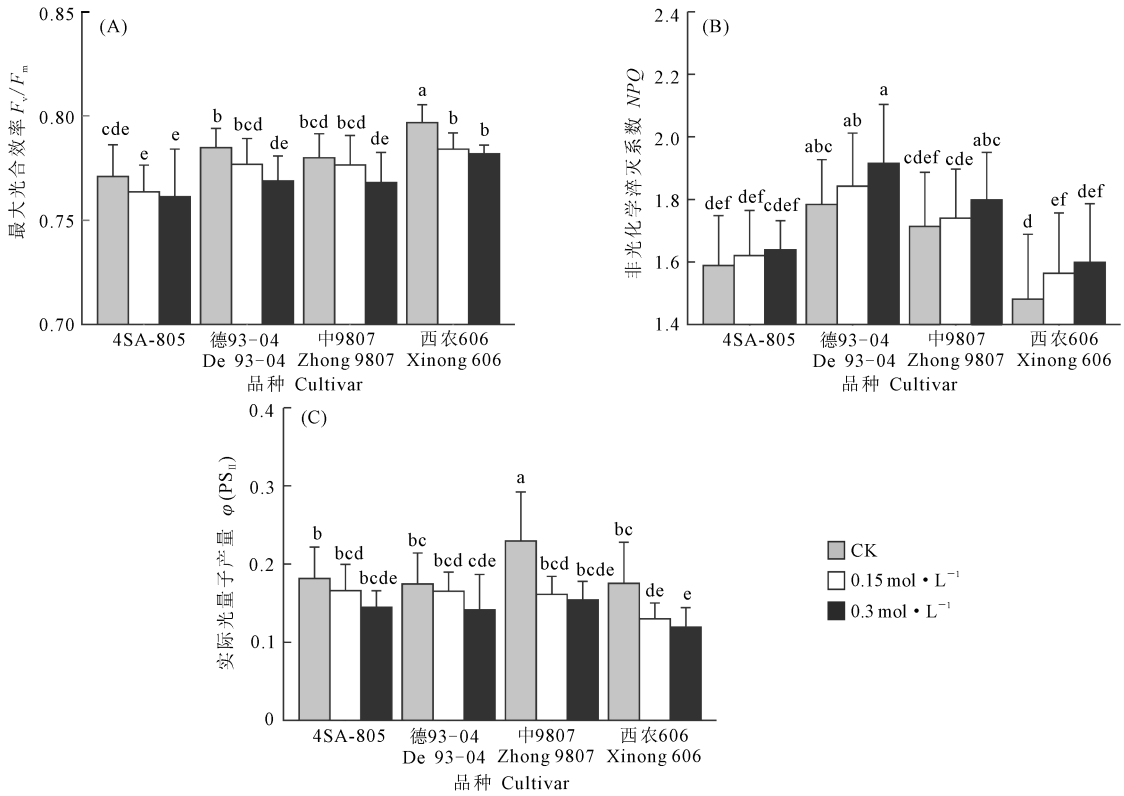


图 5 复合盐胁迫(0.15 mol · L^{-1}与 0.30 mol · L^{-1})对三叶期棉花叶片荧光参数的影响

Fig.5 Effects on fluorescence parameters in cotton under compound salt stress (0.15 mol · L^{-1} and 0.30 mol · L^{-1}) at the three-leaf stage

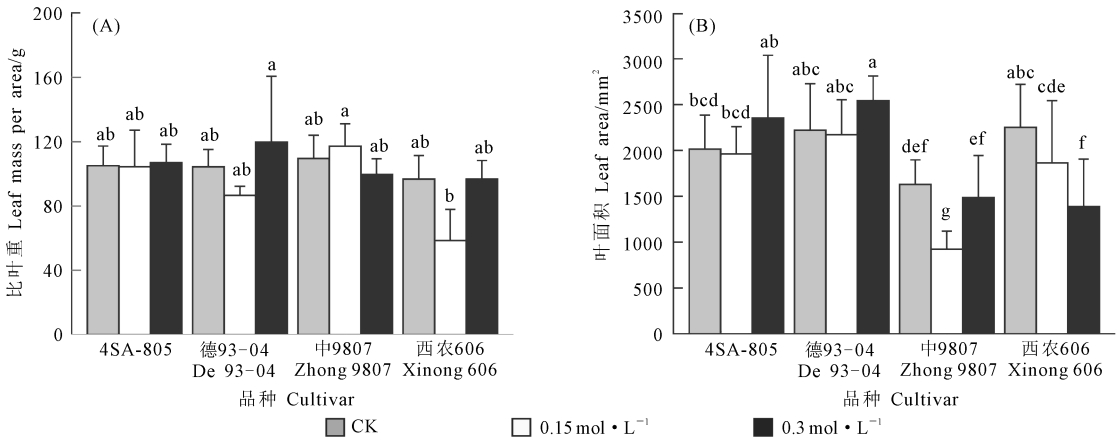


图 6 复合盐胁迫(0.15 mol · L^{-1}与 0.30 mol · L^{-1})对三叶期棉花叶片形态的影响

Fig.6 Effects on leaf morphology in cotton under compound salt stress (0.15 mol · L^{-1} and 0.30 mol · L^{-1}) at the three-leaf stage

