

渗透胁迫和离子毒害对转 *Bt* 基因棉幼苗生长及离子分布的影响

张桂玲

(临沂大学生命科学学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 研究了渗透和盐胁迫处理对转 *Bt* 基因抗虫棉(*Gossypium hirsutum*) 99B 种子的萌发和幼苗生长的影响, 以及幼苗不同器官离子吸收和分配的差异。结果表明: 渗透和盐胁迫均对转 *Bt* 基因抗虫棉幼苗的生长有抑制作用, 其中 PEG 的抑制作用最强, 而 3 种盐的抑制程度以 $\text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$, 且在 Na^+ 含量相同时, Cl^- 的毒害大于 SO_4^{2-} 。渗透胁迫下使根、茎和叶中的 Na^+ 和 Cl^- 含量提高, K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量和 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值降低, 且地上部的变化幅度大于地下部的, 其中以 PEG 的影响最为显著, 其次是 CaCl_2 , Na_2SO_4 处理最弱。这些说明, 转 *Bt* 基因抗虫棉 99B 的耐盐性较弱。

关键词: 转 *Bt* 基因抗虫棉; 渗透胁迫; 离子毒害; 离子吸收和分配

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.02.009

Effects of Osmotic Stress and Ionic Toxicity on Growth and Ion Allocation in Transgenic *Bt* Cotton Seedlings

ZHANG Gui-ling

(College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276005, China)

Abstract: The seeds of transgenic *Bt* cotton (*Gossypium hirsutum* L.) 99B were treated with osmotica and salt solution, such as CaCl_2 , NaCl , Na_2SO_4 and PEG (6000), the effects of osmotic and salt stresses on the growth and ion allocation in cotton seedlings were studied. The results showed that the growth of transgenic *Bt* cotton seedlings were inhibited under stresses, in which PEG had the most significant effect, and the inhibition effects of three kinds of salt was in order as $\text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$. Toxicity of Cl^- was greater than SO_4^{2-} under the same content of Na^+ . Under osmotic stress, the contents of Na^+ and Cl^- in the roots, stems and leaves increased, but the contents of K^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} and K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ decreased, and the change range of ion contents in aerial part was greater than those in under-ground part. The effect of PEG on ion contents was the most significant, followed by CaCl_2 , and Na_2SO_4 was the weakest. It suggested that the transgenic *Bt* cotton had low salt tolerance.

Key words: Transgenic *Bt* cotton; Osmotic stress; Ion toxicity; Ion absorption and distribution

转 *Bt* 基因抗虫棉(*Gossypium hirsutum* L.) 由于抗虫效果好, 农药用量少, 棉花产量高, 经济效益显著, 而种植面积迅速扩大, 2007 年我国转基因抗虫棉花种植面积已达 $3.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国棉花种植面积的 69%。但种植区多为盐碱地, 土壤含盐量很

高, 因此筛选转 *Bt* 基因棉耐盐品种及研究其耐(抗)盐机理成为迫切需要解决的问题。据报道, 非盐生植物棉花在短期盐胁迫下, 其离子毒害和渗透胁迫对棉花的伤害作用基本相当, 而在盐生植物滨藜(*Atriplex sibirica*) 中起主要作用的是渗透效应^[1]。

收稿日期: 2011-05-13 接受日期: 2011-07-22

基金项目: 山东省农业结构调整重大技术研究专项基金(04-07-02B)资助

作者简介: 张桂玲(1975.11 ~), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 讲师, 主要从事植物遗传育种研究。E-mail: guilingzhang2003@126.com

有研究表明,在等渗条件下 NaCl 的离子毒害要比单一渗透(PEG)胁迫对植物的影响大,这在小麦(*Triticum estivum*)^[2]、芦荟(*Aloe vera*)^[3]、水稻(*Oryza sativa*)^[4]等植物中得到证实。不同离子对棉花的伤害程度不同,对伤害起决定作用的是阴离子,它们对棉花的毒性程度依次为 $\text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ ^[5]。盐胁迫对转 *Bt* 基因棉花造成的危害主要表现在离子毒害、渗透胁迫和营养不平衡等方面^[6],但这三者的作用大小尚存有争议。探索和研究它们之间的关系,对揭示转 *Bt* 基因棉花的盐害机理、提高其耐盐性等均具有重要的理论和实践意义。

