

硝态氮对盐胁迫下囊果碱蓬幼苗根系生长和耐盐性的影响

原俊凤^{1,2}, 田长彦^{1*}, 冯固³, 马海燕^{1,2}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:在溶液培养条件下, 设计了4个盐分(1、150、300和450 mmol/L NaCl)和3个氮素(0.05、5和10 mmol/L NO₃⁻-N)水平, 研究了盐、氮及其互作对囊果碱蓬(*Suaeda physophora* Pall.) 幼苗的离子吸收、氮营养状况、根系形态特征及耐盐性的影响。结果表明, 与低盐或低氮相比, 增加盐分或氮水平显著增加了囊果碱蓬根部的干重、根系的侧根长、表面积、总吸收面积和活跃吸收面积; 且这些根系的形态指标与地上部的离子及氮的累积存在显著的正相关。高盐胁迫下增加氮营养, 显著增加了地上部 Na⁺、NO₃⁻、有机氮的含量和硝酸还原酶的活性; 降低了 Cl⁻ 和 K⁺ 的含量。高盐胁迫下, 硝态氮的增加促进了囊果碱蓬幼苗根系的生长, 增加了地上部有机氮、NO₃⁻ 和 Na⁺ 的累积, 改善了植株的营养状况和渗透调节, 从而提高了囊果碱蓬的耐盐能力。

关键词: 盐生植物; 囊果碱蓬; 根系形态; NaCl; NO₃⁻

中图分类号: S793.01; S143.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)04-0953-07

Effects of nitrate on the root growth and salt tolerance of *Suaeda physophora* seedlings under NaCl stress

YUAN Jun-feng^{1,2}, TIAN Chang-yan^{1*}, FENG Gu³, MA Hai-yan^{1,2}

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

3 College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Effects of NaCl and nitrate on the root morphologic characteristics and nitrogen accumulation in the shoot of *Suaeda physophora* seedlings were investigated in order to elucidate the relationship between nitrogen nutrition and salt tolerance. *S. physophora* seedlings were grown under four NaCl levels (1, 150, 300 and 450 mmol/L) and three NO₃⁻-N levels (0.05, 5 and 10 mmol/L) making twelve combination treatments. The results showed that the dry weight, lateral root length, surface area, absorbing area and active absorbing area of root of *S. physophora* seedlings increased with an increase in salinity or nitrate level. Meanwhile, ions and nitrogen accumulation in shoot had significantly positive correlations with those root morphologic characteristics. Increasing of nitrate levels in the high NaCl solution increased the Na⁺, NO₃⁻, organic nitrogen concentrations and nitrate reductase activities, while decreased Cl⁻ and K⁺ concentrations. Positive response of *S. physophora* seedlings under high NaCl stress could be attributed to N application which increased root growth and improved Na⁺ and nitrogen accumulation in the shoot of seedlings. Contribution of NO₃⁻ and Na⁺ to osmotic adjustment increased and nitrogen nutrient deficiency was ameliorated, and hence the tolerance to high NaCl was enhanced.

Key words: halophyte; *Suaeda physophora*; root morphology; NaCl; NO₃⁻

收稿日期: 2008-05-08

接受日期: 2008-11-05

基金项目: 自治区“十一五”重大专项(200733144-1); 自治区科学技术攻关项目(20050302)资助。

作者简介: 原俊凤(1977—), 女, 河南杞县人, 博士研究生, 主要从事植物生态学研究。Tel: 0991-7885395, E-mail: yuanjunfeng-2003@tom.com

* 通讯作者 Tel: 0991-7885301, E-mail: Tianchy@ms.xjb.ac.cn

植物最先感受逆境胁迫的器官是根系,逆境胁迫下根系形态上的变化是最为直观的,但根系却是最不被人们了解的植物器官^[1]。研究表明,植物抗盐中最初和最重要的过程存在于植物的根系系统^[2];但关于盐生植物根系的生长发育的研究报道很少。

氮营养缺乏可能是盐碱地区植物生长的主要限制因素之一^[3]。因此,在盐碱地区施氮有利于提高一些盐生植物对盐胁迫的抵抗能力^[4]。盐胁迫下增加氮营养提高植物耐盐性的研究,以地上部的较多,如施氮增加了盐生植物叶片脯氨酸的含量^[5-6],降低耐盐作物地上部 Na^+ 的含量,增加 K^+ 的向上运输^[7]。根系的形态特征在决定植物对氮的吸收方面起着重要作用^[8],但有关盐生植物根系的研究相对较少,究其原因是对根系的作用和功能的认识不足,以至于对根系的认识滞后于地上部。因此,以盐生植物的根系发育为切入点,研究盐生植物的离子吸收、氮的累积及其与根系形态的关系,加强地上和地下部分的联系,对盐生植物耐盐机理的探索是非常必要的。

