

· 研究报告 ·

## 棉粕对盐碱胁迫下棉花生理及生长补偿效应

马宏秀, 王开勇\*, 张开祥, 孟春梅, 安梦洁

石河子大学农学院, 石河子 832000

**摘要** 为探究棉粕对盐碱胁迫下棉花(*Gossypium hirsutum*)的抗盐碱机理, 通过田间试验, 研究添加不同棉粕用量对 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐碱胁迫下棉花生理及生长的补偿效应。结果表明, 添加棉粕能够增加盐碱胁迫下棉花不同器官对 $\text{K}^+$ 的吸收, 降低对 $\text{Na}^+$ 的吸收, 维持盐碱胁迫下细胞内 $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ 的平衡, 显著促进棉花生长, 提高叶片叶绿素含量和光合作用效率, 有效缓解盐碱胁迫对棉花的伤害。其中, 以添加 $6\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉粕处理的效果最显著, 且盐胁迫下棉粕的改良效果较好。主成分分析结果表明, 盐碱胁迫下棉花生长生理的主要影响因素为叶片 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比值、根长、鲜重、干重和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )。

**关键词** 棉粕, 盐碱胁迫, 生理, 生长, 补偿效应

马宏秀, 王开勇, 张开祥, 孟春梅, 安梦洁 (2019). 棉粕对盐碱胁迫下棉花生理及生长补偿效应. 植物学报 54, 208–216

盐碱土是盐土、碱土以及不同种盐化土、碱化土的总称。我国盐碱地总面积约 $3.67\times 10^7\text{ hm}^2$ , 具有分布广、面积大、种类多的特点, 主要分布于西部干旱、半干旱地区。新疆是典型的干旱区, 土壤盐渍化非常严重, 不仅成为制约当地农业发展的主要障碍, 也是影响绿洲生态稳定的重要因素(田长彦等, 2000; 翁永玲和宫鹏, 2006; 张树文等, 2010)。目前, 国内外有关盐碱地治理技术的研究较多(王文杰等, 2009; 郭凯等, 2016; 韦本辉等, 2017; Zhang et al., 2017), 其中对沸石、绿肥、粉煤灰、污泥和聚丙烯酰胺(员学锋等, 2005)等土壤改良剂研究较多, 相关技术逐渐成熟, 但是存在改良效果不佳和二次污染等负面效应(牛花朋等, 2006)。综合来看, 目前探索改良剂的治理技术时偏重应用效果, 忽略了与当地资源结合的优势。

新疆作为我国最大的商品棉生产基地, 棉籽原料十分丰富, 棉粕是棉籽榨油形成的副产物, 因此新疆是我国棉粕主产区之一。棉粕价格低廉, 主要用作动物饲料, 但棉粕中的棉酚具有一定的毒性, 极大降低了其饲用价值(Jalees et al., 2011; 陈琪和石剑华, 2013)。张娜等(2009)以棉粕为原料, 对提取的棉蛋白进行理化性质分析, 发现棉蛋白的提取率可达75.5%。刘玉国等(2013)针对盐渍化土壤对几种常见土壤改良剂进行初次筛选, 并对改良后盐渍化土壤电导率和pH值进行测定, 发现用葵粕、棉粕、柠檬酸和

沼液改良盐渍化土壤效果较好。

盐碱胁迫是两种不同性质的胁迫。盐胁迫的危害主要体现在渗透胁迫和离子毒害两个方面(Munns, 2002; Wang et al., 2005), 而碱胁迫还包括高pH值引起的胁迫(石德成和殷丽娟, 1993)。研究表明, 随着盐碱浓度的增大, 碱胁迫下小冰麦(*Triticum aestivum*-*Agropyronin termedium*)的生长率降幅大于盐胁迫, 并且碱胁迫对离子积累的干扰也较大(杨国会和石德成, 2011)。碱胁迫使细胞内离子稳态失衡是导致净光合速率( $P_n$ )降低的原因(Li et al., 2010)。也有学者认为低浓度盐短期处理时, 植物净光合速率降低主要是由气孔因素引起的; 而高浓度盐长期处理时, 则主要受非气孔因素的影响(黄清荣等, 2018)。将盐胁迫处理后的小麦(*T. aestivum*)种子放回蒸馏水中能继续萌发, 而在碱胁迫下却多半死亡, 表明盐碱胁迫下, 小麦种子活力、生理及生长补偿效应机制不同(蔺吉祥等, 2011)。一般认为, 棉花(*Gossypium hirsutum*)幼苗期和开花结铃期是对盐分较为敏感的时期(赵可夫和王韶唐, 1990)。研究表明, 棉花耐盐能力以出苗时最弱(贾玉珍等, 1987), 且随着生育时期的不断推进而逐渐提高, 在蕾期、初花期耐盐能力又开始下降, 并于开花结铃盛期耐盐能力达到最强(罗宾, 1983)。目前, 多数研究集中于盐碱胁迫下植株幼苗期的生长生理变化(阿曼古丽·买买提阿力等, 2017),

收稿日期: 2018-04-08; 接受日期: 2018-08-23

\* 通讯作者。E-mail: wky20@163.com

而对棉花花铃期耐盐机理的研究较少, 通过添加棉粕改良盐碱地的方式更为鲜见。因此, 深入研究棉粕在盐碱地治理方面的利用途径具有重要的实际意义。为此, 本研究以新疆典型的2种盐渍化土壤(中性盐NaCl和碱性盐Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)为研究对象, 通过田间试验模拟重度盐碱土壤条件, 探讨添加棉粕对盐碱胁迫下棉花的生理生长指标和离子吸收的影响, 以期揭示棉粕改良盐渍化土壤的作用机理, 为开发盐渍化土壤棉花栽培技术提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

