

DOI: 10.5846/stxb201409221872

王宇鹏, 张圣强, 刘晓娟, 林静, 齐艳, 陈敏. 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对 NaCl 胁迫下能源植物杂交狼尾草幼苗生长的影响. 生态学报, 2016, 36(2): - .
Wang Y P, Zhang S Q, Liu X J, Lin J, Qi Y, Chen M. Effects of Exogenous Ca^{2+} and IBA on Seedlings Growth of Energy Plant Hybrid *Pennisetum* under NaCl Stress. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - .

外源 Ca^{2+} 和 IBA 对 NaCl 胁迫下能源植物杂交狼尾草幼苗生长的影响

王宇鹏, 张圣强, 刘晓娟, 林 静, 齐 艳, 陈 敏*

山东师范大学生命科学学院, 山东省逆境植物重点实验室, 济南 250014

摘要:以能源植物杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为实验材料,在 NaCl 胁迫条件下用外源 IBA (100 mg/L), CaCl_2 (浓度分别为 0 mmol/L、1 mmol/L、2 mmol/L、5 mmol/L)处理杂交狼尾草幼苗,处理 3 周后测定植物的存活率、鲜重、干重、株高、生根数和地上部分、地下部分的离子含量。结果表明,经过 IBA 溶液预处理的杂交狼尾草幼苗的存活率、鲜重、干重、株高、生根数明显高于未处理的幼苗;在 NaCl 胁迫下,随着外源 Ca^{2+} 浓度的升高,杂交狼尾草幼苗的存活率、鲜重、干重、株高、生根数以及 Ca^{2+} 含量都明显升高并在 CaCl_2 浓度为 2 mmol/L 时达到最大值;随着外源 Ca^{2+} 浓度的升高, Na^+ 含量、 Na^+/K^+ 降低,当 CaCl_2 的浓度为 2 mmol/L 时, Na^+ 含量、 Na^+/K^+ 最低。以上结果表明外源 Ca^{2+} 和 IBA 对 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗生长有促进作用,可以缓解 NaCl 胁迫对杂交狼尾草幼苗生长的抑制作用,提高杂交狼尾草幼苗在 NaCl 胁迫下的成活率;缓解盐害的最适的 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L。

关键词:杂交狼尾草, IBA (吲哚丁酸); Ca^{2+} ; NaCl 胁迫; 生长

Effects of Exogenous Ca^{2+} and IBA on Seedlings Growth of Energy Plant Hybrid *Pennisetum* under NaCl Stress

WANG Yupeng, ZHANG Shengqiang, LIU Xiaojuan, LIN Jing, QI Yan, CHEN Min*

Key Laboratory of Plant Stress Research, 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, which triggers ionic disturbance and has osmotic and toxic effects due to high cellular Na^+ concentrations, which ultimately greatly reduces vegetative growth. Calcium is an indispensable nutrient for plant growth and development, and it also plays important role in plant response to abiotic stresses. Calcium deficiency phenomenon is universal in Chinese arable land and its shortage in salinized land is more intense and severely limits the growth of crops. Addition of Ca^{2+} could reduce the growth inhibition induced by salt stress by increasing Na^+/K^+ ratios, maintaining normal metabolism, stabilizing the cell membranes, and balancing absorbed ions. Hence, the liberal application of Ca^{2+} fertilizers is the recommended treatment for enhancing soil Ca^{2+} availability, stimulating plant yield, and preventing further deterioration of saline land. Indolyl-3-butyric acid (IBA) is a safe and efficient plant growth regulator, which is mainly used to promote rooting and root development. IBA, as an important plant hormone, participates in plant growth and development. Studies showed that IBA treatment can increase root growth and survival rate of plants under salt stress. A 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 as having good stress resistance, fast growth, and high yield. Coastal areas are

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BADA7B05);国家自然科学基金项目(31400239);山东省科技发展计划项目(2013GNC11310)

收稿日期:2014-09-22; **修订日期:**2015-07-16

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

considered to be ideal sites for cultivation of energy plants since they occupy large areas and usually cannot be used as farmland due to high soil salinity. Hence, the hybrid *Pennisetum* is an ideal crop for this type of land. Therefore, in order to better guide the bio-transformation of saline lands using this potential energy plant, the effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on the growth of seedlings of energy plant hybrid *Pennisetum* were examined under saline conditions. In a pot experiment, we investigated the effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on the survival rate, fresh weight, dry weight, plant height, root number, and ion content in the hybrid *Pennisetum* seedlings under NaCl treatment. The results indicated that the survival rate, fresh weight, dry weight, plant height, and root number of hybrid *Pennisetum* seedlings pre-treated with IBA were significantly higher than those in untreated, control plants. Under NaCl stress, the survival rate, fresh weight, dry weight, plant height, root number, and Ca^{2+} content in hybrid *Pennisetum* seedlings significantly increased with increasing Ca^{2+} content; the maximum effect was observed in treatment with 2 mmol/L Ca^{2+} . The content of Na^+ and Na^+/K^+ ratio decreased with increasing Ca^{2+} content reaching the maximum effect at 2 mmol/L Ca^{2+} . The results showed that exogenous Ca^{2+} and IBA promoted the growth of the hybrid *Pennisetum* seedlings under NaCl stress, relieved the NaCl stress on the hybrid *Pennisetum*, and increased the survival rate and salt tolerance of the hybrid *Pennisetum* seedlings at the optimum content of 2 mmol/L Ca^{2+} . These findings provide a theoretical basis for practical application of IBA and Ca^{2+} fertilizers when large-scale cultivation of hybrid *Pennisetum* occurs on saline land.

