

石 婧, 刘东洋, 张凤华. 不同品种 (品系) 棉花对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 828-835.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.004

不同品种 (品系) 棉花对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价

石 婧¹, 刘东洋², 张凤华²

(1. 石河子大学生命科学学院, 新疆 石河子 832003; 2. 石河子大学农学院/绿洲生态农业兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 以耐盐棉花品种中 H177、耐盐棉花品系中 J0710 与盐敏感棉花品种新陆早 74、盐敏感棉花品种中 J0102 为试验材料, 通过田间微区控制试验, 研究土壤盐胁迫对不同棉花品种 (品系) 生理生化特性的影响并开展相应的耐盐性评价。结果表明, 耐盐棉花品种 (品系) 的叶片脯氨酸含量显著高于盐敏感棉花品种 ($P < 0.05$), 前者为后者的 1.31~4.14 倍, 但耐盐棉花品种 (品系) 的丙二醛含量显著低于盐敏感棉花品种 ($P < 0.05$), 前者仅为后者的 52.73%~66.26%; 耐盐棉花品种 (品系) 的叶片 SPAD 值和光合参数 (净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率) 明显大于盐敏感棉花品种; 耐盐棉花品种 (品系) 茎中 Na^+ 含量、根中 Na^+ 含量、茎中 K^+ 含量、地上部分的 K^+/Na^+ 整体上高于盐敏感棉花品种。耐盐棉花品种 (品系) 能保持较高的光合能力, 并能维持 K^+/Na^+ 平衡, 同时能够减缓丙二醛含量的增加, 增强棉株的耐盐性。通过主成分分析和灰色关联度分析得出, 对棉花进行耐盐性评价时可将光合指标、SPAD 值和抗氧化酶活性作为重要的鉴定指标。由评价结果得出, 在供试的棉花品种 (品系) 中, 中 H177 苗期的耐盐性较好。

关键词: 棉花; 盐胁迫; 生理响应; 主成分分析; 灰色关联度分析; 耐盐性评价

中图分类号: S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0828-08

Physiological responses of different cotton cultivars (strains) to salt stress and salt tolerance evaluation

SHI Jing¹, LIU Dong-yang², ZHANG Feng-hua²

(1. College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Agriculture, Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

Abstract: Salt-tolerant cotton cultivar Zhong H177, strain Zhong J0710 and salt-sensitive Xinluzao 74, Zhong J0102 were used as the test materials by field micro-control experiments to study the effects of soil salinity stress on physiological and biochemical characteristics of different cotton cultivars (strains), and related salt tolerance evaluation was carried out. The results showed that proline content in the leaves of salt-tolerant cotton cultivars was significantly higher than that of salt-sensitive cotton cultivars (the former was 1.31 to 4.14 times as much as the later), but malondialdehyde content in the leaves of salt-tolerant cotton cultivars (strains) was significantly lower than that of salt-sensitive cotton cultivars (the former was only 52.73% to 66.26% of the later). The soil and plant analyzer development (SPAD) value and photosynthetic parameters (net photosynthesis rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate) of salt-tolerant cotton cultivars (strains) leaves were significantly higher than those of salt-sensitive cotton cultivars. The Na^+ con-

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501406)

作者简介: 石 婧 (1994-), 女, 新疆昌吉人, 硕士, 主要从事绿洲农业生态研究。 (E-mail) 15739333226@163.com

通讯作者: 张凤华, (E-mail) zfh2000@126.com

tent in stem, Na^+ content in root, K^+ content in stem and K^+/Na^+ in aboveground parts of salt-tolerant cotton cultivars (strains) were higher than those of salt-sensitive cotton cultivars. The salt-tolerant cotton cultivars (strains) could maintain high photosynthetic capacity and K^+/Na^+

balance, slow down the increase of malondialdehyde content and enhance salt tolerance of cottons. The results of principal component analysis and grey relational grade analysis showed that photosynthetic indices, *SPAD* values and antioxidant enzyme activities in salt tolerance evaluation of cottons could be used as important identification indices. According to the evaluation results, Zhong H177 shows good salt tolerance at seedling stage among the tested cotton cultivars (strains).

Key words: cotton; salt stress; physiological response; principal component analysis; grey relational grade analysis; evaluation of salt tolerance

盐渍化是全球性的土壤环境问题,当前由于不合理的灌溉制度和施肥措施等,导致土壤盐渍化程度加剧,从而降低了农作物产量^[1]。全世界大约有 4×10^8 hm^2 盐碱地,分布在一百多个国家^[2],其中中国大约有 9.2×10^7 m^2 盐碱地,并且面积还在日益扩大^[3]。如何开发利用这些土地资源是目前中国乃至世界面临的难题。棉花作为重要的经济作物,常常作为盐碱地开垦过程中的先锋作物^[4],尽管棉花被认为是中度耐盐作物,但是其耐盐程度仍然受到遗传和发育阶段的影响^[5]。因此,研究棉花在盐碱地环境下的自我保护机制是筛选耐盐棉花品种的重要途径之一。

