

NaCl 胁迫及钙调节对青钱柳根部组织离子分布的影响

姚瑞玲, 方升佐^①

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037).

摘要: 运用 X-射线微区分析法研究了 NaCl 胁迫及钙调节下, 青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja] 幼苗根部组织中离子的浓度和分布情况。结果表明, 3.0 和 5.0 g · L⁻¹ NaCl 胁迫下, 青钱柳幼苗根部各层组织中 Na⁺ 和 Cl⁻ 的相对含量增加, K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的相对含量降低; 5.0 g · L⁻¹ NaCl 胁迫下加入 3.0 g · L⁻¹ Ca(NO₃)₂ 后, Na⁺ 的相对含量降低, K⁺ 的相对含量增加, Cl⁻ 的相对含量变化较小。随 NaCl 浓度的升高, 中柱和皮层中 Cl⁻ 的相对含量增高; Na⁺ 大部分沉积在皮层及表皮上; K⁺ 由皮层进入中柱的比率增大; Ca²⁺ 由表皮进入皮层的比率减少, 由皮层进入中柱的比率增大。5.0 g · L⁻¹ NaCl 胁迫下加入高浓度 Ca(NO₃)₂ 后, Cl⁻ 的分布比率变化不明显; Na⁺ 由表皮进入皮层的比率增加, 从皮层进入中柱的比率下降; K⁺ 和 Ca²⁺ 的分布比率变化不明显。高浓度 NaCl 胁迫破坏了青钱柳幼苗根部的离子平衡, 加入外源 Ca(NO₃)₂ (1.0~3.0 g · L⁻¹) 后, 缓解作用不明显。

关键词: NaCl 胁迫; 钙调节; 青钱柳; 离子分布; X-射线微区分析

中图分类号: Q945.78; S792.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0978(2007)02-0022-05

Effect of NaCl stress and Ca²⁺ regulation on ion distribution in root tissues of *Cyclocarya paliurus* seedling YAO Rui-ling, FANG Sheng-zuo^① (College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2007, 16(2): 22-26

Abstract: The ion concentration and distribution in root tissues of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedlings under NaCl stress and Ca²⁺ regulation were studied by X-ray microanalysis technique. The results showed that under 3.0 and 5.0 g · L⁻¹ NaCl stress, relative contents of Na⁺ and Cl⁻ in different tissues of root increased, and that of K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ decreased. After treated by 5.0 g · L⁻¹ NaCl stress and 3.0 g · L⁻¹ Ca(NO₃)₂, relative content of Na⁺ reduced and that of K⁺ increased, and the variation of Cl⁻ relative content was very slightly. With increasing of NaCl concentration, Cl⁻ relative contents in stele and cortex increased, most of Na⁺ aggregated to cortex and epidermis. Ratio of K⁺ transporting from cortex into stele increased, while ratio of Ca²⁺ from epidermis into cortex decreased and from cortex into stele increased. Under 5.0 g · L⁻¹ NaCl stress with high concentration of Ca(NO₃)₂, the variation of Cl⁻ distribution ratio was not evident, Na⁺ transporting from epidermis to cortex increased whereas reduced from cortex into stele, and variation of K⁺ and Ca²⁺ distribution ratio was not apparent. It is concluded that high concentration of NaCl stress disruptes ion balance in root of *C. paliurus* seedlings and regulation effect of exogenous calcium (1.0-3.0 g · L⁻¹) is not significant.

