

不同能源柳无性系对 NaCl 胁迫的生理响应

刘斌, 张文辉*, 马闯, 刘新成

(天津师范大学化学与生命科学学院, 天津 300387)

摘要:为了探索不同能源柳无性系的耐盐潜力,在盆栽条件下,对1年生能源柳无性系2、4、C、E扦插苗设置NaCl盐分梯度,使其土壤含盐量保持在0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,并以乡土旱柳为对照,胁迫45d后,对5个无性系的气体交换参数、保护酶活性和有机渗透调节物质进行测定。研究发现:(1)在低浓度盐胁迫下(土壤含盐量0—0.4%),导致各能源柳光合速率降低的是气孔因素;在高浓度盐胁迫下(土壤含盐量大于0.4%),导致各能源柳无性系光合速率下降的主要是非气孔因素。(2)随着土壤盐浓度的增加,各能源柳无性系的过氧化氢酶(CAT)活性逐渐减小,过氧化物酶(POD)活性先增加后减小,而超氧化物歧化酶(SOD)活性呈现增加的趋势,并且4个能源柳无性系在盐胁迫条件下保护酶活性强于旱柳。(3)在土壤含盐量小于0.6%时,4个能源柳无性系的可溶性蛋白含量始终大于旱柳;在整个胁迫过程中,能源柳C的脯氨酸含量始终大于旱柳。(4)与旱柳相比,4个能源柳无性系在土壤含盐量0—0.4%的土壤中都能良好生长,其中能源柳C的耐盐潜力更大,可在土壤含盐量为0.6%的土壤中正常生长。这说明,4个能源柳无性系均可在天津轻、中度盐渍化地区栽培。

关键词:能源柳;土壤盐浓度;气体交换参数;保护酶;有机渗透调节物质

Physiological responses of different willow's clones to NaCl stress

LIU Bin, ZHANG Wenhui*, MA Chuang, LIU Xincheng

College of Chemistry and Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: We examined the NaCl resistant potential of four energy willow clones (*Salix. dasyclados*, *S. 'Mesu Neko'*, *S. fragilis*, *S. viminalis*) and one wild clone (*S. matsudana*) grown on containers with five soil NaCl concentrations (0, 0.2%, 0.4%, 0.6% and 0.8%). After 45 days' salt stress, gas exchange, protective enzyme activities and the organic substance for osmotic adjustment were measured. We found that (1) the decline of photosynthetic rate of four energy clones was caused by stomata factors when soil NaCl concentration < 0.4%, while it was mainly caused by non-stomata factors when soil NaCl concentration > 0.4%. (2) With NaCl increasing, the CAT activities of four energy clones decreased consistently; POD activities increased at the lower concentrations and then decreased at the higher concentrations; SOD activities consistently increased. The activity of the protective enzymes of four energy clones was higher than that of *S. matsudana* under the salt stress. (3) When soil NaCl concentration was lower than 0.6%, the soluble protein content of four energy clones were all higher than *S. matsudana*, *S. fragilis*'s proline content was higher than *S. matsudana* in the whole process of the salt stress. (4) All seedlings from four energy clones grew well in the soil with 0.4% NaCl concentration compared with *S. matsudana*. *S. fragilis* showed a better endurance under the salt stress and grew well in the soil of 0.6% NaCl concentration. These results indicate that four energy clones can grow well on light and moderate salt soils in Tianjin.

Key Words: energy willow; soil NaCl concentration; gas exchange parameters; protective enzymes; organic osmotic substance

基金项目:中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-05);国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD18B0102)

收稿日期:2009-05-12; 修订日期:2009-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwhckh@163.com

天津市有滨海盐土面积 996.5 km^2 , 土壤含盐量一般在 0.1%—1.5% 之间, 其中氯盐和钠盐是盐渍土壤中的主要盐类^[1-2]。利用盐生植物或耐盐植物绿化是改良土壤的重要方法^[3]。

瑞典能源柳是瑞典农业大学培育的优良能源植物, 萌芽力强, 适应力强, 具有抗病虫害, 净化土壤等作用^[4]。近些年, 国内外学者对能源柳进行了重金属抗性研究^[5]、耐旱研究^[6], 规模化栽培能源柳^[7]和能源柳改善环境等方面的研究^[8], 而不同能源柳无性系的耐盐生理研究罕见报道。2005 年, 在国家林业局 948 项目支持下, 瑞典能源柳被引进到天津蓟县国营苗圃(土壤含盐量 0.10%)、天津农学院苗圃(土壤含盐量 0.75%)和天津津南区国家农业高新技术开发区苗圃(土壤含盐量 0.84%)。经过 4a 多不同盐生境条件的适应性观测试验, 能源柳在天津不同盐生境均能正常生长发育, 表现出很强的耐盐潜力。然而, 对其耐盐机理的研究有待进一步深入。

盐胁迫会影响植物体的生理指标, 抑制植物的生长发育^[9-10]。近年来, 对盐胁迫下植物的光合系统, 保护酶系统和渗透调节系统等的研究越来越多, 设置盐分梯度, 测定盐胁迫对这些生理指标的影响, 可以阐明植物对盐胁迫的耐受性^[11-14]。

本研究通过盆栽实验、设置 NaCl 盐分梯度, 测定不同盐胁迫对不同能源柳无性系气体交换参数、保护酶活性和有机渗透调节物质的影响, 阐明不同能源柳无性系耐盐机理, 探究其耐盐潜力, 并运用模糊隶属函数法对不同能源柳无性系的耐盐指标进行综合分析, 筛选具有耐盐潜力的能源柳无性系, 为在天津盐渍化地区大面积栽培能源柳提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