目前已有较多关于棉花耐盐性的研究,例如研究发现,在盐胁迫下,棉花幼苗中的可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、丙二醛含量均有所增加^[6],棉花还可通过合成脯氨酸(Pro)来提高细胞渗透压^[7],并且在盐胁迫下棉花植株体内的抗氧化系统发生了变化,棉花植株通过提高超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性来维持膜结构和功能的稳定性^[8-9]。也有研究发现,在盐胁迫环境下,棉花的保护酶活性有所下降^[10]。在盐胁迫下,由于存在大量 Na^+ ,往往造成外部高 Na^+ 浓度、低 K^+ 浓度的离子不平衡现象,细胞一般通过保持组织内较高的 K^+/Na^+ 来维持自身的稳态。相关研究发现,耐盐性较强的棉花品种往往比耐盐性弱的棉花品种具有更高的 K^+/Na^+ ^[11-12]。 Na^+ 的大量积累同样会造成净光合速率的降低^[13],然而也有研究者认为,净光合速率的降低主要受气孔因素和非气孔因素的影响^[14]。由于棉花耐盐性受渗透调节物质、离子平衡、氧化应激、光合特性等多方面的影响,并且其中某些特定组成部分可能起着至关重要的作用,因此使用某些单项指标很难准确全面地比较棉花品种间的耐盐性,需要通过多指标综合评价的方法来筛选耐盐棉花品种,而主成分分析法与灰色关联度分析法的结合能够客观、综合地评价棉花的耐盐性^[15-16]。

本研究采用田间微区控制试验,分析盐胁迫条件下耐盐棉花与盐敏感棉花在渗透调节、离子平衡、氧化应激和光合作用等方面的差异,运用主成分分析法和灰色关联度分析法对4个棉花品种(品系)的耐盐性进行综合评价,以期筛选出鉴定棉花耐盐性的重要指标,为开发适应盐渍化土壤的耐盐棉花品种(品系)和在生产实际上更加简便地评价棉花的耐盐性提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验材料

本试验在新疆生产建设兵团第八师石总场四分场6连进行,该区域属于典型的温带大陆性气候,年平均气温为 $7.5\sim 8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为180 mm,年平均蒸发量为1 600 mm,年平均日照时数为2 784 h,年平均无霜期为166 d, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为3 918 $^{\circ}\text{C}$ 。试验地土壤中度盐渍化,土壤透气、透水性差。试验地基础理化性质如下:pH值为8.46,电导率为801.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$,全盐含量为10.23 g/kg,碱解氮含量为54.25 mg/kg,速效磷含量为4.82 mg/kg,速效钾含量为293.00 mg/kg,有机质含量为3.98 g/kg。供试棉花品种(品系)为耐盐品种中H177、耐盐品系中J0710与盐敏感品种中J0102、盐敏感品种新陆早74,前3个棉花品种(品系)及其耐盐性数据由中国农业科学院棉花研究所提供。

1.2 试验设计

采用田间微区试验方法,先人工铺膜,之后进行点播。于2019年4月29日播种,采用1膜3管6行地膜覆盖栽培,株距为10 cm。每个棉花品种(品系)设为1个处理,每个处理设2次重复,共计8个微区,本试验微区采用随机区组方式排列,每个微区长2.05 m、宽2.00 m,每个微区的面积为4.10 m^2 ,微区周围设置0.5 m宽保护行,栽培管理措施与一般棉田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素 *SPAD* 值与光合指标的测定 于棉花

出苗后 5 叶期测定叶绿素 SPAD 值及光合参数, 叶绿素 SPAD 值用日本柯尼卡美能达 SPAD-502 叶绿素仪测定, 光合指标用 LI-6400 便携式光合仪测定, 包括净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r), 光照度设为 1 200 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。选择晴朗无云的天气进行测定, 从 9:00 开始, 选取各小区棉花的功能叶 (倒三叶) 进行测定, 各处理连续测定 6 株, 取平均值。

1.3.2 生理生化指标的测定 测定棉花的叶绿素 SPAD 值、光合指标后进行棉花植株的取样, 将棉花植株放入装有干冰的泡沫盒中带回实验室, 清洗干净后用吸水纸将其表面水分吸干, 将一部分棉花植株研磨, 用于测定生理生化指标, 将另一部分棉花植株先于 105 $^{\circ}C$ 杀青 30 min, 再于 80 $^{\circ}C$ 烘干以测定其 Na^+ 、 K^+ 含量。

用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定棉花植株中可溶性蛋白质含量; 用蒽酮比色法测定棉花植株中可溶性糖含量; 用茚三酮比色法测定棉花植株中脯氨酸含量; 用硫代巴比妥酸比色法测定棉花植株中丙二醛含量; 用氮蓝四唑光还原法测定棉花植株中超氧化物歧化酶活性; 用愈创木酚-过氧化氢法测定棉花植株中过氧化物酶活性; 用紫外吸收法测定棉花植株中过氧化氢酶活性^[17]; Na^+ 、 K^+ 含量用离子色谱仪测定^[18]。

