

文章编号:1001-1498(2016)01-0140-07

## NaCl胁迫下沙枣幼苗的离子代谢特性

杨升<sup>1,2</sup>, 张华新<sup>1\*</sup>, 刘涛<sup>1</sup>, 武海雯<sup>1</sup>, 杨秀艳<sup>1</sup>, 倪建伟<sup>1</sup>, 陈秋夏<sup>2</sup>

(1. 国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091; 2. 浙江省亚热带作物研究所, 浙江温州 325005)

关键词: 沙枣; NaCl胁迫; 离子代谢; 种源

中图分类号: S793.9

文献标识码: A

### Study on Ion Metabolism Characteristics of *Elaeagnus angustifolia* Seedlings under NaCl Stress

YANG Sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua-xin<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, WU Hai-wen<sup>1</sup>, YANG Xiu-yan<sup>1</sup>, NI Jian-wei<sup>1</sup>, CHEN Qiu-xia<sup>2</sup>

(1. Research Center of Saline and Alkali Land of State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Zhejiang Institute of Subtropical Crops, Wenzhou 325005, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] To further understand the ion metabolism characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. under NaCl stress. [Method] The seedlings of two *E. angustifolia* L. provenances, which were Alaer (salt tolerance provenance) and Yinchuan (salt sensitive provenance), were treated by three NaCl concentrations (0, 150, 300 mmol · L<sup>-1</sup>) and sampled at the 7th day and the 30th day to measure the Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and Mg<sup>2+</sup> contents, K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio and selective absorption and transportation of K<sup>+</sup> in tissues (roots, stems and leaves). [Result] The results showed that the Na<sup>+</sup> content in the organizations of *E. angustifolia* L. sharply increased with the increase of NaCl concentration. With prolonging of stress time, the Na<sup>+</sup> content increased in roots, and decreased in stems and leaves. After seedlings of the two provenances were treated with 150 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl for 7 days, the Na<sup>+</sup> content was 2.10 times and 2.23 times in leaves, respectively, compared with the control groups, and was 1.79 times and 1.57 times in root. Meanwhile, the difference between two provenances showed an expanding trend with the increase of NaCl concentration and stress time. With the increase of NaCl concentration and extension of stress time, the K<sup>+</sup> content, Ca<sup>2+</sup> content and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio in organizations decreased gradually. Meanwhile, the Alaer provenance seedlings accumulated more Na<sup>+</sup> in roots and less Na<sup>+</sup> in leaves than that of Yinchuan provenance, and the K<sup>+</sup> content, Ca<sup>2+</sup> content and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio decreased less in the Alaer provenance seedlings than those of Yinchuan provenance. With the increase of NaCl concentration, the Mg<sup>2+</sup> content in leaf gradually decreased, but the Mg<sup>2+</sup> content in root increased 22.8 ~ 64.4% after salt stress for 7 days, and Alaer provenance seedlings increased more than Yinchuan provenance. After 30 days, there was non-significant difference with the control group on the Mg<sup>2+</sup> content of root. K<sup>+</sup> selective absorption of *E. angustifolia* L. seedlings significantly increased with increasing salt concentration of the media at the 7th days, whereas not obvious at the 30th days. When the concentration of NaCl in the media increased, the change of K<sup>+</sup> selective transportation was not significant. [Conclusion] *E. angustifolia* L. seedlings increase Mg<sup>2+</sup> content and K<sup>+</sup> selective absorption in the roots at the early stage of salt stress to adapt sa-

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“重要耐盐碱树种多层次遗传改良与种质创新”(CAFYBB2012009)

作者简介: 杨升(1983—),男,湖南湘潭人,助理研究员,主要从事耐盐碱植物选育和生理生化研究. E-mail: yangsheng0072001@sina.com

\* 通讯作者: zhanghx@caf.ac.cn

line environment. The salt-tolerance *E. angustifolia* L. provenance can cut off more  $\text{Na}^+$  in roots and reduce  $\text{Na}^+$  content in leaves, which cause less  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  contents loss, especially the roots and leaves, so as to ensure that all kinds of metabolisms can go well.

**Key words:** *Elaeagnus angustifolia*; NaCl stress; ion metabolism; provenance

沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 是胡颓子科 (Elaeagnaceae) 胡颓子属 (*Elaeagnus* Linn.) 的落叶小乔木, 主要分布于我国西北五省, 在新疆塔里木河、玛纳斯河、甘肃疏勒河、内蒙古的额济纳河两岸有天然的沙枣林分布, 在北京、天津和山东等地也开展了引种栽培<sup>[1-2]</sup>。沙枣的果实、叶片、花和种子等在食品加工、药物提炼和饲用开发等领域具有较高的价值, 沙枣木材也是高级家具和工艺品制作的良材<sup>[1]</sup>; 同时, 沙枣具有耐旱、耐盐碱和抗风沙的特性, 并且沙枣根系上有固氮根瘤菌, 能提高土壤肥力, 改善土壤环境, 因此, 沙枣已经被列为半干旱地区和盐土地防护林带的重要树种<sup>[3]</sup>。

