

NaCl 胁迫对不同种源青钱柳幼苗离子分配、吸收与运输的影响

李彦强¹, 方升佐^{1,①}, 姚瑞玲¹, 赵丽霞²

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 江西食品研究所, 江西 南昌 330029)

摘要: 采用水培法研究了 NaCl 胁迫对不同种源青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja] 幼苗各部位离子分配、吸收与运输的影响。结果表明, 0.085 mol · L⁻¹ NaCl 胁迫 28 d 后, 来源于安徽黄山的青钱柳幼苗根、茎、叶片及叶柄中的 Na⁺/Ca²⁺ 和 Na⁺/K⁺ 比值均最小; 相同 NaCl 浓度胁迫下, 3 个种源青钱柳幼苗各部位的 Na⁺/Ca²⁺ 比值较稳定。随 NaCl 浓度的升高, 青钱柳幼苗从根系到茎的离子选择性运输能力提高, 从叶柄到叶片的 K⁺ 和 Ca²⁺ 的离子选择性运输能力下降。综合分析结果表明, 安徽黄山种源青钱柳幼苗的耐盐性高于云南昆明种源和江西九江种源。

关键词: 青钱柳; NaCl 胁迫; 离子分配; 离子吸收; 离子运输

中图分类号: Q945.78; S792.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0978(2007)04-0029-05

Effects of NaCl stress on ion distribution, absorption and transportation in *Cyclocarya paliurus* seedling from different provenances LI Yan-qiang¹, FANG Sheng-zuo^{1,①}, YAO Rui-ling¹, ZHAO Li-xia² (1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Food Research Institute of Jiangxi, Nanchang 330029, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2007, 16(4): 29-33

Abstract: Effects of NaCl stress on ion distribution, absorption and transportation in all organs of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedling from different provenances were studied by water culture method. The results showed that ratios of Na⁺/Ca²⁺ and Na⁺/K⁺ in root, stem, leaf and petiole of seedling from Huangshan of Anhui Province were the lowest with 0.085 mol · L⁻¹ NaCl stress for 28 d. The ratio of Na⁺/Ca²⁺ was more stable than that of Na⁺/K⁺ and Na⁺/Mg²⁺ in all organs of seedling from three provenances under the NaCl stress with same concentration. Ability of selective transportation of K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ from root to stem was improved with NaCl concentration increasing, while that of K⁺ and Ca²⁺ from petiole to leaf was decreased gradually. It is concluded that the salt resistance of *C. paliurus* seedling from Huangshan of Anhui Province is better than that of provenances from Kunming of Yunnan Province and Jiujiang of Jiangxi Province.

Key words: *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja; NaCl stress; ion distribution; ion absorption; ion transportation

NaCl 胁迫可对植物造成离子毒害和渗透胁迫等危害, 由于介质中的高浓度盐离子能干扰植物对矿质营养元素的吸收, 造成植物体内营养元素比例失调, 从而影响植物的生长发育, 最终导致生物量的重新分配^[1]。近年来, 关于植物耐盐机理的研究大多偏重于根系对盐分的吸收和运输^[2,3] 以及盐胁迫对植株器官、组织和细胞内矿质营养元素分布状况的影响等方面^[4,5]。

青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja] 是国家三级保护植物, 主要分布于人为干扰较少的

原始森林和自然保护区内, 人工林资源较少^[6,7]。青钱柳集药用、保健、材用和观赏等多种价值于一身, 是很有开发利用前景的珍贵树种之一^[6]。目前, 有关青钱柳抗性方面的研究报道较少。笔者在

收稿日期: 2007-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30371156)和江苏省高新技术研究计划项目(BG2006314)

作者简介: 李彦强(1979-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事林木抗性生理方面的研究工作。

