

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.10.006

盐胁迫对芦笋幼苗生长和 体内 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 分布的影响^①

曹岩坡, 代 鹏, 戴素英

河北省农林科学院 经济作物研究所, 石家庄 050051

摘要: 以芦笋品种 NJ978 为试材, 研究了 NaCl 胁迫对芦笋幼苗生长及体内 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 吸收和分布的影响, 结果表明: 盐分对芦笋幼苗生长的抑制作用随 NaCl 浓度的增加而加剧, 低盐胁迫下 ($\text{NaCl} \leq 50 \text{ mmol/L}$), 芦笋生长与对照没有显著差异, 高盐胁迫 ($200 \sim 300 \text{ mmol/L NaCl}$) 显著抑制了幼苗生长. 随 NaCl 浓度的增加, 芦笋体内 Na^+ 含量增加, K^+ , Ca^{2+} 含量降低. 芦笋根系对 Na^+ 有一定的截留能力, 低盐环境下 ($\text{NaCl} \leq 100 \text{ mmol/L}$), 根部 Na^+ 迅速增加, 而地上部 Na^+ 增加缓慢, 从而抑制了 Na^+ 向地上部运输, 并维持了地上部相对稳定的 K^+ , Ca^{2+} 平衡; 外界 NaCl 浓度高于根系 Na^+ 截留阈值后 (100 mmol/L), 大量的 Na^+ 运输至地上部并限制了 K^+ , Ca^{2+} 的吸收, 表现为 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 迅速下降. 芦笋根系对 K^+ , Ca^{2+} , Na^+ 选择吸收性 ($\text{AS}_{\text{K}, \text{Na}}$, $\text{AS}_{\text{Ca}, \text{Na}}$) 随盐胁迫增加而变高; 根部向地上部运输 K^+ , Ca^{2+} 能力 ($\text{TS}_{\text{K}, \text{Na}}$, $\text{TS}_{\text{Ca}, \text{Na}}$) 在 $0 \sim 100 \text{ mmol/L NaCl}$ 水平下逐渐升高, 之后迅速下降. 以上结果表明: 根部对 Na^+ 的截留和 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 在器官水平上的再分布是芦笋适应盐胁迫的重要机制之一.

关键词: 芦笋; 盐胁迫; 生长; 离子分布

中图分类号: S644.6; Q948.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2014)10-0031-06

土壤盐渍化是制约植物生长的主要胁迫因素之一, 据统计, 我国各类盐碱土面积约 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 因此, 充分开发利用盐碱地是当前农业发展的重要课题^[1-2].

植物受到盐胁迫后主要表现为生长受阻, 其原因涉及渗透胁迫^[3]、离子毒害^[4]、体内电解质失衡^[5-6]、养分亏缺等多方面^[7]. 植物在低盐环境下从外界吸收并积累无机盐离子进行渗透调节, 从而增加细胞浓度, 降低细胞渗透势, 防止细胞脱水^[8-9]; 高盐胁迫下, 大量 Na^+ 涌入细胞内, 不仅破坏细胞中离子平衡状态, 而且影响无机盐离子在胞内的分布^[9-11]. 离子稳态的重建是植物对抗高盐逆境的一种重要机制, 参与离子跨膜运输的膜转运蛋白(如 $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ 、 $\text{Ca}^{2+} \text{-ATPase}$ 、跨膜蛋白、各种离子通道等)对盐胁迫下细胞的离子稳态的重建起着重要作用^[9, 12-14], 植物耐盐性与 Na^+ , K^+ 的选择吸收及交换密切相关, 盐胁迫下细胞质维持正常的离子含量和分布是植物生存的必要条件^[15].

芦笋(*Asparagus officinalis* L.)为百合科天门冬属多年生草本植物, 具有耐旱、耐盐碱等特点, 是重要的经济和药用植物. 目前, 国内外关于芦笋的研究主要集中在栽培技术、成分分析和组织培养等方面^[16-17], 有关其在盐胁迫下的代谢反应报道较少. 本研究通过盆栽试验, 在模拟盐分胁迫下, 研究芦笋生长及体内 Na^+ ,

① 收稿日期: 2013-10-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003074); 河北省科技支撑计划项目(13226904D)基金资助.

作者简介: 曹岩坡(1981-), 男, 河北石家庄人, 助理研究员, 主要从事蔬菜栽培生理方向研究.

通信作者: 戴素英, 研究员.

