

DOI: 10.5846/stxb201301220127

康爱平, 刘艳, 王殿, 王宝山, 陈敏. 钾对能源植物杂交狼尾草耐盐性的影响. 生态学报, 2014, 34(20): 5793-5801.

Kang A P, Liu Y, Wang D, Wang B S, Chen M. The effect of K on the salt tolerance of the bioenergy plant hybrid *Pennisetum*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5793-5801.

钾对能源植物杂交狼尾草耐盐性的影响

康爱平, 刘 艳, 王 殿, 王宝山, 陈 敏*

(山东师范大学生命科学学院, 逆境植物重点实验室, 济南 250014)

摘要:以盆栽的杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为实验材料,在不同浓度 NaCl(0%, 0.5%)条件下,用含有不同钾浓度(0.1, 3, 6, 9 mmol/L)的营养液处理 4 周后,测定植株高度、分蘖数、干重、叶片净光合速率、不同部位的离子含量、MDA(丙二醛)含量和细胞质膜透性等生理指标,以确定缓解盐害的适宜钾浓度。结果表明:0.5% NaCl 明显抑制了杂交狼尾草幼苗的生长和光合。在 0.5% NaCl 处理下,随着钾素浓度增加,杂交狼尾草的生物量显著增加,其中 6 mmol/L 的钾显著降低杂交狼尾草所受盐害,即 6 mmol/L 的钾素处理缓解了 NaCl 对杂交狼尾草株高、分蘖数、干重、光合速率的抑制;降低了杂交狼尾草叶片的 MDA 含量和质膜透性;降低了功能叶的 Na^+ 含量,增加了 K^+ 含量,从而增加了功能叶的 K^+/Na^+ 。以上结果表明,适宜的钾浓度(6 mmol/L)能明显缓解 NaCl 对能源植物杂交狼尾草生长和光合的抑制。这些结果为在盐碱地上大面积种植杂交狼尾草时合理施用钾肥提供了理论依据。

关键词:杂交狼尾草; 耐盐性; 钾素; 生长; 光合

The effect of K on the salt tolerance of the bioenergy plant hybrid *Pennisetum*

KANG Aiping, LIU Yan, WANG Dian, WANG Baoshan, CHEN Min*

Key Laboratory of Plant Stress, College of Life Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

Abstract: More than 6% of the world's total land area is impacted by salt. Most cultivated plants are sensitive to salt stress, and NaCl salinity, which results in ionic disturbance, osmotic and toxic effects, and which usually causes a great reduction in vegetative growth, rate of photosynthesis and an imbalance in plant nutrient uptake. Potassium (K) deprivation resulting from NaCl salinity, is expected to have a large and rapid negative effect on the rate of leaf expansion and final growth. Potassium (K), as one of 17 essential elements required for plant growth, participates in an array of processes, for example, potassium ions can be used as an activator for 60 different enzymes, promote photosynthesis, facilitate the transport of photosynthetic products, regulate the water potential of plant cells and stomatal movement. Plants subjected to salt stress are particularly prone to K deficiency as within saline soils there may be less available K due to reduced K diffusion and poor root uptake. Therefore, K is frequently the main limiting element for plant growth and development during the ecological transformation of saline impacted land. Hence, the reasonable application of K fertilizers is the recommended treatment for enhancing soil K availability, stimulating plant yields and avoiding the deterioration of saline land. Hybrid pennisetum (*Pennisetum americanum* × *P. Purpureum*) is now widely regarded to have substantial potential as a bioenergy plant and a forage source for livestock production. It has been characterized by good stress resistance, fast growth and high yields. Hence, hybrid pennisetum is a suitable energy plant candidate for the transformation of coastal areas, which are considered as suitable sites for cultivation of energy plants, since they are widespread and cannot usually be used as farmland due to the high soil salinity. Therefore, in order to better guide the establishment of the bio-transformation of the

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BADA7B05); 山东省博士基金项目(BS2011SW048); 山东省科技发展计划项目(2013GNC11310)

收稿日期:2013-01-22; **网络出版日期:**2014-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenminrundong@126.com

Yellow River Delta saline lands using this potential energy plant, the effects of K nutrition on growth, photosynthesis and ion accumulation of the energy plant hybrid pennisetum, seedlings were examined under saline conditions. In a pot experiment, we investigated the effects of K^+ level on seedling growth, ion concentrations in leaves and roots, photosynthetic characteristics, MDA (malondialdehyde) concentration and membrane permeability in the leaves of the hybrid pennisetum, under 0.5% NaCl to determine suitable levels of potassium supply to alleviate the salt damage of the studied species. The results showed the growth and photosynthesis of hybrid pennisetum seedlings were significantly inhibited under 0.5% NaCl conditions. However, the dry weight of shoots and roots, plant height and tillering number were significantly increased with the addition of K^+ , especially for 6 mmol/L of K^+ under 0.5% NaCl. K^+ supply significantly reduced the inhibitive effect of NaCl on plant height, tillering number, dry weight of shoot and root, and photosynthesis. The K^+ supply also decreased the MDA concentration and membrane permeability, decreased the concentration of Na^+ and increased the concentration of K^+ , markedly improving the K^+/Na^+ ratio of functional leaves. The results indicated that a supply of suitable concentrations of K^+ (6 mmol/L) can significantly alleviate the inhibition of growth and photosynthesis caused by salinity in hybrid pennisetum. These findings would provide a theoretical basis for practical application when large-scale cultivation of hybrid pennisetum occurs on saline land.