Key Words: hybrid *Pennisetum*; IBA (Indole-3-Butyric acid); Ca^{2+} ; NaCl stress; growth

在盐渍化土壤中生长的植物,由于受到高浓度 Na^+ 的胁迫,植物代谢紊乱^[1-2],经常表现出缺 Ca^{2+} 的症状^[3]。有研究表明施加适量的钙,一方面可以缓解因 Ca^{2+} 不足引起的矿质营养胁迫,另一方面可以增强质膜的稳定性和钙信号系统的正常发生和传递,阻止细胞内 K^+ 的外流和 Na^+ 的大量进入,以维持细胞内离子平衡^[4-6]。大量研究表明^[7-8],外源 Ca^{2+} 能够缓解植物的盐害。吲哚丁酸 (IBA, Indole-3-Butyric acid) 是一种使用安全的高效植物生长调节剂,主要用于促进插条生根和根系发育^[9-11],研究表明^[12-14],IBA 处理不仅能提高植物的扦插繁殖效率,还对盐胁迫有一定的缓解作用。

研究选用的材料杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) 为禾本科狼尾草属多年生草本,它是象草 (*Pennisetum purpureum* Schum) 为父本、美洲狼尾草 (*Pennisetum americanum* L.) 为母本的杂交种^[15]。杂交狼尾草作为最具潜力的能源植物,被大量种植^[16]。杂交狼尾草的广泛种植不可避免地带来了“与粮争地”的问题,因此利用现有的盐碱荒地种植杂交狼尾草就很好地解决了这一问题。杂交狼尾草为三倍体的杂交种,只能以营养体扦插繁殖,在扦插繁殖期间,易遭受盐胁迫伤害^[17],导致成苗率低,但是成苗后具有一定的耐盐性^[16, 18]。为了解决上述问题,本实验采用 IBA 预处理杂交狼尾草插段,然后将其种植在含有不同浓度 NaCl 的培养盆中(装有干净细沙),同时用不同浓度的 CaCl_2 处理,目的是探究在 NaCl 胁迫下提高杂交狼尾草成活率的最适 Ca^{2+} 浓度,以及其在盐碱地上生长的最佳条件,为在盐碱地上大面积种植杂交狼尾草提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验材料为杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*),由中国农业大学草业研究中心张蕴薇教授提供,2013 年 8 月移栽到山东师范大学生命科学院北温室旁空地。

1.2 实验材料的取材、培养和处理

选取长势相近的杂交狼尾草植株,剪取自下向上第三至五节间,挑选有着大致相同的芽的茎节 150 根,分成两组:其中一组(75 根)放于 100 mg/L 的 IBA 溶液中(pH = 7.0)促进其生根;另一组(75 根)放于去离子水中(pH = 7.0)作为对照,浸泡 7 小时。取出,分别栽入盛有干净细沙的营养盆中。

再将上述的每一组分别用 3 个 NaCl 浓度处理,第一处理为含有 0% NaCl 的 Hoagland 营养液,第二处理为含有 0.4% NaCl 的 Hoagland 营养液,第三处理为含有 0.6% NaCl 的 Hoagland 营养液。

上述每个 NaCl 浓度处理中又分成 4 个不同的 CaCl_2 梯度处理,即在 Hoagland 营养液里分别加入 0 mmol/L CaCl_2 、1 mmol/L CaCl_2 、2 mmol/L CaCl_2 、5 mmol/L CaCl_2 。

每天用上述溶液浇灌幼苗两次,早晚各一次。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 3 周后进行各指标的测定,整个实验重复进行 3 次,挑选每个处理中数据可靠地 6 个重复的数据进行综合分析。

1.3 生理指标的测定

1.3.1 成活率的测定

统计每组处理中杂交狼尾草的存活状况,汇总并计算其成活率。

1.3.2 植物干、鲜重的测定

小心将幼苗从营养盆中取出,去离子水洗净后迅速用吸水纸吸干,去掉已经枯死的叶片,分别称量地上部分和地下部分的鲜重。105 °C 杀青 15 min,70 °C 烘至恒重,再次称量为干重。

1.3.3 株高、根长以及根的数目的测量

用米尺分别测量每株幼苗的高度、根的长度并记录每株根的数目。

1.3.4 不同部位离子含量的测定

分别取烘为恒重功能叶 0.05 g 和根 0.05 g,分别置于坩埚中放入马伏炉进行灰化,500 °C,8 小时,冷却后小心取出,在每个坩埚中滴入两滴浓硝酸,加入去离子水冲洗多次并倒入 25 mL 容量瓶中定容至 25 mL。用 410 型火焰光度计(Sherwood Scientific Ltd., Cambridge, UK)测量 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的含量,并计算 Na^+/K^+ 。