① 通讯作者 E-mail: fangsz@njfu.com.cn

人工气候室内,采用水培法研究了不同浓度 NaCl 对各种源青钱柳幼苗各器官中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子的分配、吸收及运输的影响,以期阐明盐胁迫对青钱柳幼苗体内不同器官间离子的分配、吸收和运输的作用机制,为最大限度地利用盐渍地培育青钱柳提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试青钱柳种子于 2005 年 11 月分别采自安徽黄山、江西九江及云南昆明。经浓硫酸酸蚀、赤霉素处理并自然层积打破休眠后,取露白种子进行容器育苗,待苗高 7~9 cm 时,选择生长一致且发育健康的幼苗进行 NaCl 胁迫实验。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 采用水培法进行盐胁迫处理。处理前,先将青钱柳幼苗置于 1/2 Hoagland 溶液中进行适应性培养,每天早晚各充气 1 次,10 d 后,改用全量 Hoagland 溶液培养;并进行盐胁迫处理。以添加 0.017、0.051 和 0.085 mol·L⁻¹ NaCl 的全量 Hoagland 溶液为处理液,以未添加 NaCl 的全量 Hoagland 溶液为对照(CK)。每处理 20 株幼苗,各 3 次重复。将青钱柳幼苗置于 RGS-50 型大型智能人工气候生长室内进行培养,光照时间 12 h·d⁻¹,昼夜温度分别为(25±1)℃和(20±1)℃,昼夜空气相对湿度分别为 70%±5% 和 80%±5%,每隔 7 d 更换 1 次处理液。

1.2.2 离子浓度的测定方法 胁迫处理至 28 d,取出青钱柳幼苗,用自来水冲洗幼苗根部,吸干水分后,将幼苗的根、茎、叶和叶柄分开,分别称取根、茎、叶片及叶柄的鲜质量,并于 80℃ 烘干至恒重,粉碎备用。分别称取 0.25 g 根、茎、叶和叶柄干粉,置于 100 mL 凯氏瓶中,用水润湿后加入 8 mL 浓硫酸,放置过夜;再加入 10 滴双氧水进行消煮,待消煮液变为无色透明时停止消煮,并定容至 100 mL,备用。

用等离子体发射光谱仪 ICP-AES 测定 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量。用莫尔法测定 Cl^- 含量:取上述消煮液 10 mL,加 1 滴酚酞,pH 调至 8~9 后,加入数滴质量分数 5% 的重铬酸钾指示剂,用 0.01 mol·L⁻¹ $AgNO_3$ (1.70 g·L⁻¹) 溶液滴定,记录使用 $AgNO_3$ 溶液的体积,计算样品中的 Cl^- 含量。

1.3 数据计算和分析

离子选择性运输能力(S_{X,Na^+})^[8] 为库器官(X/Na^+)与源器官(X/Na^+)的比值,其中, X/Na^+ 为 K^+ 、 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 含量与 Na^+ 含量的比值。

采用 EXCEL 和 SPSS 数据分析软件对实验数据进行处理和分析。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对青钱柳幼苗叶片和根系中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量的影响

不同种源青钱柳幼苗各器官中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量变化因 NaCl 浓度不同而异,叶片中的 Na^+ 和 Ca^{2+} 含量随 NaCl 浓度提高而增加,叶片和根系中的 K^+ 含量则随 NaCl 浓度升高而减小。

在 0.085 mol·L⁻¹ NaCl 胁迫下,安徽黄山种源叶片中的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量均较高,云南昆明种源叶片中的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量次之。其中,安徽黄山种源叶片中的 K^+ 和 Ca^{2+} 含量分别比云南昆明和江西九江种源高 4.5% 和 43.2%、5.3% 和 82.9%。在 0.051 mol·L⁻¹ NaCl 胁迫下,安徽黄山种源叶片中的 K^+ 含量分别比云南昆明和江西九江种源高 20.4% 和 42.5%,其 Ca^{2+} 含量分别为后两者的 2.3 和 1.8 倍。