于2017年在新疆石河子大学试验站(44°18'42"N, 86°03'21"E)进行田间小区试验。土壤类型为壤土, 其基本理化性质为有机质含量16.19 g·kg<sup>-1</sup>, 土壤电导率(EC<sub>1:5</sub>) 0.28 dS·m<sup>-1</sup>, 全氮0.5 g·kg<sup>-1</sup>, 速效磷20.40 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾112 mg·kg<sup>-1</sup>, pH7.73。棉花品种为早熟陆地棉品种新陆早60号(*Gossypium hirsutum* cv. 'Xinluzao 60'), 在全疆各地广泛种植, 由新疆农垦科学院棉花研究所培育而成。试验田所用肥料为棉粕和复合肥(用高塔硝硫基肥与尿素配制, N:P:K=20:15:9, v/v/v)。

### 1.2 试验设计

2016年9月, 采集混合土样测定实验地土壤基本理化性质, 并通过撒施中性盐(NaCl)和碱性盐(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)的方式对试验小区预先进行盐化及碱化处理, 使土壤盐碱含量达到8 g·kg<sup>-1</sup>, 处理后盐化土壤的pH值为8.43, EC<sub>1:5</sub>为1.94 dS·m<sup>-1</sup>; 碱化土壤pH值为9.89, EC<sub>1:5</sub>为1.03 dS·m<sup>-1</sup>。随后将预定量的棉粕均匀地撒入不同小区, 并进行0–20 cm浅翻处理, 使其充分混合。于2017年4月播种, 9月收获。小区面积6 m<sup>2</sup>, 小区间距1.5 m, 并在小区之间设置约50 cm深的双层塑料隔膜。所有小区均采用地膜滴灌栽培方式, 一膜三管六行, 宽窄行处理, 宽行距60 cm, 窄行距20 cm。一次性施入基肥: 氮300 kg·hm<sup>-2</sup>, 五氧化二磷237 kg·hm<sup>-2</sup>, 氧化钾123 kg·hm<sup>-2</sup>。全生育期滴灌量4 200 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。其它管理措施同当地大田常规管理。

试验共设7个处理: NaCl+0 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕(Y<sub>0</sub>)、NaCl+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕(Y<sub>1</sub>)、NaCl+6 000 kg·hm<sup>-2</sup>

棉粕(Y<sub>2</sub>)、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕(J<sub>0</sub>)、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕(J<sub>1</sub>)、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+6 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕(J<sub>2</sub>)及未进行盐化处理和未撒施棉粕的空白对照(CK)。每个处理设3次重复。

### 1.3 样品采集与光合参数测定

在棉花花铃期进行样品采集。每小区随机选取5株, 采用常规方法测定株高、根长、鲜重和干重(地上部和地下部)。叶绿素提取采用乙醇提取法, 紫外分光光度法测定其含量(李合生和陈华癸, 2000)。分别将烘干的根、茎和叶粉碎过筛, 准确称取200 mg粉末样品, 利用硝酸-双氧水消解, 采用火焰光度计法(鲍士旦, 2000)测定Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>含量。光合参数采用便携式光合仪(CARIS-2, 英国PP Systems公司)于中午12:00–14:30取棉花叶片倒4叶进行测定。测定过程中光强为400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 大气温度(25±1)°C, 大气CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>a</sub>)变化范围为(400±10) μmol·L<sup>-1</sup>。测定指标包括净光合速率(P<sub>n</sub>)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>i</sub>)、蒸腾速率(E)和气孔导度(G<sub>s</sub>)。气孔限制值计算公式为L<sub>s</sub>=1–C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub> (C<sub>a</sub>为空气中CO<sub>2</sub>浓度)。每个处理重复测定5次, 取平均值。

### 1.4 主成分分析

为了分析不同处理对棉花生长的影响, 利用DPS V9.01软件进行各因子主成分分析(principal components analysis, PCA), 同时做因子载荷矩阵。

### 1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和DPS V9.01软件处理数据并绘制图表。利用SPSS 19.0软件对数据进行统计分析。差异显著性检验采用Turkey检验法进行多重比较。

## 2 结果与讨论

### 2.1 棉粕对盐碱胁迫下棉花不同器官K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>累积效应的影响

结果(图1A)表明, 与对照相比, 不同处理棉花根、茎、叶K<sup>+</sup>含量均有所增加, 盐碱胁迫下茎和叶中K<sup>+</sup>累积显著高于根部。随着棉粕施用量的增加, 盐碱胁迫下棉花的K<sup>+</sup>含量呈现逐渐增加的趋势。Y<sub>1</sub>处理与Y<sub>0</sub>处理相比差异不显著, Y<sub>2</sub>处理的根、茎、叶中K<sup>+</sup>含量分别增加了8.09%、31.55%和42.81%。与J<sub>0</sub>处理相比, J<sub>2</sub>