Key words: NaCl stress; calcium regulation; *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja; ion distribution; X-ray microanalysis

全世界盐渍土面积约 1.00 × 10⁸ hm², 占有所有可耕地面积的 5%^[1]。中国盐渍土面积达 2.70 × 10⁷ hm², 其中海涂总面积为 2.17 × 10⁶ hm²^[2]。开发利用盐碱地对提高土壤的生产能力具有深远意义。

青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja] 是中国特有的单种属植物, 为国家三级保护植物。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^[3]。目前, 尚未见有关青钱柳抗性方面的研究报道。

根系是植物与环境接触的重要界面, 外界环境对植物的影响首先作用于根系, 根系在感受到逆境信号后能产生相应的生理变化。盐胁迫能抑制根系

收稿日期: 2006-09-26

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

作者简介: 姚瑞玲 (1979-), 女, 贵州施秉人, 博士研究生, 主要从事森林营造 (恢复) 的理论与技术研究工作。

^① 通讯作者 E-mail: fangsz@njfu.edu.cn

生长,引起植物体内的离子失衡^[4]。在植物的必需元素中,钙具有极其特殊的作用,它不仅是细胞的结构物质,而且还作为第二信使调节植物对环境变化的响应过程^[5]。有研究表明,施用一定浓度的钙可以缓解盐胁迫对植物的危害^[6]。作者运用 X-射线微区分析法测定了 NaCl 胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根系离子的微区分布情况,以期阐明盐及外源钙对青钱柳幼苗的作用机理,为实现滨海地区科学造林提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试青钱柳种子可分为两部分,一部分于 2005 年 10 月采自江西庐山,经硫酸处理后用经 GA 处理的湿沙层积 2 个月;另一部分则于 2004 年 10 月采自江西赣州,湿沙自然层积 14 个月。

2006 年 3 月将经过层积催芽并已萌根的青钱柳种子播种于容器杯内,3 个月后,将生长较为一致的健壮幼苗(平均苗高 7 cm)移至水培箱内进行适应性培养。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 在 1/2 Hoagland 完全营养液中适应性培养 10 d 后,对幼苗进行水培处理,处理液用 Hoagland 完全营养液配制。将层积 2 个月的青钱柳种子分为 4 组,分别用浓度为 0.0 (S_0)、1.0 (S_1)、3.0 (S_2) 和 5.0 $g \cdot L^{-1}$ (S_3) 的 NaCl 溶液进行胁迫处理。将层积 14 个月的种子分为 5 组,各处理的浓度分别为 C_0 : 0.0 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 和 0.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$; C_1 : 5.0 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 和 0.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$; C_2 : 5.0 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 和 1.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$; C_3 : 5.0 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 和 2.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$; C_4 : 5.0 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 和 3.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$ 。各处理组幼苗分别置于 1 个水培箱(规格为 56 cm × 36 cm × 26 cm,材料为密封性较好的黑色有机玻璃)内,能有效减少水分散失。每箱 40 ~ 50 株苗,在 RGS-50 型智能人工气候生长室中进行培养,每天早晚各充气 1 次,昼夜温度分别为 25 °C 和 20 °C,相对湿度分别为 70% 和 80%,光照时间为 12 h · d⁻¹,每周换 1 次营养液。

1.2.2 分析方法 幼苗处理 23 d 后,截取植株根

部合生区以上 3 ~ 7 cm 部位进行横切面徒手切片(直径约 1 mm,厚约 0.3 mm),自然晾干后喷镀碳膜,在德国产 LEO 1530VP 型可变压力场发射扫描电子显微镜下进行观察,并用英国产 OXFORD INCA-300 型 X-射线能谱仪(EDS)进行分析。加速电压 20 kV,样品倾角 0°。选定分析元素,进行谱线与能谱图的收集,通过计算机附带软件自动判读各元素的相对百分含量^[7,8]。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 和 SPSS11.5 系统软件对实验数据进行统计分析,实验数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫及其钙调节下青钱柳幼苗根部各组织中离子的分布情况

NaCl 胁迫下,青钱柳根部不同组织中离子的相对含量见表 1。由表 1 可见,从表皮、皮层到中柱,在高或较高浓度 NaCl 胁迫下,Na⁺ 和 Cl⁻ 的相对含量增加,K⁺、Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 的相对含量降低。NaCl 胁迫下,Na⁺ 的相对含量变化与 K⁺ 相反,即前者浓度增加,后者浓度降低,反之亦然,二者呈“此消彼涨”的变化趋势;而 Na⁺ 相对含量的变化与 Ca²⁺ 的变化却存在一定的“平行性”,即前者浓度较低时后者浓度也较低,而前者浓度较高时后者浓度也较高。以上结果表明,Na⁺ 对 K⁺ 的吸收有一定的拮抗性。