1.4 数据分析

本实验的数据都采用 SAS 6.12 统计软件对钙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 $\pm$ SD)表示, $P < 0.05$,表示差异显著,采用字母标注法。

2 结果

2.1 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗成活率的影响。

幼苗的成活率对于杂交狼尾草在盐碱地上的种植至关重要,经过 3 次重复测定存活率(图 1),结果表明,所有处理中经过 IBA 溶液预处理的杂交狼尾草幼苗的成活率明显高于未经 IBA 处理的幼苗,在 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗的成活率降低,但外源 Ca^{2+} 可以增加同等 NaCl 浓度处理下的幼苗成活率,当外源 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时,杂交狼尾草的成活率最高(图 1,表 1)。

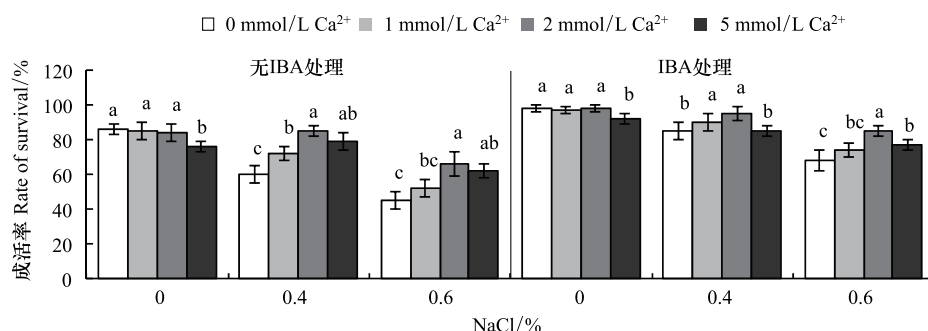


图 1 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗成活率的影响

Fig. 1 Effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on survival rate of hybrid *Pennisetum* seedlings under different NaCl stress (mean $\pm$ SD, $n = 6$)

IBA (Indole-3-Butyric acid), 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 ($P < 0.05$)。

表 1 外源钙素对经 IBA 处理的盐胁迫下杂交狼尾草幼苗生长指标的三因素分析结果

Table 1 Results of a three-way ANOVA of parameters for hybrid Pennisetum

参量 Parameters	主要因素 Main factors						
	NaCl (A)	钙 (Ca)	IBA (C)	A×Ca	A×C	Ca×C	A×Ca×C
地上部分鲜重 Shoot fresh weight	4404.06 ***	4851.31 ***	1491.84 ***	1255.66 ***	31.61 ***	11.01 ***	5.66 ***
地上部分干重 Shoot dry weight	1985.16 ***	2751.86 ***	733.28 ***	609.99 ***	30.89 ***	16.00 ***	16.65 ***
地下部分鲜重 Root fresh weight	1486.35 ***	1813.82 ***	2653.93 ***	31.87 ***	20.44 ***	8.37 ***	24.82 ***
地下部分干重 Root dry weight	1160.50 ***	1525.10 ***	3702.28 ***	15.01 ***	70.04 ***	45.77 ***	21.83 ***
地上部分 Na ⁺ 含量 Shoot Na ⁺ concentration	4328.76 ***	1455.18 ***	580.81 ***	25.29 ***	30.54 ***	8.98 ***	6.15 ***
地下部分 Na ⁺ 含量 Root Na ⁺ concentration	6332.21 ***	1716.79 ***	1675.00 ***	111.91 ***	50.08 ***	27.45 ***	12.82 ***
地上部分 K ⁺ 含量 Shoot K ⁺ concentration	4427.17 ***	74.82 ***	133.58 ***	65.13 ***	13.91 ***	1.27 ^{NS}	4.08 **
地下部分 K ⁺ 含量 Root K ⁺ concentration	16776.97 ***	81.19 ***	152.30 ***	36.16 ***	49.47 ***	16.93 ***	23.43 ***
地上部分 Ca ²⁺ 含量 Shoot Ca ²⁺ concentration	498.29 ***	1622.57 ***	400.10 ***	6.01 ***	1.71 ^{NS}	12.96 ***	6.01 ***
地下部分 Ca ²⁺ 含量 Root Ca ²⁺ concentration	3341.68 ***	2248.45 ***	739.27 ***	121.88 ***	0.40 ^{NS}	9.18 ***	23.05 ***
根长 Root length	8560.80 ***	359.81 ***	7740.75 ***	130.28 ***	103.56 ***	17.93 ***	11.78 ***
根数 Root number	5955.15 ***	125.22 ***	4802.35 ***	52.45 ***	122.40 ***	4.44 **	10.91 ***
株高 Plant height	6303.71 ***	223.38 ***	2733.97 ***	107.88 ***	4.42 *	15.53 ***	29.55 ***
地上部分 Na ⁺ /K ⁺ Shoot K ⁺ /Na ⁺	36834.06 ***	5765.22 ***	2426.91 ***	717.44 ***	199.08 *	3.20 ***	19.35 ***
地下部分 Na ⁺ /K ⁺ Root K ⁺ /Na ⁺	29911.80 ***	2437.39 ***	724.48 ***	724.98 ***	124.12 ***	21.55 *	6.38 ***