1.4 分析方法

采用灰色关联度分析法进行分析。按照灰色理论系统, 将 4 个棉花品种 (品系) 看作 1 个灰色系统, 每个棉花品种 (品系) 是该系统中的 1 个因素。设有 i 个棉花品种 (品系) j 个指标, 将各棉花品种 (品系) 的各指标构成设为比较数列 X_i , 各指标用 k 表示。其中丙二醛含量、 Na^+ 含量的测量值越小越好, 采用下限效果测度变换, 其他指标采用上限效果测度变换。相关计算公式如下:

$$\text{综合指标权重}(w_j): w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j, j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, w_j 为第 j 个综合指标的重要程度 (即权重), p_j 为棉花品种 (品系) 第 j 个综合指标的贡献率。

对棉花品种 (品系) 指标的原始数据进行无量纲化处理, 采用效果测度变换, 上限效果测度变换公式如下:

$$L_{ij} = X_{ij} / X_{\max} (X_{ij} \leq X_{\max}) \quad (2)$$

式中, L_{ij} 为第 i 个棉花品种 (品系) 第 j 个指标的标准值, X_{\max} 为指标中的最大值, X_{ij} 构成样本评价矩阵。

下限效果测度变换公式如下:

$$L_{ij} = X_{\min} / X_{ij} (X_{ij} \geq X_{\min}) \quad (3)$$

式中, L_{ij} 为第 i 个棉花品种 (品系) 第 j 个指标的标准值, X_{\min} 为指标中的最小值, X_{ij} 构成样本评价矩阵。按下式计算各棉花品种 (品系) 指标序列值与最优序列值的差 $[\Delta_i(k)]$:

$$\Delta_i(k) = |1 - L_{ij}| \quad (4)$$

其他相关计算公式:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (5)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (6)$$

$$r'_i = \sum_{k=1}^n \omega_k \xi_i(k) \quad (7)$$

式中, $\xi_i(k)$ 为关联系数; ρ 为分辨系数, $\rho = 0.5$; r_i 为关联度; ω_k 为各指标的权重; r'_i 为灰色关联度评价价值。

1.5 数据处理

用 Excel 2017 对试验数据进行整理、绘图并计算灰色关联度, 用 SPSS 20.0 软件进行方差分析与主成分分析。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对不同品种 (品系) 棉花叶片渗透调节物质的影响

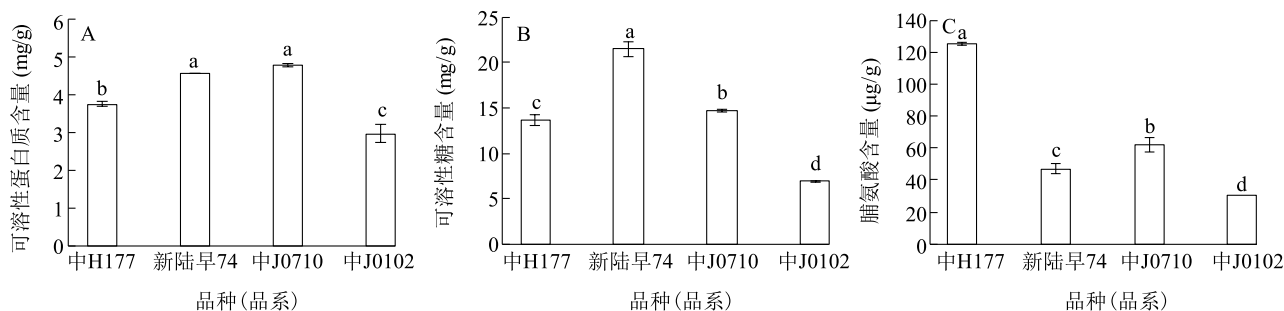
本研究发现, 盐胁迫对不同品种 (品系) 棉花叶片可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量的影响有差异。由图 1A 可以看出, 棉花叶片可溶性蛋白质含量以盐敏感品种新陆早 74 和耐盐品系中 J0710 最高, 两者间无显著差异, 并且这 2 个棉花品种 (品系) 叶片可溶性蛋白质含量均显著高于其他棉花品种, 叶片可溶性蛋白质含量较高的还有耐盐棉花品种中 H177, 而盐敏感棉花品种中 J0102 的叶片可溶性蛋白质含量最低。由图 1B、图 1C 可以看出, 各棉花品种 (品系) 叶片可溶性糖含量与脯氨酸含量均表现出显著差异 ($P < 0.05$), 盐敏感棉花品种新陆早 74 叶片可溶性糖含量最高, 并且显著高于其他棉花品种 (品系), 而盐敏感棉花品种中 J0102 叶片可溶性糖含量显著低于其他棉花品种 (品系)

($P<0.05$);耐盐棉花品种中 H177 叶片脯氨酸含量最高,其次为耐盐棉花品系中 J0710,这 2 个棉花品种(品系)的脯氨酸含量均显著高于盐敏感棉花品种新陆早 74 和中 J0102。

