

文章编号: 100121498(2009)0320428206

# NaCl胁迫对构树幼苗叶片水势、光合作用及 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 吸收和分配的影响

丁菲<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 张国武<sup>2</sup>, 李玉平<sup>1</sup>, 杜天真<sup>1\*</sup>

(1 江西农业大学园林与艺术学院, 江西 南昌 330045 2 国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524000)

**摘要:** 将 1 年生构树幼苗置于不同 NaCl 浓度的土壤下, 就其叶片水势、光合特性、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  在不同器官的吸收和分配对盐胁迫响应进行研究。结果显示: 当土壤 NaCl 浓度大于  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 构树幼苗叶片的水势显著降低。构树幼苗净光合速率、蒸腾速率及气孔导度随土壤 NaCl 浓度的增加而下降, 净光合速率下降的主要因素是非气孔限制。在盐胁迫下构树选择  $\text{Na}^+$  而排斥  $\text{K}^+$ , 叶片中积累的  $\text{Na}^+$  大于根系, 这与多数非盐生植物所具有的排钠特性不同。盐胁迫下净光合速率与叶片水势呈显著的正相关, 叶片中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量与叶片的水势分别成显著的负相关和正相关。

**关键词:** 构树; 盐胁迫; 叶水势; 蒸腾速率; 气孔导度

中图分类号: S722.3+6 文献标识码: A

## Effect of NaCl Stress on Leaf Water Potential, Photosynthesis and $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ Absorption and Distribution of *Broussonetia papyrifera* Seedlings

DING Fei<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, ZHANG Guowu<sup>2</sup>, LI Yuping<sup>1</sup>, DU Tianzheng<sup>1\*</sup>

(1 Garden and Art College Jiangxi Agricultural University Nanchang 330045 Jiangxi China 2 China Eucalypt Research and Development Centre of State Forestry Administration Zhanjiang 524022, Guangdong China)

**Abstract** One year old seedlings of *Broussonetia papyrifera* were subjected to the soil salinity stress with different NaCl concentrations. The leaf water potential, photosynthesis and the absorption and distribution of  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  in the seedlings were studied. The result showed that when soil NaCl concentration was higher than  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the leaf water potential of *Broussonetia papyrifera* seedlings decreased significantly. The net photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance went down as the NaCl concentration increased. Nonstomatal restriction was the main cause for the reduced plant photosynthetic rate of *Broussonetia papyrifera*. The content of  $\text{Na}^+$  in leaves was higher than in roots under salt stress, which was different from most nonhalophyte. The leaf water potential had significant positive correlation with net photosynthetic rate. There were significant positive and negative correlation of leaf water potential with the content of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in leaves, respectively.

**Key words** *Broussonetia papyrifera*; salt stress; leaf water potential; transpiration; stomatal conductance

构树 (*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent.) 分布广, 整株均有利用价值。东汉以来, 既是制布原料, 又是造纸原料并且是良好的禽畜饲料原料, 心材可做木板、炭薪, 构树还有较高的药用价值。构树适应

收稿日期: 2008212228

基金项目: 国家林业局重点研究项目/构树种质资源及多目标利用营林技术研究0(2006224), 教育部高等学校博士点专项基金/构树特殊抗逆性的生理及分子机理研究0(20060410002), 国家科技部/林木种质资源标准化整理、整合及共享试点0(2004DKA30400206.3)

作者简介: 丁菲(1968), 女, 江西修水人, 在读博士, 主要从事森林培育和林木抗性研究。

\* 本文通讯作者

性强,具有较强的抗逆性,能吸附  $\text{SO}_2$ 、滞留烟尘,减少酸雨的生成和腐蚀,并且生长快,是优良的绿化树种及治理石漠化和盐碱地的理想树种<sup>[1-4]</sup>。资料显示构树具有较好的耐盐性,但关于构树耐盐性的研究报告却很少,仅有杨帆等<sup>[5]</sup>对其抗氧化酶系统在盐胁迫下的响应进行过报道。目前普遍认为盐胁迫对植物的伤害主要包括渗透胁迫、离子毒害和细胞膜损伤3个方面<sup>[6-8]</sup>。本文对构树幼苗在盐胁迫下叶片的水势、光合作用及植株对  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的吸收和分布进行了研究,为开发和选育耐盐植物资源提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