本文以转 *Bt* 基因抗虫棉 99B 为材料,探讨 NaCl、CaCl₂、Na₂SO₄ 和 PEG 对转 *Bt* 基因抗虫棉幼苗生长的影响和渗透胁迫下幼苗的离子吸收和分配的差异,以揭示胁迫条件下对棉花幼苗的离子效应,为研究转 *Bt* 基因棉花的盐害和耐盐机理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

99B 转 *Bt* 基因抗虫棉种子由山东省农科院棉花研究中心提供。种子用浓硫酸脱绒,经 0.1% 的升汞灭菌 5 min 后,用无菌水冲洗干净,放到阴凉处晾干。挑选大小、饱满度均匀一致的种子备用。每个发芽盒内装入 1 kg 的细沙(150℃ 烘干 8 h),每盒播入 50 粒种子,沙与水或盐溶液的比为 5 : 1,以加入清水为对照。播种后放入昼夜温度为 28℃/22℃ 的温室内。整个苗期用 1/2 Hoagland 营养液提供无机营养,用清水保持含水量恒定。

1.2 方法

以清水为对照(0 MPa),胁迫处理分为轻度胁迫(渗透压为 -0.79 MPa,分别用 100 mmol/L NaCl、65 mmol/L CaCl₂、54 mmol/L Na₂SO₄ 和 22.5 mmol/L PEG 调制)和重度胁迫(渗透压为 -1.22 MPa,分别用 200 mmol/L NaCl、133 mmol/L CaCl₂、109 mmol/L Na₂SO₄ 和 45 mmol/L PEG 调制),各处理重复 3 次。

参照董合忠等^[7]的方法,播种后 4 d 测定种子的发芽势,6 d 记录发芽率;对照发芽后 20 d 选取 10 株棉花幼苗测定根、茎和叶中的离子含量(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-),并计算平均值。分别在对照发芽后 10 d、20 d 和 30 d 测定 10 株棉花幼苗的株高、叶

面积、干重、叶片数、可溶性糖、游离脯氨酸和丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)活性。 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量采用原子吸收分光光度计火焰发射法^[8]; Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量采用滴定法^[9]测定;可溶性糖含量采用苯酚法测定;游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮法^[8]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[9]测定;过氧化物酶活性测定采用比色法。

干重的测定是先用清水冲洗植株根部,再冲洗植株,用滤纸吸干植株表面的水分,称量鲜重,然后将整株幼苗于 108℃ 杀青 10 min,在 80℃ 恒温烘干后称重。叶面积测定是取倒数第 3 叶,用叶面积测定仪测定。

用 SAS9.2 软件进行试验数据方差分析,用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 胁迫对种子萌发及幼苗生长的影响

从表 1 可见,与对照相比,轻度胁迫和重度胁迫均降低了转 *Bt* 基因棉种子的发芽势和发芽率。在等渗情况下,不同胁迫对种子的发芽势影响不同,重度胁迫影响最为显著,降幅均为 100%,轻度胁迫下 PEG 处理的降幅最大,达 93.57%,Na₂SO₄ 的降幅最小,仅为 38.59%。等渗条件下,不同胁迫对种子发芽率的影响也不同,重度胁迫降幅较大,以 PEG 处理的降幅最大,达 100%;轻度胁迫的降幅较小,以 NaCl 处理的降幅最小,为 2.16%。可见,在等渗条件下,不同盐对种子发芽势、发芽率的抑制作用不同,以 CaCl₂ 最强,NaCl 次之,Na₂SO₄ 最弱。在 Na⁺ 含量相同的情况下,Cl⁻ 对种子萌发的毒害大于 SO₄²⁻,且重度胁迫的 PEG 处理对种子发芽势和发芽率的抑制作用最强,说明渗透胁迫对种子萌发的抑制作用要强于盐离子毒害。

由于种子在重度胁迫下用 PEG 处理不能萌发,因此以下分析均将其省略。

从表 2 可见,与对照相比,轻度胁迫和重度胁迫均使棉花幼苗的株高和干重显著降低,叶面积和叶片数显著减少,且随胁迫时间的延长,各处理的株高、干重、叶面积和叶片数的变化趋势基本一致。不同胁迫处理对株高、干重和叶面积的影响程度不同,轻度胁迫以 PEG 处理的下降幅度最大,NaCl、CaCl₂ 和 Na₂SO₄ 处理间的差异不显著(20 d 和 30 d 的干重除外);重度胁迫以 CaCl₂ 处理的最大,NaCl 和 Na₂SO₄ 处理间的差异不显著(30 d 干重除外)。