在 0.085 mol·L⁻¹ NaCl 胁迫下,不同种源青钱柳幼苗根系中的离子含量也存在一定的变化规律。云南昆明种源根系中的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较其他种源高,其中 K^+ 含量分别是安徽黄山和江西九江种源的 2.2 和 3.8 倍, Ca^{2+} 含量分别是安徽黄山和江西九江种源的 1.8 和 5.9 倍。

2.2 NaCl 胁迫对不同种源青钱柳幼苗各器官中 Na^+/X 比值的影响

Na^+/X (X 为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量) 表示 NaCl 胁迫下, Na^+ 含量对其他矿质营养元素吸收的影响程度,比值越大,说明其他矿质营养元素的代谢失衡越严重,NaCl 胁迫的影响程度越重,反之则表明植物具有较强的耐盐性。由表 1 可见,NaCl 胁迫下,3 个种源青钱柳幼苗根系和叶片的 Na^+/X 比值均随 NaCl 浓度升高而增大,其中 Na^+/K^+ 比值和 Na^+/Mg^{2+} 比值增幅较大,而 Na^+/Ca^{2+} 比值增幅却较小。

在相同浓度 NaCl 胁迫条件下,3 个种源青钱柳

幼苗根系的 Na^+/K^+ 比值有一定差异。在 0.051 和 $0.085 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,安徽黄山种源青钱柳幼苗根系的 Na^+/K^+ 比值与其他种源间的差异极显著,且其 Na^+/K^+ 比值最小,分别为 2.3742 和 2.5076 。

3 个种源青钱柳幼苗叶片的 Na^+/K^+ 比值变化规律与根系基本相似。在 $0.051 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,云南昆明种源叶片的 Na^+/K^+ 比值最小,仅为 0.7592 ;而在 $0.085 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,安徽黄山种源叶片的 Na^+/K^+ 比值最小,仅为 1.5126 。

3 个种源青钱柳幼苗根系和叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值均随 NaCl 浓度升高而增加,各种源间的差异基本达显著或极显著水平。各处理组青钱柳幼苗根

系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值为 $0.5116 \sim 1.3066$,叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值为 $0.7567 \sim 0.9928$ 。在 $0.085 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,安徽黄山种源青钱柳幼苗根系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值最小,仅为 0.7304 ;江西九江种源青钱柳幼苗根系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值最大,达到 1.3066 ;叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值从大到小依次为江西九江种源、云南昆明种源、安徽黄山种源。在 $0.051 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,云南昆明种源青钱柳幼苗根系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值最小(0.6281);江西九江种源青钱柳幼苗根系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值最大(0.9839);安徽黄山种源青钱柳幼苗叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值最小(0.7716),江西九江种源的最大(0.9762)。

随 NaCl 浓度的提高,青钱柳幼苗根系和叶柄的

表1 NaCl 胁迫对不同种源青钱柳幼苗各器官中 Na^+/X 比值的影响¹⁾
Table 1 Effect of NaCl stress on Na^+/X ratio in all organs of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedling from different provenances¹⁾