NaCl 胁迫下,添加外源钙后青钱柳幼苗根部各组织中离子的相对含量见表 1。由表 1 可见,对照(C_0)与未加外源钙的高浓度 NaCl 处理(C_1)相比,供试幼苗根系的 Na⁺ 和 Cl⁻ 的相对含量增加,K⁺、Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 的相对含量降低。加入外源钙后,不同离子在不同组织中的变化差异较大,其中,3.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$ 处理下,Na⁺ 的相对含量明显降低,K⁺ 的相对含量则有所增加。外源钙对 Cl⁻ 相对含量的变化影响不明显,仅在 3.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$ 处理时略有下降。在 1.0、2.0 和 3.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$ 处理下,Ca²⁺ 的相对含量基本保持在一个稳定的水平,而 Mg²⁺ 相对含量的变化则较为复杂,但总体上并无明显变化。综上所述,在 NaCl 胁迫条件下,添加 3.0 $g \cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$ 能促进 K⁺ 的吸收,对 Na⁺ 有明显的抑制作用,对 Cl⁻ 作用不明显。

表1 NaCl胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根部各层组织中离子的相对含量($\bar{X} \pm SD$)Table 1 Relative contents of ions in root tissues of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedlings under NaCl stress and calcium regulation ($\bar{X} \pm SD$)