2007年11月种子采于江西农业大学校园内1株健康的壮龄构树,2008年3月在江西农业大学科技园苗圃播种育苗,5月选择健康状况良好,生长势基本一致的幼苗移栽到盆内进行正常管理,7月底苗木地径  $0.466 \pm 0.087$  cm,苗高  $30.6 \pm 1.05$  cm,8月1日开始 NaCl胁迫处理。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 盆栽实验在江西农业大学科技园塑料大棚内进行。土壤取自科技园内菜园土,土壤为红壤,pH值为5.1,有机质  $25.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全N  $1.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全P  $0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全K  $15.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效P  $4.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效K  $62.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤中  $\text{Na}^+$  含量  $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , $\text{Cl}^-$  含量  $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每盆定植1株幼苗,装土10 kg,移栽上盆之后,保证每盆苗的管理一致。经过缓苗期后,再选取生长状况相同的健康幼苗进行单因素完全随机试验。NaCl胁迫分4个处理,NaCl含量(以干土质量计算)分别为  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (S1),  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (S2),  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (S3)和  $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (S4),以不施入NaCl处理为对照(CK)。每处理6株苗。实验开始时各盆中土壤含水量大致相等。于8月1日、2日分两次分别将NaCl溶解于0.4 kg水中施入各盆中以达到预定土壤含盐量,对照只浇等量水。此后,每3天各盆浇等量水1次。为保证处理盆中盐分不损失,盆下放置塑料托盘一个,浇水后,将盘内渗出水倒回至盆中,以免NaCl随水流失。盐胁迫第28天(8月29日)上午9至11点测定幼苗的光合指标及叶片水势,再取植株的根、茎和叶,分别烘干称质量后粉碎,用于各器官中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的含量测定。

1.2.2 测定方法 气体交换参数使用 Li6400便携式光合测定仪测定,每株选取位于幼苗植株中部的功能叶片6片,测定净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )及水分利用效率(WUE)。气孔限制值  $L_s = 1 - C_i/C_a$  ( $C_a$ 为空气中  $\text{CO}_2$  浓度)。每叶片每数据连续记录5个数值,取平均值。测定时用红蓝光源叶室,光强为  $450 \text{ Lmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,温度为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,空气的流量为  $500 \text{ Lmol} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\text{CO}_2$  浓度为  $370 \text{ Lmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。叶片水室采用压力室法,随机选取植株中部功能叶3片用 Skye数字式植物压力室(SKPM 1400 UK)测定。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的测定用硫酸-高氯酸消煮法处理材料<sup>[9]</sup>,原子吸收分光光度计测定。

植株对K的选择性运输系数( $\text{TS}_{X, \text{Na}}$ )按Pitman提出的公式<sup>[10]</sup>计算:  $\text{TS}_{X, \text{Na}} = \{[\text{K}]_{\text{叶}}/[\text{Na}]_{\text{叶}}\} / \{[\text{K}]_{\text{根}}/[\text{Na}]_{\text{根}}\}$ 。

以上测定都是每处理6株,共30株。

1.2.3 数据处理 运用 Excel2000结合 SPSS 11.5 软件分析数据及绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤盐胁迫对构树幼苗叶片水势的影响

如图1所示,构树幼苗叶片的水势随土壤NaCl浓度的增加而降低,S1、S2处理与CK差异不显著,其余2个盐处理均显著低于CK( $P < 0.01$ )。土壤NaCl浓度为  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,分别比CK下降了46%和75%。