3 讨 论

3.1 复合盐胁迫对萌发期棉花生长的影响

棉花种子萌发出苗阶段是耐盐性筛选的关键时期,其萌发状况将直接影响田间产量[17]。在 0.15 mol · L^{-1}复合盐胁迫下,166 份棉花种质的发芽参数(发芽率、发芽势、发芽指数)和胚根形态特征(胚根长度、鲜质量)较 CK 处理均显著下降(图 1),说明 0.15 mol · L^{-1}浓度复合盐对 166 份棉花种质(系)种子萌发过程及其胚根生长过程抑制作用显著。

本研究中,0.15 mol · L^{-1}复合盐胁迫处理下筛选的 32 份耐复合盐棉花种质与 CK 组相比,鲜质量差异不显著,胚根长度显著增加。已有研究发现,适当浓度的 NaCl 刺激有助于棉花种子萌发[18]。本

试验结果显示,0.15 mol · L^{-1}复合盐能够促进部分复合盐耐性较强的棉花品种在萌发过程中胚根生长(图 2),但 0.15 mol · L^{-1}是否为有助于棉花种子生长发育的复合盐浓度还需后续试验证明。统计显示,这 32 份棉花种质在 CK 处理下 5 项指标变异系数范围为 22.299%~65.409%,表明通过发芽率、鲜质量和胚根长度 3 个指标筛选所得的 32 份棉花种质在种子萌发和胚根生长方面表现相对一致、品种间差异较小。0.15 mol · L^{-1}复合盐胁迫下,5 项指标变异系数范围缩小至 20.488%~59.747%,小于 166 份棉花种质在 0.15 mol · L^{-1}复合盐胁迫处理下的变异系数范围(76.572%~108.657%),说明该浓度复合盐对这 32 份棉花种质的影响有限,这 32 份棉花种质较其他受试棉花种质显示出更强的复合盐耐受性。当浓度提高到 0.30 mol · L^{-1}时,这 32 份棉花品种的变异系数范围大幅增加至172.829%~270.798%,这表明此浓度下品种间差异显著扩大,0.30 mol · L^{-1}复合盐对这 32 份棉花种质的发芽和胚根生长产生了较大的抑制作用,且不同种质的复合盐耐性表现出了明显分化,说明 0.30 mol · L^{-1}复合盐对棉花种质的萌发和胚根生长确实会产生显著影响(表 4)。

对 0.15 mol · L^{-1}浓度复合盐处理 166 份棉花种质各指标的耐盐系数进行相关性分析发现,胚根长度与其余 4 个指标之间的相关性较其他性状之间相关性更小(表 3)。这虽与先前已有研究的相关性分析存在差异,但性状间相关性变化趋势相同,值得注意的是,本试验与先前研究中的差异主要体现在胚根相关指标与发芽指标上[19],这可能是由于单盐胁迫与复合盐胁迫在棉花胚根中的响应机制不同所致[11]。

3.2　三叶期耐盐棉花的光合生理指标变化

光合作用是植物生长发育的基础,为植物进行生命活动提供物质和能量[20-21]。因此,光合作用的变化直接反映了盐处理对植物的影响程度。

叶面积(*LA*)是反映植物叶片光合物质生产能力的一个重要指标。筛选品种‘德 93-04’和‘4SA-805’在高浓度复合盐(0.30 mol · L^{-1})胁迫下,其 *LA* 显著高于对照品种‘西农 606’(图 6)。较大的 *LA* 能够增加光合有效辐射的捕捉进而确保叶片的光合能力,同时先前已有研究表明比叶重(*LMA*)也与叶片的光合作用有重要关联[22],综合上述筛选品种 *LMA* 与 *LA* 的结果,认为‘德 93-04’和‘4SA-805’在高浓度复合盐胁迫下表现出较强的光合能力,这与之前的气体交换参数和叶绿素荧光参数结果相吻合。我们认为在面对复合盐胁迫时,耐盐棉花品种可能通过增加 *LMA* 和 *LA* 保持叶片光合能力,进而增强棉花对复合盐的耐性。