囊果碱蓬是中药材盐生肉苁蓉[*Cistanche salsa* (C. A. Mey.) G. Beck]的寄主之一,也是干旱荒漠区的主要灌木树种,在盐生植物的开发利用、盐碱地治理和发展畜牧业等方面起着重要的作用。本试验对不同盐分和硝态氮水平下囊果碱蓬离子吸收、氮的累积以及和根系形态特征它们之间的相关性进行了

研究,以期理解氮素营养对盐生植物根系发育的影响及其与耐盐性的关系,为盐土农业的发展和生态系统的恢复以及盐碱地区盐生植物的栽培和合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物培养

囊果碱蓬(*Suaeda physophora*)种子采自新疆阜康市郊盐渍化土壤($\text{N}44^{\circ}09'56''$, $\text{E}87^{\circ}50'55''$),置于 4°C 冰箱中保存。试验于 2007 年 1 月至 4 月在中国科学院新疆生态与地理研究所植物生长室进行,室内昼夜温度 $30 \pm 3/25 \pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $40\% \sim 65\%$,光暗周期 14/10 h,光强 12000 lx。

种子用 10% H_2O_2 浸泡 5 min,蒸馏水清洗 3 遍,置于培养皿内,于 25°C 的培养箱中催芽,挑选发芽一致的种子播于石英砂培养介质中,蒸馏水育苗,待幼苗长至 3 cm 左右,移入高 30 cm,直径 20 cm 的塑料桶中培养。幼苗基部用脱脂棉裹住,桶上部用泡沫塑料板作支持物,桶外部用黑油漆漆黑遮光。每桶 12 株苗,用气泵 24 h 连续通气。营养液的大量元素成分见表 1, Fe 及微量元素浓度为 $90 \mu\text{mol/L}$ Fe-EDTA、 $46 \mu\text{mol/L}$ H_3BO_3 、 $9.1 \mu\text{mol/L}$ MnCl_2 、 $0.32 \mu\text{mol/L}$ CuSO_4 、 $0.76 \mu\text{mol/L}$ ZnSO_4 和 $0.56 \mu\text{mol/L}$ Na_2MoO_4 。营养液用 NaOH 和 HCl 调 pH 到 6.5 ± 0.1 ,每 2 d 更换一次。

表 1 营养液中大量元素的组成成分(mmol/L)

Table 1 Chemical composition of large number of elements of nutrient solution

$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	CaCl_2	KNO_3	K_2SO_4	MgSO_4	KH_2PO_4
1	0.5	2.5	—	2	2	1
0.05	0.025	2.975	—	2	2	1
5	2.5	0.5	—	2	2	1
10	3	—	4	—	2	1

1.2 试验设计

设 NaCl 为 1、150、300 和 450 mmol/L 4 个盐分水平; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 0.05、5 和 10 mmol/L 3 个氮水平(表 1),共 12 个处理,3 次重复。幼苗在 1 mmol/L $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 营养液中培养 30 d 后,NaCl 以 75 mmol/L 作为起始浓度,每天递增 75 mmol/L,达到预定的浓度后(450 mmol/L)幼苗继续培养 30 d,一次性取样。植物鲜样用液氮冷冻,用于测定 Cl^- 、 NO_3^- 和硝酸还原酶(Nitrate reductase, NR)活性。 Na^+ 、 K^+ 和有机氮的

含量用干样测定。

1.3 测定指标与方法

鲜重和干重:将植株的地上部和根系分开,蒸馏水冲洗后用滤纸吸干表面水分并称重,记录为鲜重。将鲜样 105°C 杀青 30 min 后于 80°C 烘干至恒重,记为干重。

Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 含量的测定:取 15 mg 地上部干样品磨碎,在马福炉中 550°C 下灰化 6 h,灰分用浓硝酸溶解,用去离子水定容至 25 mL,原子吸

收光谱仪(Thermo Solar M, Thermo Electron, American)测定 Na^+ 和 K^+ 的含量。液氮冷冻的地上部在 100°C 的去离子水中浸提,过滤后用于测定 NO_3^- 和 Cl^- 的含量。 NO_3^- 含量用比色法测定(UV-120-02 Spectrophotometer, Shimadzu, Kyoto, Japan), Cl^- 含量用 $0.02 \text{ mmol/L AgNO}_3$ 滴定法测定。