在 NaCl 胁迫环境下,  $\text{Na}^+$  是造成植物伤害的主要因子, 其含量增加会使植物水分和养分吸收困难, 干扰质膜转运蛋白正常运转, 引起植物生理代谢混乱, 进而使  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等矿质离子含量减少, 造成植物生长受到抑制<sup>[4]</sup>。近年来, 已有学者研究了在盐胁迫环境条件下沙枣的离子代谢特性, 赵可夫等<sup>[5]</sup>、张宝泽等<sup>[6]</sup> 对新疆沙枣幼苗研究发现, 随着 NaCl 浓度的升高, 沙枣叶片中的  $\text{Na}^+$  含量增加, 而  $\text{K}^+$  含量减少; 马正龙等<sup>[7]</sup> 研究发现, 高盐土壤中沙枣叶片、根部和幼果中的  $\text{Na}^+$  含量均增加, 而  $\text{K}^+$  含量在幼果中增加, 在叶片中减少; 刘宝玉<sup>[8]</sup>、刘正祥等<sup>[9]</sup> 研究显示, 盐胁迫增加了根、茎和叶中  $\text{Na}^+$  的积累, 减少了  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的含量; 但公勤等<sup>[10]</sup> 研究报告, 随 NaCl 浓度的增加, 根、茎和叶中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的含量变化不明显。早期研究结果显示, 沙枣幼苗在 NaCl 胁迫下, 根中  $\text{Na}^+$  含量显著增加, 而茎和叶片在低 NaCl 浓度下变化不大; 在高 NaCl 浓度下, 茎中  $\text{K}^+$  含量变化不明显, 根和叶中的  $\text{K}^+$  含量显著增加, 而茎中  $\text{Ca}^{2+}$  含量逐渐减少, 根和叶中的  $\text{Ca}^{2+}$  含量变化不明显<sup>[3,11]</sup>。造成这些研究结果差异的原因很多, 通过比较发现, 这些研究主要存在三方面的不同, 包括 NaCl 处理浓度、材料来源 (种源) 和处理时间。因此, 本文选取阿拉尔 (耐盐型种源) 和银川 (盐敏感型种源) 2 个沙枣种源实生苗为材料, 研究了不同 NaCl 浓度、不同胁迫时间下幼苗各组织器官 (根、茎和叶) 中矿质离子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、

$\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ) 的含量变化规律及  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  平衡状态和  $\text{K}^+$  的选择性吸收与运输, 以期进一步了解沙枣在 NaCl 胁迫下的离子代谢特性, 从而更好的了解沙枣耐盐生理机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用新疆阿拉尔和宁夏银川健康沙枣种子, 进行沙藏处理。次年 3 月, 将种子置于温室内, 用塑料膜遮盖。当种子萌芽率达到 70% 以上, 进行播种育苗。将种子播种于 30 cm × 30 cm 的塑料花盆中, 培养基质为蛭石和珍珠岩 (体积比 1:1), 每盆播种 2 粒, 每个种源 120 盆。育苗期间, 进行常规的病虫害防治, 并定期浇施霍格兰营养液, 保证沙枣幼苗生长发育所需营养。

### 1.2 试验设计

本试验于中国林业科学研究院日光温室中进行, 选择长势相对一致的沙枣幼苗各 90 盆进行试验。采用完全随机区组设计, 设 3 个盐分梯度 (NaCl 浓度/(mmol · L<sup>-1</sup>)): 0 (对照)、150、300 mmol · L<sup>-1</sup>。每个梯度下种植 10 盆, 3 次重复。采用相应浓度的盐溶液进行一次性施盐处理, 盐溶液为相应质量的 NaCl 溶入霍格兰 (Hoagland) 营养液中配制而成, 每盆施盐溶液 2.5 L, 约有 1/3 的溶液从盆底漏出。在施盐后的第 7 天和第 30 天取样, 每个种源每个 NaCl 浓度各处理时间下采集 5 株。将采集的材料擦拭干净和洗干净后, 用滤纸吸干表层水, 然后, 在 105℃ 下杀青 30 min, 之后在 80℃ 烘干至恒质量, 测定矿质元素含量, 各测定指标均 3 次重复; 同时, 根据称重法, 浇不含 NaCl 的霍格兰 (Hoagland) 营养液, 每 15 d 浇 1 次, 以保证营养和水分的供应。

### 1.3 试验方法

矿质元素含量采用消煮法, 用原子吸收分光光度计测定 Na、K、Ca 和 Mg 元素含量。

离子选择性吸收/运输能力参照杨帆等<sup>[12]</sup> 和宁建凤等<sup>[13]</sup> 的方法, 根据下列公式计算不同种源沙枣幼苗的  $\text{K}^+$  选择性吸收系数 (ASK, Na) 和选择性运输系数 (TSK, Na)。

$$\text{ASK, Na (土壤} \rightarrow \text{根系)} = \frac{\text{根系}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])}{\text{介质}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])} \quad (1)$$

$$\text{TSK, Na (根系} \rightarrow \text{茎叶)} = \frac{\text{茎叶}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])}{\text{根系}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])} \quad (2)$$