处理组 ¹⁾ Treat- ment ¹⁾	浓度/g · L ⁻¹ Concentration		组织 Tissue	离子的相对含量/% Relative content of ion				
	NaCl	Ca(NO ₃) ₂		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻
S ₀	0.0	0.0	表皮 Epidermis	3.84 ± 1.25	41.87 ± 2.36	29.27 ± 0.47	9.31 ± 0.39	15.71 ± 0.21
			皮层 Cortex	2.67 ± 0.36	55.00 ± 2.36	28.01 ± 2.96	1.48 ± 0.47	12.84 ± 1.25
			中柱 Stele	12.80 ± 2.15	33.40 ± 3.56	38.97 ± 2.33	6.31 ± 1.29	8.53 ± 1.26
S ₁	1.0	0.0	表皮 Epidermis	11.95 ± 2.36	25.26 ± 2.36	41.95 ± 2.36	6.66 ± 0.74	14.18 ± 1.36
			皮层 Cortex	6.18 ± 1.45	46.68 ± 0.36	20.49 ± 0.14	8.91 ± 1.22	17.74 ± 0.22
			中柱 Stele	14.37 ± 0.24	23.67 ± 5.26	44.52 ± 0.24	6.53 ± 0.18	10.92 ± 1.36
S ₂	3.0	0.0	表皮 Epidermis	11.14 ± 3.65	33.92 ± 2.03	12.64 ± 1.59	6.39 ± 1.25	35.92 ± 0.25
			皮层 Cortex	16.03 ± 0.85	32.34 ± 2.36	8.14 ± 1.35	5.92 ± 1.74	37.57 ± 3.69
			中柱 Stele	20.63 ± 0.22	22.61 ± 2.39	20.59 ± 0.45	6.61 ± 0.62	29.55 ± 0.55
S ₃	5.0	0.0	表皮 Epidermis	17.44 ± 1.56	24.84 ± 1.25	22.11 ± 0.25	2.31 ± 0.47	33.30 ± 0.58
			皮层 Cortex	12.57 ± 0.59	32.91 ± 1.25	10.96 ± 3.33	2.77 ± 1.36	40.79 ± 1.46
			中柱 Stele	15.06 ± 0.47	30.34 ± 2.45	15.06 ± 0.47	1.45 ± 0.78	38.12 ± 2.39
C ₀	0.0	0.0	表皮 Epidermis	6.83 ± 0.36	42.21 ± 2.03	28.79 ± 1.36	10.15 ± 4.26	12.02 ± 2.65
			皮层 Cortex	2.11 ± 0.26	44.66 ± 1.59	30.36 ± 0.25	8.00 ± 2.22	14.87 ± 2.13
			中柱 Stele	5.81 ± 2.33	40.76 ± 3.56	33.79 ± 0.13	9.68 ± 0.62	9.96 ± 0.25
C ₁	5.0	0.0	表皮 Epidermis	23.03 ± 0.69	18.57 ± 0.14	10.56 ± 3.21	4.12 ± 0.21	43.73 ± 5.26
			皮层 Cortex	18.26 ± 0.85	23.50 ± 2.36	5.78 ± 0.53	2.77 ± 0.18	49.68 ± 0.17
			中柱 Stele	17.93 ± 1.24	20.38 ± 2.29	10.90 ± 1.28	0.08 ± 0.01	50.73 ± 3.26
C ₂	5.0	1.0	表皮 Epidermis	24.67 ± 5.36	2.35 ± 0.58	30.28 ± 0.14	11.09 ± 0.28	31.61 ± 2.31
			皮层 Cortex	27.64 ± 1.68	2.03 ± 1.87	17.14 ± 0.18	4.27 ± 0.11	48.92 ± 8.25
			中柱 Stele	27.10 ± 0.77	2.09 ± 0.21	22.98 ± 1.57	2.75 ± 0.06	45.08 ± 1.26
C ₃	5.0	2.0	表皮 Epidermis	23.04 ± 2.39	16.08 ± 0.85	18.08 ± 2.58	2.56 ± 1.03	40.24 ± 1.58
			皮层 Cortex	27.60 ± 0.69	14.43 ± 1.36	7.71 ± 2.36	1.21 ± 1.25	49.05 ± 0.87
			中柱 Stele	24.67 ± 0.15	2.35 ± 0.21	30.28 ± 2.63	11.09 ± 0.87	31.61 ± 2.69
C ₄	5.0	3.0	表皮 Epidermis	5.59 ± 0.36	27.67 ± 1.69	32.09 ± 1.69	5.05 ± 1.14	29.60 ± 2.59
			皮层 Cortex	11.32 ± 1.26	35.64 ± 4.26	14.31 ± 0.11	4.72 ± 0.74	34.01 ± 2.31
			中柱 Stele	11.98 ± 2.85	24.61 ± 2.55	22.59 ± 2.77	2.08 ± 0.98	38.74 ± 1.59

¹⁾ S: 种子于2005年10月采自江西庐山, 酸蚀后用经GA处理的湿沙层积2个月 The seeds were collected from Mt. Lushan of Jiangxi Province in Oct. 2005, which were treated by sulfuric acid and then stratified in wet sand with GA for two months; C: 种子于2004年10月采自江西赣州, 湿沙自然层积14个月 The seeds were collected from Ganzhou of Jiangxi Province in Oct. 2004, which were stratified by wet sand in natural condition for fourteen months.

2.2 NaCl胁迫及钙调节下不同离子在青钱柳幼苗根部各组织中的分布比率

NaCl胁迫及钙调节下, 不同离子在青钱柳幼苗根部各组织中的分布比率见表2。由表2可知, NaCl胁迫下, K⁺在根部各组织中的相对含量高于Na⁺。表皮和皮层中的Na⁺/K⁺值明显高于对照(S₀)组, 中柱中的Na⁺/K⁺值则稍高于对照(S₀)。在表皮中, Na⁺的相对含量低于Ca²⁺; 但在皮层中, 随着NaCl浓度的增加, Na⁺的相对含量增加, 并最终高于Ca²⁺; 在中柱中, 随着NaCl浓度的增加, Na⁺的相对含量也增加, 并接近Ca²⁺的浓度; 从根系表皮到中