K⁺,Ca²⁺ 等离子分布,探讨盐分对芦笋生长的伤害机理,以期为充分开发芦笋资源提供依据.

1 材料和方法

1.1 材料培养

试验于 2011 年在河北省农林科学院经济作物研究所日光温室内进行,以芦笋品种 NJ978 为材料,2011 年 2 月,在日光温室中营养钵育苗,出苗后 60 d 将幼苗移栽至 40 cm×40 cm 花盆.

移栽 10 d 后,选取生长一致的幼苗进行盐处理,试验设 5 个盐分水平,分别为 50,100,150,200,300 mmol/L,以清水处理为对照.为避免盐冲击效应,NaCl 溶液采用每天递增 50 mmol/L 的方式逐渐提高浓度,经盐胁迫处理 20 d 时,进行采样测定各项指标.

1.2 测试指标及方法

1.2.1 植株生长量和含水量测定

将各处理植株各取 3 株用蒸馏水冲洗干净、吸干表面,将地上部和根分开,分别称量鲜质量(W_f)105 ℃ 杀青 10 min,之后 80 ℃ 烘干至恒质量,称干质量(W_d).

$$\text{含水量}(\%)=(W_f-W_d)/W_f\times 100\%$$

1.2.2 Na⁺,K⁺,Ca²⁺ 含量测定

离子提取参照王宝山等的方法进行^[18],将样品分为根、茎、叶三部分,烘干粉碎后过 40 目筛,称取 0.1 g,加入 20 mL 去离子水后沸水浴 2 h,冷却后 5000 r/min 离心 15 min,上清液定容 50 mL. K⁺,Na⁺,Ca²⁺ 含量用 GGX-600 型原子吸收分光光度计进行测定.

1.2.3 AS_{X,Na}和 TS_{X,Na} 计算

离子选择性吸收系数($AS_{X,Na}$)=整株{[X⁺]/[Na⁺]} / 介质{[X⁺]/[Na⁺]};

离子运输系数($TS_{X,Na}$)=库器官{[X⁺]/[Na⁺]} / 源器官{[X⁺]/[Na⁺]}.

1.3 数据处理

试验数据均采用 SAS 统计分析软件进行分析,Duncan's 多重比较法进行统计分析, $p<0.05$.

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对芦笋幼苗生长和含水量的影响

从植株形态上看,当 NaCl≤100 mmol/L 时,芦笋幼苗没有明显盐害症状,当 NaCl 浓度增至 200 mmol/L 时,幼苗顶端拟叶失绿发黄,当 NaCl 增至 300 mmol/L 时,幼苗顶端拟叶枯萎.由表 1 可见,NaCl 胁迫下,芦笋幼苗根部($r=-0.988$, $p<0.01$)和地上部($r=-0.985$, $p<0.01$)鲜质量与 NaCl 浓度呈负相关,且在 NaCl≥100 mmol/L 时与对照差异显著($p<0.05$);株高、根部干质量、地上部干质量在 NaCl≤100 mmol/L 时与对照无明显差异,随着盐浓度的增加,株高、根部干质量、地上部干质量均逐渐下降并与对照差异显著($p<0.05$).根部和地上部含水量随盐胁迫的增强而减少,地上部含水量在 NaCl≥200 mmol/L 时与对照差异显著($p<0.05$),而根部含水量在各处理中均未达到显著水平.

表 1 盐胁迫对芦笋幼苗生长的影响

NaCl 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	株高 /cm	鲜质量/g		干质量/g		含水量/%	
		根	地上部	根	地上部	根	地上部
0(CK)	56.0 a	26.6 a	37.5 a	5.5 a	5.1 a	79.32 a	86.40 a
50	54.5 a	26.1 a	35.1 a	5.4 a	4.9 a	79.31 a	86.04 a
100	52.4 a	23.8 b	30.4 b	5.0b	4.6 b	78.99 a	84.87 a
150	46.7 b	21.7 b	25.5 c	4.4 c	4.1 c	79.72 a	83.92 a
200	35.5 c	18.5 c	18.8 d	4.0 d	3.8 d	78.38 a	79.79 b
300	30.1 c	15.6 d	13.8 e	3.5 e	3.5 e	77.56 a	74.64 c

注: a, b, c 表示 $p<0.05$ 水平上差异显著.