Key Words: hybrid Pennisetum; salt tolerance; potassium; growth; photosynthesis

目前,我国约有一亿多公顷的盐渍土地^[1],而且呈现逐年递增的趋势,仅在山东黄河三角洲一带,每年新增的盐碱土地就达 1.3×10^5 多公顷^[2]。在盐渍化土壤中生长的植物,由于受到高浓度 Na^+ 的胁迫,造成植物代谢紊乱^[3],植物经常会表现出缺 Ca^{2+} 和 K^+ 的症状,致使植物不能正常的生长发育^[4]。钾素是植物生长的必需元素,钾离子可以作为 60 多种酶的活化剂,对光合作用和光合产物的运输起促进作用^[5],可作为渗透剂,调节细胞水势和膨压,从而调节气孔开闭和植物运动^[6]。研究表明施用适量钾素可提高植物的抗逆性,周锋利等^[7]的结果表明, K^+ 在一定程度上缓解了 Fe^{2+} 对水稻的毒害。郑延海等^[8]研究表明,用合适比例的 K^+/Na^+ 施肥可明显降低 NaCl 胁迫对小麦幼苗造成的伤害。中国的耕地土壤普遍缺钾,而且盐碱地钾素缺乏更为严重,这严重限制了作物的生长,造成作物病害增加和品质下降,甚至出现减产的现象^[9]。因此,在盐碱地上种植农作物,并合理的施用钾肥来增加产量,这对于解决近年来我国国土资源紧张的问题有很重要的意义。

本实验所选用的材料杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* $\times$ *P. purpureum*) 是以美洲狼尾草和象草杂交育成的三倍体。杂交狼尾草较好地综合了象草高产和美洲狼尾草品质优的特点,且具有生长迅速、生物量大、抗性广等优点^[10]。现已经证实,杂交狼尾草不仅可用作食草动物及鱼类的饲料^[11],还是一

种较为理想的造纸原料和典型的能源植物,逐渐成为人们研究的热点。但是现在对杂交狼尾草的研究多集中在密度和刈割时间和方式对于杂交狼尾草品质的影响^[12],对其抗盐性的研究较少。已有研究表明杂交狼尾草苗期的耐盐阈值是 0.57%^[13],而且大田实验也表明,杂交狼尾草能在黄河三角洲盐碱地上种植,而且长势良好。但是盐碱地由于缺乏钾素或是钾素含量低,影响了其产量。本文通过研究不同浓度钾素对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草生长的影响,目的确定缓解杂交狼尾草盐害的适宜钾浓度,为在盐碱地上种植杂交狼尾草时合理施用钾肥提供理论依据,即本文的主要目的是为杂交狼尾草在黄河三角洲盐碱地的栽培提供合理的施肥方案,由于黄河三角洲盐碱地的有机质含量低以及氮磷钾水平低^[14]。杂交狼尾草在盐碱地上的种植和推广对于盐碱地的开发利用、生态保护具有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 材料

实验材料为杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* $\times$ *P. purpureum*), 由中国农业大学草业研究中心张蕴薇教授提供。

1.2 材料的培养

材料的培养方法及培养条件见王殿等^[13]。

1.3 材料的处理

将移栽后的幼苗从距离沙子表面 2 cm 处剪去地上部分,促进其成活和分蘖。待幼苗长至 10 cm 高时(培养 7 d),取大小一致的幼苗平均分为 2 组,一组为 0% NaCl 处理,一组为 0.5% NaCl 处理。每

组分别用 0.1、3、6、9 mmol/L[Hoagland 营养液(已经去掉钾)配制]浓度的钾素浇灌处理。每个处理 6 个重复,早晚各浇灌 1 次,每次以从底部流出的溶液体积占浇灌总体积的一半为标准,处理 4 周后进行各指标的测定。营养液处理配方如表 1 所示。

表 1 所用培养液内钾素的含量及培养液的成分含量

Table 1 Nutrient solutions with different levels of K⁺ used for irrigation

添加的营养元素 Nutrients added	含有不同浓度钾素的营养液中各种成分的含量/(mmol/L) Concentration of nutrients added to achieve nutrient solutions with different levels of K ⁺			
	0.1 K ⁺ -K	3K ⁺ -K	6K ⁺ -K	9K ⁺ -K
Ca(NO ₃) ₂	5	5	5	5
MgSO ₄	2	2	2	2
Na ₂ H ₂ PO ₄	1	1	1	1
NaNO ₃	5	5	5	5
KCl	0.01	3	6	9
Fe-EDTA	0.02	0.02	0.02	0.02
H ₃ BO ₃	0.04625	0.04625	0.04625	0.04625
MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.00914	0.00914	0.00914	0.00914
ZnSO ₄ · 5H ₂ O	0.00076	0.00076	0.00076	0.00076
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032
H ₂ MoO ₄ · H ₂ O	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011

1.4 生理指标的测定

1.4.1 株高和分蘖数的测定

用米尺测量每株植株的高度,并记录分蘖数。

1.4.2 干重和含水量的测定

将沙中取出的杂交狼尾草植株,迅速用自来水冲洗根上的沙子,洗净后用去离子水冲洗,用吸水纸吸干,分别称量地上和地下部分的鲜重;然后分别将地上部分和地下部分装入信封,105 ℃杀青 20 min,80 ℃烘干至恒重,称量干重;并计算含水量:

$$\text{含水量} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100\%$$

1.4.3 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO₂浓度(C_i)的测定

在植株光照充分,光合作用稳定的时候,采用英国 Hansatech 公司生产的 TPS-2 便携式光合仪对杂交狼尾草的功能叶(从顶部新叶向下数的第 4 片叶)进行测定。