柱, 随NaCl浓度的增高, Na⁺/Ca²⁺比值增大。

未添加外源钙的NaCl处理(C₁)中, 从根系表皮到中柱的Na⁺/K⁺和Na⁺/Ca²⁺值均高于对照(C₀); 但加入外源钙后, Na⁺/K⁺值则表现为外源钙浓度低时增高、浓度高时减小的变化趋势, 即Na⁺的相对含量显著降低, 并最终低于K⁺的相对含量。添加高浓度外源钙后, Na⁺/Ca²⁺值显著降低, 主要是因为Na⁺的相对含量低于Ca²⁺的相对含量所致。

2.3 NaCl胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根部各组织的离子运输

通过研究NaCl胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根

部不同组织间离子相对含量的比值(表3)可判断不同离子在根部的运输情况。研究发现,NaCl 胁迫下,随 NaCl 浓度的增加,进入中柱和皮层的 Cl^- 量增多。 Na^+ 由表皮运输到皮层的比率变化不明显,但由皮层到中柱的量却有减少的趋势,说明大部分 Na^+ 沉积在根部的皮层及外表皮上。 K^+ 由表皮到皮层的

比率变化较小,但由皮层进入中柱的比率逐渐增多。 Ca^{2+} 由表皮到皮层的量减少,由皮层到中柱的量增加,但在 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下, Ca^{2+} 进入中柱的量明显降低。 Mg^{2+} 由表皮进入皮层的量增加,但由皮层进入中柱的量却减少。

表2 NaCl 胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根部各组织中 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的比率

Table 2 The ratios of Na^+ , K^+ and Ca^{2+} in root tissues of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedlings under NaCl stress and calcium regulation

处理组 ¹⁾ Treatment ¹⁾	浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ Concentration		表皮中的离子比 Ion ratio in epidermis		皮层中的离子比 Ion ratio in cortex		中柱中的离子比 Ion ratio in stele	
	NaCl	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	Na^+/K^+	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$
S ₀	0.0	0.0	0.09	0.13	0.05	0.10	0.38	0.33
S ₁	1.0	0.0	0.47	0.28	0.13	0.30	0.61	0.32
S ₂	3.0	0.0	0.33	0.88	0.50	1.97	0.91	1.00
S ₃	5.0	0.0	0.70	0.79	0.38	1.15	0.50	1.00
C ₀	0.0	0.0	0.16	0.24	0.05	0.07	0.14	0.17
C ₁	5.0	0.0	1.24	2.18	0.78	3.16	0.88	1.64
C ₂	5.0	1.0	10.50	0.81	13.62	1.61	12.97	1.18
C ₃	5.0	2.0	1.43	1.27	1.91	3.58	10.50	0.81
C ₄	5.0	3.0	0.20	0.17	0.32	0.79	0.49	0.53

¹⁾ S: 种子于2005年10月采自江西庐山, 酸蚀后用经 GA 处理的湿沙层积2个月 The seeds were collected from Mt. Lushan of Jiangxi Province in Oct. 2005, which were treated by sulfuric acid and then stratified in wet sand with GA for two months; C: 种子于2004年10月采自江西赣州, 湿沙自然层积14个月 The seeds were collected from Ganzhou of Jiangxi Province in Oct. 2004, which were stratified by wet sand in natural condition for fourteen months.

表3 NaCl 胁迫及钙调节下青钱柳幼苗根部各组织间离子相对含量的比值

Table 3 Ratio of ion relative contents among different tissues in root of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja seedlings under NaCl stress and calcium regulation