2.2 NaCl 胁迫下芦笋幼苗 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 含量

2.2.1 Na^+

由图 1 可见, 芦笋幼苗体内 Na^+ 含量随着外界 NaCl 浓度的升高而增加, 低浓度 NaCl ($\leq 100 \text{ mmol/L}$) 处理下, 根系 Na^+ 含量增加幅度大于茎和拟叶, 100 mmol/L NaCl 处理下根、茎、拟叶中 Na^+ 含量分别较对照增加了 94.6% , 34.9% 和 13.1% ; 随着盐胁迫的增强, 茎、拟叶中 Na^+ 含量迅速升高, 而根中 Na^+ 含量增幅平缓, $100 \sim 150 \text{ mmol/L}$ NaCl 为芦笋幼苗地上部 Na^+ 由缓慢增加转变为迅速增加的节点。由此表明芦笋根系对 Na^+ 具有一定的截留能力, 低浓度盐胁迫下芦笋幼苗可以将 Na^+ 截留在根部, 抑制其向地上部运输, 从而减轻盐分对植株的伤害。

2.2.2 K^+ , Ca^{2+}

NaCl 胁迫下芦笋幼苗根、茎、拟叶中 K^+ 含量均低于对照, 并与盐浓度呈负相关(图 2), 根($r = -0.989$, $p < 0.01$)、茎($r = -0.952$, $p < 0.01$)、拟叶($r = -0.964$, $p < 0.01$), 根部 K^+ 含量在 $\text{NaCl} \geq 100 \text{ mmol/L}$ 时, 与对照相比差异显著($p < 0.05$), 而茎和拟叶中 K^+ 含量在 $\text{NaCl} \geq 150 \text{ mmol/L}$ 时与对照存在显著差异($p < 0.05$)。 Ca^{2+} 含量与 K^+ 含量变化趋势相似, 随盐胁迫的增强而下降, 除 $\text{NaCl} \leq 50 \text{ mmol/L}$ 时, 根、茎、拟叶中 Ca^{2+} 含量与对照没有显著性差异外, 其余各处理与对照相比差异性均达显著水平($p < 0.05$)。

随着土壤中 NaCl 浓度的增加, 芦笋幼苗根、茎、拟叶中 K^+ , Ca^{2+} 含量逐渐减少, 但在低盐环境中降幅不大, 能够保持相对稳定的离子平衡, 在高盐胁迫下, K^+ , Ca^{2+} 吸收和运输受到严重抑制, 从而影响植株正常生长。

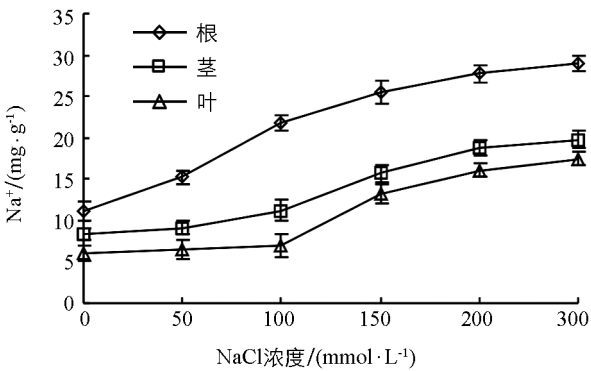


图 1 NaCl 胁迫对芦笋幼苗 Na^+ 含量的影响

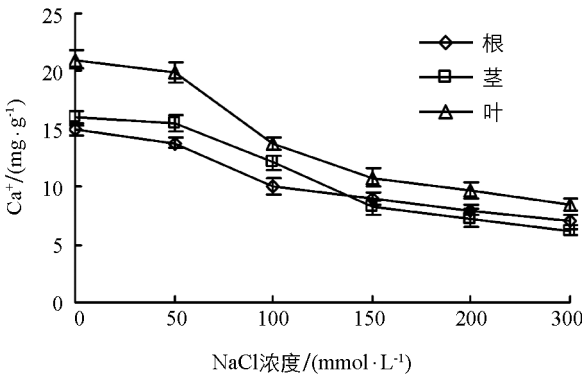
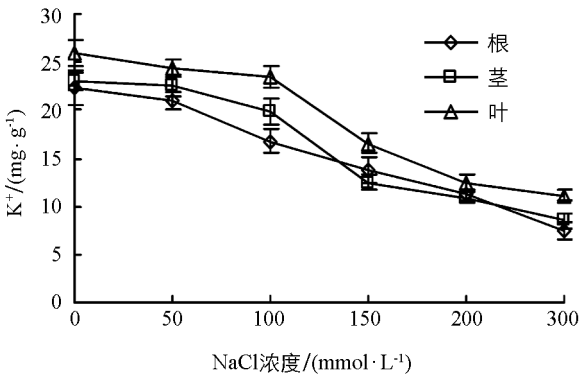