NaCl 浓度/ $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of NaCl	种源地 Location	根系中的 Na^+/X 比值 Na^+/X ratio of root system			茎中的 Na^+/X 比值 Na^+/X ratio of stem		
		Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$	Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$
0 (CK)	K	$0.1176 \pm 0.10a$	$0.3748 \pm 0.24Bc$	$0.8113 \pm 0.77Cc$	$0.0762 \pm 0.02a$	$0.8748 \pm 0.64Aa$	$0.6134 \pm 0.41Aa$
	J	$0.1158 \pm 0.18a$	$0.7502 \pm 0.53Aa$	$1.1314 \pm 0.57Aa$	$0.0857 \pm 0.07a$	$0.8502 \pm 0.53Aa$	$0.4809 \pm 0.39Bb$
	H	$0.1097 \pm 0.11a$	$0.4805 \pm 0.28Bb$	$0.9786 \pm 0.36Bb$	$0.0769 \pm 0.02a$	$0.8050 \pm 0.58Ab$	$0.4521 \pm 0.24Bb$
0.017	K	$1.3699 \pm 0.19Bb$	$0.5116 \pm 0.43Cc$	$5.5427 \pm 1.27Bb$	$0.1755 \pm 0.16a$	$0.6016 \pm 0.33Cc$	$4.6558 \pm 0.11Aa$
	J	$1.7612 \pm 0.53Aa$	$0.9383 \pm 0.58Aa$	$5.2254 \pm 1.35Cc$	$0.1825 \pm 0.17a$	$0.9381 \pm 0.28Aa$	$1.4291 \pm 0.04Cc$
	H	$1.2085 \pm 0.94Bb$	$0.6081 \pm 0.23Bb$	$8.0196 \pm 2.27Aa$	$0.1793 \pm 0.17a$	$0.9081 \pm 0.23Bb$	$3.6447 \pm 1.15Bb$
0.051	K	$3.5818 \pm 0.32Aa$	$0.6281 \pm 0.36Bb$	$8.8139 \pm 1.79Bb$	$0.3988 \pm 0.25Ba$	$0.5281 \pm 0.36Bb$	$4.8525 \pm 2.03Aa$
	J	$3.6174 \pm 0.65Aa$	$0.9839 \pm 0.11Aa$	$9.5577 \pm 1.29Aa$	$0.4298 \pm 0.31Aa$	$0.7839 \pm 0.11Aa$	$2.8961 \pm 1.38Bc$
	H	$2.3742 \pm 0.55Bb$	$0.6616 \pm 0.24Bb$	$8.5223 \pm 2.35Cc$	$0.3575 \pm 0.22Bb$	$0.5616 \pm 0.24Bb$	$4.5436 \pm 1.08Ab$
0.085	K	$3.9365 \pm 0.27Bb$	$0.8831 \pm 0.64Bb$	$14.0489 \pm 2.29Aa$	$0.3972 \pm 0.11Bb$	$0.4830 \pm 0.34Bb$	$6.0171 \pm 0.93Aa$
	J	$3.9741 \pm 0.34Aa$	$1.3066 \pm 1.22Aa$	$13.4688 \pm 4.45Bb$	$0.5488 \pm 0.53Aa$	$0.7066 \pm 0.27Aa$	$3.8871 \pm 0.88Bc$
	H	$2.5076 \pm 0.17Cc$	$0.7304 \pm 0.62Cc$	$10.7085 \pm 2.51Cc$	$0.3796 \pm 0.24Bb$	$0.3304 \pm 0.22Cc$	$4.7017 \pm 0.22Bb$