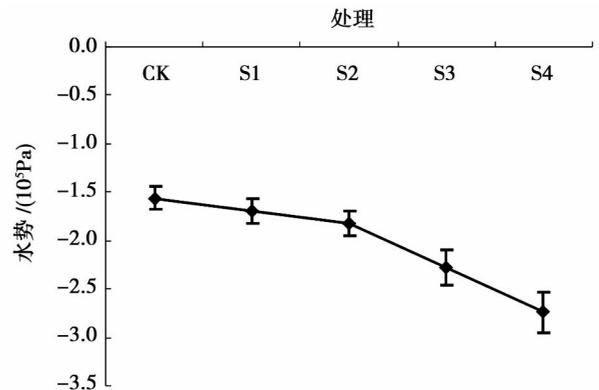


图1 盐胁迫对构树幼苗叶片水势的影响

### 2.2 土壤盐胁迫对构树幼苗叶片气体交换参数的影响

实验结果如图2所示。构树幼苗的净光合速率随着土壤NaCl浓度的增加而下降,S1和S2处理与CK差异不显著。当浓度大于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之后下降幅

度明显提高, S3和 S4处理显著低于 CK( $P < 0.01$ ), 仅是 CK的 58.4%和 36.8%。

构树幼苗的蒸腾速率随着土壤 NaCl浓度的增加而减少, 4个盐处理均显著低于 CK( $P < 0.01$ ), 分别下降了 16.8%、27.7%、33.8%和 50.3%。

气孔作为植物叶片最重要的交换通道, 是气体和水气扩散进入叶内或蒸腾的必经之路。气孔导度随着土壤 NaCl浓度的增加而减少, 4个盐处理均显著低于 CK( $P < 0.01$ )。上升至  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 气孔导度下降最剧烈, 减少了 52.3%。而由  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  上升至  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 下降趋势较为缓和, S3比 CK减少 56.2%。大于  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之后下降幅度又有所增加, S4比对照下降 72.3%。

当土壤 NaCl浓度小于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 水分利用效率随着浓度升高而缓慢上升, S1、S2与 CK之间差异均不显著, 大于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之后又明显下降, S3和 S4

之间差异不显著, 均显著低于 CK及其它盐处理( $P < 0.01$ ), 分别比 CK下降了 29%和 34.5%。说明此时利用水分的能力下降。

当土壤 NaCl浓度升高至  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 胞间  $\text{CO}_2$ 浓度表现下降的趋势, S1与 CK差异不显著, S2显著低于 CK( $P < 0.05$ ), 下降了 18.3%。浓度大于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之后又缓慢上升, S3、S4与 S2差异不显著, 仍显著低于 CK( $P < 0.05$ ), 比 CK减少了 16.1%和 15.1%。

气孔限制值表现出先升高后下降的趋势, 当土壤 NaCl浓度小于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 气孔限制值随浓度的升高明显增加, S1和 S2均显著高于 CK( $P < 0.05$ ), 而大于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之后逐渐下降, S3与 S2差异不显著, S4已经显著低于 S2( $P < 0.05$ ), 下降至与 S1相当的水平, 仍显著高于 CK( $P < 0.05$ )。