标有 * 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; 生长指标包括地上部分、地下部分的干重、株高、根长、根的数目、地上部分和地下部分的 Na⁺、K⁺ 含量、Na⁺/K⁺

2.2 外源 Ca²⁺ 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗干、鲜重的影响。

植物的生长量是衡量其生长情况的重要指标,我们对不同 NaCl 浓度处理、不同外源 Ca²⁺ 浓度处理的杂交狼尾草幼苗进行了生物量的测定。结果如图 2 所示,经 IBA 处理和不经 IBA 处理的杂交狼尾草幼苗呈现相同的趋势,但经过 IBA 溶液预处理的杂交狼尾草不论是地上部分还是地下部分的干重、鲜重都明显高于不经 IBA 处理的植株,且地下部分更加显著(图 2,表 1)。所有处理的杂交狼尾草幼苗其干、鲜重都随着 NaCl 浓度的升高而显著降低,在相同 NaCl 浓度时,杂交狼尾草的干重、鲜重随着外源 Ca²⁺ 含量升高而升高,当外源 Ca²⁺ 浓度到达 2 mmol/L 时杂交狼尾草的干重、鲜重达到最大;当外源 Ca²⁺ 浓度增加至 5 mmol/L 时,明显下降。上述结果表明,IBA 预处理明显促进杂交狼尾草根的生长,经 IBA 处理的杂交狼尾草幼苗地上部分可能因为根的发达而受益,长势明显好于未经 IBA 处理的幼苗,在 NaCl 胁迫下,外源 Ca²⁺ 浓度的升高,有助于杂交狼尾草幼苗地上和地下部分生物量的增长,当外源 Ca²⁺ 浓度为 2 mmol/L 时增长最显著(图 2,表 1)。

2.3 外源 Ca²⁺ 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗株高、根长和根的数目的影响。

由图 3 可以看出,总体来看,杂交狼尾草幼苗株高、根长和根的数目随着 NaCl 浓度的升高而降低,经 IBA 溶液预处理的幼苗与未经 IBA 处理趋势相同,但经 IBA 溶液预处理幼苗的 3 项指标都高于未经 IBA 处理的幼苗,且根的数目和根长增加更显著。在无 NaCl 处理的情况下,幼苗的 3 项指标无明显变化;在 NaCl 处理的情况下,杂交狼尾草的 3 项指标大致呈现相同的变化趋势,即都随着外源 Ca²⁺ 浓度的升高而升高,当外源 Ca²⁺ 浓度为 2 mmol/L 时达到最大值。上述结果表明,IBA 对于促进生根以及根的伸长有着很好的效果,在无 NaCl 胁迫下外源 Ca²⁺ 对杂交狼尾草的株高、根长以及根数有少许抑制作用,但在不同浓度的 NaCl 胁迫下,外源 Ca²⁺ 可以缓解盐害带来的生长抑制,当外源 Ca²⁺ 浓度为 2 mmol/L 时,缓解盐害效果最明显(图 3,表 1)。

2.4 外源 Ca²⁺ 及 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗离子含量及分布的影响。

为了进一步探讨外源 Ca²⁺ 及 IBA 预处理缓解杂交狼尾草盐害的机理。我们对处理 3 周的杂交狼尾草幼苗根和地上部分的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 进行了测定。结果如图 4 所示。经 IBA 处理的杂交狼尾草幼苗与未处理的幼苗离子含量趋势相同,含量也相差不大。图 4 中 A、B 所示,总体上,地下 Na⁺ 含量显著高于地上部分 Na⁺ 含量,随着 NaCl 浓度的升高,根和地上 Na⁺ 含量显著升高。相同 NaCl 浓度处理条件下,Na⁺ 含量随着外源 Ca²⁺