图 2 NaCl 胁迫对芦笋幼苗 K^+ , Ca^{2+} 含量的影响

2.3 NaCl 胁迫对芦笋幼苗 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 的影响

如图 3 所示, 芦笋幼苗根、茎、拟叶中 K^+/Na^+ 均与盐浓度呈负相关, 根($r = -0.907$, $p < 0.01$)、茎($r = -0.935$, $p < 0.01$)、拟叶($r = -0.931$, $p < 0.01$), 除茎部在 $\text{NaCl} \leq 50 \text{ mmol/L}$ 和拟叶在 $\text{NaCl} \leq 100 \text{ mmol/L}$ 与对照没有显著差异外, 其余各处理与对照相比均存在显著差异($p < 0.05$); $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 变化趋势同样与盐浓度呈负相关, 根($r = -0.868$, $p < 0.01$)、茎($r = -0.924$, $p < 0.01$)、拟叶($r = -0.922$, $p < 0.01$), 除茎部 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 在 50 mmol/L NaCl 处理与对照没有显著差异外, 其余各处理均与对照差异显著($p < 0.05$)。

2.4 NaCl 胁迫对芦笋幼苗 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 选择性吸收和运输的影响

表 2 所示, NaCl 胁迫下, 芦笋幼苗根系对 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 选择性吸收系数 $\text{AS}_{\text{K,Na}}$ 和 $\text{AS}_{\text{Ca,Na}}$ 均随盐胁迫

强度的增加呈逐渐上升的趋势;在低盐胁迫下, K^+ , Ca^{2+} 由根系向地上部运输系数 $TS_{K,Na}$ 和 $TS_{Ca,Na}$ 显著高于对照,而在高盐胁迫下则下降显著.

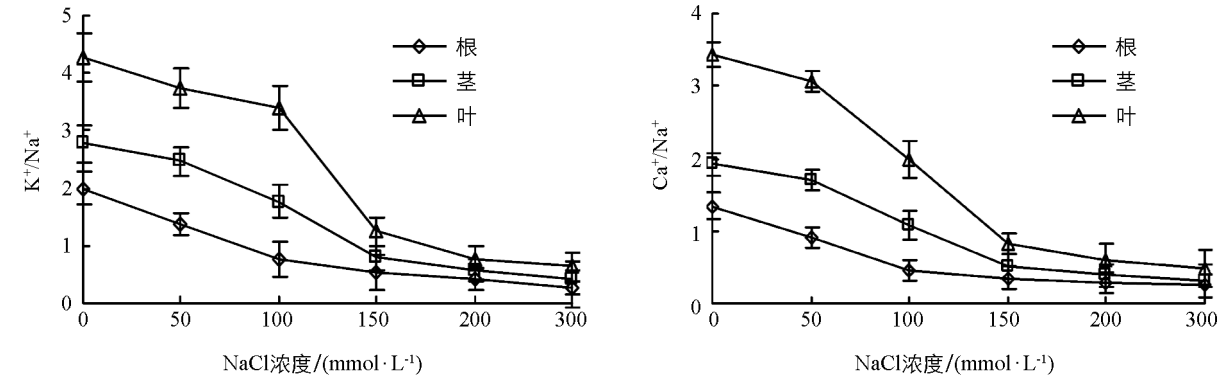


图 3 NaCl 胁迫对芦笋幼苗 K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ 的影响

表 2 NaCl 胁迫对芦笋幼苗离子吸收及运输的选择性 $S_{K,Na}$, $S_{Ca,Na}$ 的影响

NaCl 浓度 /(mmol · L ⁻¹)	选择性吸收系数		选择性运输系数	
	$AS_{K,Na}$	$AS_{Ca,Na}$	$TS_{K,Na}$	$TS_{Ca,Na}$
0	3.50 c	1.18 b	2.57 b	2.13 d
50	13.82 b	6.99 a	3.37 a	2.72 b
100	15.41 b	7.08 a	4.33 a	4.16 a
150	16.12 b	8.15 a	2.32 b	2.33 c
200	16.12 b	8.89 a	2.09 c	1.93 d
300	20.69 a	9.17 a	1.99 c	2.45c

注: a, b, c 表示 $p<0.05$ 水平上差异显著.