1.4.4 植株不同部位离子含量的测定

植株不同部位离子含量的测定方法见王殿等^[13]。

1.4.5 丙二醛(MDA)含量的测定

取植株第 4、7 叶截取中间段,去主脉,用去离子水洗净,再用吸水纸吸干水分后剪成 0.5 cm 长小段,

称取 0.4 g 于研钵中,加少许石英砂和 2 mL 0.1% 三氯乙酸(TCA)研磨成匀浆。将匀浆移至试管中,用 3 mL 0.1% TCA 分两次冲洗研钵,都倒入试管中。再加入 5 mL 0.5% 硫代巴比妥酸溶液,摇匀,沸水浴 10 min(自试管中出现小气泡开始计时),后迅速取出放入冷水浴中。待冷却后 3000 r/min 离心 15 min,取上清液并量其体积,以 0.5% 硫代巴比妥酸溶液为空白对照,用分光光度计测量 532 nm 和 600 nm 的吸光度。计算组织中 MDA 的含量:

$$\text{MDA 含量}(\text{mmol/g 鲜重}) = \Delta A \times N / (155 \times W)$$

式中,ΔA 为 A₅₃₂和 A₆₀₀的差;N 为上清液总体积;155 为 1 mmol 三甲川(反应产物)在 532 nm 的吸收系数;W 为称取植物材料的鲜重(g)。

1.4.6 细胞质膜透性的测定

细胞质膜透性用相对电导率表示。取植株第 4、7 叶截取中间段,去离子水冲洗干净,吸水纸吸干,去主脉后剪成大小一致的方形小段,用重蒸水迅速冲洗两次后吸干水分,称取 0.3 g 样品于试管中,加入 6 mL 重蒸水。抽真空反复几次,直至叶片全部沉入水中,用等量的重蒸水换液后静置 2 h 使离子外渗,用 DDS-307 电导率仪测量电导值,记作原电导值;再放入沸水浴中 5 min,待冷却至室温后测电导值,记作

总电导值。计算相对电导率:

相对电导率(%)=(原电导值)/(总电导值)×100%

1.4.7 数据的统计分析

本实验的数据都采用 SAS 6.12 统计软件对钾浓度和盐分进行双因素显著性分析。同一处理各参数均以平均值加减标准偏差 (mean ± SD) 表示, $P < 0.05$, 表示差异显著, 采用字母标注法。

2 实验结果

2.1 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗株高和分蘖数的影响

由图 1 可以看出, 0.5% NaCl 处理明显降低了杂交狼尾草幼苗的株高和分蘖数, 而施用钾素明显提高了 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗的株高和分蘖数 (图 1, 表 2), 其中 6 mmol/L 钾素水平下, 杂交狼尾草幼苗的分蘖数达到最大值, 明显高于其它 3 个钾素水平。

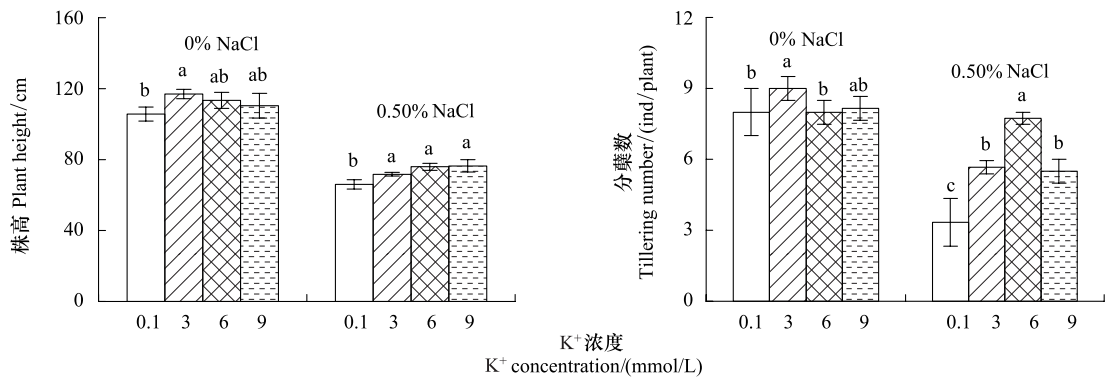


图 1 NaCl 胁迫条件下, 不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗株高和分蘖数的影响

Fig.1 Effects of NaCl and K⁺ level on plant height and tiller number of hybrid pennisetum

图中数据为 6 个重复的平均值±SD (n=6), 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)