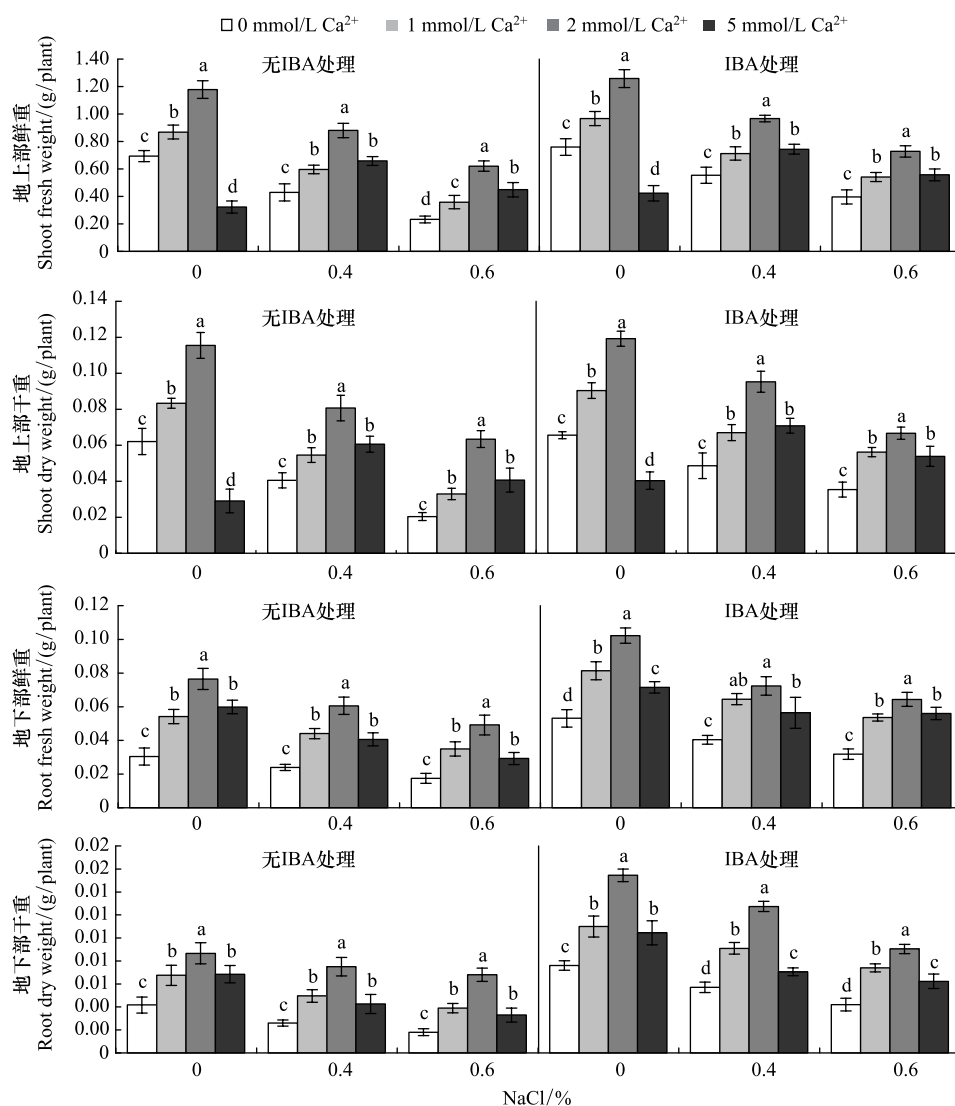


图2 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗干、鲜重的影响。

Fig. 2 Effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on fresh weight, dry weight of shoot and roots of hybrid *Pennisetum* seedlings (mean $\pm$ SD, $n=6$)

A、B 为地上部分, C、D 为地下部分, 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 ($P<0.05$)。

浓度的增加而降低, 当外源 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时 Na^+ 含量到达最低值, 外源 Ca^{2+} 浓度为 5 mmol/L 时, Na^+ 含量与 2 mmol/L 时大致相等 (图 4 A, 图 4 B, 表 1)。图 4 C、D 表明, 随着 NaCl 浓度的升高, 根和地上 K^+ 含量降低。在无 NaCl 处理条件下, 随着外源 Ca^{2+} 浓度的增加 K^+ 含量基本无变化, NaCl 处理下, 随着外源 Ca^{2+} 浓度的增加 K^+ 含量小幅度升高; 图 4 E、F 表明, 根和地上部分 Ca^{2+} 浓度随着外源 Ca^{2+} 含量的增加而明显增加。图 4 G、H 表明, 不论是经过 IBA 预处理的还是未经过 IBA 处理的, 其地上部分和地下部分 Na^+/K^+ 在无 NaCl 处理时随着外源 Ca^{2+} 含量的增加而小幅度降低, 在 NaCl 处理时, Na^+/K^+ 随着外源 Ca^{2+} 浓度的增加明显降低, 在 2 mmol/L 时达到最低, 5 mmol/L 变化不明显 (图 4, 表 1)。从上述结果可以看出杂交狼尾草是通过在根部积累大量 Na^+ 的拒盐方式来缓解盐害的, 同时外源 Ca^{2+} 通过降低 Na^+/K^+ 缓解盐害。

2.5 三向方差分析

外源 Ca^{2+} 和 IBA 溶液预处理对不同 NaCl 浓度胁迫下杂交狼尾草幼苗各项生理指标影响的三向方差分析见表 1, 从表中可以看出, 单独的 NaCl、 Ca^{2+} 、IBA 对杂交狼尾草幼苗的生理指标影响显著, IBA 在一定程度上缓解 NaCl 胁迫, Ca^{2+} 缓解 NaCl 胁迫效果显著, 3 种因素共同作用对植物生长的影响显著, 但 NaCl 和 IBA 共同作用对植物体中 Ca^{2+} 含量没有影响。综上所述, 外源 Ca^{2+} 及 IBA 对 NaCl 胁迫下能源植物杂交狼尾草幼苗生