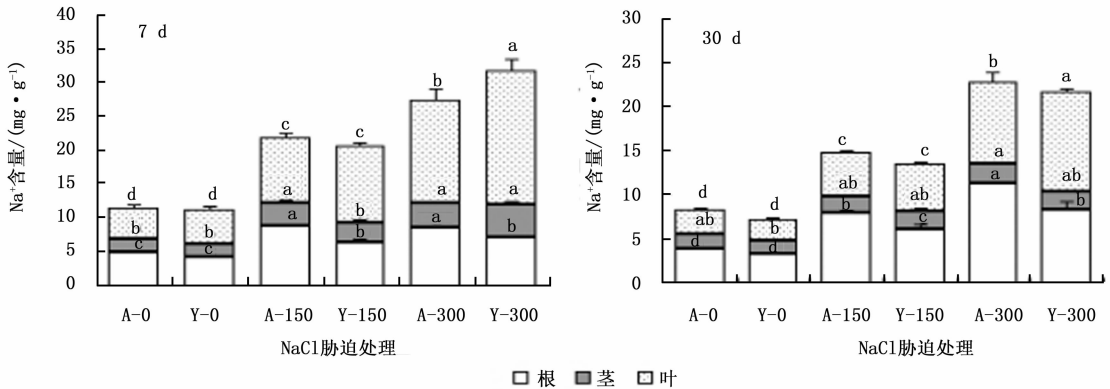
#### 1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2003 软件对所有数据进行整理和作图,并运用 SPSS16.0 数理统计软件对数据进行方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(LSD法,  $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaCl 胁迫对不同种源沙枣幼苗 $\text{Na}^+$ 含量的影响

由图1可看出:在 NaCl 胁迫下,随着 NaCl 浓度的增加,沙枣幼苗根、叶片和整株的  $\text{Na}^+$  含量均显著



图中 A-0、A-150、A-300 和 Y-0、Y-150、Y-300 分别表示阿拉尔种源和银川种源在 0、150 和 300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下的处理,误差棒为平均值的标准误 ( $n=3$ );不同小写字母表示元素含量在同一时间某一组织(根、茎或叶)各个盐胁迫处理间差异显著 ( $P < 0.05$ );下同。

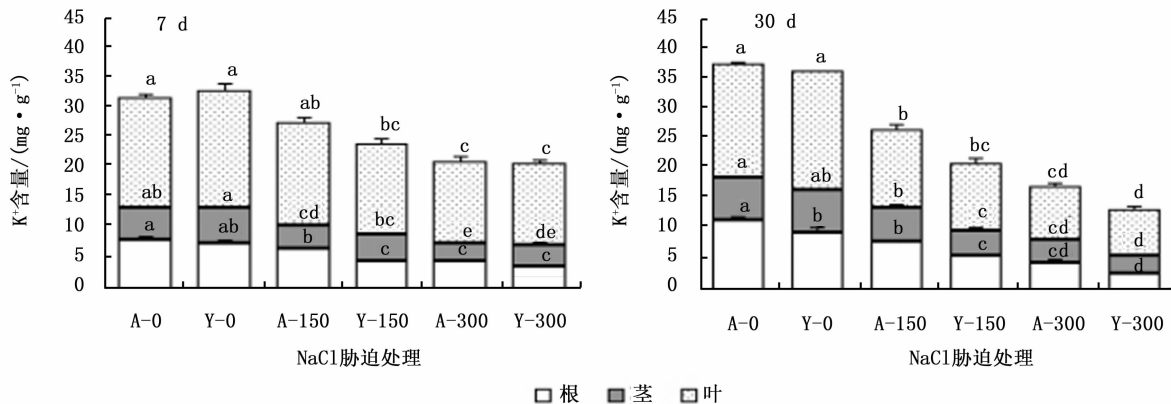
图1 不同 NaCl 浓度和胁迫时间对 2 个种源沙枣幼苗  $\text{Na}^+$  含量的影响

### 2.2 NaCl 胁迫对不同种源沙枣幼苗 $\text{K}^+$ 含量的影响

随着 NaCl 浓度的增加,沙枣各组织中的  $\text{K}^+$  含量呈逐渐下降趋势,且叶和根的下跌幅度大于茎(图2)。当 NaCl 胁迫 7 d 时,在 NaCl 浓度 150  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  下,阿拉尔种源沙枣幼苗叶中  $\text{K}^+$  含量与对照间差异不明显,而银川种源显著下降,下降了 22.88%;与对照相比,在 NaCl 浓度 150、300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  胁迫下,阿拉尔种源沙枣幼苗根中的  $\text{K}^+$  含量分别下降了 20.75% 和 46.29%,而银川种源分别下降了 41.85% 和 52.79%。当 NaCl 胁迫 30 d 时,随着 NaCl 浓度的增加,沙枣幼苗根、茎和叶中的  $\text{K}^+$  含量均表现出阿拉尔种源的下跌幅度小于银川种源的(图2)。另外,从胁迫 7 d 到 30 d,在对照组中,阿拉