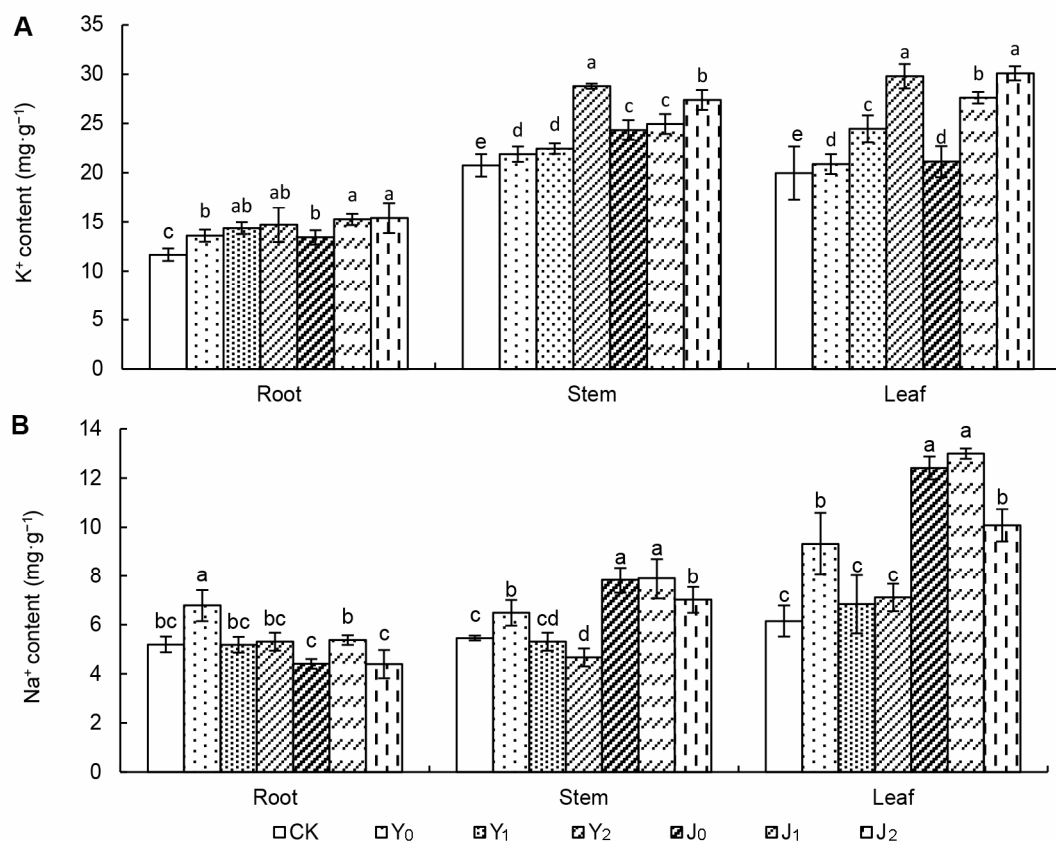


图1 棉粕对盐碱胁迫下棉花不同器官K<sup>+</sup> (A)、Na<sup>+</sup> (B)含量的影响

CK: 对照; Y<sub>0</sub>: NaCl+0 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕; Y<sub>1</sub>: NaCl+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕; Y<sub>2</sub>: NaCl+6 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕; J<sub>0</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕; J<sub>1</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕; J<sub>2</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+6 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕。不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。

Figure 1 Effect of cottonseed meal on K<sup>+</sup> (A) and Na<sup>+</sup> (B) content of cotton under salinity-alkalinity stress

CK: Control; Y<sub>0</sub>: NaCl+0 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal; Y<sub>1</sub>: NaCl+3 000 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal; Y<sub>2</sub>: NaCl+6 000 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal; J<sub>0</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal; J<sub>1</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+3 000 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal; J<sub>2</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+6 000 kg·hm<sup>-2</sup> cottonseed meal. Different lowercase letters indicate significant differences among each treatment ( $P<0.05$ ).

处理的根、茎、叶中K<sup>+</sup>含量分别增加了14.51%、12.54%和42.26%。上述结果表明,在盐胁迫下,添加棉粕后棉花不同器官中K<sup>+</sup>含量变化大小为叶>茎>根;在碱胁迫下,添加棉粕后棉花不同器官中K<sup>+</sup>含量变化大小为叶>根>茎。

与对照相比,不同处理棉花根、茎、叶中Na<sup>+</sup>含量变化规律不同,盐碱胁迫下茎和叶中Na<sup>+</sup>累积显著高于根部(图1B)。与Y<sub>0</sub>处理相比,Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>处理棉花根、茎、叶中Na<sup>+</sup>含量显著降低,但Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>两者差异不显著,根、茎、叶中Na<sup>+</sup>含量分别降低了21.85%和23.64%、18.24%和28.01%、23.61%和26.57%。与J<sub>0</sub>处理相比,J<sub>1</sub>处理与其差异不显著,J<sub>2</sub>处理棉花各器官Na<sup>+</sup>含量显著降低,根、茎、叶Na<sup>+</sup>含量分别降低了

0.30%、10.34%和18.73%。以上结果表明,在盐胁迫下,添加3 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕后棉花不同器官中Na<sup>+</sup>含量变化大小依次为叶>茎>根,添加6 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕后棉花不同器官中Na<sup>+</sup>含量变化大小为茎>叶>根;在碱胁迫下,添加6 000 kg·hm<sup>-2</sup>棉粕后棉花不同器官中Na<sup>+</sup>含量变化大小为叶>茎>根。

## 2.2 棉粕对盐碱胁迫下棉花不同器官K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值的影响

与对照相比,盐胁迫下,除Y<sub>0</sub>处理外,Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>处理棉花不同器官K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值均有所增加;碱胁迫下,J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>处理棉花根部K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值均有所增加,茎部和叶部K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值均有不同程度降低(图2)。盐胁迫下,茎

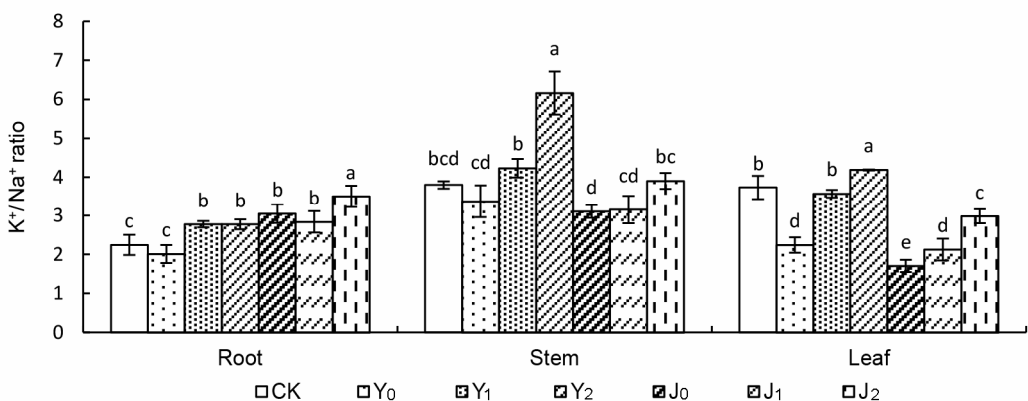


图2 棉粕对盐碱胁迫下棉花不同器官 $K^+/Na^+$ 比值的影响  
CK、Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>同图1。不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。

Figure 2 Effect of cottonseed meal on  $K^+/Na^+$  ratio of cotton under salinity-alkalinity stress  
CK, Y<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, J<sub>0</sub>, J<sub>1</sub> and J<sub>2</sub> see Figure 1. Different lowercase letters indicate significant differences among each treatment ( $P<0.05$ ).