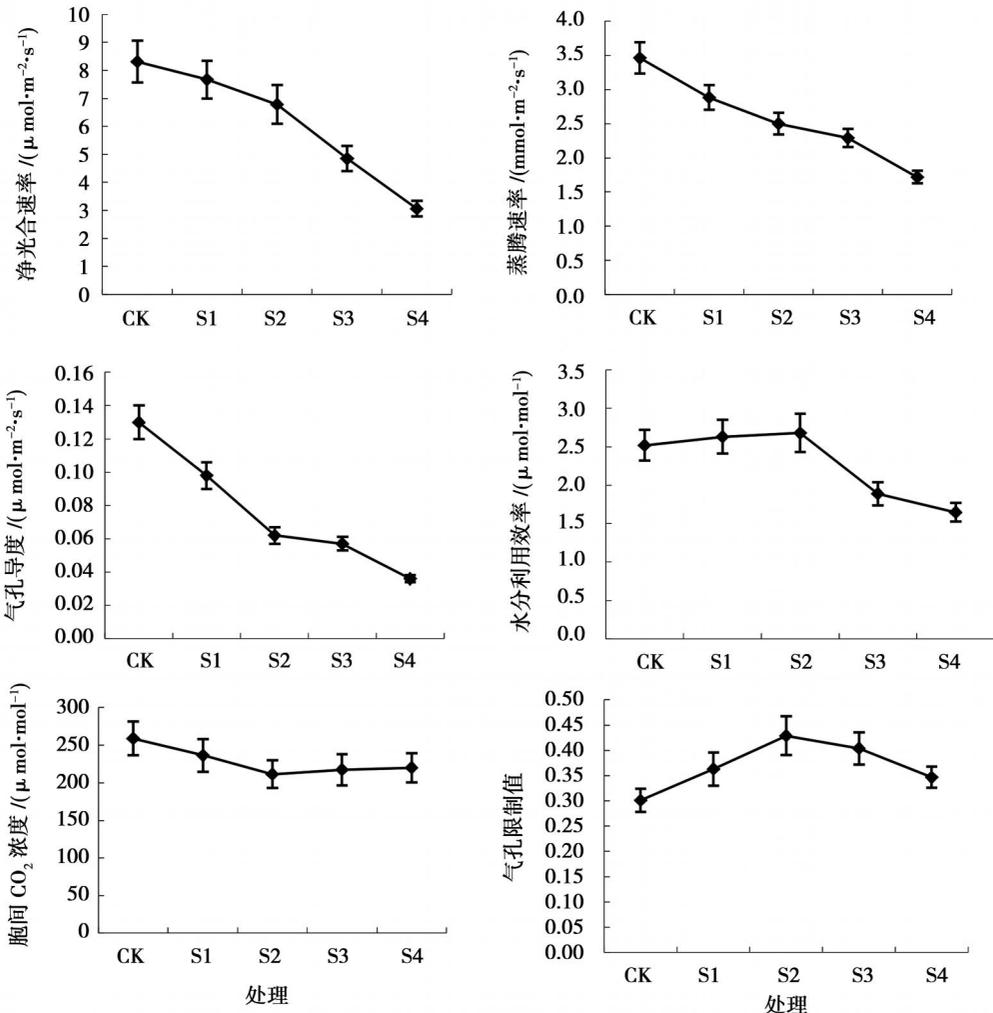


图 2 盐胁迫对构树幼苗叶片气体交换参数的影响

### 2.3 土壤盐胁迫下构树幼苗 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>的变化及在不同部位的分布

由于对照中土壤的 Na<sup>+</sup> 含量很低, 幼苗各器官中 Na<sup>+</sup> 含量也都很少。图 3 表明, 除 CK 外, 其他各处理下均呈现出明显的叶中 Na<sup>+</sup> 含量 > 茎中 Na<sup>+</sup> 含量 > 根中 Na<sup>+</sup> 含量的规律。各器官的 Na<sup>+</sup> 含量均随土壤盐浓度的增加而明显升高 (P < 0.01), 叶片中的 Na<sup>+</sup> 含量的增加最明显, S3 处理下的 Na<sup>+</sup> 含量约为对照的 45 倍, S4 处理下达到对照的近 80 倍, 说明当土壤 NaCl 浓度由 3 g# kg<sup>-1</sup> 上升至 4 g# kg<sup>-1</sup>, 增加的幅度明显提高。5 个处理之间, 根、茎、叶中 Na<sup>+</sup> 含量的差异均极显著 (P < 0.01), 说明土壤 NaCl 浓度对构树幼苗体内各部位中 Na<sup>+</sup> 含量有着很大的影响。

如图 4 所示, 叶的 K<sup>+</sup> 含量始终明显高于根和茎, 各器官的 K<sup>+</sup> 含量均随盐浓度的升高而下降, 根部的下降最为缓慢。方差分析表明, 土壤 NaCl 浓度