以瑞典农业大学引进的 4 个能源柳无性系能源柳 2 (*Salix dasyclados*), 能源柳 4 (*S. 'Mesu Neko'*), 能源柳 C (*S. fragilis*) 和能源柳 E (*S. viminalis*) 为实验材料。并以西北农林科技大学从乡土旱柳 (*S. matsudana*) 中选育的优良无性系为对照。选取各无性系 1 年生健壮枝条, 取中部修剪成直径 1cm, 长 20cm 的插穗, 保存于 4°C 冰箱中备用, 供来年春天培养盆栽扦插苗。以天津市区园林绿化用土为供试土壤(褐土, pH 7.3, 有机质含量 $18.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效氮 $41.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $36.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $243.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤容重 $2.74\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 土壤含水量 6.68%, 土壤含盐量 0.12%), 过筛风干后, 供盆栽苗用。

1.2 实验方法

1.2.1 材料处理

3 月中旬, 培养盆栽苗。选择瑞典能源柳 2、4、C、E 和旱柳的插穗, 扦插于直径 40cm、高 45cm 的花盆内, 每盆装干土 16kg, 保持每个插穗 2cm 露出土壤表面。给盆栽苗浇水, 通过称重保持盆内土壤含水量 15% 左右。盆栽苗置于室外搭建的防风雨的塑料棚(顶部可移动, 以调节光照), 防止雨水淋湿材料。每天浇水, 每周浇灌 1 次 Hoagland 营养液, 以保持各能源柳植株健康生长。7 月中旬, 待能源柳生长到一定高度后, 整盆淘汰弱小苗, 选择能源柳无性系生长健壮、大小一致的整盆植株, 进行盐胁迫试验。

1.2.2 胁迫方法

实验用土的土壤含盐量为 0.12%。土壤含盐量以土壤 NaCl 的重量占干土重量的百分数表示。设置盐分梯度, 使土壤含盐量分别保持在 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%, 设置空白作为对照。计算出每一胁迫等级所需要加入的 NaCl 质量, 并且分 4 次等量加入(每隔 3d 浇灌 1 次), 使每一胁迫等级在同一时间达到胁迫浓度, 开始计算胁迫时间(具体胁迫方法见表 1)。每胁迫等级 3 个重复, 胁迫 45d。在胁迫期间, 仍采用室外培养的方法, 每天浇水, 每周浇灌 1 次 Hoagland 营养液, 浇水时采用称重法, 使土壤含水量保持在 15% 左右。盆底置有托盘, 并及时把收集的流出水浇于花盆中, 避免盐分的损失, 保持盆内盐分含量的恒定。

1.2.3 指标测定

(1) 气体交换参数的测定: 胁迫 45d 后, 选取健康且长势一致的各能源柳无性系, 用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合系统测定各能源柳无性系的健康完全展开的功能叶的净光合速率 (Pn ,

$\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(Tr , $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(Gs , $\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和胞间 CO_2 浓度(Ci , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。(2)保护酶活性测定:胁迫 45d 后,取各能源柳无性系健康的完全展开的功能叶,分别测定其过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性。分别采用紫外吸收法^[15]、愈创木酚染色法^[16]和氮蓝四唑染色法^[17]。(3)有机渗透调节物质可溶性蛋白和脯氨酸含量的测定:胁迫 45d 后,取各能源柳无性系健康的完全展开的功能叶,测定其可溶性蛋白含量和脯氨酸含量。可溶性蛋白测定用考马斯亮蓝 G-250 染色比色法^[16-17]。脯氨酸含量测定用茚三酮显色法^[17]。

表 1 盐分胁迫方法

Table 1 Method of salt stress

盐胁迫浓度/% Salt stress concentration	土壤干重 /(kg·Pot ⁻¹) Soil dry weight	土壤含盐量/% Soil NaCl concentration	加入 NaCl 的总质量 /(g·Pot ⁻¹) Total weight of NaCl	每次加入的 NaCl 质量 /(g·Pot ⁻¹) NaCl weight of each time
0.2	16	0.12	12.8	3.2
0.4	16	0.12	44.8	11.2
0.6	16	0.12	76.8	19.2
0.8	16	0.12	108.8	27.2

1.2.4 数据分析

用 SPSS13.0 分别对不同能源柳无性系在不同盐胁迫下的保护酶活性和渗透调节物质进行统计分析,对同一品系不同盐胁迫水平之间采用 Duncan 比较,进行单因素方差分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对不同能源柳无性系气体交换参数的影响

如图 1 所示,各能源柳无性系光合速率日变化相似,都表现为早晚高、中午低的双峰曲线,光合速率总趋势随着盐浓度的增加而下降。与旱柳相比,在土壤含盐量小于 0.4% 时,4 个能源柳无性系光合速率的日平均值差别不大。在土壤含盐量为 0.4% 时,能源柳 C 的光合速率的日平均值均大于其它能源柳无性系。由此可以看出,与旱柳相比,4 个能源柳无性系在盐胁迫下,光合速率表现良好,其中,能源柳 C 表现最好。