表 1 不同胁迫对转 *Bt* 基因棉种子萌发的影响

Table 1 Effects of stress on seed germination of transgenic *Bt* cotton

胁迫程度 Stress degree	盐溶液 Salt solution	发芽势 Germination potential (%)	发芽率 Germination rate (%)
对照 Control		93.31aA	92.78aA
轻度胁迫 Slight stress	NaCl	55.33bB	90.79aA
	CaCl ₂	20.01cC	86.75bB
	Na ₂ SO ₄	57.36bB	86.70bB
	PEG	6.01dD	84.09bB
重度胁迫 Severe stress	NaCl	0.00dD	70.71cC
	CaCl ₂	0.00dD	51.35eD
	Na ₂ SO ₄	0.00dD	78.73dC
	PEG	0.00dD	0.00fE

数据后不同的大写和小写字母表示差异极显著($P<1\%$)和显著($P<5\%$)。下表同。
Data followed different capical and small letters indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same as followed Tables.

表 2 胁迫对转 *Bt* 基因棉幼苗生长的影响

Table 2 Effects of stress on growth of transgenic *Bt* cotton seedlings

	时间 Days	对照 Control	轻度胁迫 Slight stress				重度胁迫 Severe stress		
			NaCl	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	PEG	NaCl	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂
株高 Height (cm)	10	17.30a	13.21b	13.10b	12.70b	10.40c	9.12c	9.63c	7.60d
	20	21.70a	14.63b	14.26bc	13.90bc	11.83d	10.36d	11.74c	7.99e
	30	23.02a	15.63b	15.36b	14.25bc	12.68d	10.92d	12.18c	8.25e
平均 Mean		20.67a	14.49b	14.24b	13.30b	11.64c	10.13d	11.18c	7.95e
干重 Dry weight (g)	10	0.80a	0.57b	0.56b	0.52bc	0.40cd	0.38c	0.44b	0.34d
	20	1.84a	1.18bc	1.31b	1.04c	0.84d	0.63e	0.71d	0.48f
	30	2.45a	1.47c	1.77b	1.57c	1.23d	0.89e	1.11d	0.59f
平均 Mean		1.70a	1.07bc	1.21b	1.04c	0.82d	0.63e	0.75d	0.47f
叶面积 Leaf area (cm ²)	10	141.24a	85.55b	80.03b	80.56b	54.98c	55.78b	55.53b	36.90c
	20	255.27a	161.64b	176.68b	152.21b	105.51c	88.77d	109.51c	55.53e
	30	255.70a	184.38b	217.97b	190.81b	129.06c	129.11c	131.26c	79.40d
平均 Mean		217.40a	143.86b	158.23b	141.19b	96.52c	91.22d	99.10c	57.28e
叶片数 Number of leaves	10	4.00a	3.00b	3.00b	3.00b	3.00b	2.00c	3.00b	2.00c
	20	5.00a	4.00b	4.00b	4.00b	4.00b	3.00c	4.00b	3.00c
	30	6.00a	5.00b	5.00b	5.00b	5.00b	4.00c	4.00c	4.00c
平均 Mean		5.00a	4.00b	4.00b	4.00b	4.00b	3.00c	3.67b	3.00c
综合平均 Comprehensive mean		61.19a	40.86c	44.42b	39.88c	28.25d	26.25e	28.68d	17.18f

综合分析,轻度胁迫以 PEG 处理的平均降幅最大,达 53.84%, Na₂SO₄ 处理的最小,为 27.41%;重度胁迫以 CaCl₂ 处理的最大,为 71.93%,Na₂SO₄ 处理的最小,为 53.96%。

以上分析表明,不同盐类对棉苗生长发育抑制

的程度有差异,在轻度胁迫下 CaCl₂、NaCl 和 Na₂SO₄ 对棉苗生长发育抑制的程度相当,在重度胁迫下以 CaCl₂ 最强,NaCl 其次,Na₂SO₄ 最弱,且在 Na⁺ 含量相同的情况下,Cl⁻ 对棉花幼苗生长发育的毒害大于 SO₄²⁻;在等渗条件下,PEG 对棉苗的抑制作用最