处理组 ¹⁾ Treatment ¹⁾	浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ Concentration		皮层与表皮中离子相对含量的比值 Ratio of ion relative content in cortex to epidermis					中柱与皮层中离子相对含量的比值 Ratio of ion relative content in stele to cortex				
	NaCl	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-
S ₀	0.0	0.0	0.70	1.31	0.96	0.16	0.82	4.79	0.61	1.39	4.26	0.66
S ₁	1.0	0.0	0.52	1.85	0.49	1.34	1.25	2.33	0.51	2.17	0.73	0.62
S ₂	3.0	0.0	1.44	0.95	0.64	0.93	1.05	1.29	0.70	2.53	1.12	0.79
S ₃	5.0	0.0	0.72	1.32	0.50	1.20	1.22	1.20	0.92	1.37	0.52	0.93
C ₀	0.0	0.0	0.31	1.06	1.05	0.79	1.24	2.75	0.91	1.11	1.21	0.67
C ₁	5.0	0.0	0.79	1.27	0.55	0.67	1.14	0.98	0.87	1.89	0.03	1.02
C ₂	5.0	1.0	1.12	0.86	0.57	0.39	1.55	0.98	1.03	1.34	0.64	0.92
C ₃	5.0	2.0	1.20	0.90	0.43	0.47	1.22	0.89	0.16	3.93	9.17	0.64
C ₄	5.0	3.0	2.03	1.29	0.45	0.93	1.15	1.06	0.69	1.58	0.44	1.14

¹⁾ S: 种子于2005年10月采自江西庐山, 酸蚀后用经 GA 处理的湿沙层积2个月 The seeds were collected from Mt. Lushan of Jiangxi Province in Oct. 2005, which were treated by sulfuric acid and then stratified in wet sand with GA for two months; C: 种子于2004年10月采自江西赣州, 湿沙自然层积14个月 The seeds were collected from Ganzhou of Jiangxi Province in Oct. 2004, which were stratified by wet sand in natural condition for fourteen months.

在添加外源钙的条件下, 青钱柳幼苗根部不同组织间离子相对含量的比值变化见表3。其中, Cl^- 的分布比率变化不明显; Na^+ 由表皮进入到皮层的比率增加, 从皮层进入中柱的分布比率整体呈下降

趋势; K^+ 的分布比率总体水平与对照(C₀)相近; 除对照(C₀)外, Ca^{2+} 由表皮到皮层的分布比率在不同浓度 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理组中的结果基本一致, 由皮层到中柱的分布比率除 C₃ 处理组外整体与对照(C₀)接

近; Mg^{2+} 的分布比率变化复杂, 趋势不明显。

以上结果表明, Cl^- 通过质外体和共质体途径大量进入植株根系中柱内, 对植株造成致命伤害; 由于植物自身的调节作用(如 $H^+ - ATPase$ 产生的质子泵及 Ca^{2+} 的抑制作用), Na^+ 由皮层进入中柱的分布比率与盐浓度非正相关; $NaCl$ 胁迫下, Ca^{2+} 和 Na^+ 分布比率呈“平行关系”; Na^+ 与 K^+ 在根部各组织分布比率大小的变化相反。

3 结论和讨论

$NaCl$ 胁迫下, 供试青钱柳幼苗根部各组织离子分布受到显著影响, Na^+ 和 Cl^- 的相对含量增加, K^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 的相对含量降低。随着 $NaCl$ 浓度的增加, 根部各组织中的 Na^+/Ca^{2+} 值增大; 在表皮和皮层中, Na^+/K^+ 值也明显高于对照 (S_0); Na^+ 对 K^+ 的吸收有拮抗作用, 而 Ca^{2+} 对 Na^+ 的毒害具有一定的抑制性。整体而言, 随着 $NaCl$ 浓度的增加, 进入中柱和皮层的 Cl^- 量增多; 大部分 Na^+ 沉积在皮层及外表皮上; K^+ 由皮层进入中柱的比率增大; Ca^{2+} 由表皮到皮层的比率减少, 由皮层到中柱的比率增大; Mg^{2+} 由表皮进入皮层的量增加, 但由皮层进入中柱的量减少。根据实验结果初步判定, 青钱柳幼苗生长的耐盐阈值约为 $1.0 g \cdot L^{-1}$ 。