根系形态的测定:将根系从培养桶中取出,用蒸馏水冲洗 3 次后放入 50°C 、1% 的结晶紫溶液中浸泡 5 min,用蒸馏水冲洗后将根浸于 50% 的乙醇溶液中,置于冰箱中待用。根系用蒸馏水冲洗后,放入装有 0.01 mmol/L NaOH 溶液的玻璃盘子里,用镊子将根系尽可能分散,使根系最少地重叠,将根系扫描,选择黑白二值图像,分辨率 600 DPI,以 TIFF 格式保存。用 Rootedge 2.3b 软件分析得出根系的总长度、平均直径和表面积^[9],用直尺测量出根系的主根长。每个处理扫描 3 株,求其平均值。用甲烯蓝法测定根系的总吸收面积和活跃吸收面积^[10]。

通过计算得到以下的根系指标:

侧根长(cm) = 总根长 - 主根长;

主根长百分比(%) = 主根长/总根长 $\times 100$;

比根长(cm/g , FW) = 总根长/根鲜重;

根长密度(cm/cm^2) = 总根长/根系表面积。

有机氮和硝酸还原酶(NR)活性的测定:有机氮含量用凯氏定氮法测定;NR 用离体法测定^[11]。

试验数据采用 SAS 软件对数据进行双因素方差分析,用软件 SPSS 11.5 对数据进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗生长的影响

图 1 看出,盐分显著影响囊果碱蓬地上部的干重($F_S = 48.5$, $P < 0.001$),高盐浓度下地上部的干重显著增加,而低盐浓度下受到明显的抑制。 10 mmol/L N 水平下,1 和 150 mmol/L NaCl 处理,地上部的干重比 300 mmol/L NaCl 处理分别降低了 79.3% 和 54.5%;当 NaCl 浓度达到 450 mmol/L 时,囊果碱蓬地上部的干重有下降的趋势,在此盐浓度下 N 水平为 0.05 mmol/L 时植株叶片黄化并死亡。

相同盐浓度下 0.05 和 5 mmol/L N 处理对地上部干重的影响不大;但供 N 为 10 mmol/L 时地上部生物量的增加达到显著水平。提高盐浓度,供 N 促进囊果碱蓬生长的效应更为明显($F_N = 54.3$, $P < 0.001$)。 300 mmol/L NaCl 水平下, 10 mmol/L N 处理地上部的干重比 0.05 和 5 mmol/L N 处理分别增加了 118.3% 和 148.5%。盐和氮对地上部生长的交互作用不显著($F_{S \times N} = 1.8$, $P > 0.05$)。盐、氮对根的干重表现出相似的规律($F_S = 27.4$, $P < 0.001$; $F_N = 99.0$, $P < 0.001$),盐和氮对根的干重存在显著的交互作用($F_{S \times N} = 3.7$, $P < 0.05$)。

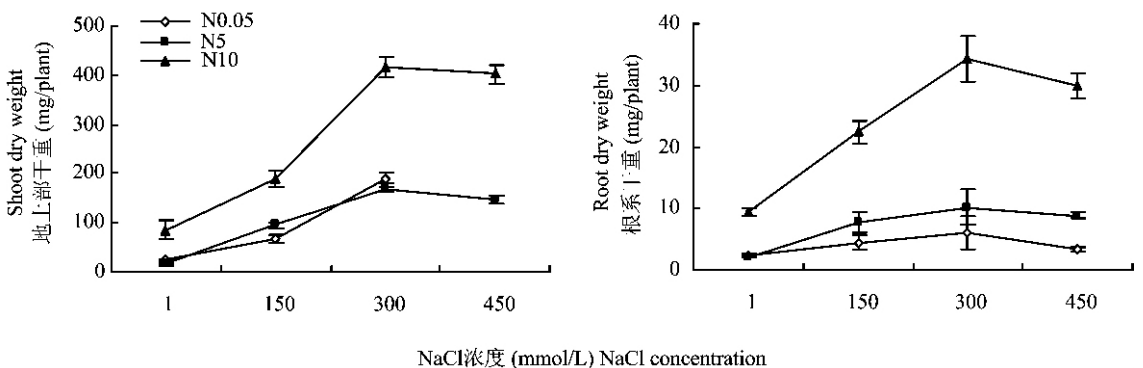


图 1 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗地上部和根系干重的影响

Fig. 1 The effects of NaCl and nitrate on the shoot and root dry weight of *Suaeda physophora* seedlings

(N0.05、N5 和 N10 分别表示 NO_3^- -N 处理浓度为 0.05、5 和 10 mmol/L ,下同。

N0.05, N5 and N10 mean 0.05, 5 and 10 mmol/L NO_3^- -N concentration treatments, respectively. The same below.)