2.2 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片叶绿素 SPAD 值和丙二醛含量的影响

如图 2A 所示,不同品种(品系)棉花叶片的叶绿素 SPAD 值存在差异,耐盐棉花品系中 J0710 叶片的叶绿素 SPAD 值最高,显著高于其他棉花品种

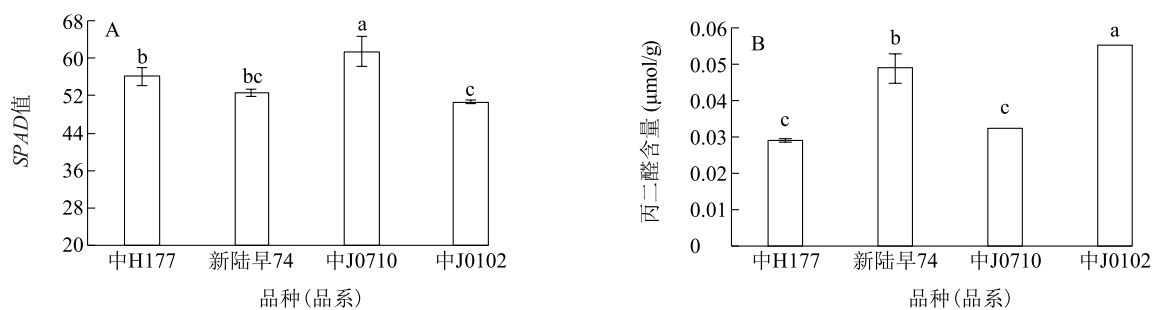
($P<0.05$),其次为耐盐棉花品种中 H177。此外,耐盐棉花品种(品系)的叶绿素 SPAD 值均明显高于盐敏感棉花品种,盐敏感棉花品种中 J0102 叶片的叶绿素 SPAD 值最低。由图 2B 可以看出,不同品种(品系)棉花叶片的 MDA 含量间存在显著差异($P<0.05$),盐敏感棉花品种中 J0102 叶片的 MDA 含量最高,其次为盐敏感棉花品种新陆早 74,表明盐敏感棉花品种的膜损伤程度较为严重,而耐盐棉花品种(品系)中 H177、中 J0710 的叶片 MDA 含量低。



A: 可溶性蛋白含量; B: 可溶性糖含量; C: 脯氨酸含量。不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ($P<0.05$)。

图1 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片渗透调节物质的影响

Fig.1 Effects of salt stress on osmotic regulating substances in leaves of different cotton cultivars (strains)



A: SPAD 值; B: 丙二醛含量。不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ($P<0.05$)。

图2 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片 SPAD 值及丙二醛含量的影响

Fig.2 Effects of salt stress on soil and plant analyzer development (SPAD) value and malondialdehyde (MDA) content in leaves of different cotton cultivars (strains)

2.3 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片光合特性的影响

本研究发现,耐盐棉花品种(品系)和盐敏感棉花品种间的光合特性有一定差异。由图 3A 可以看出,耐盐棉花品系中 J0710 叶片的 P_n 最高,显著高于其他棉花品种($P<0.05$),耐盐棉花品种中 H177 和盐敏感棉花品种中 J0102 间的叶片 P_n 无显著差异,但二者均显著高于盐敏感品种新陆早 74。由图 3B、图 3C、图 3D 可以看出,各棉花品种(品系)间在叶片 G_s 、 C_i 和 T_r 上的差异基本相似,均表现为耐盐

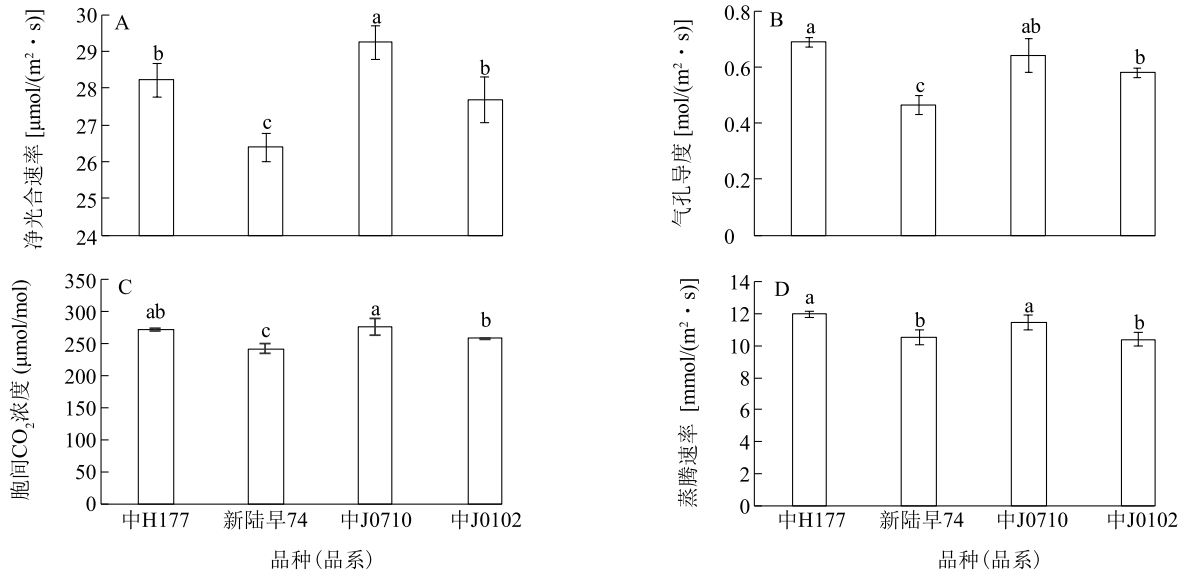
棉花品种(品系)较高,盐敏感棉花品种较低。耐盐棉花品种(品系)中 H177 和中 J0710、盐敏感棉花品种中 J0102 的 G_s 、 C_i 均显著高于盐敏感棉花品种新陆早 74 ($P<0.05$);耐盐棉花品种(品系)间的 T_r 无显著差异,盐敏感棉花品种间的 T_r 也无显著差异,并且耐盐棉花品种(品系)的 T_r 均显著高于盐敏感棉花品种($P<0.05$)。