表1 棉粕对盐碱胁迫下棉花叶片叶绿素含量的影响

Table 1 Effect of cottonseed meal on chlorophyll content of cotton leaves under salinity-alkalinity stress

Treatment	Total chlorophyll content (mg·g <sup>-1</sup> )	Chlorophyll a content (mg·g <sup>-1</sup> )	Chlorophyll b content (mg·g <sup>-1</sup> )	Carotenoid content (mg·g <sup>-1</sup> )
CK	2.51±0.10 a	1.45±0.08 a	0.66±0.06 a	0.64±0.09 a
Y <sub>0</sub>	1.51±0.08 c	1.17±0.10 bc	0.33±0.13 b	0.34±0.09 b
Y <sub>1</sub>	1.80±0.08 bc	1.37±0.08 bc	0.43±0.09 ab	0.46±0.10 ab
Y <sub>2</sub>	2.07±0.13 ab	1.44±0.09 ab	0.45±0.10 ab	0.57±0.13 ab
J <sub>0</sub>	2.18±0.19 ab	1.17±0.13 c	0.42±0.13 ab	0.28±0.08 b
J <sub>1</sub>	1.78±0.28 bc	1.37±0.13 ab	0.33±0.10 b	0.32±0.09 b
J <sub>2</sub>	1.89±0.12 bc	1.43±0.08 ab	0.40±0.11 ab	0.51±0.16 ab

CK、Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>同图1。同列不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。  
CK, Y<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, J<sub>0</sub>, J<sub>1</sub> and J<sub>2</sub> see Figure 1. Different lowercase letters in the same column indicate that each treatment is significantly different ( $P<0.05$ ).

部和叶部以Y<sub>2</sub>处理 $K^+/Na^+$ 比值最高,根部以J<sub>2</sub>处理 $K^+/Na^+$ 比值最高。与Y<sub>0</sub>处理相比,随着棉粕施用量的增加,各处理棉花不同器官 $K^+/Na^+$ 比值也相应增加。与Y<sub>0</sub>处理相比,Y<sub>2</sub>处理根、茎、叶中 $K^+/Na^+$ 比值分别增加了38.03%、82.81%和86.88%。碱胁迫下,与J<sub>0</sub>处理相比,J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>处理棉花不同器官 $K^+/Na^+$ 比值均有所增加,其中J<sub>2</sub>处理根、茎、叶中 $K^+/Na^+$ 比值分别增加了14.77%、25.41%和75.47%。以上结果表明,在盐碱胁迫下,添加棉粕后棉花不同器官中 $K^+/Na^+$ 比值变化大小为叶>茎>根。

2.3 棉粕对盐碱胁迫下棉花生理指标的影响

与对照相比,不同处理棉花叶片叶绿素含量均有所降

低(表1)。盐胁迫下,与Y<sub>0</sub>处理相比,随着棉粕施用量的增加,棉花叶绿素含量也相应增加。Y<sub>2</sub>处理叶绿素总含量、叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量分别增加了37.09%、23.08%、36.36%和67.65%。碱胁迫下,与J<sub>0</sub>处理相比,随着棉粕施用量的增加,棉花叶绿素含量呈现不同的变化趋势,其中,J<sub>2</sub>处理叶绿素a和类胡萝卜素含量分别增加了22.22%和82.14%,而叶绿素总含量和叶绿素b含量分别降低了13.30%和4.76%。

与对照相比,Y<sub>0</sub>和J<sub>0</sub>处理的棉花叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )均有所降低(表2),表明盐碱胁迫造成棉花叶片 $P_n$ 下降的主要因素是气孔因素。与Y<sub>0</sub>处理相比,Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>处理的 $P_n$ 分别增加

表2 棉粕对盐碱胁迫下棉花光合参数的影响

Table 2 Effect of cottonseed meal on photosynthetic parameters of cotton under salinity-alkalinity stress

Treatment	$P_n$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$G_s$ ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$E$ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$C_i$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$L_s$
CK	6.73±0.15 a	111.13±1.28 a	1.81±0.25 a	281.20±0.10 b	0.25±0.10 a
Y <sub>0</sub>	6.32±0.38 b	79.17±0.70 d	1.60±1.95 ab	262.79±0.07 e	0.28±0.04 a
Y <sub>1</sub>	6.57±0.15 a	85.7±0.49 c	1.67±1.10 ab	270.00±0.06 d	0.25±0.06 a
Y <sub>2</sub>	6.63±0.27 a	94.38±1.81 b	1.76±1.86 ab	282.81±0.04 b	0.21±0.10 a
J <sub>0</sub>	5.16±0.07 c	75.16±1.63 e	1.58±1.60 b	274.77±0.08 c	0.26±0.05 a
J <sub>1</sub>	5.76±0.18 bc	85.78±1.06 c	1.63±1.54 ab	282.47±0.06 b	0.21±0.10 a
J <sub>2</sub>	5.82±0.25 b	86.02±1.51 c	1.66±1.88 ab	294.13±0.10 a	0.21±0.09 a

$P_n$ : 净光合速率;  $G_s$ : 气孔导度;  $E$ : 蒸腾速率;  $C_i$ : 胞间CO<sub>2</sub>浓度;  $L_s$ : 气孔限制值。CK、Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>同图1。同列不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。

$P_n$ : Net photosynthetic rate;  $G_s$ : Stomatal conductance;  $E$ : Transpiration rate;  $C_i$ : Inter-cellular CO<sub>2</sub> concentration;  $L_s$ : Stomatal limit value. CK, Y<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, J<sub>0</sub>, J<sub>1</sub> and J<sub>2</sub> see Figure 1. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among each treatment ( $P<0.05$ ).