表 2 NaCl 和钾素对杂交狼尾草幼苗生长指标的双因素分析结果

Table 2 Results of a two-way ANOVA of parameters

参量 Parameters	主要因素 Main factors		
	NaCl (S)	钾 (K)	S × K
地上干重 Shoot dry weight	1646.69 ***	26.16 ***	20.07 ***
地下干重 Root dry weight	1233.85 ***	116.42 ***	19.46 ***
株高 Plant height	544.60 ***	6.78 **	1.65 ^{NS}
分蘖数 Tiller	218.40 ***	26.01 ***	25.09 ***
功能叶 Na ⁺ 含量 Functional leaf Na ⁺ concentration	430.41 ***	17.64 ***	0.62 ^{NS}
老叶 Na ⁺ 含量 Old leaf Na ⁺ concentration	601.34 ***	4.46 *	11.28 ***
根 Na ⁺ 含量 Root Na ⁺ concentration	307.28 ***	9.98 ***	6.96 ***
功能叶 K ⁺ 含量 Functional Leaf K ⁺ concentration	15.08 **	186.77 ***	3.57 *
老叶 K ⁺ 含量 Old leaf K ⁺ concentration	4.06 ^{NS}	162.52 ***	21.38 ***
根 K ⁺ 含量 Root K ⁺ concentration	24.01 ***	70.71 ***	23.20 ***
功能叶 K ⁺ /Na ⁺ Functional Leaf K ⁺ /Na ⁺	268.94 ***	190.98 ***	7.38 **
老叶 K ⁺ /Na ⁺ Old leaf K ⁺ /Na ⁺	270.84 ***	54.54 ***	33.02 ***
根 K ⁺ /Na ⁺ Root K ⁺ /Na ⁺	12.01 **	637.70 ***	163.25 ***
净光合速率 P _n	1015.67 ***	272.41 ***	43.86 ***
气孔导度 G _s	204.90 ***	45.18 ***	33.36 ***
蒸腾速率 T _r	92.57 ***	64.10 ***	64.50 ***
胞间 CO ₂ 浓度 C _i	52.99 ***	8.44 **	1.31 ^{NS}
MDA 含量 MDA concentration	58.62 ***	32.42 ***	3.81 *
叶片膜透性 Membrane permeability	1148.28 ***	117.17 ***	20.16 ***

* 表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; * * 表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著; * * * 表示在 $P < 0.001$ 水平上差异显著; NS 表示没有显著性差异; 数值代表 F 值

2.2 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗干重的影响

由图 2 可以看出,0.5% NaCl 处理明显降低了杂交狼尾草幼苗的地上部和地下部的干重,但对其含水量没有明显影响。无论是在 0% NaCl 还是在

0.5% NaCl 处理下,施用钾素都明显增加了杂交狼尾草幼苗的干重(图 2,表 2),其中在 0% NaCl 处理下,3 mmol/L 钾素处理下,杂交狼尾草幼苗生长的最好;而在 0.5% NaCl 处理下,6 mmol/L 钾素处理下,杂交狼尾草幼苗生长的最好。

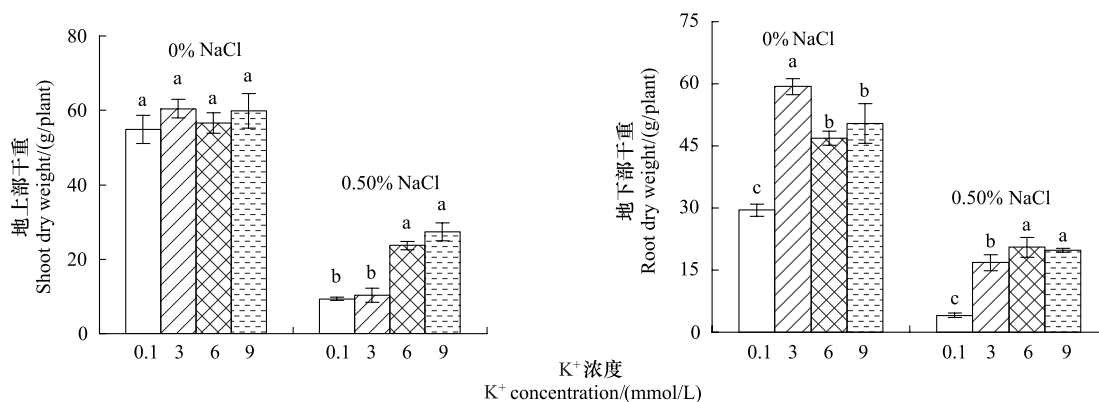


图 2 NaCl 胁迫条件下,不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗干重的影响

Fig.2 Effects of NaCl and K⁺ level on dry weight of shoot and root of hybrid pennisetum

图中数据为 6 个重复的平均值±SD (n=6),不同字母代表差异显著 (P < 0.05)

2.3 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、蒸腾速率 (Tr)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的影响