各能源柳无性系的蒸腾速率随着土壤盐浓度的增加,总体呈下降趋势,而各无性系之间响应趋向不同。

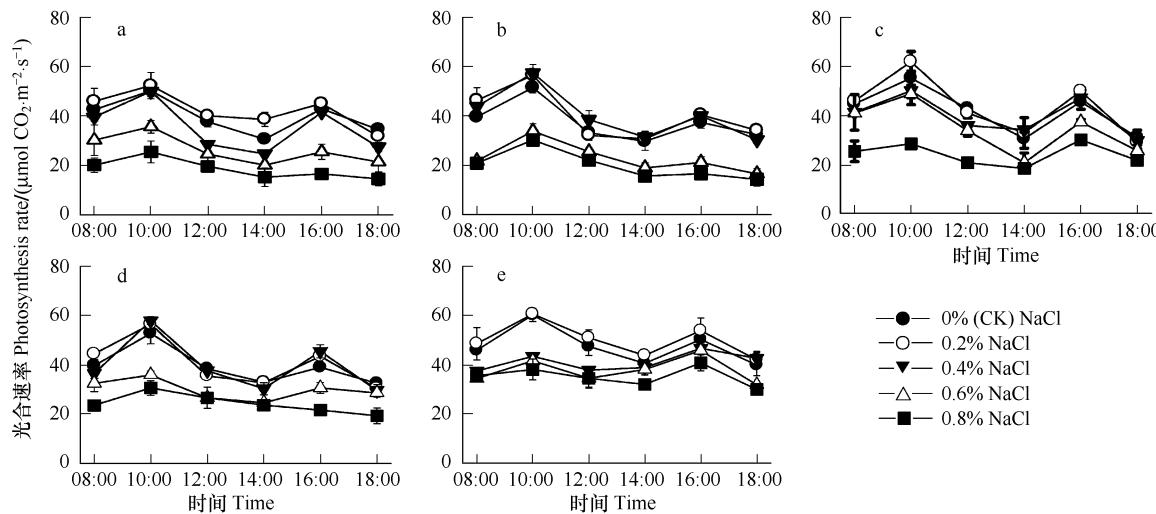


图 1 盐胁迫对不同能源柳无性系光合速率日变化的影响

Fig. 1 Effects of soil NaCl concentration on diurnal changes of photosynthesis rate in five willow clones

a: 能源柳 2 *S. dasyclados*; b: 能源柳 4 *S. 'MesuNeko'*; c: 能源柳 C *S. fragilis*; d: 能源柳 E *S. viminalis*; e: 旱柳 *S. matsudana*; 下同

其中,能源柳E与旱柳蒸腾速率日变化趋势相似,都呈单峰曲线;能源柳4表现为早晚高、中午低的双峰曲线;而能源柳2在低浓度盐胁迫下(土壤含盐量0—0.2%),蒸腾速率日变化呈早晚高、中午低的双峰曲线,在中、高浓度盐胁迫下(土壤含盐量大于0.4%)却呈单峰曲线。这可能是盐胁迫改变了能源柳2蒸腾速率的日变化趋势。从蒸腾速率的日平均值来看,能源柳E在土壤含盐量为0.2%和0.4%时,蒸腾速率日平均值较大,分别比对照增加了5.6%和4.7%(图2)。

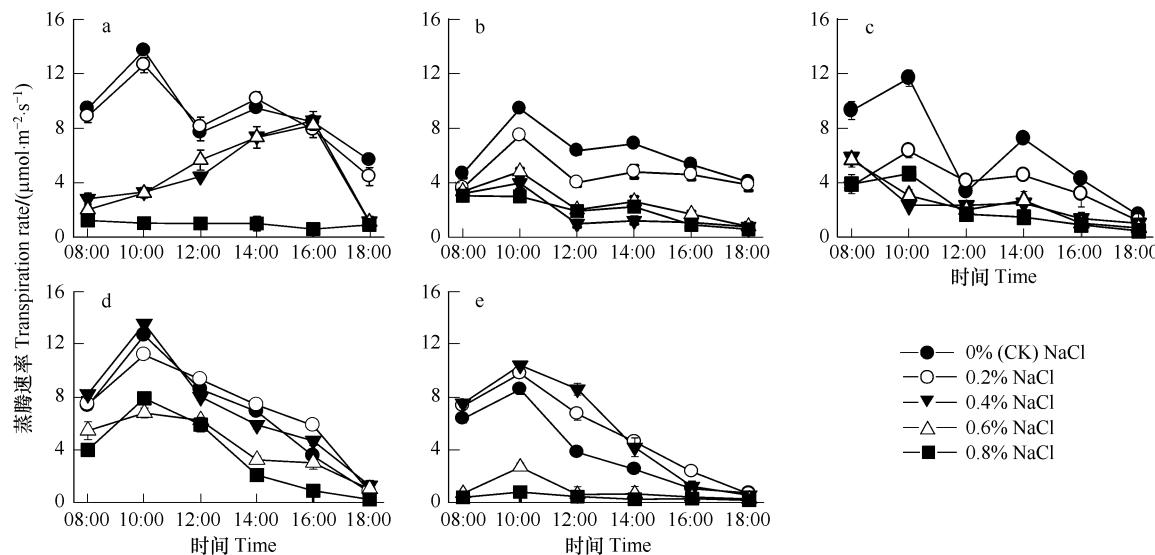


图2 盐胁迫对不同能源柳无性系蒸腾速率日变化的影响

Fig. 2 Effects of soil NaCl concentration on diurnal changes of transpiration rate in five willow clones

各能源柳无性系气孔导度日变化均呈双峰曲线变化。能源柳4和能源柳E在低浓度盐胁迫下(土壤含盐量0.2%—0.4%),气孔导度日平均值与对照相比下降不大,分别比对照下降了27.1%、13.4%和10.9%(图3)。