表3 棉粕对盐碱胁迫下棉花生长的影响

Table 3 Effect of cottonseed meal on cotton growth under salinity-alkalinity stress

Treatment	Plant height (cm)	Root length (cm)	Fresh weight ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )	Dry weight ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )
CK	89.4±0.36 b	31.83±0.78 a	184.59±0.23 a	54.49±0.26 a
Y <sub>0</sub>	84.1±0.17 c	26.1±0.61 c	135.81±0.52 g	37.89±0.46 e
Y <sub>1</sub>	91±0.58 b	29.83±0.35 b	173.12±0.88 c	44.21±0.18 c
Y <sub>2</sub>	98.67±0.58 a	30.97±0.40 ab	181.43±0.88 b	55.15±0.34 a
J <sub>0</sub>	74.33±0.58 d	22.78±0.40 d	148.47±0.43 f	34.42±0.34 f
J <sub>1</sub>	76.33±1.15 d	25.4±0.26 c	162.33±0.96 e	39.75±0.27 d
J <sub>2</sub>	82.33±0.58 c	26.4±0.17 c	165.12±0.42 d	46.63±0.71 b

CK、Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>同图1。同列不同小写字母表示各处理差异显著( $P<0.05$ )。

CK, Y<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, J<sub>0</sub>, J<sub>1</sub> and J<sub>2</sub> see Figure 1. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among each treatment ( $P<0.05$ ).

了3.96%和4.91%;  $G_s$ 分别增加了8.25%和19.21%; 蒸腾速率( $E$ )分别增加了4.37%和10.00%;  $C_i$ 分别增加了2.74%和7.62%。与J<sub>0</sub>处理相比, J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>处理的 $P_n$ 分别增加了11.63%和12.79%;  $G_s$ 分别增加了14.13%和14.45%;  $E$ 分别增加了3.16%和5.06%;  $C_i$ 分别增加了2.80%和7.05%。以上结果表明, 在盐碱胁迫下, 添加棉粕后棉花叶片 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $E$ 和 $C_i$ 均有不同程度的增加, 其中, 碱胁迫下添加棉粕后棉花叶片的 $P_n$ 增幅大于盐胁迫。

2.4 棉粕对盐碱胁迫下棉花生长的影响

与对照相比, 各处理棉花的根长、鲜重及干重均有所降低(表3)。与Y<sub>0</sub>处理相比, Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>处理植株株高分别增加了8.20%和17.32%; 根长分别增加了14.29%和18.66%; 鲜重分别增加了27.47%和33.59%; 干重分别增加了16.68%和45.55%。与J<sub>0</sub>处理相比, J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>处

理植株株高分别增加了2.38%和9.51%; 根长分别增加了11.50%和15.89%; 鲜重分别增加了9.34%和11.21%; 干重分别增加了15.49%和35.47%。以上结果表明, 在盐碱胁迫下, 添加棉粕后棉花的株高、根长、鲜重及干重均有不同程度的增加, 其中, 盐胁迫下添加棉粕后棉花的株高、根长、鲜重及干重增加幅度均大于碱胁迫。

2.5 各指标主成分分析

对标准化后各处理的22个指标进行分析, 转换为新的综合指标, 能代替22个单项指标的绝大部分信息且贡献率最大定义为第1主成分(PC1), 其贡献率为46.85%。此外, 能代替单项指标的综合指标定义为第2主成分(PC2), 其贡献率为21.71%。对代表样点理化特性的变量进行排序作图(图3), 同时计算各理化因子载荷(表4)。

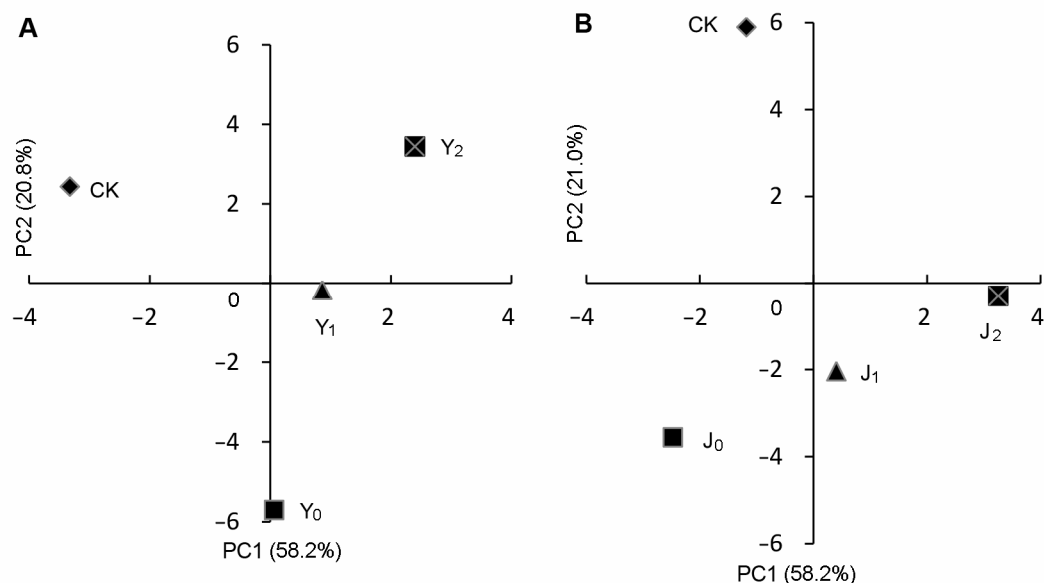


图3 棉花盐(A)和碱(B)胁迫下各指标主成分(PC)分析  
CK、Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、J<sub>0</sub>、J<sub>1</sub>和J<sub>2</sub>同图1。

Figure 3 Analysis of principal components (PC) of each index of cotton under salinity (A) and alkalinity (B) stress  
CK, Y<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, J<sub>0</sub>, J<sub>1</sub> and J<sub>2</sub> see Figure 1.