2.4 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片抗氧化酶活性的影响

本研究发现,不同棉花品种(品系)间的抗氧化

酶活性有一定差异。由图 4A 可以看出,耐盐棉花品种(品系)中 H177、中 J0710 和盐敏感棉花品种新陆早 74 间的 *SOD* 活性无显著差异,但均显著高于盐敏感棉花品种中 J0102 ($P<0.05$)。由图 4B 可以看出,在 *POD* 活性方面,耐盐棉花品系中 J0710 和盐敏感棉

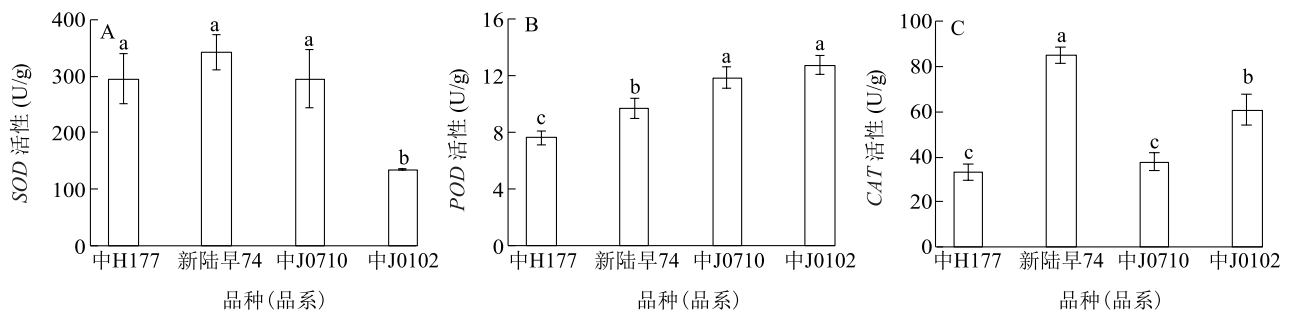
花品种中 J0102 叶片的 *POD* 活性最高,两者间无显著差异,且两者均显著高于其他棉花品种 ($P<0.05$)。由图 4C 可以看出,盐敏感棉花品种(新陆早 74 和中 J0102)叶片中的 *CAT* 活性显著高于耐盐棉花品种(品系)(中 H177 和中 J0710) ($P<0.05$)。



A: 净光合速率; B: 气孔导度; C: 胞间 CO_2 浓度; D: 蒸腾速率。品种(品系)间标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图3 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片光合特性的影响

Fig.3 Effects of salt stress on photosynthetic characteristics in leaves of different cotton cultivars (strains)



A: 超氧化物歧化酶(*SOD*)活性; B: 过氧化物酶(*POD*)活性; C: 过氧化氢酶(*CAT*)活性。品种(品系)间标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图4 盐胁迫对不同品种(品系)棉花叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of salt stress on antioxidant enzyme activities in leaves of different cotton cultivars (strains)

2.5 盐胁迫对不同品种(品系)棉花 Na^+ 、 K^+ 含量的影响

如表 1 所示,在盐胁迫环境下,耐盐棉花品种中 H177 叶片、根中 Na^+ 含量显著高于其他棉花品种(品系) ($P<0.05$),耐盐棉花品系中 J0710 茎中 Na^+ 含量显著高于其他棉花品种。耐盐棉花品种中 H177 各器官中 K^+ 含量、 K^+/Na^+ 均显著高于其他棉花品种(品系) ($P<0.05$),而盐敏感棉花品种中

J0102 叶、茎中 K^+/Na^+ 显著低于其他棉花品种(品系) ($P<0.05$),但根中 K^+/Na^+ 与耐盐棉花品系中 J0710 无显著差异。

2.6 主成分分析和灰色关联度分析

对 4 个棉花品种(品系)中 H177、新陆早 74、中 J0710 和中 J0102 受盐胁迫后的 21 个指标进行主成分分析。结果表明,第 1 主成分(PC1)、第 2 主成分(PC2)和第 3 主成分(PC3)特征值均大于 1,主成分

特征值中 3 个成分的累积方差贡献率达到 85.63%。将原来的 21 个单项指标转换为 3 个相互独立的主成分,并对数据进行极差法标准化处理后,根据公式

(1) 计算权重。由表 2 可以看出,本研究测定的 21 个评价指标中权重系数较大的为 MDA 含量、SPAD 值、CAT 活性、 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 。

表 1 盐胁迫对不同品种(品系)棉花各器官 Na^+ 、 K^+ 含量的影响

Table 1 Effects of salt stress on Na^+ and K^+ contents in organs of different cotton cultivars(strains)