净光合速率(A_N)是表示光合作用强弱的重要指标,也是鉴定植物抗盐能力的有效生理指标[23]。‘4SA-805’和‘德 93-04’在 CK 和 0.15 mol · L^{-1}浓度复合盐处理下 A_N显著高于对照品种‘中 9807’和‘西农 606’。0.30 mol · L^{-1}浓度复合盐处理下,‘德 93-04’的 A_N显著高于‘中 9807’和‘西农 606’,而‘4SA-805’的 A_N与中度耐盐材料‘中 9807’无明显差异但显著高于敏盐材料品种‘西农 606’(图 4),表明‘4SA-805’和‘德 93-04’光合能力较对照品种更强,且在复合盐胁迫下仍较对照品种保持较强的光合能力。

叶绿素荧光参数可以反映光合作用和热耗散[24]。最大光合效率(F_v/F_m)与实际光量子产量($\varphi(PS_{Ⅱ})$)分别代表 $PS_Ⅱ$ 最大光化学量子产量和 $PS_Ⅱ$ 实际光化学量子产量[25]。前者反映的是 PS_{II} 的原初光能转化效率,而后者反映了 PS_{II} 反应中心部分关闭情况下实际 PS_{II} 光能捕获效率[26]。非光化学淬灭系数(*NPQ*)可以量化衡量 $PS_Ⅱ$ 天线色素吸收的光能中不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分[25]。已有研究表明,盐胁迫会通过渗透胁迫、离子毒害和氧化应激等方式造成植物体光合器官中 PSII 反应中心的损伤[27]。这种损伤通常在荧光参数中表现为 F_v/F_m、F_v/F_o、*qP* 和 $\varphi(PSⅡ)$的下降和 *NPQ* 的上升[28]。本试验中,随着复合盐浓度的增加 4 个试验棉花品种的 F_v/F_m下降、$\varphi(PSⅡ)$下降、*NPQ* 增加(图 5),说明高浓度复合盐胁迫处理下 4 个棉花品种 PSⅡ反应中心的光能转化效率降低,用于光化学反应的光能更多的以热能形式被耗散掉,光合能力降低。由图 5 可以看出,CK 处理与复合盐胁迫下‘德 93-04’的 F_v/F_m、$\varphi(PSⅡ)$和 *NPQ* 都保持相对较高水平,‘4SA-805’的 F_v/F_m与 *NPQ* 显著低于‘德 93-04’,$\varphi(PSⅡ)$无显著差异。表明复合盐胁迫下‘德 93-04’较对照品种‘中 9807’和‘西农 606’具有更强的光化学效率,且在高浓度盐胁迫下,其释放过剩光能保护光合器官的能力也较其他品种更强。与对照品种‘西农 606’相比,‘4SA-805’显示出更高的 *NPQ* 和 $\varphi(PSⅡ)$(图 5),这表明其复合盐耐性优于对照品种,这也与先前讨论所得结果相一致。

4　结　论

采用复合盐胁迫处理,最终筛选出两个在萌发期和三叶期均表现出显著复合盐耐性的棉花品种:

即‘德93-04’(编号X170743)和‘4SA-805’(编号X170523),为后续挖掘棉花耐复合盐基因及研究其耐复合盐机理提供了重要材料。复合盐胁迫对大部分萌发期棉花种子的萌发和生长抑制作用显著,0.30 mol·L^{-1}浓度复合盐对棉花种子生长萌发抑制作用明显强于0.15 mol·L^{-1}浓度,适度的复合盐胁迫可能有助于萌发期耐盐棉花种子的根系发育。通过测量三叶期植株叶绿素相对含量、叶绿素荧光参数、叶片气体交换参数与形态特征,发现筛选品种‘德93-04’、‘4SA-805’较对照品种在高浓度复合盐胁迫下仍保持较强的光合能力,证明了这两个品种在三叶期同样具有较高复合盐耐性。

参 考 文 献:

[1] 钱静斐, 宋玉兰, 原瑞玲, 等. 开放条件下我国棉花产业安全问题及发展策略[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(5): 140-145.
QIAN J F, SONG Y L, YUAN R L, et al. China's cotton industry safety issues and development strategies under open conditions[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(5): 140-145.

[2] 叶武威, 刘金定. 氯化钠和食用盐对棉花种子萌发的影响[J]. 中国棉花, 1994, (3): 14-15.
YE W W, LIU J D. The effect of sodium chloride and table salt on the germination of cotton seeds[J]. China Cotton, 1994, (3): 14-15.

[3] 苏莹, 郭安慧, 华金平. 棉花耐盐性鉴定方法探讨[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 11-19.
SU Y, GUO A H, HUA J P. Strategies for evaluation the salt tolerance in cotton[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 11-19.