表4 棉花盐碱胁迫下不同处理因子载荷

Table 4 Load of different treatment factors of cotton under salinity-alkalinity stress

Index		Salt treatment		Alkali treatment	
		PC1	PC2	PC1	PC2
K <sup>+</sup>	Root	-0.05	0.94**	-0.67	0.69
	Stem	0.47	0.78*	-0.68	0.70
	Leaf	0.73	0.60	-0.09	0.96**
Na <sup>+</sup>	Root	-0.83*	0.01	0.41	-0.15
	Stem	-0.87*	-0.36	-0.98**	0.02
	Leaf	-0.81*	0.23	-0.95**	0.00
K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> ratio	Root	0.61	0.61	-0.67	0.59
	Stem	0.69	0.66	0.72	0.58
	Leaf	0.96**	0.15	0.93**	0.28
Physiology index	Total chlorophyll content	0.79*	-0.52	0.63	-0.55
	Chlorophyll a content	0.82*	-0.07	0.60	0.55
	Chlorophyll b content	0.56	-0.68	0.78*	-0.35
	Carotenoid content	0.78*	-0.29	0.83*	0.19
	P <sub>n</sub>	0.61	-0.16	0.94**	0.10
	G <sub>s</sub>	0.75*	-0.61	0.98**	-0.03
	C <sub>i</sub>	0.94**	-0.11	0.16	0.97**
	E	0.74	-0.36	0.78*	0.06
	L <sub>s</sub>	-0.36	-0.12	0.02	-0.27
Growth index	Plant height	0.82*	0.52	0.97**	0.17
	Root length	0.96**	-0.10	0.97**	0.11
	Fresh weight	0.97**	-0.11	0.97**	0.16
	Dry weight	0.96**	-0.13	0.95**	0.28

P<sub>n</sub>、G<sub>s</sub>、C<sub>i</sub>、E和L<sub>s</sub>同表2。\* 因子与主成分相关性显著(P<0.05); \*\* 因子与主成分相关性极显著(P<0.01)。  
P<sub>n</sub>, G<sub>s</sub>, C<sub>i</sub>, E and L<sub>s</sub> see Table 2. \* Significant correlation (P<0.05); \*\* Extremely significant correlation (P<0.01).

PC1主轴正方向为 $Y_0$ 、 $Y_1$ 和 $Y_2$ ; PC2主轴正方向为CK和 $Y_2$ (图3A)。由图3B可知, PC1主轴正方向为 $J_1$ 和 $J_2$ ; PC2主轴正方向为CK。主成分相关性分析表明(表4), 盐胁迫下, 第1主成分PC1与叶中 $K^+/Na^+$ 比值、 $C_i$ 、根长、鲜重、干重呈极显著正相关, 与叶绿素总含量、叶绿素a含量、类胡萝卜素含量、 $G_s$ 、株高呈显著正相关, 与根、茎、叶中 $Na^+$ 含量呈显著负相关; 第2主成分PC2与根中 $K^+$ 含量呈极显著正相关, 与茎中 $K^+$ 含量呈显著正相关。以上结果表明, 盐胁迫下添加棉粕对棉花生长生理指标影响较大, 尤其是对叶中 $K^+/Na^+$ 比值、 $C_i$ 、根长、鲜重及干重, 其中根、茎中 $K^+$ 含量在次要影响因子中较为敏感。

碱胁迫下, 第1主成分PC1与叶中 $K^+/Na^+$ 比值、 $P_n$ 、 $G_s$ 、株高、根长、鲜重、干重呈极显著正相关, 与叶绿素b含量、类胡萝卜素含量、 $E$ 呈显著正相关, 与茎、叶中 $Na^+$ 含量呈极显著负相关; 第2主成分PC2与叶中 $K^+$ 含量、 $C_i$ 呈极显著正相关。这说明碱胁迫下添加棉粕对棉花生长生理指标影响较大, 尤其是对叶中 $K^+/Na^+$ 比值、 $P_n$ 、 $G_s$ 、株高、根长、鲜重、干重及茎和叶中 $Na^+$ 含量, 其中叶片 $K^+$ 含量和 $C_i$ 在次要影响因子中较为敏感。

综上所述, 盐碱胁迫下棉花生长生理补偿机制的影响因子有所不同。盐胁迫下, 气孔关闭, 阻碍 $CO_2$ 进入细胞内部, 因此 $C_i$ 成为主要影响因子; 盐碱胁迫均会导致棉花叶片 $P_n$ 和 $G_s$ 下降, 但在碱胁迫下, 棉花叶片 $P_n$ 和 $G_s$ 值极低, 说明叶片的光合作用发生适应性下调。由于 $P_n$ 逐渐增大, 消耗大量 $CO_2$ , 同时 $G_s$ 逐渐减小, 影响外界 $CO_2$ 向细胞内部扩散, 从而导致 $C_i$ 下降。通常植株地上部受害情况比地下部表现更为明显, 碱胁迫较盐胁迫对植物造成的伤害更大(Zhang and Mu, 2009; 焦伟红, 2011), 因此 $P_n$ 、 $G_s$ 及株高成为主要影响因子。综上, 盐碱胁迫下棉花生长生理的主要影响因子有叶中 $K^+/Na^+$ 比值、根长、鲜重、干重及胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )。

## 2.6 讨论

盐碱胁迫下, 植物体内积累大量 $Na^+$ 进而抑制了对 $K^+$ 的吸收, 导致 $K^+$ 含量下降, 离子稳态失衡(Schroeder et al., 1994; Nedjimi and Daoud, 2009)。研究表明, 在盐碱胁迫下, 添加棉粕可以使棉花不同器官的 $Na^+$ 含量显著降低, 促进其对 $K^+$ 的吸收(图1, 图2)。保持