处理	Na^+ 含量 (mg/g)			K^+ 含量 (mg/g)			K^+/Na^+		
	叶	茎	根	叶	茎	根	叶	茎	根
中 H177	19.02±0.17a	17.84±0.23b	22.40±0.11a	19.51±0.17a	41.27±0.15a	38.90±0.05s	1.03±0.01a	2.31±0.03a	1.74±0.01a
新陆早 74	16.99±0.00b	14.24±0.25d	17.96±0.18b	13.81±0.30b	19.39±0.36c	16.98±0.41b	0.81±0.02b	1.36±0.00c	0.95±0.02b
中 J0710	15.59±1.48c	19.29±0.36a	17.16±0.16c	12.98±0.21c	27.65±0.47b	12.82±0.07c	0.84±0.07b	1.43±0.01b	0.75±0.01c
中 J0102	12.26±0.12d	17.17±0.46c	13.63±0.09d	8.83±0.36d	7.31±0.07d	10.00±0.49d	0.72±0.04c	0.43±0.02d	0.73±0.04c

同一列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

对数据进行无量纲化处理,并根据公式(5)、公式(6)和公式(7)的计算结果得到各指标的权重。根据灰色关联度分析方法计算得出,各指标的权重系数中较大的为可溶性蛋白质含量、SPAD 值、POD 活性、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r (表 2)。计算各棉花品种(品系)的灰色综合评价,由表 3 可见,4 个棉花品种(品系)的关联度为 0.66~0.81,其中中 H177 的关联度最高,为 0.81,中 J0102 的关联度最低,为 0.66;根据 r_i' 对棉花品种(品系)进行耐盐性评价排序:中 H177>中 J0710>新陆早 74>中 J0102。

表 2 不同棉花品种(品系)的单项指标权重系数

Table 2 Weight coefficients of single index of different cotton cultivars(strains)

分析方法	指标	权重系数
主成分分析法	MDA 含量	0.07
	SPAD 值	0.07
	CAT 活性	0.08
	P_n	0.08
	G_s	0.08
	C_i	0.08
	T_r	0.07
灰色关联度分析	SP 含量	0.05
	SPAD 值	0.06
	POD 活性	0.05
	P_n	0.06
	G_s	0.05
	C_i	0.06
	T_r	0.06

MDA:丙二醛;SPAD 值:相对叶绿素含量;CAT:过氧化氢酶;POD:过氧化物酶;SP:可溶性蛋白质; P_n :净光合速率; G_s :气孔导度; C_i :胞间 CO_2 浓度; T_r :蒸腾速率。

表 3 供试棉花品种(品系)指标的关联度及排序

Table 3 Correlation degree of tested cotton cultivars(strains) and related ranking

棉花品种(品系)	r_i'	r_i' 排序
中 H177	0.81	1
新陆早 74	0.68	3
中 J0710	0.71	2
中 J0102	0.66	4

r_i' :灰色关联度评价。

3 讨论

3.1 不同耐盐棉花品种(品系)渗透调节系统和抗氧化酶系统的差异

一般来说,植株能够通过积累渗透调节物质来抵抗盐胁迫^[19]。梁晓艳等^[20]研究发现,在盐胁迫环境下,耐盐植物品种叶片中较高的脯氨酸含量是其重要的耐盐适应特征。在本研究中同样发现,耐盐棉花品种(品系)植株叶片中的脯氨酸含量显著高于盐敏感棉花品种,表明在盐胁迫下耐盐棉花中脯氨酸的积累有利于其维持较高的抗性。在本研究中还发现,耐盐棉花品种(品系)与盐敏感棉花品种间的渗透调节物质差异存在不一致,其中盐敏感棉花品种新陆早 74 叶片中的可溶性蛋白含量、可溶性糖含量显著高于耐盐棉花品种中 H177,盐敏感棉花品种中 J0102 叶片中的可溶性蛋白含量、可溶性糖含量则显著低于耐盐棉花品种(品系),可能是由于 2 种盐敏感棉花品种对盐的耐受性不同^[21]。由于盐胁迫造成植株中 Na^+ 过量,使得活性氧产生和积累,造成了氧化胁迫,从而加剧了膜脂过氧化产物丙

二醛的积累^[22]。在本研究中,耐盐棉花品种(品系)的膜脂过氧化产物丙二醛含量显著低于盐敏感品种,植株在应激环境下,能够通过 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 活性的变化来提高自身的抗氧化水平以清除活性氧^[23]。本试验通过对不同棉花品种(品系)叶片中 *SOD* 活性、*POD* 活性和 *CAT* 活性的研究发现,盐敏感棉花品种与耐盐棉花品种(品系)的抗氧化酶活性具有不同的变化趋势:耐盐棉花品种(品系)的 *SOD* 活性较高但 *POD* 活性不高,可能由于叶片中的 *SOD* 活性增大,导致超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)更多地转化为 H_2O_2 ,从而抑制了 *POD* 活性;耐盐棉花品种(品系)叶片中的 *CAT* 活性则显著低于盐敏感棉花品种,说明氧化应激方式在耐盐棉花类型和种间存在差异^[24],也进一步说明耐盐棉花品种(品系)和盐敏感棉花品种抵抗盐胁迫的方式存在差异。