0.5% NaCl 处理明显降低了杂交狼尾草幼苗的净光合速率,而施用钾素明显增加了杂交狼尾草的净光合速率(图3,表2),并且均随着钾素浓度的升

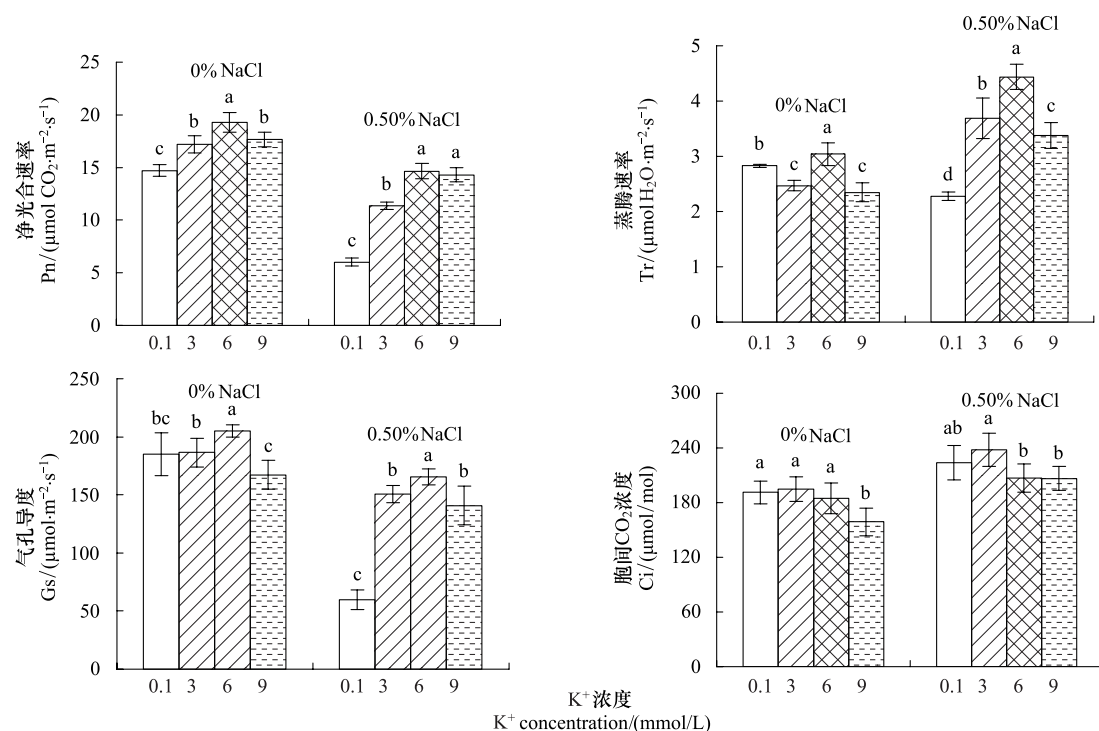


图 3 NaCl 胁迫条件下,不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗叶片 Pn、Tr、Gs、Ci 的影响

Fig.3 Effects of NaCl and K⁺ level on Pn, Tr, Gs and Ci of leaves of hybrid pennisetum

图中数据为 15 个重复的平均值±SD (n=15),不同字母代表差异显著 (P<0.05)

高,净光合速率逐渐增加,在 6 mmol/L 钾素水平时达到最大;气孔导度与蒸腾速率的变化趋势和净光合速率基本一致,均在 6 mmol/L 钾素水平时达到最高。胞间二氧化碳浓度的变化与净光合速率、气孔导度、蒸腾速率的变化趋势相反(图 3)。

2.4 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗地上部和地下部 Na^+ 、 K^+ 含量的影响

由图 4 可以看出,0.5% NaCl 处理明显增加了杂交狼尾草幼苗地上部分和地下部分的 Na^+ 含量,其中,根中含量最高,其次是老叶,而功能叶含量最低。而施用钾素明显降低了 NaCl 处理条件下的功能叶

的 Na^+ 含量,而对根和老叶中的 Na^+ 含量没有显著影响(图 4,表 2)。无论是在 0% NaCl 还是在 0.5% NaCl 处理下,施钾素都明显增加了杂交狼尾草幼苗地上部分和地下部分的 K^+ 含量,其中功能叶中 K^+ 含量最高,其次是老叶,而根中含量最低。0.5% NaCl 处理明显降低了杂交狼尾草功能叶的 K^+/Na^+ ,而对根中的 K^+/Na^+ 影响不大;钾素处理明显增加了杂交狼尾草功能叶和根中的 K^+/Na^+ (图 4,表 2)。以上结果表明杂交狼尾草幼苗在 NaCl 胁迫下,加入一定浓度的钾素可以明显提高功能叶的 K^+/Na^+ ,从而保持植株正常生长。