增加,而茎中增加相对较少;在 150、300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫 7 d 时,阿拉尔种源沙枣幼苗叶中的  $\text{Na}^+$  含量分别为对照的 2.10、3.35 倍,而银川种源分别为 2.23、3.91 倍。在根中,阿拉尔种源沙枣幼苗的  $\text{Na}^+$  含量均为对照的 1.79 倍,而银川种源分别为 1.57、1.76 倍。由此发现,随 NaCl 浓度的增加,阿拉尔种源沙枣幼苗叶中  $\text{Na}^+$  含量的增幅小于银川种源,而根中  $\text{Na}^+$  含量的增幅则大于银川种源。在 NaCl 胁迫 30 d 时,与对照相比,茎中  $\text{Na}^+$  含量的变化不明显,而叶和根中,  $\text{Na}^+$  含量的增幅均大于胁迫 7 d 时的增幅,且 2 个种源间的差异呈现增大的趋势。这表明,在 NaCl 胁迫下,阿拉尔种源沙枣幼苗比银川种源能更有效的把  $\text{Na}^+$  阻隔在根内,减少叶中  $\text{Na}^+$  的含量,且茎主要作为  $\text{Na}^+$  的运输通道,而不是储存器官。

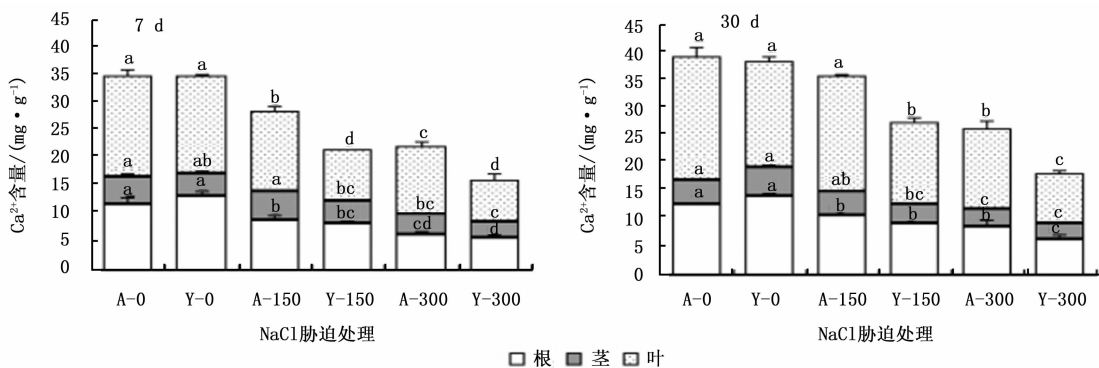
尔和银川种源根中的  $\text{K}^+$  含量分别从 7.96、7.40  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加到 11.47、9.50  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;在 150  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下,阿拉尔种源沙枣幼苗根中的  $\text{K}^+$  含量增加了 1.52  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,银川种源沙枣幼苗根中的  $\text{K}^+$  含量增加了 1.17  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;在 300  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下,阿拉尔种源沙枣幼苗根中的  $\text{K}^+$  含量几乎没增加,银川种源沙枣幼苗根中的  $\text{K}^+$  含量略有减少。茎中  $\text{K}^+$  含量情况与根类似。在叶中,对照组在 2 个时间点间  $\text{K}^+$  含量无明显增加,但在 NaCl 胁迫下,  $\text{K}^+$  含量显著减少,且阿拉尔种源的下跌幅度比银川种源的小。因此,可以推测,NaCl 胁迫不仅可以造成沙枣幼苗  $\text{K}^+$  流失,还影响根系对  $\text{K}^+$  的吸收,并且阿拉尔种源沙枣幼苗能够更好的保留  $\text{K}^+$ 。

图2 不同NaCl浓度和胁迫时间对2个种源沙枣幼苗K<sup>+</sup>含量的影响

### 2.3 NaCl胁迫对不同种源沙枣幼苗Ca<sup>2+</sup>含量的影响

由图3可知:随NaCl浓度的增加,沙枣幼苗的Ca<sup>2+</sup>含量逐渐减少,且阿拉尔种源的下降幅度小于银川种源。在NaCl处理7 d时,与对照相比,除茎在150 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下无明显减少外,各组织中的Ca<sup>2+</sup>含量均显著减少,其中,在300 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下,阿拉尔种源沙枣幼苗根、茎和叶中的Ca<sup>2+</sup>含量分别减少了47.12%、21.93%和33.83%,而银川种源分别减少了56.64%、28.98%和56.71%(图

3)。当150 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl胁迫30 d,阿拉尔种源茎和叶中的Ca<sup>2+</sup>含量均与对照无明显差异,而银川种源随NaCl浓度的增加显著降低;在300 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl胁迫下,与对照相比,阿拉尔种源各组织中Ca<sup>2+</sup>含量下降幅度为27.50%~35.27%,而银川种源的下降幅度为44.19%~55.13%(图3)。由此说明,在盐胁迫下,阿拉尔种源可以更好的阻止各组织中的Ca<sup>2+</sup>流失。由图3还发现:Ca<sup>2+</sup>在各组织中的含量有所不同,在各处理水平,叶中的Ca<sup>2+</sup>含量最高,其次是根,而茎中的Ca<sup>2+</sup>含量最少。