[4] 叶武威, 刘金定. 棉花种质资源耐盐性鉴定技术与应用[J]. 中国棉花, 1998, (9): 34, 38.
YE W W, LIU J D. The identification technology and application of salt tolerance in cotton germplasm resources[J]. China Cotton, 1998, (9): 34, 38.

[5] DKHIL B B, DENDENE M. Salt stress induced changes in germination, sugars, starch and enzyme of carbohydrate metabolism in *Abelmoschus esculentus* L. (Moench.) seeds[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(12): 1412-1418.

[6] 王俊娟, 王德龙, 樊伟莉, 等. 陆地棉萌发至三叶期不同生育阶段耐盐特性[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3720-3727.
WANG J J, WANG D L, FAN W L, et al. The characters of salt-tolerance at different growth stages in cotton[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3720-3727.

[7] HU G F, LIU Y M, DUO T Q, et al. Antioxidant metabolism variation associated with alkali-salt tolerance in thirty switchgrass (*Panicum virgatum*) lines[J]. PLoS One, 2018, 13(6): e0199681.

[8] SIKDER R K, WANG X, JIN D S, et al. Screening and evaluation of reliable traits of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes for salt tolerance at the seedling growth stage[J]. Journal of Cotton Research, 2020, 3(2): 25-37.

[9] 李昊旻, 尹红, 薛龙朔, 等. 两种棉花耐盐鉴定方法的综合评价与低酚棉种质系的耐盐性鉴定[J]. 棉花学报, 2024, 36(4): 306-319.
LI H M, YIN H, XUE L S, et al. Comprehensive evaluation of two salt tolerance identification methods and salt tolerance identification of glandless cotton germplasms[J]. Cotton Science, 2024, 36(4): 306-319.

[10] 李双男, 郭慧娟, 王晶, 等. 不同盐碱胁迫对棉花种子萌发的影响[J]. 种子, 2018, 37(1): 38-45.
LI S N, GUO H J, WANG J, et al. Effects of different saline and alkaline stress on seed[J]. Seed, 2018, 37(1): 38-45.

[11] 许艳超, 韦洋洋, 李振庆, 等. 复合盐碱胁迫下半野生棉苗期耐盐性综合评价及其关键生理指标的变化[J]. 棉花学报, 2018, 30(3): 231-241.
XU Y C, WEI Y Y, LI Z Q, et al. Integrated evaluation and the physiological and biochemical responses of semi-wild cotton under complex salt-alkali stress[J]. Cotton Science, 2018, 30(3): 231-241.

[12] 韦洋洋. 半野生棉对复合盐碱的响应机制与克劳茨基棉盐胁迫转录组分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
WEI Y Y. Response of mixure salt-alkali in semi-wild cotton and salt stress responsiveness of awild cotton species (*Gossypium klotzschianum*) based on transcripyomic analysis[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.

[13] 高利英, 邓永胜, 韩宗福, 等. 黄淮棉区棉花品种种子萌发期低温耐受性评价[J]. 棉花学报, 2018, 30(6): 455-463.
GAO L Y, DENG Y S, HAN Z F, et al. Evaluation of the low-temperature tolerance of cotton varieties in the Huang-huai region during seed germination[J]. Cotton Science, 2018, 30(6): 455-463.

[14] 徐建伟, 张晨, 曾晓燕, 等. 近十年新疆北疆主栽棉花种子低温萌发能力差异评价[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(9): 1569-1578.
XU J W, ZHANG C, ZENG X Y, et al. Evaluation of seed germination of main-cultivated cotton under low temperature in northern Xinjiang in recent ten years[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(9): 1569-1578.

[15] MONOSTORI I, ÁRENDÁS T, HOFFMAN B, et al. Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat[J]. Euphytica, 2016, 211(1): 103-112.

[16] 谢志坚. 农业科学中的模糊数学方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1983: 99-193.
XIE Z J. Fuzzy mathematical methods in agricultural science[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1983: 99-193.

[17] 孙小芳, 郑青松, 刘友良. NaCl胁迫对棉花种子萌发和幼苗生长的伤害[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(3): 22-25.
SUN X F, ZHENG Q S, LIU Y L. Salinity injury to germination and growth of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) at emergence and seedling stages[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2000, 9(3): 22-25.

[18] 谢德意, 王惠萍, 王付欣, 等. 盐胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2000, (3): 10-11, 13.
XIE D Y, WANG H P, WANG F X, et al. Effects of cotton seeds germination and seedling growth under salt stress[J]. Seed, 2000, (3): 10-11, 13.

(下转第38页)