钙调节下, 供试青钱柳幼苗根部各组织中的离子分布比率差异较大。 $3.0 g \cdot L^{-1} Ca(NO_3)_2$ 作用下, Na^+ 的相对含量明显降低, K^+ 的相对含量增加, Ca^{2+} 的相对含量基本不变, Mg^{2+} 的相对含量变化较为复杂, 但高浓度 $Ca(NO_3)_2$ 对 Cl^- 的相对含量影响较小, 表明外源钙能促进 K^+ 的吸收, 对 Na^+ 有明显的抑制作用, 对 Cl^- 作用不明显。根部不同组织中 Na^+/K^+ 值表现为在低浓度 $Ca(NO_3)_2$ 处理下增高、在高浓度 $Ca(NO_3)_2$ 处理下减小的趋势; 在高浓度 $Ca(NO_3)_2$ 调节下, Na^+/Ca^{2+} 值显著降低。在根部各组织中, Cl^- 的分布比率变化不明显; Na^+ 由表皮进入皮层的量增加, 从皮层进入中柱的量下降; K^+ 的分布比率变化不大; Ca^{2+} 由皮层进入中柱的分布比率与对照 (C_0) 相近; Mg^{2+} 的分布比率变化复杂, 趋势不明显。相对而言, 在不同浓度 $Ca(NO_3)_2$ 处理组中, $3.0 g \cdot L^{-1} Ca(NO_3)_2$ 处理组的缓解效果较明显。

盐胁迫对植物的影响包括以下 3 个方面: 一是单盐毒害, 即过量有毒的 Na^+ 和 Cl^- 导致细胞膜透性增大, 电解质外渗, 细胞代谢失调; 二是相对较高浓度的 Na^+ 和 Cl^- 干扰了植物对营养元素的吸收, 造成植物体内营养元素的亏缺, 从而影响其生长发育; 三是可溶性盐使营养介质的水势降低从而限制植物根系对水分的吸收, 导致植物出现生理干旱。作者应用 X-射线能谱微区分析法发现, 高浓度 $NaCl$ 胁迫下, 供试青钱柳幼苗根部不同组织中不同离子的分布均发生明显变化, Na^+ 和 Cl^- 出现不同程度的积累, K^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 则呈现出下降趋势, 表明单盐胁迫使细胞中的离子稳态遭到破坏; $5.0 g \cdot L^{-1} NaCl$ 胁迫下加入 $3.0 g \cdot L^{-1} Ca(NO_3)_2$ 后, Na^+ 在表皮、皮层和中柱中的相对含量明显降低, K^+ 的相对含量增加, 但 Cl^- 在表皮、皮层和中柱的相对含量仍然很高, 说明添加外源钙不能有效缓解 $NaCl$ 对根部各组织离子分布平衡的破坏作用。

实验过程中还发现, 无论是否添加外源钙, 植株均表现出严重的尖焦现象, 这是由于 Cl^- 通过质外体→共质体→质外体这一途径侵入植物根系输导组织后, 最终造成单盐毒害。就本实验结果来看, 初步认为 $5.0 g \cdot L^{-1} NaCl$ 胁迫下, 外源钙能对 Na^+ 产生一定的抑制作用, 促进 K^+ 的吸收, 但由于对 Cl^- 的影响非常小, 导致 Ca^{2+} 的缓解作用不明显。

参考文献:

- [1] Lambers H. Dryland salinity: a key environmental issue in southern Australia[J]. *Plant Soil*, 2003, 257: 5-7.
- [2] 蔡清泉. 我国海涂资源开发利用的现状和展望[J]. *国土与自然资源研究*, 1990(2): 33-37.
- [3] 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.
- [4] Ward J M, Hirschi K D, Sze H. Plants pass the salt[J]. *Trends Plant Sci*, 2003, 8(5): 200-201.
- [5] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 971-976.
- [6] 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.
- [7] Li Q, Shen Y B, Wang S S. X-ray microanalysis of Ce and ions contents in stem tip meristem and leaves of *Populus deltoids* Bortr. cv 'Lux' grown in nutrient solutions with different level of $Ce(NO_3)_3$ treatment[J]. *Journal of Beijing Forestry University (English ed.)*, 1996, 5(2): 47-55.
- [8] 徐呈祥. 硅缓解金丝比小枣盐胁迫的效应与机制[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.