3.2 不同耐盐棉花品种(品系)光合效率的差异

本研究发现,盐胁迫条件下盐敏感棉花品种的光合参数(P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r)显著低于耐盐棉花品种(品系),并且盐胁迫会导致植株光合作用减弱^[25]。对光合作用的影响主要体现在2个方面:气孔因素和非气孔因素^[26]。气孔限制会导致 C_i 降低,进而降低净光合速率,而非气孔限制一般会引起 C_i 升高^[27]。在本研究中,盐敏感棉花品种的 P_n 、 G_s 和 C_i 变化一致,说明盐敏感棉花品种的光合速率主要受气孔因素的影响。郭丽丽等^[28]研究发现,在盐胁迫下光合速率的下降受到气孔和非气孔因素影响,本研究中耐盐棉花品种(品系)间 P_n 、 G_s 和 C_i 的变化并不一致。通过对非气孔因素的研究发现,耐盐棉花品种(品系)叶片中的叶绿素含量显著高于盐敏感棉花品种,并且叶绿素含量在耐盐棉花品种(品系)间也存在显著差异,说明耐盐棉花品种(品系)通过提高自身的光合作用来降低盐胁迫的伤害,并且 P_n 的变化可能同时受到气孔因素和非气孔因素影响。

3.3 不同耐盐棉花品种(品系)对离子平衡响应的差异

盐胁迫下大量 Na^+ 的流入及 K^+ 的排出会产生离子毒害,而植株抵御离子毒害的重要途径是通过抑制 Na^+ 向地上部分运输并且减缓叶片中 K^+ 的流失^[29-30]。在本研究中,耐盐棉花品种中H177地下部分较其他棉花品种(品系)保持了较高的 Na^+ 含量,并且根系中的 Na^+ 含量高于地上部分,表明其根部保留了大量 Na^+ ,减少了 Na^+ 向地上部分的运输,从而减轻了对幼

苗的毒害。相关研究发现,组织中高 K^+/Na^+ 是棉花耐盐能力的一个重要鉴定指标^[31]。在本研究中,耐盐棉花品系中J0710叶、根中 Na^+ 、 K^+ 含量均显著低于盐敏感棉花品种新陆早74,但其地上部分的 K^+/Na^+ 较盐敏感棉花品种新陆早74高,这可能是由于植株能够采取更有效的机制参与 K^+ 、 Na^+ 的转运,而不是依赖于对 K^+ 、 Na^+ 的吸收能力^[32-33]。在本研究中,耐盐棉花品种(品系)和盐敏感棉花品种各器官的 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 表现出明显差异,总体表现为耐盐棉花品种(品系)高于盐敏感棉花品种,也表明耐盐棉花品种(品系)能够通过保持低 Na^+ 、高 K^+ 来维持自身的离子稳态。

3.4 棉花苗期的耐盐性评价

盐胁迫对棉花的影响表现在渗透调节、抗氧化酶活性、光合作用及离子平衡等方面^[34],为了全面准确地评价不同棉花品种(品系)的耐盐性,应当通过与耐盐性相关的多项指标进行综合评价。在本研究中,通过对4个不同耐盐性棉花品种(品系)的21个相关指标的鉴定评价发现,光合参数、*SPAD*值和*CAT*活性、*POD*活性在其耐盐性评价中的权重系数较高,表明这些指标能反映棉花的耐盐性,因此可以通过施加外源添加物等方法提高棉花的光合效率、抗氧化酶活性等增强棉花的耐盐性^[35-36]。通过主成分分析法和灰色关联度分析法进行的棉花耐盐性综合评价,使得不同棉花品种(品系)的耐盐性评价更加客观合理,也为今后在实际生产中评价棉花的耐盐性提供了较为方便的方法。

4 结 论

在盐胁迫环境下,棉花通过合成较多叶绿素来维持其叶片的光合能力,同时通过维持高 K^+/Na^+ 、较低的丙二醛含量来提高自身的耐盐性。与盐敏感棉花相比,耐盐棉花始终保持较高的光合能力和 K^+/Na^+ 。通过主成分分析法和灰色关联度分析法进行综合评价发现,耐盐性评价指标中的光合指标、*SPAD*值和抗氧化酶活性可作为重要的鉴定指标,并且鉴定结果表明,供试的棉花品种(品系)中,中H177在苗期的耐盐性较好。

参考文献:

- [1] MUNN R, GILLIHAM M. Salinity tolerance of crops-what is the cost? [J]. New Phytologist, 2015, 208(3): 668-673.