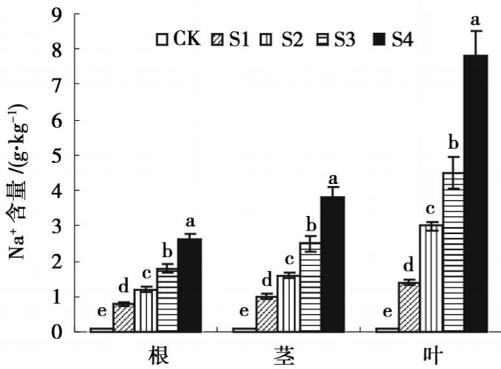


图 3 NaCl胁迫对构树幼苗不同器官 Na<sup>+</sup> 含量的影响

对根部 K<sup>+</sup> 含量没有显著影响, 对茎和叶中的 K<sup>+</sup> 含量影响显著 (P < 0.05)。多重比较结果显示, CK, S1, S2 和 S3 处理在根和叶中 K<sup>+</sup> 含量差异不显著, 说明土壤 NaCl 浓度小于 3 g# kg<sup>-1</sup> 时, 幼苗体内还能维持较高的 K<sup>+</sup> 含量。S3 处理下叶片的 K<sup>+</sup> 含量仅比对照下降 9%, 而 S4 处理下的含量比对照减少了 26.3%。说明当土壤 NaCl 浓度由 3 g# kg<sup>-1</sup> 上升到 4 g# kg<sup>-1</sup>, 叶部 K<sup>+</sup> 含量大幅度下降。

上述表明, 加盐处理植株根、茎、叶各器官 Na<sup>+</sup> 含量明显高于 CK, Na<sup>+</sup> 的大量进入应该是植物主动吸收离子来降低细胞的渗透势, 调节水分平衡以适应逆境的反应途径之一。另外, 根据各处理不同器官对 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 的吸收和分配, 叶片应该是最先出现危害症状的器官, 这与作者实验观察到的 S3、S4 处理后期幼苗由于 Na<sup>+</sup> 过量造成毒害使叶缘出现焦化、叶脉失绿等现象是一致的。

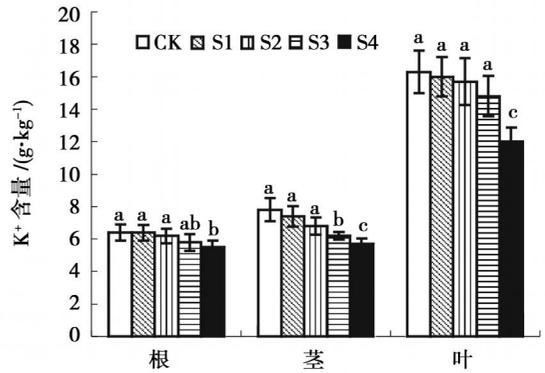


图 4 NaCl胁迫对构树幼苗不同器官 K<sup>+</sup> 含量的影响

### 2.4 盐胁迫对构树幼苗的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 离子平衡及运输的影响

由表 1 可以看出, 幼苗的各器官中 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 均呈现出随着土壤 NaCl 浓度增加而下降的趋势, 处理之间差异显著 (P < 0.01), 下降的幅度随浓度的增加而逐渐减少。K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 是衡量植物耐盐性的一个重要指标<sup>[11]</sup>。在 CK, S1, S2 和 S3 处理中, 叶片中的 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 高于根和茎。说明土壤 NaCl 浓度小于 3 g# kg<sup>-1</sup>, 构树幼苗能够通过离子平衡让绿叶维持一个较高的 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup>, 尽量保证光合器官和幼嫩组织少受盐害。而当土壤 NaCl 浓度高于 3 g# kg<sup>-1</sup> 后, 这种调节离子平衡的能力被破坏, 叶片开始受到明显的盐害。构树的所有器官在 5 个处理下的 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 均大于 1, 植株未出现死亡, 这与 Greenway 等<sup>[12]</sup>

提出的淡土植物 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 值应高于 1 相一致。植株对 K<sup>+</sup> 的选择性运输系数 (TS<sub>K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup></sub>) 的变化表明幼苗对 K<sup>+</sup> 的选择性运输能力随着浓度的升高而降低, 4 个盐处理均显著低于 CK (P < 0.01), 但土壤 NaCl 浓度为 2 g# kg<sup>-1</sup> 和 3 g# kg<sup>-1</sup> 之间的差异不显著。

表 1 NaCl 胁迫对构树幼苗 K<sup>+</sup> / Na<sup>+</sup> 及选择性运输的影响

处理	K <sup>+</sup> / Na <sup>+</sup>			TS <sub>K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup></sub>
	根	茎	叶	
CK	64.30 ± 7.23	78.10 ± 8.67	163.00 ± 18.62	2.58 ± 0.18
S1	8.05 ± 0.86	7.40 ± 0.65	11.43 ± 1.07	1.45 ± 0.18
S2	5.17 ± 0.55	4.25 ± 0.52	5.23 ± 0.46	1.05 ± 0.10
S3	3.22 ± 0.21	2.48 ± 0.22	3.29 ± 0.36	1.03 ± 0.08
S4	2.12 ± 0.18	1.50 ± 0.13	1.54 ± 0.15	0.76 ± 0.07