2.2 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗根系形态特征的影响

囊果碱蓬幼苗的侧根长随着 NaCl 浓度的增加而显著增加。当 NaCl 浓度大于 300 mmol/L 时,侧根

的长度开始下降,而在 0.05 mmol/L N 水平下,侧根长度在 NaCl 浓度达到 150 mmol/L 时已经开始下降。相同盐浓度下,侧根长随 N 含量的增加显著增加,在 300 mmol/L NaCl 水平下, 10 mmol/L N 处理的侧

根长比 0.05 和 5 mmol/L N 处理分别增加了 382.0% 和 107.6%。不同的盐、氮水平对根系表面积的影响与侧根长的趋势相似(图 2)。

图 2 还可看出,低浓度的盐分对囊果碱蓬幼苗根系的总吸收面积影响不明显;高浓度盐分显著增加了根系的总吸收面积。在 10 mmol/L N 水平下,300 和 450 mmol/L NaCl 处理下根系的总吸收面积比 1 mmol/L 盐处理分别增加了 75.9% 和 37.6%。相同盐浓度下,根系的总吸收面积随着 N 水平的增加而增加,10 mmol/L N 处理下的增加更为显著。不同

盐、氮水平对根系的活跃吸收面积也表现出相似的规律。

由表 2 可知,盐和氮对囊果碱蓬幼苗根系的侧根长、表面积、总吸收面积和活跃吸收面积均存在显著的交互作用。不同盐、氮水平以及盐氮互作对植株根系的初生根长、平均直径、比根长和根长密度均没有显著的影响。

2.3 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗地上部离子含量的影响

表 3 看出,囊果碱蓬幼苗地上部 Na^+ 和 Cl^- 的

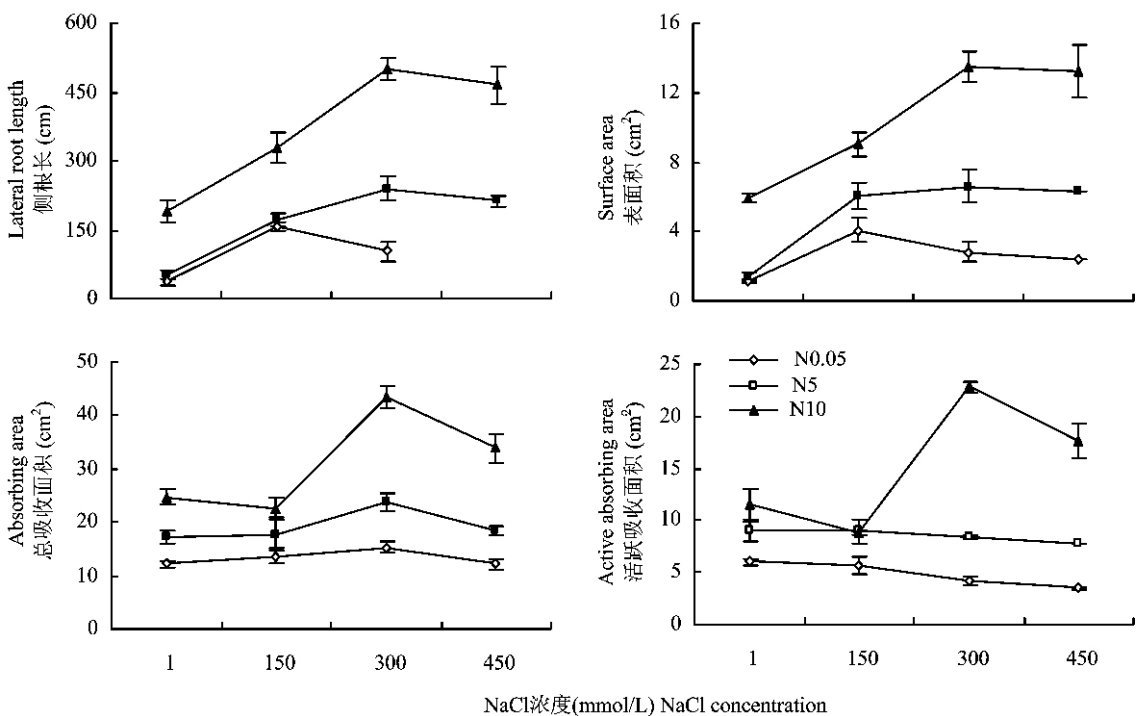


图 2 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗根系侧根长、表面积、总吸收面积和活跃吸收面积的影响

Fig.2 The effects of NaCl and nitrate on the lateral root length, surface area, absorbing area and active absorbing area of root of *Suaeda physophora* seedlings