强,重度胁迫下 PEG 处理的棉花种子无法萌发,说明渗透胁迫比盐离子胁迫对棉苗生长的抑制作用要强。

2.2 不同胁迫对叶片的生理指标的影响

表 3 的结果表明,与对照相比,轻度胁迫和重度胁迫均能显著提高棉花幼苗中可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量,显著降低过氧化物酶活性。随着胁迫时间的延长,轻度胁迫(PEG 处理除外)下棉花幼苗叶片中的可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量先上升后下降,而过氧化物酶活性逐渐上升,而 PEG 处理的可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量均逐渐上升,过氧化物酶活性则逐渐下降;在重度胁迫下棉花幼苗叶片中的可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量逐渐升

高,而过氧化物酶活性则逐渐下降。轻度胁迫和重度胁迫各处理间的差异均达到显著水平,其中轻度胁迫以 PEG 的影响最大,其次是 CaCl_2 , Na_2SO_4 的最小;重度胁迫以 CaCl_2 的最大, Na_2SO_4 的最小。

在轻度胁迫和重度胁迫下,盐对棉花幼苗叶片中可溶性糖、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)活性的影响显著,以 CaCl_2 最强, NaCl 其次, Na_2SO_4 最弱,且在 Na^+ 含量相同的情况下, Cl^- 的毒害作用大于 SO_4^{2-} ;在等渗条件下,PEG 处理使可溶性糖、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)积累最多,POD 活性下降最多,这说明渗透胁迫对棉花幼苗的毒害作用大于离子毒害。

表 3 胁迫对转 *Bt* 基因棉幼苗叶片中某些物质的影响
Table 3 Effects of osmotic stress and ion toxicity on some substance contents in transgenic *Bt* cotton seedlings

	时间 Days	对照 Control	轻度胁迫 Slight stress				重度胁迫 Severe stress		
			NaCl	Na_2SO_4	CaCl_2	PEG	NaCl	Na_2SO_4	CaCl_2
可溶性糖含量 Soluble sugar content (g kg ⁻¹)	10	1.61 d	1.81 d	1.77 d	2.61 bc	2.85 b	2.44 c	2.27 c	3.36 a
	20	1.69 f	2.22 e	1.85 f	2.89 bc	3.03 b	2.62 cd	2.48 de	3.77 a
	30	1.49 e	1.84 de	1.83 de	2.13 d	3.37 b	2.80 c	2.72 c	3.96 a
平均 Mean		1.60 g	1.96 e	1.82 f	2.54 cd	3.08 b	2.62 c	2.49 d	3.70 a
脯氨酸含量 Proline content (μg g ⁻¹)	10	47.48 d	57.85 d	55.34 d	161.23 c	200.31 b	184.27 bc	168.46 c	254.17 a
	20	81.60 e	237.09 c	189.31 d	238.31 c	315.71 a	273.19 b	238.76 c	336.26 a
	30	66.33 g	175.54 e	139.34 f	200.33 e	357.99 b	288.92 c	257.83 d	386.38 a
平均 Mean		65.14 g	156.83 e	128.00 f	199.96 d	291.34 b	248.79 c	221.68 d	325.60 a
丙二醛含量 MDA content (μmol g ⁻¹)	10	0.10 c	0.12 b	0.10 c	0.12 ab	0.12 ab	0.12 ab	0.11 b	0.13 a
	20	0.11 g	0.21 f	0.21 f	0.24 e	0.31 d	0.39 b	0.35 c	0.47 a
	30	0.05 h	0.19 f	0.17 g	0.20 e	0.33 d	0.44 b	0.40 c	0.49 a
平均 Mean		0.09 e	0.17 d	0.16 d	0.19 d	0.25 c	0.32 b	0.29 c	0.36 a
过氧化物酶活性 POD activity (U g ⁻¹ FW)	10	208.63 a	188.60 bc	193.76 ab	174.28 c	126.06 d	103.62 ef	117.51 de	93.67 f
	20	355.99 a	224.81 c	263.49 b	205.58 d	103.84 e	97.93 e	107.93 e	73.90 f
	30	365.28 a	324.42 b	358.25 a	273.93 c	92.72 de	79.36 e	99.55 d	59.47 f
平均 Mean		309.97 a	245.94 b	271.83 b	217.93 c	107.54 d	93.64 e	108.33 d	75.68 f