表 2 土壤 NaCl 浓度、叶片水势、光合指标及叶片中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量之间的相关分析

项目	盐浓度	水势	净光合速率	蒸腾速率	气孔导度	水分利用率	叶片 $\text{Na}^+$ 含量	叶片 $\text{K}^+$ 含量
盐浓度	1							
水势	-0.965*	1						
净光合速率	-0.981*	0.997*	1					
蒸腾速率	-0.986*	0.934	0.951*	1				
气孔导度	-0.966*	0.869	0.901*	0.981*	1			
水分利用率	-0.844	0.939	0.923*	0.765	0.679	1		
叶片 $\text{Na}^+$ 含量	0.983*	-0.984*	-0.989*	-0.976*	-0.929	-0.863*	1	
叶片 $\text{K}^+$ 含量	-0.895	0.965*	0.948	0.885	0.792	0.883	-0.959*	1

注: \*\* 代表显著相关 ( $P < 0.01$ ), \* 代表高度相关 ( $P < 0.05$ )

## 2.5 盐胁迫下构树幼苗叶片水势、光合及 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 含量的相关性分析

相关分析(表 2)表明,水势、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均与土壤 NaCl 浓度成显著的负相关,叶片  $\text{Na}^+$  含量与土壤 NaCl 浓度成显著的正相关,叶片  $\text{K}^+$  含量与土壤 NaCl 浓度成高度负相关。净光合速率、蒸腾速率与叶片中  $\text{Na}^+$  含量呈显著的负相关,与叶片中  $\text{K}^+$  含量呈显著的正相关,水分利用效率与叶片中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量分别呈高度的负相关和正相关。

## 3 结论与讨论

### 3.1 构树幼苗叶片水势对盐胁迫的响应

实验中,土壤 NaCl 浓度为  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时的叶片与对照叶片之间的水势差异不大,说明此时植株未出现明显的缺水。根据 Levitt 的定义,如果盐浓度足以降低植物水势 ( $0.5 \sim 1$ )  $\times 10^5 \text{ Pa}$  时,会对植物产生盐害<sup>[13]</sup>。当土壤 NaCl 浓度为  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,叶片水势分别比对照下降  $0.7 \times 10^5 \text{ Pa}$  和  $1.18 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,由此判断已经对构树幼苗产生了盐害。

### 3.2 构树幼苗的耐盐特性

盐胁迫造成土壤水势的降低,为了降低植株细胞内的水势,细胞会从外界吸收无机离子参与渗透调节,主要的离子有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$ <sup>[14]</sup>,在不同的植物中这几种离子所占比例是不一样的。不同的植物对离子的选择性也不同,有些植物选择  $\text{K}^+$  而排斥  $\text{Na}^+$  (如很多非盐生植物),有些植物选择  $\text{Na}^+$  而排斥  $\text{K}^+$ <sup>[15]</sup>。实验中,随外界盐浓度的增加,植株内的  $\text{Na}^+$  增加,而  $\text{K}^+$  呈现下降的趋势,这与很多非盐生植物有所不同。研究还表明,构树不仅能从土壤中吸收盐分,而且与许多非盐生植物根中  $\text{Na}^+$  含量明显高于地上部分的排  $\text{Na}^+$  特性<sup>[16-23]</sup> 不同,构树叶片中积累的  $\text{Na}^+$  最多,根系中最少,这与盐生植物枸杞