图3 不同NaCl浓度和胁迫时间对2个种源沙枣幼苗Ca<sup>2+</sup>含量的影响

### 2.4 NaCl胁迫对不同种源沙枣幼苗Mg<sup>2+</sup>含量的影响

由图4可知:在NaCl胁迫7 d时,随NaCl浓度的升高,沙枣幼苗根系中的Mg<sup>2+</sup>含量逐渐增加,而叶中的Mg<sup>2+</sup>含量则逐渐减少,茎中Mg<sup>2+</sup>含量在各处理间差异不显著;与对照相比,在150、300 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下,阿拉尔种源沙枣幼苗根中的Mg<sup>2+</sup>含量分别增加37.88%和64.40%,而银川种源沙枣幼苗根中的Mg<sup>2+</sup>含量分别增加22.80%和34.47%,且阿拉尔种源沙枣幼苗根中的Mg<sup>2+</sup>含量

比银川种源的高。在NaCl胁迫的第30天,在300 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下,与对照相比,沙枣叶片中的Mg<sup>2+</sup>含量显著减少;在对照和150 mmol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下,阿拉尔种源叶中的Mg<sup>2+</sup>含量显著高于银川种源的,而在茎中的差异不显著( $P < 0.05$ )。

### 2.5 NaCl胁迫对不同种源沙枣幼苗各组织K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值的影响

由表1可知:随着NaCl浓度的升高,沙枣幼苗各组织中的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值呈逐渐下降的趋势,且与对照间差异显著( $P < 0.05$ )。随着处理时间的延

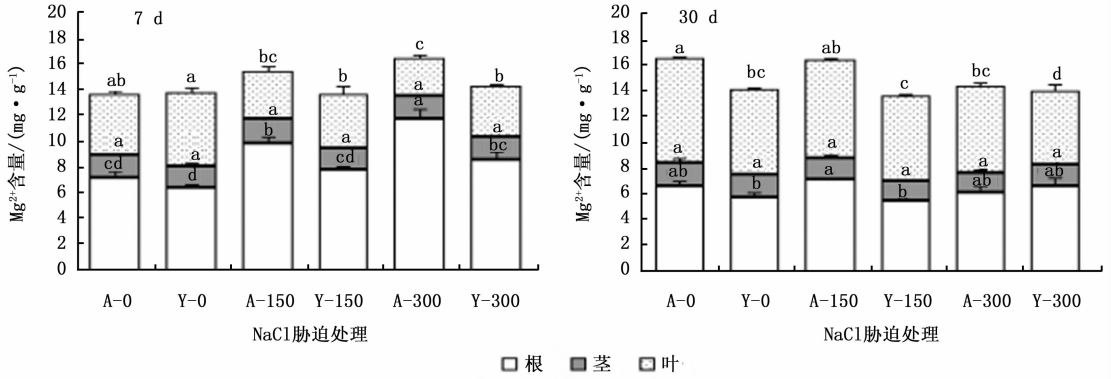


图4 不同NaCl浓度和胁迫时间对2个种源沙枣幼苗Mg<sup>2+</sup>含量的影响

长,对照沙枣各组织的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值呈急剧上升趋势,且叶中的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值最高,其次为茎,根最小;但在NaCl胁迫下,除根中K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值略微下降外,茎和叶中均呈上升趋势;在300 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl胁迫下,K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值的增幅较小,而且仅阿拉尔种源在胁迫7 d时,叶中K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值大于茎,其他均表现为茎中K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值大于叶,根仍然最小;同时,根和叶作为主要的生长活跃点,其K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值在阿拉尔种源中的下降幅度小于银川种源。与对照

相比,在150 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl胁迫7 d时,阿拉尔种源沙枣幼苗根和叶中的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值分别下降了55.69%和56.72%,而银川种源沙枣幼苗根和叶中的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值分别下降了63.04%和65.35%;当胁迫30 d时,阿拉尔种源沙枣幼苗根和叶中的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值分别下降了67.97%和61.69%,银川种源则分别下降了69.42%和76.34%。由此可以推断,阿拉尔种源沙枣幼苗能更好的维持体内K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>平衡。

表1 不同NaCl浓度和胁迫时间对2个沙枣种源K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值的影响