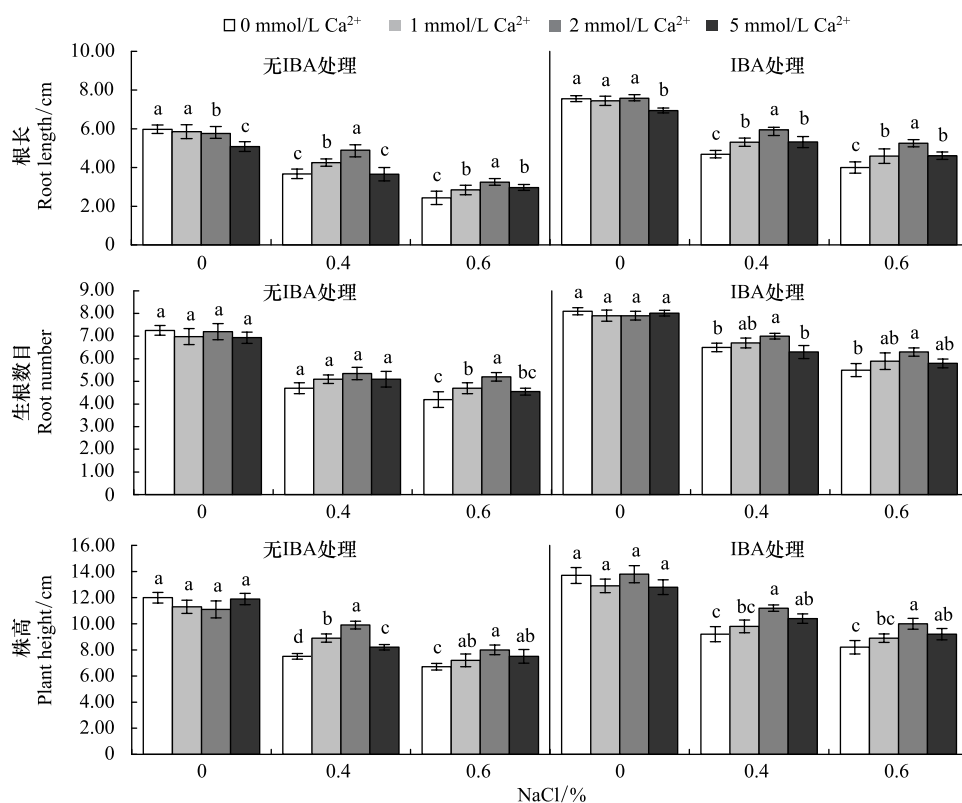
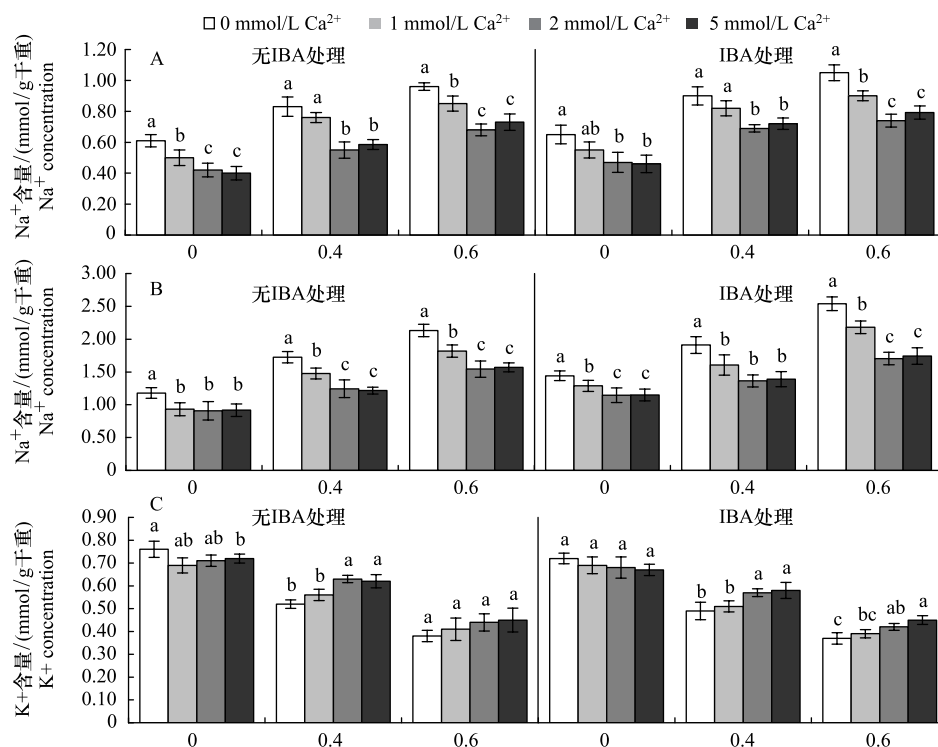


图3 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对于不同 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗株高、根长、根的数目的影响。

Fig. 3 Effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on the plant height, root length and the root numbers of hybrid *Pennisetum* seedlings (mean $\pm$ SD, $n=6$).