NaCl 浓度/ $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of NaCl	种源地 Location	叶柄中的 Na^+/X 比值 Na^+/X ratio of petiole			叶片中的 Na^+/X 比值 Na^+/X ratio of leaf		
		Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$	Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$
0 (CK)	K	$0.0574 \pm 0.04Aa$	$0.4987 \pm 0.42Aa$	$0.7954 \pm 0.38Bb$	$0.0223 \pm 0.04a$	$0.7711 \pm 0.29a$	$0.3145 \pm 0.23a$
	J	$0.0599 \pm 0.09Aa$	$0.2602 \pm 0.12Bb$	$1.2332 \pm 0.59Aa$	$0.0326 \pm 0.33a$	$0.7801 \pm 0.27a$	$0.3092 \pm 0.21a$
	H	$0.0437 \pm 0.18Ab$	$0.3008 \pm 0.27Bb$	$0.8207 \pm 0.35Bb$	$0.0341 \pm 0.28a$	$0.7106 \pm 0.19a$	$0.3212 \pm 0.23a$
0.017	K	$0.2189 \pm 0.27Bb$	$0.6639 \pm 0.59Bb$	$3.5057 \pm 0.85Cc$	$0.4541 \pm 0.42a$	$0.8484 \pm 0.29Bb$	$1.5844 \pm 0.54a$
	J	$0.2298 \pm 0.21Bb$	$0.4922 \pm 0.33Cc$	$7.3825 \pm 1.89Aa$	$0.6637 \pm 0.51a$	$0.9113 \pm 0.18Aa$	$2.9559 \pm 0.92a$
	H	$0.2884 \pm 0.24Aa$	$0.7287 \pm 0.60Aa$	$4.8770 \pm 1.05Bb$	$0.5515 \pm 0.45a$	$0.7567 \pm 0.17Cc$	$2.4046 \pm 0.85a$
0.051	K	$0.2573 \pm 0.33Bc$	$0.8608 \pm 0.53Aa$	$3.7159 \pm 0.71Cc$	$0.7592 \pm 0.66Cc$	$0.8513 \pm 0.22ABa$	$1.6787 \pm 0.73Cc$
	J	$0.4371 \pm 0.15Bb$	$0.7812 \pm 0.61Bb$	$7.5861 \pm 2.72Aa$	$2.0518 \pm 0.55Aa$	$0.9762 \pm 0.18Aa$	$3.0924 \pm 0.72Aa$
	H	$0.4278 \pm 0.67Aa$	$0.7095 \pm 0.56Cc$	$5.0495 \pm 1.97Bb$	$0.9116 \pm 0.67Bb$	$0.7716 \pm 0.16Bb$	$2.5731 \pm 0.41Bb$
0.085	K	$0.4509 \pm 0.13Bb$	$0.9096 \pm 0.49Aa$	$4.7335 \pm 1.35Cc$	$2.1615 \pm 0.64Bb$	$0.8518 \pm 0.38Bb$	$2.2858 \pm 0.52a$
	J	$0.9551 \pm 0.61Aa$	$0.9158 \pm 0.64Ab$	$8.0704 \pm 1.82Aa$	$2.8638 \pm 0.73Aa$	$0.9928 \pm 0.24Aa$	$3.1685 \pm 0.82a$
	H	$0.4337 \pm 0.26Bb$	$0.8555 \pm 0.32Aa$	$5.6319 \pm 2.81Bb$	$1.5126 \pm 0.61Cc$	$0.7931 \pm 0.34Cc$	$2.8239 \pm 0.78a$

¹⁾ K: 云南昆明 Kunming of Yunnan Province; J: 江西九江 Jiujiang of Jiangxi Province; H: 安徽黄山 Huangshan of Anhui Province. 不同的大写和小写字母分别表示不同处理组的 3 个种源在 1% 和 5% 水平上差异显著 The different capitals and small letters indicate the significant difference among three provenances of different treatments at 1% and 5% levels respectively.

Na⁺ / Mg²⁺ 比值大幅度增高, 而茎和叶片的 Na⁺ / Mg²⁺ 比值增幅较小。相同浓度 NaCl 胁迫条件下, 安徽黄山种源青钱柳幼苗各器官的 Na⁺ / Mg²⁺ 比值均最低, 江西九江种源的 Na⁺ / Mg²⁺ 比值最高。

2.3 NaCl 胁迫对青钱柳幼苗不同器官间离子选择性运输的影响

S_{X,Na+} 值反映了植物根系中的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 向地上部分运输的选择性, 同时也反映了植物受胁迫的程度。离子分配形式的不同导致植物耐盐性存在差异。NaCl 胁迫条件下, 不同种源青钱柳幼苗各库源的 S_{X,Na+} (X 代表 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的含量) 值见表 2。由表 2 可以看出, 随 NaCl 浓度的提高, 各种源青钱柳幼苗由根系向茎选择性运输 K⁺ 的能力提高, 选择性运输 Ca²⁺ 的能力下降, 选择性运输 Mg²⁺ 的能力变化不明显; 各种源由茎向叶柄和由叶