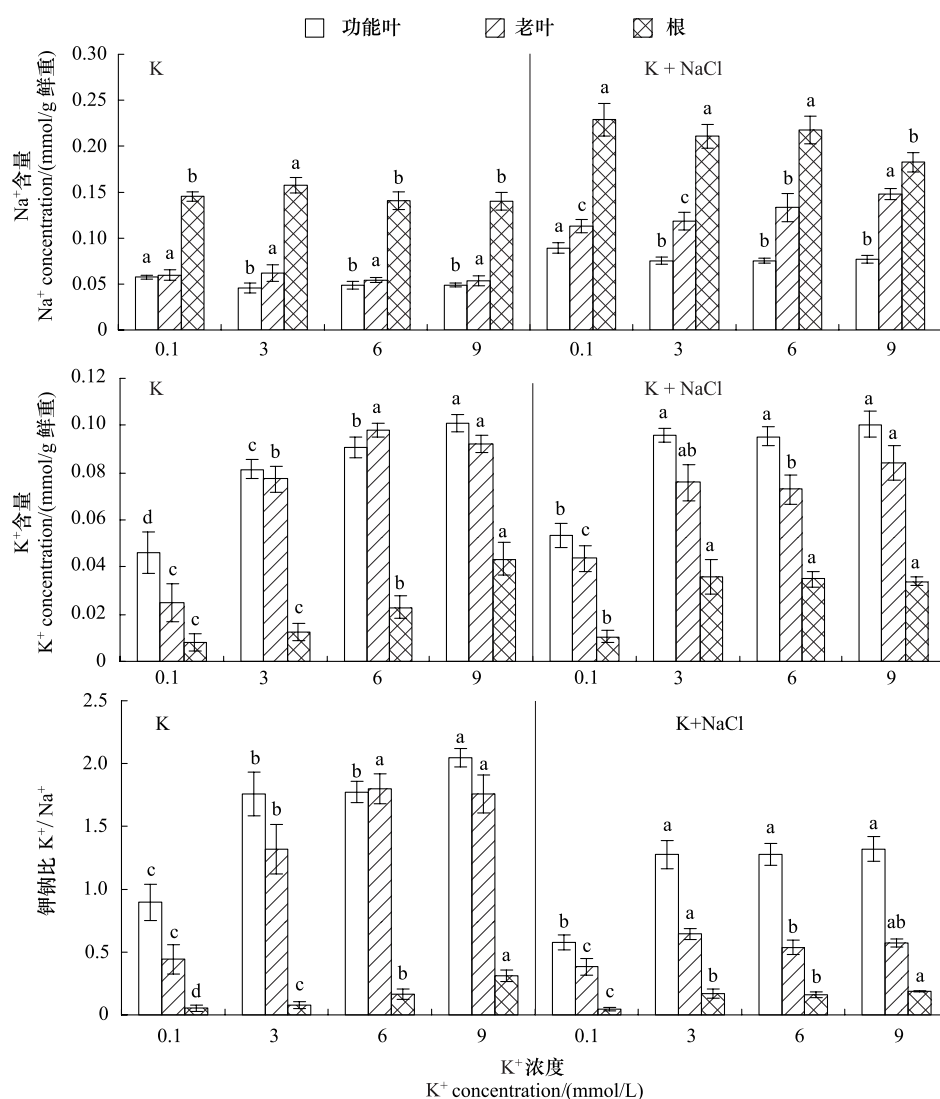


图 4 NaCl 胁迫条件下,不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗地上部分和地下部分 Na^+ 含量 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 的影响

Fig.4 Effects of NaCl and K^+ level on Na^+ content, K^+ content and K^+/Na^+ of shoot and root of hybrid pennisetum

图中数据为 6 个重复的平均值 $\pm$ SD($n=6$),不同字母代表差异显著($P<0.05$)

2.5 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗叶片 MDA 含量的影响

叶片 MDA 含量的多少表示膜损伤程度的大小。0.5% NaCl 处理对杂交狼尾草幼苗功能叶的 MDA 含

量没有显著影响(结果未列出),但是却明显增加了杂交狼尾草老叶的 MDA 含量(图 5,表 2)。钾素处理明显降低了 MDA 含量,在 3 mmol/L 和 6 mmol/L 的钾素处理时,杂交狼尾草幼苗老叶的 MDA 含量最低,表明一定浓度的钾素可以缓解 NaCl 胁迫对植物叶片组织的伤害。

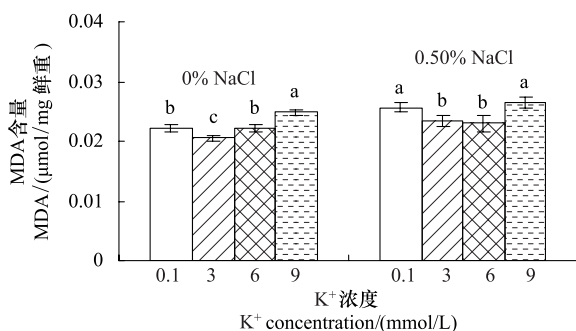


图 5 NaCl 胁迫条件下,不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗老叶 MDA 含量的影响

Fig.5 Effects of NaCl and K⁺ level on MDA content of old leaves of hybrid pennisetum

图中数据为 6 个重复的平均值±SD (n=6),不同字母代表差异显著 (P<0.05)

2.6 不同钾素水平对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗叶片质膜透性的影响

0.5% NaCl 处理对杂交狼尾草幼苗功能叶片的质膜透性没有显著影响(结果未列出),但是却明显增加了杂交狼尾草幼苗老叶的质膜透性(图 6,表 2)。钾素处理明显降低了质膜透性(图 6,表 2),而且随着钾素浓度增加,质膜透性明显减低,在 9 mmol/L 的钾素浓度处理时膜透性最小,缓解作用最

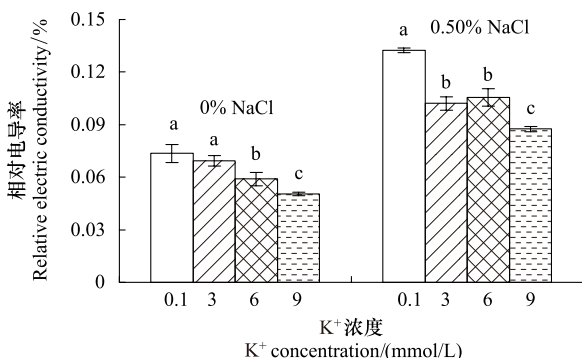


图 6 NaCl 胁迫条件下,不同钾素处理对杂交狼尾草幼苗叶片质膜透性的影响

Fig.6 Effects of NaCl and K⁺ level on membrane permeability of leaves of hybrid pennisetum

图中数据为 6 个重复的平均值±SD (n=6),不同字母代表差异显著 (P<0.05)