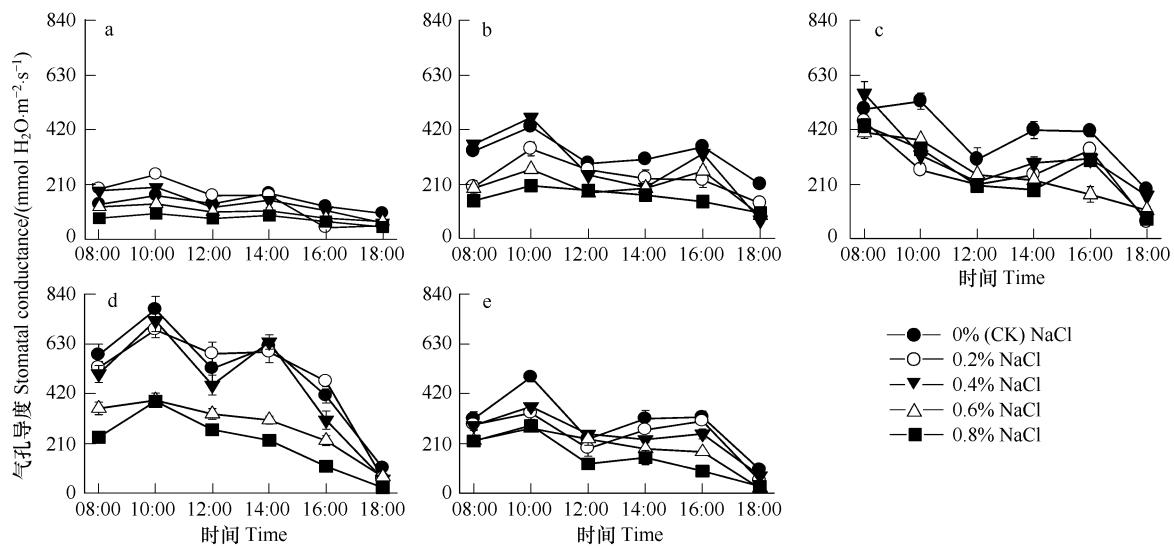


图3 盐胁迫对不同能源柳无性系气孔导度日变化的影响

Fig. 3 Effects of soil NaCl concentration on diurnal changes of stomatal conductance in five willow clones

各能源柳无性系胞间CO₂浓度日变化趋势相似,都表现为早晚高、中午低的趋势。随着盐胁迫浓度的增加,这种变化趋势越来越不显著。对于能源柳4来说,盐胁迫后,胞间CO₂浓度在一天中的最低值的时间发生

了变化,这是由于盐胁迫改变了能源柳 4 的胞间 CO₂浓度日变化的格局。在土壤含盐量为 0.2% 和 0.4% 时,能源柳 4 和能源柳 C 的胞间 CO₂浓度的日均值较大,比对照分别增加了 35.6% 和 34.6% 以及 26.2% 和 43.0%。而旱柳的胞间 CO₂浓度日均值在此土壤盐浓度下,变化幅度较小(图 4)。

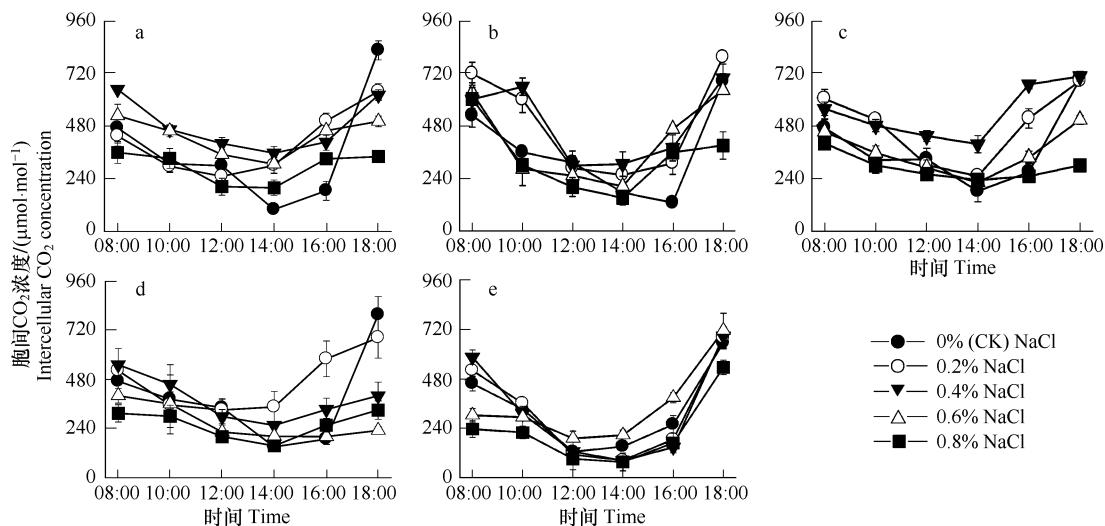


图 4 盐胁迫对不同能源柳无性系胞间 CO₂浓度日变化的影响

Fig. 4 Effects of soil NaCl concentration on diurnal changes of intercellular CO₂ concentration in five willow clones

2.3 盐胁迫对不同能源柳无性系保护酶活性的影响

随着土壤盐浓度的增加,4 个能源柳无性系 CAT 活性变化趋势相似,均表现为波动下降趋势。经过盐胁迫后,各能源柳无性系的 CAT 活性下降显著(图 5)。

4 个能源柳无性系的 POD 活性,随土壤盐浓度的增加,均表现为先增加后减小的趋势。而各能源柳无性系 POD 活性的峰值出现在不同的盐浓度下。其中,能源柳 C 和能源柳 E 的 POD 活性在土壤含盐量为 0.2% 时最大,分别比对照增加了 454.5% 和 117.3%,增大极显著(图 6)。

随着土壤盐浓度的增加,各能源柳无性系的 SOD 活性呈现先升高后下降的趋势。经盐胁迫后的能源柳各无性系的 SOD 活性均高于对照。其中,能源柳 2 和能源柳 C 在土壤含盐量为 0.6% 时 SOD 活性达到最大值,分别比对照增加了 273.1% 和 212.1%,变化极显著;而能源柳 4 和能源柳 E 在土壤含盐量为 0.4% 时,SOD 活性分别比对照增加了 234.6% 和 256.3%,变化极显著(图 7)。

2.4 盐胁迫对不同能源柳无性系有机渗透调节物质的影响

由图 8 可以看出,能源柳各无性系的脯氨酸含量随盐胁迫浓度的增加呈现先增加后减小的趋势。而各能源柳无性系脯氨酸含量的峰值出现在不同的土壤盐浓度下。其中,能源柳 E 与旱柳相同,脯氨酸含量的峰值出现在土壤含盐量 0.4% 时,而能源柳 2、4 和能源柳 C 在土壤含盐量为 0.6% 时脯氨酸含量出现最大值,且明显高于旱柳。