柄向叶片选择性运输 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的能力则呈现出不同的变化趋势。

各种源由叶柄向叶片的 S_{K+,Na+} 值随 NaCl 胁迫浓度升高而下降, 且江西九江种源青钱柳幼苗下降较快, 表明 NaCl 胁迫抑制了青钱柳幼苗对 K⁺ 的选择性运输能力; 各种源由叶柄向叶片的 S_{Ca2+,Na+} 值随 NaCl 胁迫浓度升高而逐渐下降, 表明 NaCl 胁迫对青钱柳幼苗 Ca²⁺ 的选择性运输能力的影响较弱; 由叶片向叶柄的 S_{Mg2+,Na+} 值随 NaCl 胁迫浓度升高而显著下降, 说明 NaCl 胁迫对青钱柳幼苗 Mg²⁺ 的选择性运输能力具有较强的抑制作用。

总之, S_{X,Na+} 值反映了植株不同部位对离子的选择性运输能力, NaCl 胁迫促进了各种源青钱柳幼苗由根系向茎的离子选择性运输能力, 抑制了由茎向叶柄和由叶柄向叶片的离子选择性运输能力。

表 2 NaCl 胁迫下不同种源青钱柳幼苗 S_{X,Na+} 值的差异性分析¹⁾
Table 2 Variation analysis of S_{X,Na+} values of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedlings from different provenances under NaCl stress¹⁾

库源关系 Sink-source relation	种源地 Location	对照组的 S _{X,Na+} 值 S _{X,Na+} of CK			0.017 mol · L ⁻¹ NaCl 处理组的 S _{X,Na+} 值 S _{X,Na+} of 0.17 mol · L ⁻¹ NaCl treatment group		
		S _{K+,Na+}	S _{Ca2+,Na+}	S _{Mg2+,Na+}	S _{K+,Na+}	S _{Ca2+,Na+}	S _{Mg2+,Na+}
根 - 茎 Root-stem	K	0.648 ± 0.20A	2.334 ± 0.67Aa	0.756 ± 0.35Ab	0.128 ± 0.08B	1.176 ± 0.77A	0.840 ± 0.19Aa
	J	0.740 ± 0.14A	1.133 ± 0.21Ab	0.425 ± 0.18ABb	0.104 ± 0.03B	0.999 ± 0.24A	0.273 ± 0.03Bc
	H	0.701 ± 0.18A	1.675 ± 0.77Ab	0.462 ± 0.17Bb	0.148 ± 0.08B	1.493 ± 0.23A	0.454 ± 0.15Bb
茎 - 叶柄 Stem-petiole	K	0.753 ± 0.22B	0.570 ± 0.16Ba	1.296 ± 0.39Ab	1.247 ± 0.69A	1.103 ± 0.39Aa	0.753 ± 0.37Bc
	J	0.698 ± 0.29B	0.306 ± 0.13Bb	2.564 ± 1.01Aa	1.259 ± 0.24A	0.524 ± 0.18Bb	2.166 ± 0.74Aa
	H	0.568 ± 0.29B	0.373 ± 0.17Bb	1.815 ± 0.46Ab	1.608 ± 0.41A	0.802 ± 0.16Ba	1.338 ± 0.61Bb
叶柄 - 叶片 Petiole-leaf	K	0.388 ± 0.11Cb	1.546 ± 0.69Ab	0.395 ± 0.18Ba	2.074 ± 0.56Bb	1.277 ± 0.49Ab	0.451 ± 0.24A
	J	0.544 ± 0.17Cb	2.998 ± 0.85Aa	0.250 ± 0.16Bb	2.888 ± 0.43Ba	1.851 ± 0.55Aa	0.400 ± 0.19A
	H	0.778 ± 0.28Ca	2.362 ± 0.71Aa	0.391 ± 0.11Ba	1.912 ± 0.38Bb	1.038 ± 0.28Bb	0.493 ± 0.18A
库源关系 Sink-source relation	种源地 Location	0.051 mol · L ⁻¹ NaCl 处理组的 S _{X,Na+} 值 S _{X,Na+} of 0.051 mol · L ⁻¹ NaCl treatment group			0.085 mol · L ⁻¹ NaCl 处理组的 S _{X,Na+} 值 S _{X,Na+} of 0.085 mol · L ⁻¹ NaCl treatment group		
		S _{K+,Na+}	S _{Ca2+,Na+}	S _{Mg2+,Na+}	S _{K+,Na+}	S _{Ca2+,Na+}	S _{Mg2+,Na+}
根 - 茎 Root-stem	K	0.111 ± 0.07B	0.840 ± 0.25AB	0.550 ± 0.19Ba	0.101 ± 0.04B	0.547 ± 0.13B	0.428 ± 0.17Ba
	J	0.119 ± 0.05B	0.796 ± 0.27B	0.303 ± 0.03Bb	0.138 ± 0.06B	0.540 ± 0.12B	0.288 ± 0.14Bb
	H	0.151 ± 0.04B	0.848 ± 0.17B	0.533 ± 0.23b	0.157 ± 0.04B	0.452 ± 0.15C	0.439 ± 0.09a
茎 - 叶柄 Stem-petiole	K	0.645 ± 0.23Bb	1.630 ± 0.47Aa	0.765 ± 0.35Bc	1.135 ± 0.58A	1.883 ± 0.44Ab	0.786 ± 0.54Bc
	J	1.016 ± 0.48Aa	0.996 ± 0.25Ab	2.619 ± 0.97a	1.740 ± 0.65A	1.296 ± 0.37Ac	2.076 ± 0.72a
	H	1.196 ± 0.35Aa	1.263 ± 0.33Ab	1.111 ± 0.62Bb	1.142 ± 0.48A	2.589 ± 0.45Aa	1.197 ± 0.77Bb
叶柄 - 叶片 Petiole-leaf	K	2.950 ± 0.57Bb	0.989 ± 0.42Bb	0.451 ± 0.13Ab	4.793 ± 0.92Aa	0.936 ± 0.78B	0.482 ± 0.19Ab
	J	4.695 ± 1.67Aa	1.249 ± 0.32Ba	0.407 ± 0.26Ab	2.998 ± 0.67Bb	1.084 ± 0.38B	0.392 ± 0.25Ac
	H	2.130 ± 0.52Bb	1.087 ± 0.29Bb	0.509 ± 0.21Aa	3.487 ± 0.35Aa	0.926 ± 0.56B	0.501 ± 0.28Aa