(*Lycium chinense* Mill)<sup>[24]</sup> 和沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L)<sup>[25]</sup> 的表现一致。构树虽不属于盐生植物,但其耐盐性高于其它许多非盐生植物。估计构树可以将吸收到细胞中的离子贮存于液泡中来减轻盐害。另外,通过盐害症状判断构树可先将盐分转移到老叶中积累,通过老叶的脱落阻止盐分在体内的过量积累,尽量保证成熟叶和新叶少受伤害,以维持植株的光合作用能力。而且,老叶脱落的同时新叶的萌发生长也可以尽量稀释植株体内盐的浓度。作者将进一步研究构树植株内离子的分配及区隔化作用来加以论证。综合分析认为,对构树幼苗的生长开始造成明显伤害的土壤 NaCl 浓度为  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 3.3 盐胁迫下构树幼苗净光合速率下降的原因

很多实验证明,盐胁迫抑制植物的光合作用。但盐胁迫下光合速率降低的原因至今还没有形成统一的认识。逆境胁迫下,引起叶片光合速率降低的自身因素主要有气孔的部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制。Farquhar 等认为可用胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  和气孔限制值  $L_s$  这两个指标来判断引起植株光合速率下降的主要因素。只有当  $C_i$  和净光后速率  $P_n$  两者均减小,且  $L_s$  增大时,才可认为光合速率的下降主要是由于气孔导度的降低;否则,如果  $P_n$  下降,  $C_i$  升高,  $L_s$  减少,便可以肯定光合速率下降的决定因素是叶肉细胞光合活性的降低<sup>[26]</sup>。实验结果表明,当土壤 NaCl 浓度小于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,盐胁迫对构树幼苗的净光合速率影响不显著。土壤 NaCl 浓度大于  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  后,  $P_n$  开始明显降低,而  $C_i$  值缓慢的升高,  $L_s$  值逐渐减少。许大全等认为气孔和非气孔的的界限是  $C_i$  和  $L_s$  的变化方向而不是变化幅度,并且  $C_i$  是头等重要的依据<sup>[27]</sup>。由此判断盐胁迫下构树幼苗光合速率下降的主要因素是非气孔限制。

### 3.4 植物水势与光合指标的相关性

研究植物水势尤其是叶、茎水势与气孔导度、蒸

腾速率以及其他环境因子的关系, 对进行土壤) 植物) 大气循环系统中的水分运动规律及其相互关系研究等方面具有重要的学术意义<sup>[28]</sup>。王兴鹏等<sup>[29-30]</sup>研究发现: 沙地柠条 (*Caragana korschinskii* Kom.) 和赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvet.) 的蒸腾速率与叶片水势之间呈显著的负相关, 韩若霜等<sup>[31]</sup>研究发现杜松 (*Juniperus rigida* Sieb et Zucc.)、新疆杨 (*Populus alba* L. var *pyramidalis* Bge.) 的总光合速率随水势绝对值的增加而呈下降趋势, 蒸腾速率则随着水势绝对值的降低而下降。Mara de Menezes 等<sup>[32]</sup>研究了干旱胁迫下柑桔的叶片水势与气孔导度及蒸腾作用的关系, 发现干旱导致叶片水势与气孔导度的下降, 它们之间呈显著的正相关, 叶片水势的下降加之气孔的关闭使得蒸腾速率下降。但是, 关于盐胁迫下叶水势与气体交换参数之间关系的研究报道还未看到, 本研究发现盐胁迫下构树的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均与叶片水势呈显著的正相关, 与干旱胁迫下柑桔叶片的水势与气孔导度、蒸腾速率的关系相似, 而蒸腾速率和叶片水势的关系与以上学者对沙地柠条、赖草、杜松和新疆杨的研究结果相反, 初步判断主要是由于环境胁迫导致它们之间关系的变化, 这还有待于进一步深入研究论证。