表 2 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗根系形态特征的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of NaCl and nitrate on *Suaeda physophora* seedlings

项目 Items	NO_3^- -N(N)	盐浓度 Salinity(S)	S × N
侧根长 Lateral root length(cm)	137.58***	54.17***	6.60***
表面积 Surface area(cm^2)	157.93***	36.27***	7.56***
总吸收面积 Absorbing area(cm^2)	100.72***	25.90***	5.73**
活跃吸收面积 Active absorbing area(cm^2)	214.34***	33.62***	36.82***
初生根长 Primary root length(cm)	3.15 ^{NS}	0.34 ^{NS}	1.60 ^{NS}
平均直径 Root diameter(mm)	2.63 ^{NS}	0.06 ^{NS}	2.00 ^{NS}
比根长 Specific root length(cm/g)	3.42 ^{NS}	0.24 ^{NS}	1.45 ^{NS}
根长密度 Root length density(cm/cm^2)	1.38 ^{NS}	1.06 ^{NS}	2.40 ^{NS}

注(Note): * , ** 和 *** 分别表示差异达 5%、1% 和 0.1% 显著水平 Indicate significant at 5% , 1% and 0.1% levels , respectively ; NS 表示不显著 Indicates no significant difference ; 下同 Same as table 3 and table 4 ; 数据表示 F 值 F values are shown .

含量随 NaCl 浓度的增加而增加, NO_3^- 、 K^+ 的含量和 K^+/Na^+ 随 NaCl 浓度的增加而减少,但在 10 mmol/L NO_3^- -N 水平下, NaCl 浓度对 NO_3^- 的含量影响较小。相同盐浓度下,幼苗地上部 NO_3^- 和 Na^+ 的含量

随 N 水平的增加而增加, Cl^- 、 K^+ 的含量和 K^+/Na^+ 的变化趋势则相反。盐和氮对囊果碱蓬幼苗地上部 NO_3^- 和 Cl^- 的含量存在显著的交互作用,而对 Na^+ 、 K^+ 的含量和 K^+/Na^+ 没有影响。

表 3 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗地上部 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 和 K^+/Na^+ 的影响

Table 3 The effects of NaCl and nitrate on the concentrations of NO_3^- , Cl^- , Na^+ , K^+ and K^+/Na^+ ratio in shoots of *Suaeda physophora* seedlings

处理 Treatments	NO_3^- (mg/g, DW)	Cl^- (mg/g, DW)	Na^+ (mg/g, DW)	K^+ (mg/g, DW)	K^+/Na^+
N 0.05					
Na1	4.43 ± 0.66	59.81 ± 0.21	31.45 ± 1.00	92.31 ± 3.15	2.90 ± 0.00
Na150	2.35 ± 0.19	87.15 ± 2.38	50.24 ± 0.56	81.85 ± 2.17	1.63 ± 0.03
Na300	1.12 ± 0.14	116.27 ± 6.37	73.72 ± 2.84	75.70 ± 2.30	1.03 ± 0.02
Na450	—	—	—	—	—
N 5					
Na1	11.71 ± 0.44	34.29 ± 2.03	33.89 ± 0.73	76.53 ± 1.73	2.26 ± 0.07
Na150	7.47 ± 0.30	49.90 ± 2.36	67.67 ± 6.51	69.52 ± 2.75	1.03 ± 0.05
Na300	5.10 ± 0.34	75.44 ± 1.62	99.72 ± 6.42	59.10 ± 2.39	0.59 ± 0.01
Na450	4.00 ± 0.12	81.52 ± 2.68	116.28 ± 6.46	52.24 ± 1.85	0.45 ± 0.02
N 10					
Na1	14.92 ± 0.94	32.37 ± 0.45	32.85 ± 0.56	74.93 ± 1.38	2.28 ± 0.08
Na150	12.48 ± 0.36	55.45 ± 2.27	68.46 ± 3.90	66.09 ± 1.89	0.97 ± 0.04
Na300	15.94 ± 0.44	65.22 ± 2.08	107.24 ± 6.03	49.08 ± 1.92	0.46 ± 0.01
Na450	14.70 ± 0.76	74.37 ± 1.68	119.11 ± 5.11	42.34 ± 2.52	0.36 ± 0.00
方差分析(F 值) Analysis of variance(F values)					
NO_3^- -N(N)	440.33***	141.97***	47.95***	133.56***	236.85***
盐浓度 Salinity(S)	16.62**	159.14***	183.78***	122.90***	1227.09***
N × S	9.69***	26.62***	0.00 ^{NS}	0.00 ^{NS}	0.00 ^{NS}

注(Note):表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误差 All data are means of 3 replications ± SE (n = 3).