¹⁾ K: 云南昆明 Kunming of Yunnan Province; J: 江西九江 Jiujiang of Jiangxi Province; H: 安徽黄山 Huangshan of Anhui Province. 不同的大写和小写字母分别表示不同处理组的 3 个种源在 1% 和 5% 水平上差异显著 The different capitals and small letters indicate the significant difference among three provenances of different provenances at 1% and 5% levels respectively.

3 结论和讨论

NaCl 胁迫对 3 个不同种源青钱柳幼苗各器官 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的分配、吸收及运输均有一定的影响。随着 NaCl 胁迫浓度的升高,各种源青钱柳幼苗体内的 Na^+ 含量迅速提高,但不同器官中的 Na^+ 含量存在一定差异,叶片和根系中积累了较多 Na^+ ,特别是叶片中的 Na^+ 含量高于其他器官,高浓度 Na^+ 改变了植物细胞的渗透势及植物对矿质营养元素的吸收平衡,造成离子毒害。3 个种源青钱柳幼苗根系和叶片中的 K^+ 含量随 NaCl 浓度升高而下降,其中叶片中 K^+ 含量的下降幅度最大。在植物细胞中, Na^+ 和 K^+ 可能具有相同的结合部位,由于水合 Na^+ 半径比水合 K^+ 半径小,因此,在胁迫条件下,随 NaCl 浓度的提高,大量 Na^+ 被结合,破坏了植物对 K^+ 的吸收,造成钾营养亏缺。该结果与 Bernstein 的研究结果^[9]一致。