- [2] 龙卫华,胡茂龙,陈 松,等. 盐地种植对甘蓝型油菜产量和品质性状的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):85-87.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [4] KONG X Q, LUO Z, ZHANG Y J, et al. Soaking in H_2O_2 regulates ABA biosynthesis and GA catabolism in germinating cotton seeds under salt stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017,39(1):2.
- [5] WANG N, QI H K, SU G L, et al. Genotypic variations in ion homeostasis, photochemical efficiency and antioxidant capacity adjustment to salinity in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2016,62(3):240-246.
- [6] 阿曼古丽·买买提阿力,王立红,郑 慧,等. 盐胁迫对海岛棉幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(2):121-126, 200.
- [7] 刘金定,朱召勇,樊宝香. 棉花品种在不同浓度盐胁迫下的生理表现[J]. 中国棉花,1995,22(9):16-17.
- [8] 吴晓东,王 巍,金路路,等. 盐胁迫对棉花光合作用和生理指标的影响[J]. 中国棉花,2013,40(6):24-26.
- [9] 王汐妍,裴波音,刘玉姣,等. 盐胁迫对不同耐盐性棉花幼苗生长与生理及无机离子器官分布的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2017,43(3):273-280.
- [10] SEKMEN A H, OZGUR R, UZILDAY B, et al. Reactive oxygen species scavenging capacities of cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars under combined drought and heat induced oxidative stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014,99:141-149.
- [11] ASHRAF M Y, AHMAD S. Influence of sodium chloride on ion accumulation, yield components and fibre characteristics in salt-tolerant and salt-sensitive lines of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Field Crops Research, 2000,66(2):115-127.
- [12] IBRAHIM W, QIU C W, ZHANG C, et al. Comparative physiological analysis in the tolerance to salinity and drought individual and combination in two cotton genotypes with contrasting salt tolerance [J]. Physiologia Plantarum, 2019,165(2):155-168.
- [13] LI R L, SHI F C, FUKUDA K, et al. Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010,56(5):725-733.
- [14] ALAMIN M, ZENG D D, SULTANA M H, et al. Photosynthesis, cellulose contents and ultrastructure changes of mutant rice leading to screw flag leaf [J]. Plant Growth Regulation, 2018,85(1):1-13.
- [15] 戴海芳,武 辉,阿曼古丽·买买提阿力,等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(7):1290-1300.
- [16] 马 辉,戴 路,阿布都艾尼·阿布都维力,等. 灰色关联度法在优质棉品种综合评价中的应用[J]. 中国棉花,2018,45(4):19-21.
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:142-228.
- [18] 刘自刚,王志江,方 圆,等. NaCl 胁迫对白菜型冬油种子萌发和幼苗生理的影响[J]. 中国油料作物学报,2017,39(3):351-359.
- [19] 马洪波,曹月阳,陈 杰,等. 土壤盐胁迫对小麦养分和渗透调节物质的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(6):1300-1305.
- [20] 梁晓艳,顾寅钰,李 萌,等. 盐胁迫下不同耐盐性花生品种形态及生理差异研究[J]. 花生学报,2018,47(1):19-26.
- [21] 韩 冰,徐 刚,郭世荣,等. 不同浓度盐胁迫对黄瓜幼苗生长和生理代谢的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(1):172-177.
- [22] PAYTON P, WEBB R, KORNYEYEV D, et al. Protecting cotton photosynthesis during moderate chilling at high light intensity by increasing chloroplastic antioxidant enzyme activity[J]. Journal of Experimental Botany, 2001,52(365):2345-2354.
- [23] TANG L L, CAI H, ZHAI H, et al. Overexpression of *Glycine soja* WRKY20 enhances both drought and salt tolerance in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2014,118(1):77-86.
- [24] 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.
- [25] 郝治安,吕有军. 植物耐盐机制研究进展[J]. 河南农业科学,2004(11):30-33.
- [26] 王旭明,赵夏夏,周鸿凯,等. NaCl 胁迫对不同耐盐性水稻某些生理特性和光合特性的影响[J]. 热带作物学报,2019,40(5):882-890.
- [27] 张晓晓,殷小琳,李红丽,等. NaCl 胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报,2017,37(21):7258-7265.
- [28] 郭丽丽,郝立华,贾慧慧,等. NaCl 胁迫对两种番茄气孔特征、气体交换参数和生物量的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(12):3949-3958.
- [29] CHEN M, YANG Z, LIU J, et al. Adaptation mechanism of salt excluders under saline conditions and its applications [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018,19(11):3668.
- [30] 颜 宏,石德成,尹尚军,等. 外施 Ca^{2+} 、ABA 及 H_3PO_4 对盐碱胁迫的缓解效应[J]. 应用生态学报,2000,11(6):889-892.
- [31] 王 宁,杨 杰,黄 群,等. 盐胁迫下棉花 K^+ 和 Na^+ 离子转运的耐盐性生理机制[J]. 棉花学报,2015,27(3):208-215.
- [32] BOSE J, SHABALA L, POTTOSIN I, et al. Kinetics of xylem loading, membrane potential maintenance, and sensitivity of K^+ - permeable channels to reactive oxygen species: physiological traits that differentiate salinity tolerance between pea and barley [J]. Plant, Cell & Environment, 2014,37(3):589-600.
- [33] SHABALA S, BOSE J, HEDRICH R. Salt bladders: do they matter? [J]. Trends in Plant Science, 2014,19(11):687-691.
- [34] SHARIF I, ALEEM S, FAROOQ J, et al. Salinity stress in cotton: effects, mechanism of tolerance and its management strategies [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019,25(1):1-14.
- [35] 高 雁,娄 恺,李 春. 盐分胁迫下棉花幼苗对外源甜菜碱的生理响应[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊1):244-248.
- [36] 王立红,张巨松,李星星,等. 外源水杨酸对盐胁迫下棉花幼苗光合作用的影响[J]. 核农学报,2016,30(9):1864-1871.

(责任编辑:徐 艳)