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 ($P < 0.05$)



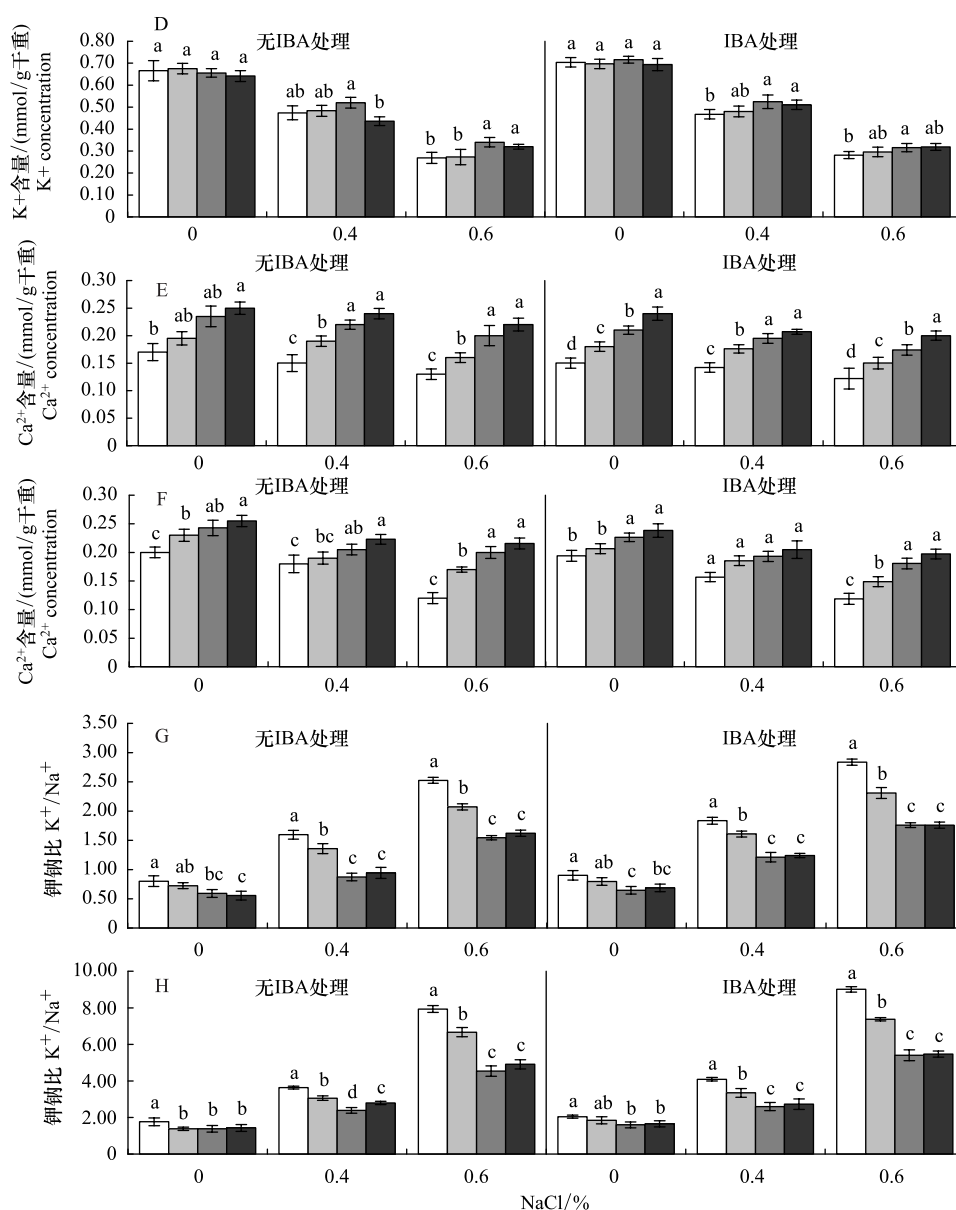


图4 外源 Ca^{2+} 和 IBA 对于不同浓度 NaCl 处理下杂交狼尾草幼苗 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量及 Na^+/K^+ 的影响。

Fig. 4 Effects of exogenous Ca^{2+} and IBA on the content of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Na^+/K^+ of shoot and root of hybrid *Pennisetum* seedlings (mean $\pm$ SD, $n = 6$).

A、C、E、G 为地上部分, B、D、F、H 为地下部分, 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 ($P < 0.05$)。

长影响是显著的, 它们缓解了 NaCl 对杂交狼尾草生长的胁迫, 促进了植物的生长, 以及植物体内的离子平衡。

3 讨论

植物生长环境中的盐分超过其耐盐阈值时, 就会引起植物有机体在所有功能水平上产生变化和反应, 即发生胁迫^[19]。植物在盐胁迫下最明显的变化是生长受到抑制^[20]。本实验结果表明, NaCl 胁迫下杂交狼尾草的地上和地下部分的干、鲜重显著下降, 地上部分的下降速率更快, 但加入外源 Ca^{2+} 之后, 其各部分干、鲜重明显增加, 当外源 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时增加最多, 这证明适当的外源 Ca^{2+} 浓度对处于 NaCl 胁迫条件下的杂交狼尾草幼苗的盐害有很好的缓解作用。此外, 经过 IBA 溶液预处理的幼苗生长状况更加良好, 这是由于 IBA 作为重要的植物生长调节剂, 参与了根和茎的生长、维管束组织的形成和分化等^[12]。IBA 与外源 Ca^{2+} 共同协作, 对于 NaCl 胁迫起到了双重缓解的作用。