3 讨 论

盐胁迫在离子毒害、渗透胁迫、养分亏缺等多方面对植物造成伤害,从而损害细胞正常代谢,最终导致植物生长发育受阻,甚至死亡^[2]. 生物量下降是植物在盐胁迫下最直观的表现^[19-20], 本研究中随着盐浓度的增加,芦笋生长量逐渐减少,株高下降,鲜质量、干质量降低,同时发现盐胁迫对芦笋地上部分生长的抑制作用大于根系,这与朱义在高羊茅上的研究结果相一致^[9]

盐胁迫下,土壤中过量的 Na^+ 影响了植物对 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等离子体的吸收、运输和分配,假盐生植物一般通过拒盐的方式提高其在盐碱环境下的适应性^[20], 孙景波等认为桑树耐盐品种通过根系对 Na^+ 的截留作用限制 Na^+ 向地上部的运输^[21]. 本研究中,盐胁迫导致了芦笋幼苗体内 Na^+ 的积累,在低盐环境中,根部 Na^+ 含量迅速增加,而地上部 Na^+ 积累的幅度不大,说明芦笋根系对 Na^+ 的截留作用限制了 Na^+ 向地上部的运输,从而避免地上部积累大量 Na^+ 造成离子毒害.

盐胁迫下 Na^+ 和 K^+ , Ca^{2+} 之间的竞争造成了植物体内 K^+ , Ca^{2+} 含量的下降,这在本研究中也得到了验证,芦笋幼苗根、茎、拟叶中 K^+ , Ca^{2+} 含量均随 NaCl 浓度的增加而下降. 在低浓度盐胁迫下,茎和拟叶中 K^+ , Ca^{2+} 含量降低较少,表明芦笋在低盐环境中具有一定的适应性. Ca^{2+} 对于保持植物细胞膜的完整性和稳定性具有重要作用^[22], Mittler R 等证实细胞中 Ca^{2+} 与 ABA, ROS 等一起参与植物抗逆性的信号传递和表达^[23], Knight H 等也证实了植物内源 Ca^{2+} 与耐盐性有重要关联,在盐胁迫下,细胞质膜上 Ca^{2+} 可能被 Na^+ 所取代,降低了细胞膜的选择性和稳定性,从而导致盐离子的大量进入和营养物质的外泄^[24].

离子选择性吸收系数和运输系数能够反映植物体对离子吸收以及向地上部分运输的选择性^[21, 25], 本研究

发现, 随着外界盐浓度的增加, 芦笋体内 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 逐渐降低, 这是由于 Na^+ 的增加和 K^+ , Ca^{2+} 的降低两方面原因造成. 芦笋根部对 K^+ , Ca^{2+} 的吸收能力随外界盐浓度的增加而增加; 而 K^+ , Ca^{2+} 向地上部的运输能力在低浓度盐胁迫下 ($\leq 100 \text{ mmol/L NaCl}$) 较对照迅速升高, 但随着外界盐浓度的增加, 在高盐胁迫下 $\text{TS}_{\text{K,Na}}$ 和 $\text{TS}_{\text{Ca,Na}}$ 又显著降低, 这可能是由于随着外界环境中盐分离子的增多, 大量的 Na^+ 进入植物体内引起离子毒害效应, 而且细胞对离子的选择吸收和运输的能耗大大增加, 导致体内代谢紊乱.

参考文献:

- [1] 王遵亲, 祝寿泉, 愈仁培. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 郑青松, 刘玲, 刘友良, 等. 盐分和水份胁迫对芦荟幼苗渗透调节和渗透物质积累的影响 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(6): 585—588.
- [4] 杨春武, 李长有, 张美丽, 等. 盐、碱胁迫下小冰麦体内的 pH 及离子平衡 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1000—1005.
- [5] MUNNS R. Comparative Physiology of Salt and Water Stress [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 239—250.
- [6] YEO A. Molecular Biology of Salt Tolerance in the Context of Whole-Plant Physiology [J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(323): 915—929.
- [7] CARET C T, GRIEVE C M. Mineral Nutrition, Growth and Germination of *Antirrhinum majus* L. (Snapdragon) when Produced Under Increasingly Saline Conditions [J]. HortScience, 2008, 43(3): 710—718.
- [8] 杨少辉, 季静, 王昱. 盐胁迫对植物的影响及植物的抗盐机理 [J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(4): 70—76.
- [9] 朱义, 谭贵娥, 何池全, 等. 盐胁迫对高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 幼苗生长和离子分布的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5447—5454.
- [10] RAMOLIYA P J, PATEL H M, PANDEY A N. Effect of Salinization of Soil on Growth and Macro and Micro-Nutrient Accumulation in Seedlings of *Salvadora persica* (Salvadoraceae) [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 202(1—3): 181—193.
- [11] NIU X, BRESSAN R A, HASEGAWA P M, et al. Ion Homeostasis in NaCl Stress Environments [J]. Plant Physiology, 1995, 109(3): 735—742.
- [12] ZHU J K. Regulation of Ion Homeostasis Under Salt Stress [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(5): 441—445.
- [13] 王景艳, 张高华, 苏乔, 等. 植物跨膜离子转运蛋白与其耐盐性关系研究进展 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 635—640.
- [14] SERRANO R, RODRIGUEZ-NAVARRO A. Ion Homeostasis During Salt Stress in Plants [J]. Current Opinion in Cell Biology, 2001, 13(4): 399—404.
- [15] 宁建凤, 郑青松, 杨少海, 等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325—330.
- [16] 乜兰春, 李保会, 黄瑞虹. 中国绿芦笋栽培研究进展 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 204—208.
- [17] 鞠玉栋. 芦笋的化学成分及其药理作用 [J]. 中国园艺文摘, 2011(2): 125—126.
- [18] 王宝山, 赵可夫. 小麦叶片中 Na、K 提取方法的比较 [J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(1): 50—52.
- [19] 程玉静, 郭世荣, 张润花, 等. 外源硝酸钙对黄瓜幼苗盐胁迫伤害的缓解作用 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(9): 1853—1859.
- [20] 谢英赞, 何平, 王朝英, 等. 外源 Ca^{2+} , SA, NO 对盐胁迫下决明幼苗生理特性的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(3): 36—43.
- [21] 孙景波, 孙广玉, 刘晓东, 等. 盐胁迫对桑树幼苗生长、叶片水分状况和离子分布的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 543—548.
- [22] 吕芝香, 王正刚. 盐胁迫下 Ca^{2+} 对小麦根无机离子分布和膜脂脂肪酸的影响 [J]. 植物生理学报, 1993, 19(4): 325—332.

- [23] MITTLER R. Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance [J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(9): 405—410.
- [24] KNIGHT H, KNIGHT M R. Abiotic Stress Signalling Pathways: Specificity and Cross-Talk [J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(6): 262—267.
- [25] 郭春晓, 王文莉, 郑成淑, 等. 盐胁迫下外源 SA 对菊花体内离子含量和净光合速率的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(15): 3185—3192.

Effects of Salt Stress on the Growth of *Asparagus officinalis* L. Seedlings and on Na^+ , K^+ and Ca^{2+} Distribution in Them

CAO Yan-po, DAI Peng, DAI Su-ying

Institute of Cash Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China

Abstract: *Asparagus officinalis* L. cultivar NJ978 was used to study the growing rate, salt ion content and mineral ion uptake and distribution in the plant under salt stress. The results showed that there was a negative relationship between seedling growth and salt concentration. Seedlings growth was not significantly inhibited under low salt stress ($\text{NaCl} \leq 50 \text{ mmol/L}$), but high concentrations of NaCl (200—300 mmol/L) had a detrimental effect on the growth of *A. officinalis*. Na^+ content increased and K^+ and Ca^{2+} content decreased in *A. officinalis* roots, stems and leaves with increasing NaCl concentration. Under low salt stress, the seedlings of *A. officinalis* could inhibit Na^+ from transporting to the aerial part of the plant by withholding Na^+ in the root, thus maintaining a relative balance of ions in the aerial part. Under high salt stress ($\text{NaCl} > 100 \text{ mmol/L}$), the aerial part of seedlings accumulated superabundance of Na^+ , the uptake of K^+ and Ca^{2+} was limited, the seedlings were damaged heavily, as was manifested as a rapid decrease in K^+/Na^+ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in the plant. The selective absorption of K^+ , Ca^{2+} and Na^+ (ASK, Na and ASCa, Na) was significantly increased with increasing salinity, and the selective transportation of K^+ and Ca^{2+} (TSK, Na and TSCa, Na) increased at first and then decreased with increasing salinity. The impediment by the root of the upward transport of Na^+ and the redistribution of ions in the root, the stem and the leaves could be an important mechanism for salt tolerance of *A. officinalis*.

Key words: *Asparagus officinalis* L. ; salt stress; growth; ion distribution

责任编辑 欧 宾