3 个种源青钱柳幼苗根系和叶片的 Na^+/K^+ 比值随着 NaCl 浓度的升高而快速增加,说明 NaCl 胁迫效应比较明显。在 $0.085 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,安徽黄山种源青钱柳幼苗根系和叶片的 Na^+/K^+ 比值最小,云南昆明种源较高,江西九江种源最高。在 NaCl 胁迫条件下,植物细胞中的 K^+ 含量保持一定的稳定性,使 Na^+ 和 K^+ 泵 ATPase 保持较高活性,有利于 Na^+ 和 K^+ 交换,表明植物对 NaCl 胁迫有一定的适应性^[10],并可据此评价植物的耐盐性。研究结果表明,安徽黄山种源青钱柳幼苗对 NaCl 胁迫的适应性较强,其次为云南昆明种源,江西九江种源的耐性最弱。

在 $0.085 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,各种源青钱柳幼苗根系和叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值较 Na^+/K^+ 比值低;在 $0.051 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,各种源青钱柳幼苗根系的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值均较 Na^+/K^+ 比值低,但云南昆明种源叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值高于 Na^+/K^+ 比值,而安徽黄山种源叶片的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值低于 Na^+/K^+ 比值。由于 Ca^{2+} 具有保护细胞膜完整性的功能^[11],且 Ca^{2+} 对 Na^+ 胁迫具有拮抗作用^[12],因此本实验结果是否能说明青钱柳幼苗中的 Ca^{2+} 比 K^+ 更稳定且对缓解 NaCl 胁迫作用更强,还有待进一步的实验验证。

植物对矿质元素的吸收运输动力包括根压、蒸腾(水分和矿质营养协同运输)作用和选择性吸收。采用水培法进行实验时,根压和选择性吸收成为根系主要的吸收动力。随 NaCl 浓度的提高,各种源青钱柳幼苗从根系到茎的离子选择性运输能力增强,说明 NaCl 胁迫促进了矿质元素从根系到茎的离子选择性运输能力。随 NaCl 浓度的升高,从茎到叶柄的离子选择性运输能力下降,可能是由于 Na^+ 积累造成叶片气孔开度减小、蒸腾作用下降所致。而从叶柄到叶片的离子选择性运输能力下降,可能是由于 NaCl 胁迫造成细胞膜透性增大和离子毒害,从而使细胞对离子的选择性运输能力减弱。

参考文献:

- [1] Teakle N L, Real D, Colmer T D. Growth and ion relations in response to combined salinity and waterlogging in the perennial forage legumes *Lotus corniculatus* and *Lotus tenuis*[J]. *Plant Soil*, 2006, 289: 369-383.
- [2] 曹帮华, 郁万文, 吴丽云, 等. 盐胁迫对刺槐无性系生长和离子吸收、运输、分配的影响[J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2005, 36(3): 353-358.
- [3] Maathuis F J M, Amtmann A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios[J]. *Annals of Botany*, 1999, 84: 123-133.
- [4] 许祥明, 叶和春, 李国风. 植物抗盐机理的研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2000, 6(4): 379-387.
- [5] 姚瑞玲, 方升佐. NaCl 胁迫及钙调节对青钱柳根部组织离子分布的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(2): 22-26.
- [6] 方升佐, 杨万霞. 青钱柳的开发利用与资源培育[J]. *林业科技开发*, 2003, 17(1): 49-51.
- [7] Fang S Z, Wang J Y, Wei Z Y, et al. Methods to break seed dormancy in *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 110: 305-309.
- [8] 於丙军, 罗庆云, 刘友良. 盐胁迫对盐生野大豆生长及其离子分布的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 776-780.
- [9] Bernstein L. Effect of salinity on plant growth[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1975, 26: 295-312.
- [10] 杨敏生, 李艳华, 梁海永, 等. 盐胁迫下白杨无性系苗木体内离子分配及比较[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 271-277.
- [11] 刘伟, 魏日凤, 潘廷国. NaCl 胁迫及外源 Ca^{2+} 处理下甘薯幼苗叶片多胺水平的变化[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2005, 34(2): 244-247.
- [12] 霍书新, 杜国强, 张小红. 钙缓解植物盐害的作用机制研究进展[J]. *土壤肥料*, 2005(6): 3-6.