## 参考文献:

- [1] 熊佑清. 构树在绿化中的应用研究 [J]. 中国园林, 2004(8): 72-74
- [2] 罗红艳. 绿化树种对大气  $\text{SO}_2$  的净化作用 [J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 45-49
- [3] 罗盛碧. 石漠化石山造林发展构树大有可为 [J]. 广西林业, 2002(2): 34-35
- [4] 杨祖达. 构树叶资源利用潜力的初步研究 [J]. 湖北林业科技, 2002, 119(1): 1-3
- [5] 杨帆, 丁菲, 杜天真. 构树抗氧化酶系统对盐胁迫的响应 [J]. 浙江林业科技, 2008, 28(1): 1-4
- [6] Greenway H, Munn R. Mechanism of salt tolerance in nonhalophytes [J]. Ann Rev Plant Physiol 1980, 31: 149-190
- [7] 赵可夫. 盐分过多对植物的伤害作用和伤害机理 [J]. 曲阜师范学院学报, 1984(抗盐生理专刊): 63-68
- [8] 廖祥儒, 贺普超, 朱新产. 玉米素对盐渍下葡萄叶片  $\text{H}_2\text{O}_2$  清除系统的影响 [J]. 植物学报, 1997, 39(7): 641-646
- [9] 中华人民共和国林业部技术司. 中国林业标准汇编: 营造林卷, GB7887287[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998
- [10] Pitman M G. Transport across the root and shoot/root interactions [M] // Staples R C, Toennissen G H. Salinity Tolerance in Plants Wiley, New York, 1984: 93-125
- [11] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress [J]. Current Opinion in Plant Biology 2003, 6: 441-445

- [12] Greenway H, Munn R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes [J]. Annual Review Plant Physiology 1980, 31: 149-190
- [13] Levitt J. Responses of Plant to Environmental Stress [M]. New York: Academic Press, 1980: 365-488
- [14] Rodriguez H, Roberts J K M, Jordan W R, et al. Growth, water relations and accumulation of organic and inorganic solutes in roots of maize seedlings during salt stress [J]. Plant Physiol 1997, 113(3): 881-893
- [15] Volkmar K M, Hu Y, Steppuhn H. Physiological responses of plants to salinity: a review [J]. Can J Plant Sci 1998, 78: 19-27
- [16] Lauchli A. Salt exclusion: An adaptation of legumes for crops and pastures under saline conditions [M] // Staples R C, Toennissen G H. Salinity Tolerance in Plants Strategies for Crop Improvement. New York: John Wiley and Sons, 1984: 171-187
- [17] 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(3): 271-277
- [18] 夏阳, 梁慧敏, 束怀瑞, 等. NaCl 胁迫下苹果幼树叶片膜透性、脯氨酸及矿质营养水平的变化 [J]. 果树学报, 2005, 22(1): 1-5
- [19] 苏国兴. 盐胁迫下桑树器官和组织  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  分布特点研究 [J]. 蚕业科学, 2002, 28(3): 256-260
- [20] 王宝山, 邹琦, 赵可夫. NaCl 胁迫对高粱不同器官离子含量的影响 [J]. 作物学报, 2000, 22(6): 845-850
- [21] 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
- [22] 王艳青, 蒋湘宁, 李悦. 盐胁迫对刺槐不同组织及细胞离子吸收和分配的变化 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(1): 18-23
- [23] 冷平生, 柳振亮, 杨宗选. NaCl 胁迫对黄连木实生苗生长和离子吸收的影响 [J]. 北京农学院学报, 2004, 19(1): 7-9
- [24] 魏玉清, 许兴, 王璞. 土壤盐胁迫下宁夏枸杞的生理反应 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 213-217
- [25] 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]. 江苏科学学报, 2007, 19(3): 82-83
- [26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology 1982, 33: 317-345
- [27] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题 [J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244
- [28] 李卫红, 张宏锋, 付爱红, 等. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 744-749
- [29] 王兴鹏, 张维江, 马轶, 等. 盐池沙地柠条的蒸腾速率与叶水势关系的初步研究 [J]. 农业科学研究, 2005, 26(2): 43-47
- [30] 王兴鹏, 文卿琳, 张维江. 毛乌素沙地南缘赖草的蒸腾速率与叶水势关系的初步研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 135-140
- [31] 韩若霜. 杜松、新疆杨光合速率、蒸腾速率与水势的关系研究 [J]. 安徽农学通报, 2007, 13(5): 29-30
- [32] Mara de Menezes de Assis Gomes Ana Maria Magalhaes Andrade Lagoa Camilo Lazaro Medina et al. Interactions between leaf water potential, stomatal conductance and abscisic acid content of orange trees submitted to drought stress [J]. Braz J Plant Physiol 2004, 16(3): 155-161