2.3 不同胁迫对棉花幼苗离子吸收和分布的影响

从表 4 可见,胁迫对棉花幼苗不同组织的离子含量影响较大。与对照相比,不同胁迫处理的 Na^+ 和 Cl^- 含量显著增加, K^+ 含量显著降低, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量下降,且叶 > 茎 > 根,离子分布均是地上部多于地下部的。轻度胁迫下,以 NaCl 处理的 Na^+ 含量增幅最大,达 89%,其次是 Na_2SO_4 (80%), PEG 处理的最小,为 17%;重度胁迫下, NaCl 处理

的 Na^+ 含量增幅最大,达 122%, CaCl_2 的最小,为 37%。轻度胁迫下, Cl^- 含量的增幅以 CaCl_2 处理的最大,达 202%,其次是 NaCl (156%), PEG 处理的最小 (15%);重度胁迫以 CaCl_2 处理的最大 (259%), Na_2SO_4 的最小 (93%)。轻度胁迫下, K^+ 含量的降幅以 NaCl 处理的最大 (48%),其次是 Na_2SO_4 (38%), PEG 的最小 (28%);重度胁迫以 NaCl 处理的最大 (49%), CaCl_2 的最小 (33%)。除

高于对照(增加3%)外,轻度胁迫下, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值以 NaCl 处理的平均降幅最大(69%), PEG 的最小(14%); 重度胁迫以 NaCl 处理的最大(91%), Na_2SO_4 的最小(19%)。

可见,在渗透和盐胁迫下棉花幼苗组织中的 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值显著下降,其中 NaCl 处理对 K^+/Na^+ 影响最大, CaCl_2 处理对 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 影响最大, Na_2SO_4 处理对 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 影响最大,且变化幅度以叶 > 茎 > 根。在胁迫条件下,植物体内 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值的高低能反映出其耐盐和耐旱性的不同,本研究表明,在 PEG 和 NaCl 胁迫下,棉花幼苗体内 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 含量均显著低于对照,说明该棉花品种具有较低的耐盐和耐旱性,尤其对旱害表现比较敏感。

3 结论和讨论

3.1 不同胁迫对转 *Bt* 基因棉幼苗生长的影响

盐胁迫对植物的伤害主要是由于盐离子改变了植物细胞中水和离子的热力学平衡,导致高渗透胁迫、离子不平衡和离子毒害^[10]。盐胁迫通常包括离子胁迫和渗透胁迫,当环境中盐分浓度过高时,介质的水势下降,水分的有效性降低,造成棉株吸水困难,形成渗透胁迫,使植株生长发育受到抑制^[11]。本研究结果表明,在渗透胁迫和离子毒害下,转 *Bt* 基因棉幼苗的生长及干物质的积累明显下降,但仍然能够维持一定的生长速率和干物质的积累速率,这说明转 *Bt* 基因棉幼苗对盐胁迫仍有一定的适应能力。在等渗条件下,NaCl、 CaCl_2 、 Na_2SO_4 和 PEG 对棉花的生长发育都有显著的抑制作用,抑制程度以 $\text{PEG} > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$,且浓度越大抑制作用越明显,其中 PEG 最为明显,渗透胁迫大于离子毒害。这与前人的研究结果不同,可能是由于无机盐是渗透调节的主要贡献者,其作用约占 65% ~ 85%,有机物的作用只占 15% ~ 35%,在有机物中,糖类所起的作用又是最大的^[12]。由于 PEG 处理不能有效积累无机盐,无机渗透剂与有机渗透剂之间又有互补关系^[13],所以在根际渗透势相同的情况下,PEG 处理使可溶性糖、脯氨酸和丙二醛积累较多,尽管有机渗透剂多于无机渗透剂,但其调节渗透能力的作用却不及无机盐,导致叶片的渗透调节能力最差^[14-15]。尽管 PEG 比 NaCl、 CaCl_2 、 Na_2SO_4 能促进棉株积累更多的有机渗透调节剂,但植物积累有机渗透调节剂的