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^[21]。实验结果显示,杂交狼尾草的地下部分 Na^+ 含量明显高于地上部分,这是由于杂交狼尾草作为一种盐生植物用独特的拒盐方式来抵御外界盐害^[18],将大量 Na^+ 储存在根部,只让少量的 Na^+ 进入地上,对地上部分起到了很好的保护作用。植物细胞内 Na^+ 与 K^+ 浓度比例 (Na^+/K^+) 是影响植物的耐盐性的因素之一,本实验结果显示,随着植物的 Ca^{2+} 含量上升, Na^+/K^+ 下降,当 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时, Na^+/K^+ 最低。 Na^+ 能置换细胞膜上的 Ca^{2+} , 导致 K^+ 的大量外流。增加胞外 Ca^{2+} 浓度,可以阻止这种由 Na^+ 引起的胞内 K^+ 的外流,降低细胞质中的 Na^+ 浓度^[22] 从而降低了细胞内 Na^+/K^+ , 使植物在盐胁迫条件下维持正常生理功能^[23], 增强了植物的抗逆性。

中国的耕地普遍缺钙,而且盐碱地钙素缺乏更为严重,这严重限制了作物的生长,致使作物病害增加和品质下降,甚至出现减产的现象^[24]。本实验应用外源 Ca^{2+} 及 IBA 溶液预处理对于不同 NaCl 胁迫下杂交狼尾草幼苗的成活率和生长做了深入的研究,证明了外源 Ca^{2+} 及 IBA 溶液预处理明显缓解杂交狼尾草的盐害,并找到了最佳的缓解 NaCl 胁迫的外源 Ca^{2+} 浓度 (2 mmol/L), 为在盐碱地上大面积种植杂交狼尾草,提高其成活率和产量、合理施用钙肥提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 赵可夫, 范海, 宋杰, 周三. 中国盐生植物的种类、类型、植被及其经济潜势 // 2001 年盐生植物利用与区域农业可持续发展国际学术研讨会, 2001.
- [2] Kholová J, Hash C T, Kumar P L, Yadav R S, Kováč 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.
- [3] 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.
- [4] 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?. *Plant Physiology*, 1985, 79(1): 207-211.
- [5] 赵可夫, 王韶唐. 作物抗性生理. 北京: 中国农业科学出版社, 1990: 25-41.
- [6] 赵可夫, 卢元芳, 张宝泽, 衣建龙. Ca 对小麦幼苗降低盐害效应的研究. *植物学报*, 1993, 35(1): 51-56.
- [7] 周芬, 曾长立, 王建波. 外源钙降低拟南芥幼苗盐害效应. *武汉植物学研究*, 2004, 22(2): 179-182.
- [8] 刘丽云, 侯传本, 王明友, 郑延海, 贺明荣. 外源钙离子对盐胁迫下小麦萌发的影响. *山东农业科学*, 2007, (5): 60-62.
- [9] 王小玲, 赵忠, 权金娥, 张晓鹏, 张博勇. 外源激素对四倍体刺槐硬枝扦插生根及其关联酶活性的影响. *西北植物学报*, 2011, 31(1): 116-122.
- [10] 王海南, 沈海龙, 杨立学. 紫椴嫩枝扦插繁殖技术研究. *经济林研究*, 2012, 30(3): 106-110.
- [11] Christensen M V, Ericksen E N, Andersen A S. Interaction of stock plant irradiance and auxin in the propagation of apple rootstocks by cuttings. *Scientia Horticulturae*, 1980, 12(1): 11-17.
- [12] 吕剑, 喻景权. 植物生长素的作用机制. *植物生理学通讯*, 2004, 40(5): 624-628.
- [13] 邓涛, 何永艳, 周太久, 盘波, 唐文秀, 仇硕, 邹玲俐. 外源 IBA 对 5 种苦苣苔科植物扦插繁殖的影响. *经济林研究*, 2013, 31(3): 68-71.
- [14] 李婧男, 刘强, 李升. 生长素和氯化钙对盐胁迫下沙冬青幼苗的缓解作用[J]. *植物研究*, 2010, 30(1): 27-31.
- [15] 陈志彤, 应朝阳, 林永生, 黄毅斌. 白三叶的栽培技术与利用价值. *福建农业科技*, 2005, (6): 45-46.
- [16] 杨运生, 李荣, 徐宝琪, 顾洪如. 杂交狼尾草无性繁殖利用研究. *中国草业科学*, 1987, (2): 14-18.
- [17] 李海云, 赵可夫. 盐对盐生植物种子萌发的抑制作用. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2002, 33(2): 170-173.
- [18] 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.
- [19] 王宝山. 逆境植物生物学. 北京: 高等教育出版社, 2010: 47-50.
- [20] 王宝山, 赵可夫, 邹琦. 作物耐盐机理研究进展及提高作物抗盐性的对策. *植物学通报*, 1997, 14(S): 25-30.
- [21] 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.
- [22] Liu T, van Staden J, Cress W A. Salinity induced nuclear and DNA degradation in meristematic cells of soybean (*Glycine max* (L.)) roots. *Plant Growth Regulation*, 2000, 30(1): 49-54.
- [23] Zhu J K. Genetic analysis of plant salt tolerance using Arabidopsis. *Plant Physiology*, 2000, 124(3): 941-948.
- [24] 马章全, 冯忠义. 杂交狼尾草. *农村养殖技术*, 2002, (12): 27-27.