2.4 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗地上部有机 N 含量和 NR 活性的影响

低浓度的盐分对囊果碱蓬幼苗的地上部有机 N 的含量和 NR 活性影响不大,但高浓度盐分显著降低了有机 N 的含量和 NR 活性($F_S = 9.3$, $P < 0.001$; $F_S = 12.3$, $P < 0.001$)(图 3)。在 5 mmol/L N 水平

下 300 和 450 mmol/L NaCl 处理时,有机 N 的含量比 1 mmol/L NaCl 处理分别降低了 35.8% 和 45.6%; NR 活性则分别降低了 21.3% 和 31.1%。有机 N 的含量和 NR 活性随着 N 水平的增加而显著增加($F_N = 19.8$, $P < 0.001$; $F_N = 25.3$, $P < 0.001$),尤其是高盐浓度下。在 300 mmol/L NaCl 水平下,10 mmol/L N

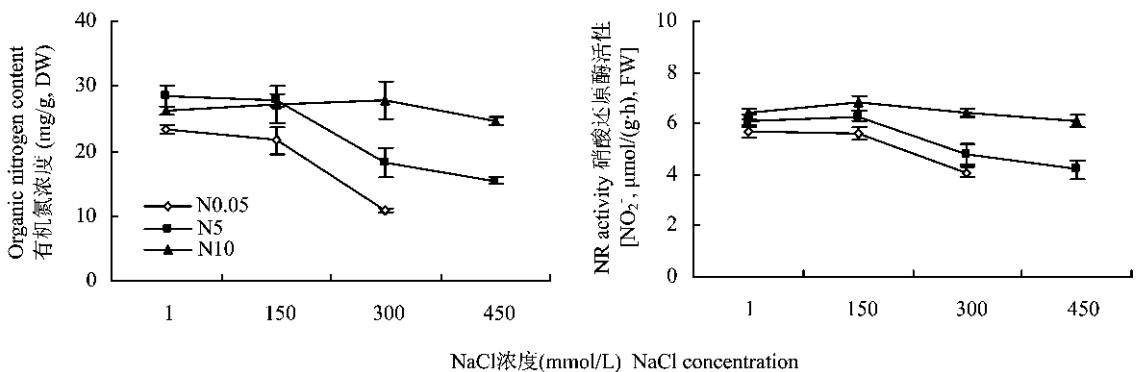


图 3 不同盐和氮水平对囊果碱蓬幼苗地上部有机氮和硝酸还原酶活性的影响

Fig.3 The effects of NaCl and nitrate on the organic nitrogen and NR activity in shoots of *Suaeda physophora* seedlings

处理,有机 N 的含量比 0.05 和 5 mmol/L N 处理分别增加了 156.0% 和 52.5%;NR 活性则分别增加了 56.1% 和 33.3%。盐和氮对地上部的有机 N 和 NR 活性均存在显著的交互作用($F_{S*N} = 6.2, P < 0.01$; $F_{S*N} = 8.3, P < 0.001$)。

2.5 囊果碱蓬幼苗的根系形态特征与地上部吸氮量、离子含量的关系

表 4 囊果碱蓬幼苗根系形态特征与地上部吸氮量、离子含量的相关性

Table 4 Correlation analyses between the ions, N accumulations of shoot and root morphologic characteristics of *Suaeda physophora* seedlings

项目 Items	有机氮 Organic N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺
初生根长 Primary root length	0.293	0.307	0.161	0.077	0.238
直径 Root diameter	0.161	0.189	0.086	0.007	0.158
比根长 Specific root length	-0.301	-0.372	-0.312	-0.212	-0.263
根长密度 Root length density	0.075	0.026	0.042	0.100	0.020
根冠比 Root/shoot	-0.162	-0.062	-0.246	-0.422*	-0.349
侧根长 Lateral root length	0.936**	0.937**	0.882**	0.751**	0.827**
表面积 Surface area	0.901**	0.917**	0.869**	0.726**	0.815**
总吸收面积 Absorbing area	0.875**	0.882**	0.811**	0.682**	0.736**
活跃吸收面积 Active absorbing area	0.829**	0.865**	0.796**	0.598**	0.638**
根干重 Root dry weight	0.907**	0.916**	0.824**	0.692**	0.779**