由图 9 可以看出,各无性系可溶性蛋白含量随土壤含盐量增加呈现先升高后降低的趋势。经盐胁迫后,

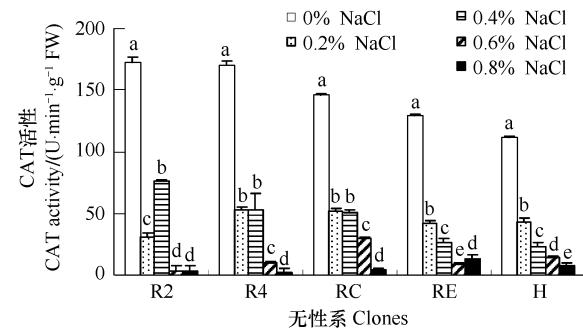


图 5 盐胁迫对不同能源柳无性系 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of soil NaCl concentration on CAT activities in five willow clones

注:R2,能源柳 2 *S. dasyclados*; R4,能源柳 4 *S. 'Mesu Neko'*; RC,能源柳 C *S. fragilis*; RE,能源柳 E *S. viminalis*; H,旱柳 *S. matsudana*; 下同

可溶性蛋白含量都比对照明显增大。与旱柳相比,在土壤含盐量小于0.6%时,4个能源柳无性系的可溶性蛋白含量均大于旱柳。可见,与旱柳相比,4个能源柳无性系在盐胁迫下,有机渗透调节物质发挥了很好的作用。

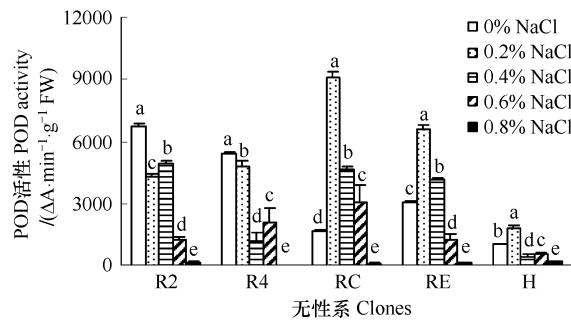


图6 盐胁迫对不同能源柳无性系POD活性的影响

Fig. 6 Effects of soil NaCl concentration on POD activities in five willow clones

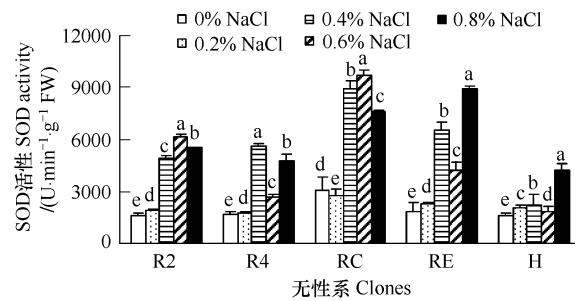


图7 盐胁迫对不同能源柳无性系SOD活性的影响

Fig. 7 Effects of soil NaCl concentration on SOD activities in five willow clones

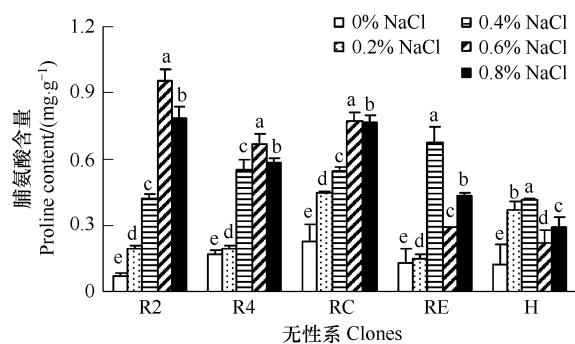


图8 盐胁迫对不同能源柳无性系脯氨酸含量的影响

Fig. 8 Effects of soil NaCl concentration on proline content in five willow clones

2.5 能源柳无性系对盐胁迫响应的综合评价

本研究选取了盐胁迫下5个无性系的日平均光合速率、日平均蒸腾速率、日平均气孔导度、日平均胞间CO₂浓度; SOD、POD和CAT活性以及可溶性蛋白含量和脯氨酸含量作为参评指标,运用模糊函数隶属法对5个无性系进行耐盐综合评价^[18-19]:

$$X(\mu) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中,X为参试植物某一耐盐指标的测定值,X_{max}为该指标中的最大值,X_{min}为该指标中的最小值。先求出5个无性系在不同盐胁迫梯度下各个耐盐指标的隶属值,然后把每一指标在不同盐胁迫梯度下的隶属值累加求平均值,最后再将每一无性系各耐盐指标的隶属值累加,求其平均值。通过比较两物种的耐盐隶属值的总平均值大小,确定两物种耐盐性的强弱。

耐盐性的综合评定结果表明,4个能源柳无性系的耐盐性均大于旱柳,其中能源柳C的耐盐性最强。5个无性系的耐盐性由强到弱依次为:能源柳C>能源柳E>能源柳2>能源柳4>旱柳(表2)。

3 讨论

气孔作为植物叶片最重要的呼吸交换通道,是O₂、CO₂和H₂O扩散进入叶内或蒸腾的必经之路^[20]。盐胁

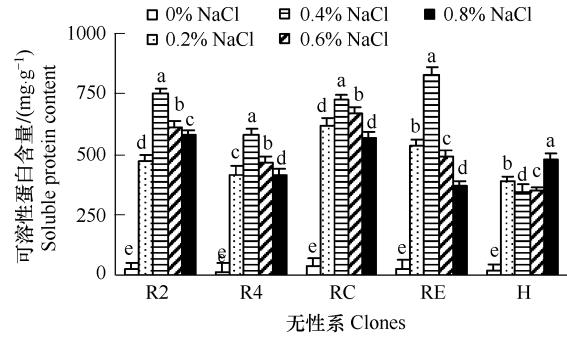


图9 盐胁迫对不同能源柳无性系可溶性蛋白含量的影响

Fig. 9 Effects of soil NaCl concentration on soluble protein content in five willow clones