较高的 $K^+/Na^+$ 比值是植株耐盐的重要策略(周志林等, 2017)。本研究表明, 在盐碱胁迫下, 添加棉粕可以使棉花不同器官 $K^+/Na^+$ 比值增加, 盐胁迫下棉花不同器官的 $K^+/Na^+$ 比值的变化幅度大于碱胁迫(图3), 说明添加棉粕有助于维持棉花不同器官的 $K^+$ 、 $Na^+$ 平衡, 对棉花生长生理有促进作用可能是由于其增加对 $K^+$ 的选择性吸收, 而降低对 $Na^+$ 的吸收, 进而通过增加 $K^+/Na^+$ 比来维持细胞内的离子平衡(张华宁等, 2017)。叶绿体不仅是植物进行光合作用重要部位, 也是对盐胁迫最敏感的细胞器(Štefanić et al., 2013)。植株在正常生长过程中, 叶绿素含量呈现动态平衡, 而盐胁迫会打破这种平衡, 导致叶绿素含量发生变化(张景云等, 2014)。本研究表明, 添加棉粕能够增加盐胁迫下棉花叶片的叶绿素含量, 提高光合作用效率, 从而促进棉花生长, 其中以添加6 000  $kg \cdot hm^{-2}$ 棉粕处理效果最显著, 而碱胁迫下效果不显著(表1)。这可能是由于碱胁迫下叶绿素分解酶活力增强, 促进叶绿素的分解(陈俊, 2006)。本研究表明, 盐碱胁迫下棉花叶片 $P_n$ 下降的主要原因是气孔因素, 这与前人的研究结果一致(杨淑萍等, 2010)。其中 $P_n$ 增加与 $G_s$ 和 $C_i$ 的升高有关, 表明添加棉粕能够有效调节棉花叶片的气孔开度(表2)。植物的生长过程对盐碱胁迫较为敏感, 而生长量是植物耐盐性的直接体现(Boscaiu et al., 2005)。本研究表明, 添加棉粕在一定程度上缓解了盐碱胁迫对棉花生长的抑制作用, 添加后棉花的株高、根长、鲜重和干重与单独盐碱胁迫处理相比均有显著差异, 其中添加6 000  $kg \cdot hm^{-2}$ 棉粕处理的效果最显著且盐胁迫下棉花生长指标的变化幅度较大(表3)。王安平等(2010)用棉粕开发的氨基酸肥能提高小麦的株高、叶面积、叶绿素和干物质含量, 使小麦产量显著增加。本研究也得到类似的结果, 这可能由于棉粕中除了含有蛋白质外, 还有粗脂肪、酸性及中性洗涤纤维等营养成分, 这些营养成分可能对棉花的生长有一定的促进作用。主成分分析结果表明, 盐胁迫下添加棉粕对棉花生长生理指标影响较大, 主要影响因子有叶中的 $K^+/Na^+$ 比值、 $C_i$ 、根长、鲜重和干重, 其中根、茎中 $K^+$ 含量在次要影响因子中较为敏感; 碱胁迫下添加棉粕对棉花生长生理指标影响较大, 主要影响因子有叶中的 $K^+/Na^+$ 比值、 $P_n$ 、 $G_s$ 、株高、根长、鲜重、干重及茎和叶中 $Na^+$ 含量, 其中叶片 $K^+$ 含量和 $C_i$ 在次要影响因子中较为敏感(表4)。

综上, 本研究得到以下结论。(1) 添加棉粕能够增加盐碱胁迫下棉花各器官对 $K^+$ 的吸收, 降低对 $Na^+$ 的吸收, 以维持细胞内 $K^+$ 和 $Na^+$ 的平衡; (2) 添加棉粕能够缓解盐碱胁迫对棉花的伤害, 可促进棉花生长, 提高叶片叶绿素含量和光合作用效率; (3) 盐碱胁迫条件下添加 $6\ 000\ kg\cdot hm^{-2}$ 棉粕处理的改良效果最显著, 同时在盐胁迫下的作用优于碱胁迫。主成分分析表明, 盐碱胁迫下棉花生长生理的主要影响因子有叶中 $K^+/Na^+$ 比值、根长、鲜重、干重及胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )。

## 参考文献

- 阿曼古丽·买买提阿力, 拉扎提·努尔布拉提, 高丽丽, 张巨松, 田立文 (2017). 盐胁迫对海岛棉和陆地棉幼苗生长及生理特性的影响. 植物学报 **52**, 465–473.
- 鲍士旦 (2000). 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社. pp. 270–271.
- 陈俊 (2006). 碱地肤幼苗抗氧化酶系统对盐碱混合胁迫的生理响应特点. 硕士论文. 长春: 东北师范大学. pp. 4–10.
- 陈琪, 石剑华 (2013). 棉籽饼使用脱毒剂和生物发酵脱毒的营养分析. 当代畜禽养殖业 (10), 6–7, 8.
- 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 李晓光, 刘小京 (2016). 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望. 中国生态农业学报 **24**, 1016–1024.
- 黄清荣, 祁琳, 柏新富 (2018). 根环境供氧状况对盐胁迫下棉花幼苗光合及离子吸收的影响. 生态学报 **38**, 528–536.
- 贾玉珍, 朱禧月, 唐予迪, 蔡养廉, 林同保, 罗先宝, 杨兆庚, 韩海江 (1987). 棉花出苗及苗期耐盐性指标的研究. 河南农业大学学报 **21**, 30–41.
- 焦伟红 (2011). 燕麦耐盐碱渗透调节机制研究. 硕士论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学. pp. 15–20.
- 李合生, 陈华癸 (2000). 21世纪农林本科生物系列课程改革的研究与实践(上). 中国农业教育 (4), 19–22.
- 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 张兆军, 李卓琳, 高战武, 穆春生 (2011). 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及 $Na^+$ 、 $K^+$ 代谢的影响. 麦类作物学报 **31**, 1148–1152.
- 刘玉国, 谭兰兰, 卞龙, 王开勇 (2013). 盐渍化土壤改良剂的筛选. 农业科技与信息 (20), 48–49, 50.
- 牛花朋, 李胜荣, 申俊峰, 李祯, 佟景贵 (2006). 粉煤灰与若干有机固体废弃物配施改良土壤的研究进展. 地球与环境 **34**(2), 27–34.
- 石德成, 殷丽娟 (1993). 盐( $NaCl$ )与碱( $Na_2CO_3$ )对星星草胁迫作用的差异. 植物学报 **35**, 144–149.
- 田长彦, 周宏飞, 刘国庆 (2000). 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议. 干旱区地理 **23**, 177–181.
- 王安平, 吕云峰, 张军民, 赵青余, 王加启, 田科雄 (2010). 我国棉粕和棉籽蛋白营养成分和棉酚含量调研. 华北农学报 **25**(S1), 301–304.
- 王文杰, 贺海升, 祖元刚, 赵修华, 杨磊, 关宇, 许慧男, 于兴洋 (2009). 施加改良剂对重度盐碱地盐碱动态及杨树生长的影响. 生态学报 **29**, 2272–2278.
- 韦本辉, 申章佑, 周佳, 甘秀芹, 劳承英, 周灵芝, 刘斌, 胡泊, 李艳英 (2017). 粉垄改造利用盐碱地效果初探. 中国农业科技导报 **19**(10), 107–112.
- 翁永玲, 宫鹏 (2006). 土壤盐渍化遥感应用研究进展. 地理科学 **26**, 369–375.
- 杨国会, 石德成 (2011). 盐碱胁迫对小冰麦相对生长率及茎叶离子积累的影响. 河南农业科学 **40**, 45–47, 57.
- 杨淑萍, 危常州, 梁永超 (2010). 盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响. 中国农业科学 **43**, 1585–1593.
- 员学锋, 汪有科, 吴普特, 冯浩 (2005). PAM对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析. 水土保持学报 **19**(2), 37–40.
- 张华宁, 李孟军, 郭秀林, 张艳敏, 刘子会 (2017). 盐胁迫下不同 $K^+$ 吸收抑制剂对小麦根系 $K^+/Na^+$ 比和质膜相关蛋白活性的影响. 华北农学报 **32**(5), 154–162.
- 张景云, 缪南生, 白雅梅, 万新建, 吕文河 (2014). 盐胁迫下二倍体马铃薯叶绿素含量和抗氧化酶活性的变化. 作物杂志 (5), 59–63.
- 张娜, 潘思铁, 侯旭杰 (2009). 棉籽蛋白提取工艺及其主要理化性质研究. 食品研究与开发 **30**(7), 36–38.
- 张树文, 杨久春, 李颖, 张养贞, 常丽萍 (2010). 1950s中期以来东北地区盐碱地时空变化及成因分析. 自然资源学报 **25**, 435–442.
- 赵可夫, 王韶唐 (1990). 作物抗性生理. 北京: 农业出版社. pp. 300–304.
- 周志林, 唐君, 曹清河, 赵冬兰, 张安 (2017).  $NaCl$ 胁迫对甘薯植株体内 $K^+$ 、 $Na^+$ 和 $Cl^-$ 含量及生长的影响. 中国农业科技导报 **19**(4), 17–23.
- 罗宾BA (陈恺元等译) (1983). 棉花生理学. 上海: 上海科学技术出版社. pp. 116–118.
- Boscaiu M, Estrelles E, Soriano P, Vicente O (2005). Effects of salt stress on the reproductive biology of the halophyte *Plantago crassifolia*. Biol Plant **49**, 141–143.
- Jalees MM, Khan MZ, Saleemi MK, Khan A (2011). Effects of cottonseed meal on hematological, biochemical and behavioral alterations in male Japanese quail (*Coturnix*