能耗要比积累无机渗透调节剂大得多^[16-17],因此 PEG 处理的棉花植株长势最差也就不难理解了。所以,我们认为 3 种盐分对棉株的伤害作用主要是由渗透胁迫造成的,离子胁迫是次要因素。另外,由于 PEG 的黏滞性比其它 3 种盐大得多,从而降低了水的流动性和根系的透气性,这是否对实验结果有影响,还有待进一步研究探讨。

3.2 胁迫对棉花幼苗离子吸收和分配的影响

盐离子毒害是由于外界高浓度的 Na^+ 取代了细胞质膜上的 Ca^{2+} ,破坏了质膜选择性透性,使胞内离子外渗,通常还伴随着一些内膜结构的破坏,同时抑制了根系对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的吸收;导致活性氧的大量产生,影响一些酶的结构和功能,产生代谢失调、养分缺乏等次级效应^[18-19]。渗透胁迫和离子毒害对棉花幼苗不同器官的离子分布的影响较大,转 *Bt* 基因棉花幼苗体内 95% 以上的 Na^+ 和 Cl^- 积累于地上部, Na^+ 和 Cl^- 在叶中积累和滞留,影响地上部对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的吸收,导致地上部 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值下降。本研究结果表明,在等渗条件下不论是离子毒害还是渗透胁迫,棉花幼苗不同组织中的 Na^+ 和 Cl^- 含量呈增加趋势, K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量呈下降趋势,且变化幅度以叶 > 茎 > 根,离子分布始终是地上部的积累多于地下部的,这与陈亚华等^[20]的研究结果基本一致。不同离子毒害对转 *Bt* 基因棉幼苗器官中的 Na^+ 和 Cl^- 含量的影响不同,在等渗条件下 NaCl 处理的影响最大,根、茎和叶中的 Na^+ 和 Cl^- 含量升幅也最大, K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的降幅也最大,其次是 Na_2SO_4 。 CaCl_2 处理对棉花幼苗的生长发育毒害显著,其对 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 含量的影响不大,而对 Cl^- 和 Ca^{2+} 含量影响显著,这可能是由于较高浓度的 Cl^- 抑制了棉苗对 NO_3^- 、 H_2PO_4^- 等的吸收,引起必需元素的缺乏,叶片中 Cl^- 浓度高,体内蛋白质降解大于合成,棉花是喜钠作物,这可能是 CaCl_2 处理对棉苗生长的抑制强于 NaCl 和 Na_2SO_4 处理的原因。PEG 处理对转 *Bt* 基因棉幼苗 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量的影响小于盐离子的毒害,这与郑青松等^[3]对芦荟的研究结果基本相同。Flower 等^[21]认为在干旱下旱生植物能更好地维持体内的离子平衡,这是其耐旱水平高于中生植物的主要原因之一。本研究结果表明,PEG 处理的棉花幼苗体内 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值显著低

于对照,这说明该品种耐旱能力较弱,在水分胁迫和盐胁迫下,对水分胁迫更加敏感,这可能是 PEG 处理对棉花幼苗生长抑制最强的理由。许多研究表明^[22-23],植物的耐盐性与植株地上部对 Na^+ 、 Ca^{2+} 积累的限制力及高 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值的保持能力有关,植株地上部 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比率高的其耐盐性强。在正常生理条件下,植物胞质能维持着较高的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值,而盐胁迫必然导致 Na^+ 过量流入胞内。盐生植物和较耐盐的淡土植物细胞不但能够吸收胞质内的 Na^+ 、 Cl^- 以消除其对胞质的毒害,并将其贮存于液泡中作为渗透剂^[24]。本研究中,NaCl 和 Na_2SO_4 处理的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值均低于对照,达显著差异水平,且地上部的累积较多,说明该品种耐盐性较弱,这与张敏等^[25]的研究结果基本一致。