迫会导致气孔的关闭,影响植物的光合作用^[21-23]。本研究中,盐胁迫不仅影响各能源柳无性系的光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂浓度的日均值,而且也使其日变化曲线发生变化。能源柳 2 的蒸腾速率日变化曲线由双峰变为单峰,说明,盐胁迫改变了能源柳 2 的蒸腾速率日变化格局,能源柳 2 在土壤含盐量大于 0.4% 的土壤中生长受到抑制。在土壤含盐量为 0.8% 时,旱柳的蒸腾速率日变化曲线不再出现峰值的明显变化,这说明,在高浓度盐胁迫下旱柳蒸腾作用受到抑制,而 4 个能源柳无性系仍能保持一定的蒸腾作用,表明其具有一定的耐盐能力。本研究中,盐胁迫导致各能源柳无性系光合速率降低。一般认为导致光合速率降低的因子包括气孔限制和非气孔限制两类^[24]。根据 Farquhar G D 和 Sharkey T D 的观点^[25]只有当气孔导度与胞间 CO₂浓度以相同的方式变化时,才能确定叶片光合作用的下降是气孔限制造成的;反之则是由叶肉细胞光合性能降低引起的非气孔因素造成。本研究中,低盐浓度胁迫下(土壤含盐量小于 0.4%),随盐浓度的增加,各能源柳无性系光合速率变化不大,蒸腾速率随盐浓度的增加呈减小趋势,气孔导度和胞间 CO₂浓度变化趋势相同,说明在低浓度盐胁迫下,导致各能源柳无性系光合速率降低的是气孔因素。郑国琦^[26]等研究认为,气孔因素导致光合速率降低,主要是由于盐胁迫刺激植物根系产生一种刺激信号,导致了气孔导度的降低。而在高浓度盐胁迫下(土壤含盐量大于 0.4%),各能源柳无性系蒸腾速率与光合速率随盐浓度的增加均呈减小趋势,气孔导度和胞间 CO₂浓度变化趋势不同。这表明在高浓度盐胁迫下(土壤含盐量大于 0.4%),导致各能源柳无性系光合速率下降的主要原因是非气孔因素,即在高浓度盐胁迫下,植物细胞内积累大量的 Na⁺和 Cl⁻,使光合机构和光合作用有关的酶的活性受到损伤,从而降低光合速率^[27-28]。

表 2 能源柳无性系耐盐性的综合评定指数及排序

Table 2 Indexes of integrated assessment and order of five willow clones to NaCl resistance

指标 Parameters	耐盐指标隶属值 Subordinate function values of salt tolerant ability				
	能源柳 2 <i>S. dasyclados</i>	能源柳 4 <i>S. 'Mesu Neko'</i>	能源柳 C <i>S. fragilis</i>	能源柳 E <i>S. viminalis</i>	旱柳 <i>S. matsudana</i>
日平均光合速率 Diurnal average of Photosynthesis rate	0.1467	0.1936	0.5285	0.3653	1
日平均蒸腾速率 Diurnal average of Transpiration rate	0.7451	0.3117	0.3226	0.8205	0.1945
日平均气孔导度 Diurnal average of Stomatal conductance	0	0.3782	0.7655	1	0.4061
日平均胞间 CO ₂ 浓度					
Diurnal average of Intercellular CO ₂ concentration	0.687	0.8718	0.7782	0.4952	0.0981
CAT 活性 CAT activity	0.4768	0.5213	0.6371	0.3769	0.2526
POD 活性 POD activity	0.6674	0.3882	0.6998	0.5706	0.2000
SOD 活性 SOD activity	0.2807	0.1523	0.9466	0.5230	0.0626
脯氨酸含量 Proline content	0.4294	0.4975	0.8403	0.3537	0.2151
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.7050	0.2347	0.9440	0.5045	0.1387
平均值 Average	0.4598	0.3944	0.7181	0.5566	0.2853
排序 Order	3	4	1	2	5

盐胁迫会诱发植物产生大量的自由基,自由基对植物膜系统和蛋白质有伤害作用,但生物体内的保护酶系统能清除产生的自由基,减轻盐胁迫的危害^[29]。SOD、POD、CAT 是保护酶系统中的重要组成部分,它们之间是协同作用的^[30-31]。本研究中,在低浓度盐胁迫下(土壤含盐量小于 0.4%),各无性系 CAT 活性下降显著,POD 和 SOD 活性升高。说明低浓度盐胁迫下,POD 和 SOD 协同发挥清除氧自由基的作用。而在高浓度盐胁迫下(土壤含盐量大于 0.6%),能源柳 2、4、E 和旱柳的 CAT 和 POD 活性明显下降,SOD 活性显著升高。而 SOD 在清除氧自由基的过程中产生的 H₂O₂如果没有被 CAT 或 POD 及时分解,也会对植物膜系统造成伤

害。本研究中,高浓度盐胁迫造成了能源柳2、4、E和旱柳CAT和POD活性显著下降,这可能是高浓度盐胁迫给能源柳能源柳2、4、E和旱柳的膜系统造成了伤害,抑制其生长。而能源柳C与其它4个无性系相比,在高浓度盐胁迫下,CAT和POD仍保持一定的活性,能够正常生长。

盐胁迫造成植物渗透胁迫、膨压丧失,植物通过渗透调节方式来解决这些问题^[32-33]。脯氨酸和可溶性蛋白影响植物细胞内渗透势的大小^[34]。脯氨酸是植物最为广泛应用的相容性渗透调节剂^[35-36],可溶性蛋白质量分数是植物细胞内酶系统稳定的标志^[37]。在本研究中,随着土壤盐浓度的增加,各能源柳无性系的脯氨酸含量都有不同程度的增大,且均大于旱柳,这表明各能源柳无性系面对盐伤害都有一定的保护机制。4个能源柳无性系的可溶性蛋白含量在低浓度盐胁迫下显著升高,并且在土壤含盐量小于0.6%时,均大于旱柳。由这两个渗透调节物质的指标可以看出,与旱柳相比,4个能源柳无性系在盐胁迫下,有机渗透调节系统均发挥了很好的作用。