明显。

2.7 双向方差分析

NaCl 和钾素对杂交狼尾草幼苗各种指标影响的双向方差分析见表 2,各种影响在以上的结果中都已表述。

3 讨论

当植物受到盐分胁迫时,植物体内的离子平衡被打破,最终造成植物生理功能紊乱^[15],表现为植物的形态结构的改变和生物量的下降^[16-17]。本实验结果表明,NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗的生物量下降,株高、分蘖数均明显降低。随着钾素水平的升高,植株生长表现出一定的缓解效应。钾素浓度达到 6 mmol/L 时缓解盐胁迫效果最明显,然而钾素浓度继续升高则表现出一定程度的抑制作用。光合作用产物是构成生物量的主要因素。测定了杂交狼尾草的光合作用,结果表明 NaCl 胁迫降低了杂交狼尾草的光合作用,适当钾素处理增加了杂交狼尾草的光合作用^[16-17]。这是钾素提高杂交狼尾草生物量的一个主要原因。

盐胁迫条件下,植物能否保持一个高的 K⁺/Na⁺ 对其的耐盐性至关重要^[18]。有报道小麦在盐胁迫下介质中 K⁺ 的增多能降低叶片的 Na⁺ 浓度^[19]。一般认为,Na⁺ 吸收与 K⁺ 内流相伴进行,但由于 Na⁺、K⁺ 的水合离子半径相似,因此容易产生竞争^[19-20]。在盐胁迫发生时,耐盐植物,特别是拒盐植物往往通过根的选择性吸收限制 Na⁺ 进入体内,保持体内 Na⁺ 的低含量和 K⁺ 的高吸收,维持高的 K⁺/Na⁺ 值,保证正常的生理代谢^[13, 20]。此外,Na⁺ 的区域化作用,例如把植物体内过多的 Na⁺ 截留在根部,抑制其向地上部的运输,从而保持地上部的正常生长。本实验中,NaCl 明显增加了杂交狼尾草幼苗不同部位的 Na⁺ 含量,导致植株的 K⁺/Na⁺ 降低,而施用适量钾素明显增加了杂交狼尾草幼苗的 K⁺/Na⁺,尤其是功能叶中增加显著,即适量钾素处理能使 NaCl 胁迫下的杂交狼尾草幼苗功能叶保持较高的 K⁺/Na⁺^[13],说明杂交狼尾草是通过根部拦截部分 Na⁺,限制了 Na⁺ 向地上部的运输,而向地上部选择性运输更多的 K⁺,这可能是杂交狼尾草植株的耐盐能力强的部分原因。杂交狼尾草是禾本科植物,其耐盐机理也是拒盐^[13],这和其他的禾本科植物一样^[20]。

逆境下植物产生较多的活性氧,从而加快膜脂过氧化进程,使膜系统完整性降低^[21],电导率的大小和 MDA 含量能直接或间接反映质膜受伤害的程度^[22]。杂交狼尾草幼苗叶片电导率和 MDA 含量的变化趋势基本一致,受到 NaCl 胁迫的杂交狼尾草中的 MDA 含量均增加,这与前人的研究结果一致^[23],但用钾素处理后,起到了一定的缓解作用。此外,钾参与多种酶的合成,参与许多生理代谢过程^[6, 24],在光合和呼吸代谢中有非常重要的作用。本实验结果表明适当钾素处理缓解了 NaCl 对杂交狼尾草的抑制,增加了其生物量,生物量的增加是由于光合作用的增加,光合作用的增加是由于杂交狼尾草能保持高的 K^+/Na^+ 和产生较小的膜伤害。

总之,本实验的结果表明,6 mmol/L 的钾素能够缓解 NaCl 对杂交狼尾草造成的抑制,增加了其生物量。这为在盐碱地上大面积种植杂交狼尾草合理施用钾肥提供依据。

References:

- [1] Zhu J K. Plant salt tolerance. Trends in Plant Science, 2001, 6 (2): 66-71.
- [2] Dong H Z. Cotton farming in saline soil. Science Press, Beijing, 2010: 36-36.
- [3] Kholová J, Hash C T, Lava Kumar P, Yadav R, Kocva M, Vadez V. Terminal drought-tolerant pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] have high leaf ABA and limit transpiration at high vapour pressure deficit. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(5): 1431-1440.
- [4] Zhao K F, Fan H. Halophytes and Its Adaptation Physiology to Salinity Habitats. Beijing: Science Press, 2005: 2-3.
- [5] Hu D J, Dong R R, Ge D Z. Theory and Practice of Plant Potassium Nutrition. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1993: 58-109.
- [6] Glass A D M. Plant Nutrition: An Introduction to Current Concepts. Sunderland: Jones and Bartlett Publishers Inc., 1989: 24-28.
- [7] Zhou F L, Jiang L, Wang S F, Ma W L, Wang J M. Amelioration of Fe^{2+} toxicity by K^+ in rice. Journal of Nanjing Agricultural University, 2005, 28(4): 6-10.
- [8] Zheng Y H, Ning T Y, Jia A J, Li Z J, Han B, Jiang X D, Li W D. Amortizing functions of potassium nutrition on different genotypes wheat seedling under NaCl stress. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 381-386.
- [9] Liu X Y, Ren G X, Shi Y. The effect of organic manure and chemical fertilizer on growth and development of *Stevia rebaudiana* Bertoni. Energy Procedia, 2011, 5: 1200-1204.
- [10] Lin S X, Gao C F, Zhang X P, Liu Y, Lin B F, Li W Y, Dong X N. The research progress of comprehensive utilization of hybrid pennisetum. Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary, 2011, 33(1): 32-33.
- [11] Feng Q D, Huang X S, Chen Z D, Tang L F. Experiment on feeding *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* and *Vigna sinensis* sari Var to grass carp. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 20(2): 97-99.
- [12] Zhuo K S. The comprehensive technique of cultivation of hybrid pennisetum. Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2007, 29(2): 66-67.
- [13] Wang D, Yuan F, Wang B S, Chen M. Response of plant biofuel hybrid Pennisetum to NaCl stress and its salinity threshold. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(6): 572-577.
- [14] Fan H, Wu H D, Zhou M L, Zhang Y, Ding T L, Wang B S. Planting sweet sorghum in Yellow river delta: The cultivation measure, yield and effect on soil microflora. Advanced Materials Research, 2012, 1793(518/523): 81-87.
- [15] Kholova J, Sairam R K, Meena R C. Osmolytes and metal ions accumulation, oxidative stress and antioxidant enzymes activity as determinants of salinity stress tolerance in maize genotypes. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32(3): 477-486.
- [16] Yan B, Dai Q J. Effect of external K^+ level on salt tolerance of rice seedlings. Chinese Journal of Rice Science, 1994, 8(2): 119-122.
- [17] Li J S, Huang Y Z. Physiological studies of plant salt-tolerance. Chinese Bulletin of Botany, 1995, 12(3): 15-19.
- [18] Apse M P, Blumwald E. Engineering salt tolerance in plants. Current Opinion In Biotechnology, 2002, 13(2): 146-150.
- [19] Xu X, Li S H, Hui H X, Mi H L. Effect of NaCl stress on growth, chlorophyll content and K^+ , Na^+ absorption of spring wheat seedlings. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 278-284.
- [20] Johanson J G, Cneeseaman J M. Uptake and distribution of Sodium and Potassium by corn seedlings: I. Role of the mesocotyl in sodium exclusion. Plant Physiology, 1983, 73(1): 153-158.
- [21] Chen M J, Zheng Q S, Liu Z P, Long X H, Liu H. Growing and photosynthetic response of *Jatropha curcas* L. seedlings to salt stress. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1356-1365.
- [22] Dou Q Q, Jiao X J, Zhang M, He K Y, Huang L B. Physiological response of *Zelkova schneideriana* seedlings in the soil under NaCl Stress. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(10): 2063-2069.
- [23] Hu X L, Li Y H, Chen D L, Feng C J, Yang J M. Physiological responses of three colored-leaf species of *Prunus* under NaCl stress. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(2): 370-376.
- [24] Cram W J. Negative feedback regulation of transport in cells. The

maintenance of turgor, volume and nutrient supply // Luttge L, Pitman MG, eds. Transport in Plants II. Encyclopedia of Plant Physiology. New Ser. New York: Springer, 1976, II (A): 284-346.

参考文献:

- [2] 董合忠. 盐碱地棉花栽培学. 北京: 科学出版社, 2010: 36-36.
- [4] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理. 北京: 科学出版社, 2005: 2-3.
- [5] 胡笃敬, 董任瑞, 葛旦之. 植物钾营养的理论与实践. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1993: 58-109.
- [7] 周锋利, 江玲, 王松凤, 马文良, 万建民. 钾离子对水稻亚铁毒害的缓解作用. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 6-10.
- [8] 郑延海, 宁堂原, 贾爱君, 李增嘉, 韩宾, 江晓东, 李卫东. 钾营养对不同基因型小麦幼苗 NaCl 胁迫的缓解作用. 植物营养与肥料科学, 2007, 13(3): 381-386.
- [10] 林仕欣, 高承芳, 张晓佩, 刘远, 林碧芬, 李文杨, 董晓宁. 杂交狼尾草综合利用的研究进展. 福建畜牧兽医, 2011, 33(1): 32-33.
- [11] 冯庆德, 黄秀声, 陈钟佃等. 杂交狼尾草、印度豇豆喂草鱼试验研究. 福建农业学报, 2005, 20(2): 97-99.
- [12] 卓坤水. 杂交狼尾草栽培综合配套技术. 福建畜牧兽医, 2007, 29(2): 66-67.
- [13] 王殿, 袁芳, 王宝山, 陈敏. 能源植物杂交狼尾草对 NaCl 胁迫的响应及其耐盐阈值. 植物生态学报, 2012, 36(6): 572-577.
- [16] 晏斌, 戴秋杰. 外界 K^+ 水平对水稻幼苗耐盐性的影响. 中国水稻学, 1994, 8(2): 119-122.
- [17] 李景生, 黄韵珠. 浅述植物的耐盐生理. 植物学通报, 1995, 12(3): 15-19.
- [21] 陈健妙, 郑青松, 刘兆普, 等. 麻疯树 (*Jatropha curcas* L.) 幼苗生长和光合作用对盐胁迫的响应. 生态学报, 2009, 29(3): 1356-1365.
- [22] 窦全琴, 焦秀洁, 张敏, 何开跃, 黄利斌. 土壤 NaCl 含量对榉树幼苗生理特性的影响. 西北植物学报, 2009, 29(10): 2063-2069.
- [23] 胡晓立, 李彦慧, 陈东亮, 冯晨静, 杨建民. 3 种李属彩叶植物对 NaCl 胁迫的生理响应. 西北植物学报, 2010, 30(2): 370-376.