种源	NaCl 浓度/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	胁迫7 d时各组织中K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> 比值			胁迫30 d时各组织中K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> 比值		
		根	茎	叶	根	茎	叶
阿拉尔	0	1.67 ± 0.13a	2.52 ± 0.36a	4.09 ± 0.56a	3.06 ± 0.35a	4.03 ± 0.49ab	6.97 ± 0.51b
	150	0.74 ± 0.09b	1.11 ± 0.15bc	1.77 ± 0.11b	0.98 ± 0.06b	3.20 ± 0.44bc	2.67 ± 0.47c
	300	0.50 ± 0.02b	0.84 ± 0.07c	0.91 ± 0.13cd	0.41 ± 0.09b	1.64 ± 0.07d	0.95 ± 0.09d
银川	0	1.84 ± 0.19a	2.66 ± 0.18a	3.81 ± 0.11a	2.91 ± 0.44a	4.59 ± 0.21a	8.75 ± 0.69a
	150	0.68 ± 0.10b	1.66 ± 0.21b	1.32 ± 0.08c	0.89 ± 0.03b	2.35 ± 0.72cd	2.07 ± 0.13c
	300	0.49 ± 0.04b	0.78 ± 0.15c	0.69 ± 0.07d	0.36 ± 0.03b	1.45 ± 0.05d	0.69 ± 0.11d

注:同一列不同小写字母表示K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值差异显著(P<0.05)。

## 2.6 NaCl胁迫对不同种源沙枣幼苗K<sup>+</sup>选择性吸收和运输的影响

从表2可知:与150 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl浓度相比,在300 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl胁迫7 d时,K<sup>+</sup>选择性吸收系数显著提高(P<0.05),且阿拉尔种源的K<sup>+</sup>吸收系数略高于银川种源的。当盐胁迫时间延长到30 d时,随着NaCl浓度的升高,K<sup>+</sup>选择性吸收系数呈下

降趋势,但2个NaCl浓度间的K<sup>+</sup>吸收系数差异不显著,且相同NaCl浓度下,阿拉尔种源沙枣幼苗的K<sup>+</sup>选择性吸收系数大于银川种源的。在NaCl胁迫下,沙枣幼苗的K<sup>+</sup>选择性运输系数与对照间差异不显著,但阿拉尔种源沙枣幼苗在NaCl胁迫30 d时,呈上升趋势,且阿拉尔种源沙枣幼苗的K<sup>+</sup>选择性运输系数大于相同浓度下银川种源的。

表2 不同NaCl浓度和胁迫时间对2个沙枣种源K<sup>+</sup>选择性吸收系数和运输系数的影响

种源	NaCl 浓度/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	胁迫7 d		胁迫30 d	
		吸收系数	运输系数	吸收系数	运输系数
阿拉尔	0	0.00 ± 0.00	2.21 ± 0.41a	0.00 ± 0.00	1.95 ± 0.27a
	150	11.07 ± 1.39bc	2.19 ± 0.28a	14.59 ± 0.84a	2.86 ± 0.32a
	300	15.09 ± 0.70a	1.83 ± 0.30a	12.33 ± 2.96a	2.89 ± 0.68a
银川	0	0.00 ± 0.00	1.92 ± 0.19a	0.00 ± 0.00	2.52 ± 0.31a
	150	10.22 ± 1.48c	2.07 ± 0.29a	13.35 ± 0.48a	2.32 ± 0.09a
	300	14.87 ± 1.114ab	1.47 ± 0.27a	10.06 ± 0.47a	2.38 ± 0.29a

注:在对照组介质中未加入Na<sup>+</sup>,因此,均把0 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下K<sup>+</sup>的选择性吸收系数视为0,并且不参与多重比较;同一列不同小写字母表示K<sup>+</sup>选择性吸收系数或运输系数差异显著(P<0.05)。

### 3 结论与讨论

Na<sup>+</sup>在植物体内过度积累是造成植物盐害的主要原因,而K<sup>+</sup>既是植物生长发育所必需的营养元素,又在生理调节、物质构成中发挥着作用。大量研究发现,在NaCl胁迫下,随着NaCl浓度的增加,植物Na<sup>+</sup>含量逐渐增加,而K<sup>+</sup>逐渐减少<sup>[13-15]</sup>。因为,在盐胁迫下,Na<sup>+</sup>竞争性的抑制了植物根系质膜上的K<sup>+</sup>吸收位点或者激活诱导K<sup>+</sup>通过外向K<sup>+</sup>通道外流<sup>[16-17]</sup>。Babal等<sup>[18]</sup>研究认为,盐敏感型植物在叶中积累更多的Na<sup>+</sup>,而耐盐型植物则积累在根系中。另外,有研究发现,植物各组织中Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>含量不仅与盐浓度有关,与胁迫时间有关,随着胁迫时间的延长,Na<sup>+</sup>含量逐渐升高,而K<sup>+</sup>含量逐渐降低<sup>[19-21]</sup>。本试验中,随着NaCl浓度的增加,沙枣幼苗各组织中Na<sup>+</sup>含量均急剧增加,随着胁迫时间的延长,根中的Na<sup>+</sup>含量增加,而茎和叶中的减少;随NaCl浓度的增加和胁迫时间的延长,K<sup>+</sup>含量和吸收量逐渐下降;与银川种源沙枣幼苗相比,阿拉尔种源积累了更多的Na<sup>+</sup>在根中和更少的Na<sup>+</sup>在叶中,K<sup>+</sup>含量在NaCl胁迫下的降幅也低于银川种源。这表明,阿拉尔种源沙枣幼苗根系能更有效阻隔Na<sup>+</sup>,减少向叶运输,并且可以更好的维持K<sup>+</sup>吸收和减少K<sup>+</sup>的流失。

Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>是植物生长所必需的大量元素,在植物各种新陈代谢过程中发挥重要作用。在NaCl胁迫下,Ca<sup>2+</sup>不仅能促进种子萌发、提高植株保水力、维持膜的稳定和渗透平衡等,还在胁迫信号传导方面起非常积极的作用<sup>[22]</sup>,而Mg<sup>2+</sup>可以促进种子萌发和生长,尤其是根的生长<sup>[23]</sup>。有研究显示,植物根、茎和叶中的Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量随着盐浓度增加而减少<sup>[24-26]</sup>,而罗布麻(*Apocynum venetum* L.)茎中Ca<sup>2+</sup>和根中Mg<sup>2+</sup>含量在盐胁迫下有所增加<sup>[27]</sup>。施加外源Ca,可以抑制盐对植物的损伤已得到普遍的证实<sup>[28-30]</sup>,但也有研究发现,补充Ca<sup>2+</sup>并不能缓解NaCl胁迫抑制植物的生长和细胞膜完整性及流动性损伤<sup>[31-32]</sup>。本研究发现,沙枣幼苗各组织中的Ca<sup>2+</sup>含量和叶中的Mg<sup>2+</sup>含量随着NaCl浓度的增加而逐渐减少,且阿拉尔种源的下降幅度比银川种源的小,这说明阿拉尔种源能更有效的减少Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>流失;但在NaCl胁迫7d时,根中Mg<sup>2+</sup>的含量显著增加,且阿拉尔种源的增幅比银川种源的大,胁迫30d时,根中Mg<sup>2+</sup>含量均与对照差异不显著,由此可以推测,短期盐胁迫可以增加沙枣根系中Mg<sup>2+</sup>

的积累,从而促进根系生长,抵御盐胁迫环境。

K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>平衡对植物耐盐能力表现是非常重要的因素<sup>[33]</sup>。本研究发现,NaCl胁迫下,沙枣幼苗各组织的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值均随着NaCl浓度的升高而显著降低,且阿拉尔种源沙枣幼苗根和叶中K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值的下降幅度比银川种源的小;在盐胁迫7d时,沙枣的K<sup>+</sup>选择性吸收系数显著增加,在胁迫30d时,则差异不显著,而NaCl胁迫对沙枣幼苗的K<sup>+</sup>选择性运输系数的影响不显著。芦荟(*Aloe vera* L.)<sup>[34]</sup>、马蔺(*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch) Koidz.)<sup>[35]</sup>和罗布麻<sup>[13]</sup>等在盐胁迫下也表现出更强的K<sup>+</sup>选择性吸收和运输能力,而海蓬子(*Salicornia europaea* L.)<sup>[36]</sup>和向日葵(*Helianthus annuus* L.)<sup>[34]</sup>表现为K<sup>+</sup>吸收系数升高,运输能力下降,构树(*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hert. ex Vent.)<sup>[12]</sup>则在盐胁迫下K<sup>+</sup>选择性吸收和运输能力都降低。因此,可以推测,造成K<sup>+</sup>选择性吸收和运输能力变化差异可能与植物材料和胁迫时间有关。

从上述研究结果可知:在NaCl胁迫环境下,沙枣幼苗各组织中的Na<sup>+</sup>含量增加,造成K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量减少,但在短期胁迫下,沙枣幼苗会增大K<sup>+</sup>选择性吸收,增加根系中Mg<sup>2+</sup>含量,并且耐盐能力较强种源的增幅更大;同时,耐盐性较强的沙枣种源能更多的阻隔Na<sup>+</sup>于根系中,减少叶中的Na<sup>+</sup>含量,并且更好的减少体内K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量的流失,尤其是根和叶中的含量,以保证植物体内各种新陈代谢顺利进行。

### 参考文献:

- [1] 郭丽君,王玉涛. 沙枣种质资源特性及利用价值[J]. 中国野生植物资源,2008,27(5):32-34.
- [2] 管文轲,徐娜. 沙枣资源利用研究与开发现状述评[J]. 安徽农学通报,2012,18(19):119-121.
- [3] 杨升,刘涛,张华新,等. 盐胁迫下沙枣幼苗的生长表现和生理特性[J]. 福建林学院学报,2014,34(1):64-70.
- [4] Parvaiz A, Satyawati S. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants-a review[J]. Plant Soil Environ, 2008, 54(3):88-99.
- [5] 赵可夫,周澍波,刘家尧. 盐分胁迫下沙枣幼苗一些生理特性的观测[J]. 山东师大学报:自然科学版,1992,7(1):72-76.
- [6] 张宝泽,曹子谊,赵可夫. 盐分胁迫下沙枣某些生理特性的研究[J]. 林业科学,1992,28(2):187-189.
- [7] 马正龙,白生文. 盐度对沙枣离子分布和渗透调节影响的研究[J]. 甘肃科学学报,2007,19(3):83-85.
- [8] 刘宝玉. 盐胁迫下沙枣生理生态响应与离子分配研究[D]. 天津:天津师范大学,2007.
- [9] 刘正祥,张华新,杨秀艳,等. NaCl胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸

- 收、运输与分配特性[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 326-336.
- [10] 公勤, 齐曼·尤努斯, 艾力江·麦麦提. 盐胁迫对尖果沙枣离子分布及渗透调节的影响[J]. 经济林研究, 2008, 26(3): 34-37.
- [11] 杨升, 张华新, 刘涛. 盐胁迫对 16 种幼苗渗透调节物质的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 269-277.
- [12] 杨帆, 丁菲, 杜天真. 盐胁迫下构树幼苗器官中  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$  和  $Cl^-$  含量分布及吸收特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 767-772.
- [13] 宁建凤, 郑青松, 邹献中, 等. 罗布麻对不同浓度盐胁迫的生理响应[J]. 植物学报, 2010a, 45(6): 689-697.
- [14] Wang H, Wu Z, Zhou Y, *et al.* Effects of salt stress on ion balance and nitrogen metabolism in rice[J]. *Plant Soil Environ*, 2012, 58(2): 62-67.
- [15] Jamil M, Bashir S, Anwar S, *et al.* Effect of salinity on physiological and biochemical characteristics of different varieties of rice[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44: 7-13.
- [16] Ko C H, Gaber R F. TRK1 and TRK2 encode structurally related  $K^+$  transporters in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Molecular and Cellular Biology*, 1991, 11(8): 4266-4273.
- [17] 孙健. 胡杨响应盐胁迫与离子平衡调控信号网络研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 24.
- [18] Balal R M, Khan M M, Shahid M A, *et al.* Comparative studies on the physiobiochemical, enzymatic, and ionic modifications in salt-tolerant and salt-sensitive citrus rootstocks under NaCl stress[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2012, 137(2): 86-95.
- [19] Summart J, Thanonkeo P, Panichajakul S, *et al.* Effect of salt stress on growth, inorganic ion and proline accumulation in Thai aromatic rice, Khao Dawk Mali 105, callus culture [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(2): 145-152.
- [20] Silva E N D, Ribeiro R V, Silva S L F, *et al.* Salt stress induced damages on the photosynthesis of physic nut young plants[J]. *Scientia Agricola*, 2011, 68(1): 62-68.
- [21] 孙孟超, 尹贇鹏, 马晓蕾, 等. 盐胁迫对欧李幼苗生理响应及离子含量的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30(2): 33-37.
- [22] 戴高兴, 彭克勤, 皮灿辉. 钙对植物耐盐性的影响[J]. 中国农学通报, 2003, 19(3): 97-101.
- [23] 纪灵霄, 杨洪兵.  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  对盐胁迫下荞麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 广东农业科学, 2013(17): 52-53.
- [24] Loupassaki M H, Chartzoulakis K S, Dugalaki N B, *et al.* Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sodium in leaves, shoots, and roots of six olive cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(11): 2457-2482.
- [25] Essa T A. Effect of salinity stress on growth and nutrient composition of three soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivars[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2002, 188(2): 86-93.
- [26] 刘智微, 钟小仙, 常盼盼, 等. 海盐胁迫下苏牧 2 号象草幼苗不同器官中阳离子分配与运输[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 237-247.
- [27] 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, 2010b, 21(2): 325-330.
- [28] 杨凤军, 李天来, 臧忠婧, 等. 外源钙施用时期对缓解盐胁迫番茄幼苗伤害的作用[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1181-1188.
- [29] Cha-um S, Pal S H, Thapanee S, *et al.* Calcium-alleviated salt tolerance in indica rice (*Oryza sativa* L. spp. indica): Physiological and morphological changes[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2012, 6(1): 176-182.
- [30] Yin Y Q, Yang R Q, Gu Z X. Calcium regulating growth and GA-BA metabolism pathways in germinating soybean (*Glycine max* L.) under NaCl stress[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 239(1): 149-156.
- [31] Amador B M, Jones H, Kaya C, *et al.* Effects of foliar application of calcium nitrate on growth and physiological attributes of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1-3): 188-196.
- [32] Guimaraes F V A, Lacerda C F, Marques E C, *et al.* Calcium can moderate changes on membrane structure and lipid composition in cowpea plants under salt stress [J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, 65(1): 55-63.
- [33] Shabala S, Pottosin I I. Potassium and potassium-permeable channels in plant salt tolerance [M]//Demidchik V, Maathuis F. *Ion Channels and Plant Stress Responses*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010: 87-110.
- [34] 郑青松, 刘兆普, 刘友良, 等. 盐和水胁迫对海蓬子、芦荟、向日葵幼苗生长及其离子吸收分配的效应[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(2): 16-20.
- [35] Bai W B, Li P F, Li B G, *et al.* Some physiological response of Chinese iris to salt stress[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 454-463.
- [36] Zheng Q S, Liu L, Liu Z P, *et al.* Comparison of the response of ion distribution in the tissues and cells of two succulent plants *Aloe vera* and *Salicornia europaea* to saline stress[J]. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 2009, 172(6): 875-883.

(责任编辑: 徐玉秀)