- japonica*). *Pak Vet J* **31**, 211–214.
- Li RL, Shi FC, Fukuda K, Yang YL** (2010). Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Soil Sci Plant Nutr* **56**, 725–733.
- Munns R** (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ* **25**, 239–250.
- Nedjimi B, Daoud Y** (2009). Ameliorative effect of  $\text{CaCl}_2$  on growth, membrane permeability and nutrient uptake in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* grown at high (NaCl) salinity. *Desalination* **249**, 163–166.
- Schroeder JI, Ward JM, Gassmann W** (1994). Perspectives on the physiology and structure of inward-rectifying  $\text{K}^+$  channels in higher plants: biophysical implications for  $\text{K}^+$  uptake. *Annu Rev Biophys Biomol Struct* **23**, 441–471.
- Štefanić PP, Koffler T, Adler G, Bar-Zvi D** (2013). Chloroplasts of salt-grown *Arabidopsis* seedlings are impaired in structure, genome copy number and transcript levels. *PLoS One* **8**, e82548.
- Wang LW, Showalter AM, Ungar IA** (2005). Effects of intraspecific competition on growth and photosynthesis of *Atriplex prostrata*. *Aquat Bot* **83**, 187–192.
- Zhang JT, Mu CS** (2009). Effects of saline and alkaline stresses on the germination, growth, photosynthesis, ionic balance and anti-oxidant system in an alkali-tolerant leguminous forage *Lathyrus quinquenervius*. *Soil Sci Plant Nutr* **55**, 685–697.
- Zhang TB, Zhan XY, Kang YH, Wan SQ, Feng H** (2017). Improvements of soil salt characteristics and nutrient status in an impermeable saline-sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation while ridge planting *Lycium barbarum* L. *J Soils Sediments* **17**, 1126–1139.

## Effect of Cottonseed Meal on Cotton Physiology and Growth Compensation Under Salinity-alkalinity Stress

Hongxiu Ma, Kaiyong Wang\*, Kaixiang Zhang, Chunmei Meng, Mengjie An

Agricultural College, Shihezi University, Shihezi 832000, China

**Abstract** We investigated the salt-tolerant mechanism of cottonseed meal in cotton (*Gossypium hirsutum*) under salinity-alkalinity stress. Salinity-alkalinity stress of  $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  was tested in the field to explore the effect of cottonseed meal dose on the physiology and growth of cotton. Cottonseed meal could increase the absorption of  $\text{K}^+$  and decrease that of  $\text{Na}^+$ .  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  were kept in ion balance in cells under salinity-alkalinity stress. Cottonseed meal could effectively alleviate damage to cotton, significantly promote growth of cotton, and improve chlorophyll content and photosynthesis of leaves. An amount of  $6\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  cottonseed meal was the most significant treatment, and the improvement effect of cottonseed meal under salt stress was better. According to principal component analysis, the  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  ratio in leaves, root length, fresh weight, dry weight and intercellular  $\text{CO}_2$  concentration were the main factors involved in salinity-alkalinity stress.

**Key words** cottonseed meal, salinity-alkalinity stress, physiology, growth, compensation effect

**Ma HX, Wang KY, Zhang KX, Meng CM, An MJ** (2019). Effect of cottonseed meal on cotton physiology and growth compensation under salinity-alkalinity stress. *Chin Bull Bot* **54**, 208–216.

\* Author for correspondence. E-mail: wky20@163.com