耐盐性是一个受多种因素影响的复杂数量性状。以往的研究从光合作用、保护酶活性、渗透调节物质、膜质过氧化物等单一指标探究植物的耐盐性。而不同物种对某一具体指标的耐盐性反应不一定相同。因此,单一指标难以全面准确地反映耐盐性的强弱。本研究采用隶属函数值平均法,既消除了个别指标带来的片面性,又由于平均值是个[0,1]区间上的纯数,使各无性系的耐盐性差异具有可比性,所以采用多个指标进行耐盐综合评价更具有可行性和可靠性^[38]。本研究中,从耐盐性的综合指标评判来看,5个无性系的耐盐性由强到弱依次为:能源柳C>能源柳E>能源柳2>能源柳4>旱柳。通过对天津不同盐生环境下能源柳生长状况的长期监测,不同能源柳品系表现出生长差异,与综合评判结果具有一致性。采用模糊隶属函数方法,建立评价体系,可为盐生植物筛选提供理论依据和参考典范。

4 结论

从气体交换参数、保护酶活性、有机渗透调节物质和耐盐综合评定各指标来看,4个能源柳无性系的耐盐性均强于旱柳。4个能源柳无性系在土壤含盐量为0—0.4%的土壤中都能良好生长,对于土壤含盐量高于0.4%的土壤具有一定的耐盐潜力。其中能源柳C的耐盐潜力更大,能够在土壤含盐量为0.6%的土壤中正常生长。由于天津地区土壤含盐量在0.1%—1.5%之间,可以得出结论,4个能源柳无性系可以在天津轻、中度盐渍化地区(土壤含盐量0—0.6%)栽培。

References:

- [1] Li H L, Yang Z, Sun Y C, Qi S T. Halophyte resource and its exploitation in Tianjin Binhai area. *Soil and Fertilizers Sciences in China*, 2007, (1): 60-63.
- [2] Tao W F. Preliminary discussion the salting of soil in the plain area of Tianjin. *Journal of Tianjin Geological Society*, 1990, 8 (2): 132-137.
- [3] Yang Y L, Xu J, Fu D Y, Hao J M. Study and application of biotechnology mode of eco-reconstruction in coastal heavy salty deserted land-take Tianjin coastal area for example. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23 (2): 359-363.
- [4] Zhang W H, He J F, Zhou J Y. Exploitation and utilization status of bioenergy willow and its cultivation and growth in China. *Biomass Chemical Engineering*, 2006, 40 (Z1): 38-44.
- [5] Xue J Y, Zhang W H, Liu X C. The tolerance of different energy willow's clones to soil Cd contamination. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28 (4): 491-496.
- [6] Wang Z H, Zhang W H, He J F, Zhou J Y, Lu Y C, Guo Q Q. Differences of the drought-resistance characteristics of various clones of salix were investigated. *Journal of Northwest Forstry College*, 2008, 23 (2): 21-23.
- [7] Stig L, Zhou W J. Research and application of short season salix in Sweden. *World Agriculture*, 1999, 247 (11): 52.
- [8] McCarter J B, Wilson J S, Baker P J, Moffett J L, Oliver C D. Landscape management through integration of existing tools and emerging technologies. *Journal of Forestry*, 1996, (6): 17-23.
- [9] Yeo A R, Lee K S, Izard P. Short and long term effects of salinity on leaf growth in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, 1991, 42: 881-889.
- [10] Alshammary S F, Qian Y L, Wallner S J. Growth response of four turfgrass species to salinity. *Agricultural Water Management*, 2004, 66: 97-111.