参考文献

- [1] Hou X G(侯旭光), Zhao K F(赵可夫). Studies of mechanism of salt injuries in nonhalophyte cotton and halophyte saltbush [J]. J Shandong Univ(山东大学学报), 1999, 34(2): 230-235.(in Chinese)
- [2] Xu X(许兴), Zheng G Q(郑国琦), Deng X P(邓西平), et al. Comparison study on osmotic adjustment of accumulation of spring wheat seedlings in water and salt stress [J]. Agri Res Arid Areas(干旱地区农业研究), 2002, 20(1): 52-56.(in Chinese)
- [3] Zheng Q S(郑青松), Liu Z P(刘兆普), Liu Y L(刘友良), et al. Effects of iso-osmotic salt and water stresses on growth and ionic distribution in Aloe seedlings [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 2004, 28(6): 823-827.(in Chinese)
- [4] Zhou W(周卫), Ma J K(马敬坤), Wang Z Q(王志强), et al. Effect of water and salt iso-osmotic stress on ammonium assimilation in the leaves of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. J Wuhan Univ (Nat Sci)(武汉大学学报: 理学版), 2005, 51(4): 521-524.(in Chinese)
- [5] 刘友良, 汪良驹. 植物生理及分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 52-63.
- [6] Saeed S. Salt sensitivity of rice, maize, sugar beet, and cotton during germination and early vegetative growth [D]. Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen, 2002: 25-31.
- [7] 董合忠, 李维江, 张晓洁, 等. 棉花种子学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 46-48.
- [8] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 47-53.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育

出版社, 2000: 160-161.

- [10] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant Cell Environ, 2002, 25(2): 239-250.
- [11] Niu X M, Bressan R A, Hasegawa P M, et al. Ion homeostasis in NaCl stress environments [J]. Plant Physiol, 1995, 109(3): 735-742.
- [12] Fernandez-Ballester G, Martinez V, Ruiz D, et al. Changes in inorganic and organic solutes in *Citrus* growing under saline stresses [J]. J Plant Nutr, 1998, 21(12): 2497-2514.
- [13] Xiao W(肖雯), Jia H X(贾恢先), Pu L M(蒲陆梅). Studies on physiological index of some halophytes [J]. Acta Bot Boreal-Occid Sin(西北植物学报), 2000, 20(5): 818-825.(in Chinese)
- [14] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 125-132.
- [15] Sairam P K, Tyagi A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants [J]. Curr Sci, 2004, 86(3): 407-421.
- [16] Ying T Y(应天玉), Liu G S(刘国生), Jiang Z Z(姜中珠). Molecule mechanism for salt tolerance of plant [J]. J NE For Univ(东北林业大学学报), 2003, 31(1): 31-33.(in Chinese)
- [17] Xin C S(辛承松), Dong H Z(董合忠), Tang W(唐薇), et al. Physiological and molecular mechanism of salt injury and salt tolerance in cotton [J]. Cotton Sci(棉花学报), 2005, 17(5): 309-313.(in Chinese)
- [18] Zhu J K. Plant salt tolerance [J]. Trends Plant Sci, 2001, 6(2): 66-71.
- [19] Cramer G R, Läuchli A, Polito V S. Displacement of Ca^{2+} by Na^+ from the plasmalemma of root cells: A primary response to salt stress [J]. Plant Physiol, 1985, 79(1): 207-211.
- [20] Chen Y H(陈亚华), Shen Z G(沈振国), Liu Y L(刘友良), et al. Ion homeostasis in NaCl stressed cotton [J]. Cotton Sci(棉花学报), 2001, 13(4): 225-229.(in Chinese)
- [21] Fowers T J. Chloride as a nutrient and as an osmoticum [M]// Linker B, Lauuchli A. Advanced in Plant Nutrition Vol. 3. New York: Praeger, 1988: 55-78.
- [22] Gorham J. Salt tolerance in the Triticeae: Ion distribution in rye and triticale [J]. J Exp Bot, 1990, 41(5): 609-614.
- [23] Chhipa B R, Lal P. Na/K ratios as the basis of salt tolerance in wheat [J]. Aust J Agri Res, 1995, 46(3): 533-539.
- [24] Liao Y(廖岩), Peng Y G(彭友贵), Chen G Z(陈桂珠). Research advances in plant salt tolerance mechanism [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2007, 27(5): 2077-2089.(in Chinese)
- [25] Zhang M(张敏), Wang X C(王校常), Liang Y C(梁永超), et al. K^+ and Na^+ uptake and transport and SOD activity in *Bt* transgenic cotton seedlings under salt stress [J]. Acta Pedol Sin(土壤学报), 2005, 42(3): 460-467.(in Chinese)