3 讨论

根系是吸收器官,也是直接感受环境变化的器官。根系的生长发育、形态变化与环境胁迫密切相关。以往的研究仅关注了盐、氮及其互作对植株地上部的影响^[4-7],而对根系的生长和形态变化的了解很少。本试验观察到高浓度的盐分明显促进了囊果碱蓬幼苗根系的生长和发育,使根系的干重、侧根长、表面积和总吸收面积等显著增加,这与盐分下甜土植物的根系反应不同,甜土植物的根系生长受到盐分的抑制^[12]或不敏感^[13]。囊果碱蓬是稀盐盐生植物,其生长发育需要一个适度的盐分环境,结果表明盐分不足(1 和 150 mmol/L NaCl)显著抑制其根系的生长。

施用一定数量的氮肥促进植物根系的生长,这在许多农作物的研究中得到证实^[14-16]。试验发现,N 营养不仅增加囊果碱蓬幼苗根系的生长,还表现出一定的剂量效应,即 0.05 和 5 mmol/L N 水平下根系的形态特征变化不大,但 10 mmol/L N 处理显著促进了根系的生长和发育,尤其是高盐浓度下的促进作用更为显著。说明囊果碱蓬是一种氮需求量较

植物的生长发育及其生理过程是相互关联,相互影响的。试验结果(表 4)表明,囊果碱蓬幼苗地上部的有机 N、NO₃⁻、Na⁺、Cl⁻、K⁺ 的含量与初生根长、直径、比根长、根长密度和根冠比的关系不密切,而与侧根长、表面积、总吸收面积、活跃吸收面积和根干重等形态特征均存在极显著的正相关,这种相关性反映了囊果碱蓬地上部的离子吸收、氮营养的累积与根系发育的相互响应程度。

高的盐生植物,而野外土壤环境中的低氮条件可能成为囊果碱蓬生长的限制因子。这与 Messedi 等^[17]认为盐生植物 *Sesuvium portulacastrum* 耐盐能力的限制因子是 N 而不是 K⁺ 和 Ca²⁺ 的研究结果类似。Okusanya 和 Ungar^[18]指出,盐分下增加营养显著促进盐植物的生长,对甜土植物影响较小的原因是盐生植物生长的主要限制因子是养分,对甜土植物而言是盐分。因此,高盐胁迫下施加氮对甜土植物的根系生长影响较小或降低根系的生长^[19-21]。

本试验结果还表明,盐、氮及互作对囊果碱蓬幼苗根系的初生根长、平均直径、比根长和根长密度均没有表现出较强的可塑性,这与盐生植物 *Plantago maritima* 的研究结果一致^[22]。说明初生根长和平均直径等形态指标对囊果碱蓬盐分下的吸氮能力的贡献不大,因而不建议作为氮营养提高盐生植物耐盐性的根系筛选指标。

根系形态的变化与植株地上部的离子吸收、氮营养的累积存在密切的关系。本试验结果表明,在 10 mmol/L N 水平下,植株体内 Na⁺ 的含量随 NaCl 浓度的增加而显著增加,而 NO₃⁻ 的含量维持不变。在盐植物的生长中 Na⁺ 不仅具有调节渗透压和影

响水势梯度形成的功能^[23],而且还能刺激植物 *Amaranthus tricolor* 对 NO_3^- 的吸收^[24]。因此,盐胁迫下囊果碱蓬 Na^+ 的增加对 NO_3^- 的吸收可能有刺激作用。另一方面,通过发育良好的根系形态来提高根系对氮的吸收和利用,从而促进了囊果碱蓬地上部硝酸还原酶的活性,增加了有机氮的合成和积累,改善了高盐胁迫下植株的养分平衡,更有利于 Na^+ 的吸收,提高幼苗的渗透调节能力。因此,盐胁迫下囊果碱蓬对离子的吸收和氮的累积是根系形态特征和生理特性共同影响的结果^[25]。同时,相关性分析结果进一步证实根系的生长发育对地上部的离子和营养积累有重要的调节作用。

高盐胁迫下囊果碱蓬地上部的需氮量增加,良好的根系形态发育增加了根系对养分的接触面积,为这种增加提供了保障。这种特征与非盐生植物存在差别,是囊果碱蓬高耐盐性的机理之一。

参考文献:

- [1] 刘莹,盖钧镒,吕慧能.作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展[J].植物遗传资源学报,2003,4(3):265-269.
Liu Y, Gai J Y, Lü H N. Advances of relationship between crop root morphology and tolerance to antibiotic stress[J]. J. Plant Genet. Resour., 2003, 4(3):265-269.
- [2] Lacan D, Durand M. Na^+ and K^+ transport in excised soybean roots [J]. Physiol. Plant., 1995, 99(1):132-138.
- [3] Smart R M, Barko J W. Nitrogen nutrition and salinity tolerance of *Distichlis spicata* and *Spartina alterniflora* [J]. Ecol., 1980, 60(3):630-638.
- [4] Skeffington M J S, Jeffrey D W. Response of *America maritime* (Mill.) Willd. and *Plantago maritima* L. from an Irish salt marsh to nitrogen and salinity [J]. New Phytol., 1988, 110(3):399-408.
- [5] 段德玉,刘小京,李存桢,乔海龙. N 素营养对 NaCl 胁迫下盐地碱蓬幼苗生长及渗透调节物质变化的影响 [J]. 草业学报, 2005, 14(1):63-68.
Duan D Y, Liu X J, Li C Z, Qiao H L. The effects of nitrogen on the growth and solutes of halophyte *Suaeda salsa* seedlings under the stress of NaCl [J]. Acta Pratacul. Sin., 2005, 14(1):63-68.
- [6] Naidoo G, Naidoo Y. Effects of salinity and nitrogen on growth, ion relations and proline accumulation in *Triglochin bulbosa* [J]. Wetlands Ecol. Manage., 2001, 9(6):491-497.
- [7] 沈振国,沈其荣,管红英,等. NaCl 胁迫下氮素营养与大麦幼苗生长和离子平衡的关系 [J]. 南京农业大学学报, 1994, 17(1):22-26.
Shen Z G, Shen Q R, Guan H Y et al. Relationship between nitrogen nutrition and growth of barley seedlings as well as ion balance under NaCl stressed [J]. J. Nanjing Agric. Univ., 1994, 17(1):22-26.
- [8] Schortemeyer M, Feil B, Stamp P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system [J]. Ann. Bot., 1993, 72(2):107-115.
- [9] Ewing T, Kaspar T. Rootedge. zip. ftp://ftp.nsl.gov/software/root-edge[J/OL].
- [10] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.58-59.
Gao J F. Experimental plant physiology guidance [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 58-59.
- [11] 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,2000.123-191.
Li H S. Principles and technology of plant physiological and biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 123-191.
- [12] Franssen B, Kroon H D, Berendse F. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability [J]. Oecol., 1998, 115(3):351-358.
- [13] Shraf M Y, Khtar K A, Sarwar G, Ashraf M. Role of the rooting system in salt tolerance potential of different guar accessions [J]. Agron. Sustain. Dev., 2005, 25:243-249.
- [14] Snapp S S, Shennan C. Effects of salinity on root growth and death dynamics of tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill. [J]. New Phytol., 1992, 121(1):71-79.
- [15] 王艳,米国华,陈范骏,张福锁.玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性 [J]. 生态学报, 2003, 23(2):297-302.
Wang Y, Mi G H, Chen F J, Zhang F S. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology [J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(2):297-302.
- [16] 王东升,张亚丽,陈石,等.不同氮效率水稻品种增硝营养下根系生长的响应特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4):585-590.
Wang D S, Zhang Y L, Chen S et al. Response of root growth of rice genotypes with different N use efficiency to enhanced nitrate nutrition [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4):585-590.
- [17] Messedi D, Labidi N, Grignon C, Abdelly C. Limits imposed by salt to the growth of the halophyte *Sesuvium portulacastrum* [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 200, 167(6):720-725.
- [18] Okusanya O T, Ungar I A. The growth and mineral composition of three species of *Spergularia* as affected by salinity and nutrients at high salinity [J]. Am. J. Bot., 1984, 71(3):439-447.
- [19] Lewis O A M, Leidi E O, Lips S H. Effect on nitrogen source on growth response to salinity stress in maize and wheat [J]. New Phytol., 1989, 111(2):155-160.
- [20] Papadopoulos I, Rendig V V. Interactive effects of salinity and nitrogen on growth and yield of tomato plants [J]. Plant Soil, 1983, 73(1):47-57.
- [21] Abdelgadir E M, Oka M, Fujiyama H. Nitrogen nutrition of rice plants under salinity [J]. Biol. Plant., 2005, 49(1):99-104.
- [22] Rubinigg M, Posthumus F, Ferschke M et al. Effect of NaCl salinity on ^{15}N -nitrate and specific root length in the halophyte *Plantago maritima* L. [J]. Plant Soil, 2003, 250(2):201-231.
- [23] Balnokin Yu V, Kotov A A, Myasocedov N A et al. Involvement of long-distance Na^+ transport in maintaining water potential gradient in the medium-root-leaf system of a halophyte *Suaeda altissima* [J]. Russ. J. Plant Physiol., 2005, 52(4):489-496.
- [24] Ohta D, Matoh T, Takahashi E. Sodium stimulates NO_3^- uptake in *Amaranthus tricolor* L. plants [J]. Plant Physiol., 1988, 87(1):223-225.
- [25] Lynch J P. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiol., 1995, 109:7-13.