- [11] Ouerghi Z, Gomic G, Roudam M. Effect of NaCl on photosynthesis of two wheat species (*Triticum durum* and *T-aestuum*) differing in their sensitivity to salt stress. *Journal Plant Physiology*, 2000, 156: 335-340.
- [12] Bongi G, Loreto F. Gas-exchange properties of salt-stressed Olive (*Olea europaea* L.). *Plant Physiology*, 1989, 90: 1408-1416.
- [13] Liao Y, Peng Y G, Chen G Z. Research advances in plant salt-tolerance mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 2077-2084.
- [14] Friednan R, Altman A L. The effect of salt stress on poyamie bioynthesis and content in mung bean plants and in halophytes. *Physiologia Plantarum*, 1989, 76(3): 295-302.
- [15] Gao J F. The experimental guide for plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006: 214-215.
- [16] Zhang Z L. The experimental guide for plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 1990: 154-155, 183-184.
- [17] Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000: 167-169, 184-185, 258-260.
- [18] Zhang H X, Tao L. The study on drought resistance of varieties of alfalfa in Gansu. *Qinghai Prataculture*, 1997, 6 (2): 7-12.
- [19] Song H Y, Lei J J, Li C Q. Heat stress response of plant and appraisal of heat resistance. *China Vegetables*, 1998, (1): 48-50.
- [20] Ren Y F, He J Y. Effects of NaCl stress on growth and photosynthetic characteristics of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23 (4): 149-153.
- [21] Munns R. Physiological process limiting plant growth in saline soils; some generalizations and hypotheses. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16 (1): 15-24.
- [22] Li H B, Chen W F, Li Q Y. Responses of rice leaf photosynthetic parameters to light intensity under NaCl stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1588-1592.
- [23] Koyro H W. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(2): 136-146.
- [24] Xia J B, Liu X R, Wang G X, Yang J H, Lü A X, Yu H T. Effects of soil moisture and microclimate factors on gas exchange parameters of *Kalopanax Septemlobus Koidz.* *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (2): 179-183.
- [25] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [26] Zheng G Q, Ma H W, Xu X. The relationship between the accumulation of saltions and betaine, and the photosynthesis in leaves of *Lycium barbarum* L. under salt stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11 (3): 51-54.
- [27] Delfine S, Alvino A, Concetta Villani M, Loreto F. Restrictions to carbon dioxide conductance and photosynthesis in spinach leaves recovering from salt stress. *Plant Physiology*, 1999, 119: 1101-1106.
- [28] Brugnoli E, Lauteri M. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium hisatum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non-halophytes. *Plant Physiology*, 1991, 95: 628-635.
- [29] Zhu J K. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 2001, 6 (2): 66-71.
- [30] Lu Z Y. Research paper about selection of new salt-tolerance poplar clones. Nanjing: Nanjing Forestry University Press, 1995: 13-19.
- [31] Jiang M Y. Generation of hydroxyl radicals and its relation to cellular oxidative damage in plants subjected to water stress. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41 (3): 229-234.
- [32] Munns R. Why measure osmotic adjustment. *Australian Journal Plant Physiology*, 1988, 15: 717-726.
- [33] Plaut Z, Federman E. Acclimation of CO₂ assimilation in cotton leaves to water stress and salinity. *Plant Physiology*, 1991, 97: 515-522.
- [34] Liang J, Yan Z L, Li Y H, Zhang R F, Zhu Z. Effect of (Ca(NO₃)₂) on phytological characteristics in *Casuarina equisetifolia* cutting seedlings under NaCl stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (5): 1073-1077.
- [35] Jefferies R L, Rudmik T. Growth, reproduction and resource allocation in halophytes. *Aquatic Botany*, 1991, 39: 3-16.
- [36] Naidoo G. Growth, water and ion relationships in the coastal halophytes *Triglochin bulbosa* and *T. striata*. *Environmental and Experimental Botany*, 1994, 34: 419-426.
- [37] Ma J M, Li J, Zhang G N, Yang K J, Wang L, Wu Z B. Effects of POD and Hg²⁺ on seed germination and seedling growth of wheat. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, 21 (5): 531-538.
- [38] Jie Y C, Huang P S, Li Z D. Genotype difference and early evaluation of drought resistance in ramie. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26 (6): 942-946.

参考文献:

- [1] 李红柳,杨志,孙贻超,齐树亭.天津滨海盐生植物资源及其开发利用.中国土壤与肥料,2007,(1):60-63.
- [2] 陶维藩.刍议天津平原地区土壤的盐渍化.天津地质学会志,1990,8(2):132-137.
- [3] 杨永利,徐君,富东英,郝晋珉.滨海重盐渍荒漠化地区生态重建生物技术模式的研究——以天津滨海新区为例.农业环境科学学报,

2004,23(2):359-363.

- [4] 张文辉,何景峰,周建云.能源柳研究现状与国内引种栽培.生物质化学工程,2006,40(Z1):38-44.
- [5] 薛建永,张文辉,刘新成.不同能源柳无性系对土壤镉污染的抗性研究.植物研究,2008,28(4):491-496.
- [6] 王贞红,张文辉,何景峰,周建云,卢彦昌,郭其强.瑞典能源柳无性系保护酶活性对水分胁迫的影响.西北林学院学报,2008,23(2):21-23.
- [7] Stig L,周伟军.瑞典短季柳的研究与应用.世界农业,1999,247(11):52.
- [13] 廖岩,彭友贵,陈桂珠.植物耐盐性机理研究进展.生态学报,2007,27(5):2077-2084.
- [15] 高俊凤.植物生理学实验指导.北京:高等教育出版社,2006:214-215.
- [16] 张志良.植物生理学实验指导.北京:高等教育出版社,1990:154-155, 183-184.
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术.北京:高等教育出版社,2000:167-169,184-185,258-260.
- [18] 张惠霞,陶玲.甘肃苜蓿地方品种抗旱性的种苗形态指标研究.青海草业,1997,6(2):7-12.
- [19] 宋洪元,雷建军,李成琼.植物热胁迫反应及抗热性鉴定与评价.中国蔬菜,1998,(1):48-50.
- [20] 任艳芳,何俊瑜.NaCl 胁迫对莴苣幼苗生长和光合性能的影响.华北农学报,2008,23(4):149-153.
- [22] 李海波,陈温福,李全英.盐胁迫下水稻叶片光合参数对光强的响应.应用生态学报,2006,17(9):1588-1592.
- [24] 夏江宝,刘信儒,王贵霞,杨吉华,吕爱霞,于洪泰.土壤水分及环境因子对刺楸叶片气体交换的影响.水土保持学报,2005,19(2):179-183.
- [26] 郑国琦,马宏玮,许兴.盐胁迫下宁夏枸杞盐分与甜菜碱积累及其与光合作用的关系.中国生态农业学报,2003,11(3):51-54.
- [30] 吕志英.抗(耐)盐杨新无性系的筛选研究报告.南京:南京林业大学出版社,1995:13-19.
- [31] 蒋明义.水分胁迫下植物体内的 OH⁻产生与细胞的氧化损害.植物学报,1999,41(3):229-234.
- [34] 梁洁,严重玲,李裕红,张瑞峰,朱珠.Ca(NO₃)₂对 NaCl 胁迫下木麻黄扦插苗生理特征的调控.生态学报,2004,24(5):1073-1077.
- [37] 马剑敏,李今,张改娜,杨柯金,王琳,吴振斌. Hg²⁺与 POD 复合处理对小麦萌发及幼苗生长的影响.植物学通报,2004,21(5):531-538.
- [38] 揭雨成,黄丕生,李宗道.苎麻基因型抗旱性差异及其早期鉴定研究.作物学报,2000,26(6):942-946.