

网络出版时间:2013-06-20 15:47

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130620.1547.013.html>

盐胁迫对杨树和紫丁香叶片叶绿素 荧光特性的影响

冯汉青, 李翡翡, 贾凌云, 陈 纹

(西北师范大学 生命科学学院, 甘肃 兰州 730070)

【摘 要】 **【目的】**研究 NaCl 不同浓度胁迫处理对杨树和紫丁香叶片叶绿素荧光特性的影响。**【方法】**采用 0 (对照), 200, 400, 600, 800 mmol/L NaCl 溶液处理杨树和紫丁香叶片, 研究两者在盐胁迫条件下叶绿素荧光参数的变化。**【结果】**随着 NaCl 处理浓度的增大, 杨树和紫丁香叶片的 PSⅡ 最大光能转化效率 (F_v/F_m)、PSⅡ 有效光化学量子效率 (F_v'/F_m')、非循环光合电子传递速率 (ETR)、PSⅡ 实际光能转化效率 ($\Phi_{PSⅡ}$) 以及光化学猝灭系数 (qp) 均呈下降趋势。比较而言, 杨树 F_v/F_m 下降并不显著, 且在非胁迫环境或较低盐胁迫条件下, 杨树叶片的 F_v'/F_m' 、 ETR 、 $\Phi_{PSⅡ}$ 以及 qp 值高于紫丁香叶片, 而非光化学猝灭系数 (NPQ) 值低于紫丁香叶片。**【结论】**在非胁迫环境或较低盐胁迫条件下, 杨树叶片光合作用的光化学性能优于紫丁香叶片。

【关键词】 盐胁迫; 杨树; 紫丁香; 叶绿素荧光参数; 光合特性

【中图分类号】 S567.23; S718.43

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)07-0157-05

Effects of salt stress on chlorophyll fluorescence characteristics of poplar and lilac leaves

FENG Han-qing, LI Fei-fei, JIA Ling-yun, CHEN Wen

(College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: **【Objective】** Effects of NaCl solutions with different concentrations on the chlorophyll fluorescence parameters of poplar and lilac leaves were studied. **【Method】** Poplar and lilac leaves living in same circumstance were cultured with 0 (control), 200, 400, 600, 800 mmol/L NaCl to investigate the variation of chlorophyll fluorescence parameters. **【Result】** The results showed that the maximal photochemical efficiency of PSⅡ (F_v/F_m), the photochemical efficiency of PSⅡ in light (F_v'/F_m'), the intrinsic PSⅡ efficiency (ETR), the actual photochemical efficiency of PSⅡ in the light ($\Phi_{PSⅡ}$), and the photochemical quenching coefficient (qp) in poplar and lilac leaves decreased as the increase of NaCl concentrations. Compared with lilac leaves, poplar leaves had more stable level of F_v/F_m and higher values of F_v'/F_m' , ETR , $\Phi_{PSⅡ}$, and qp . Moreover, non-photochemical quenching coefficient (NPQ) of poplar leaves was lower than that of lilac leaves. **【Conclusion】** These results indicated that under non-stress or low-salt stress, poplar leaves had superior photochemical properties than lilac leaves.

Key words: salt stress; poplar; lilac; chlorophyll fluorescence parameters; photosynthetic characteristics

* [收稿日期] 2012-09-13

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30900105); 教育部科学技术研究重点项目(211190); 西北师范大学基金项目(NWNU-kjcxgc-03-77, NWNU-09-31, NWNU-LKQN-10-32)

[作者简介] 冯汉青(1978—), 男, 河北保定人, 副教授, 主要从事植物生化与分子生物学理论与应用研究。

E-mail: fenghanq@nwnu.edu.cn

土壤盐渍化会对植物的生长和发育造成严重影响^[1],因此土壤盐渍化是植物资源生产力下降的一个主要逆境因素,探究植物在盐胁迫下的生理学变化,有助于了解植物耐盐生理机制和选育耐盐植物。目前,有关植物盐胁迫生理的研究多集中在水稻^[2]、小麦^[3]等农作物上;同时,银杏、侧柏、火炬松、刺槐^[4-5]、滨藜^[6]等木本植物对盐胁迫的响应也有报道。

光合作用是植物生长发育的基础,决定着植物的生产力;且光合作用对环境条件变化较为敏感,在很大程度上表征了植物对环境胁迫的适应能力^[7],故研究木本植物光合作用对盐胁迫的响应,是了解盐胁迫下木本植物生理学变化的重要切入点。然而,目前对于木本植物盐胁迫下生理学变化的研究,多集中于盐胁迫对叶片 K^+ 、 Na^+ 含量^[4],叶肉细胞超微结构^[5],细胞膜透性及生理特性的影响^[6]等方面,而关于盐胁迫对木本植物叶片光合作用的影响则研究较少。

叶绿素荧光技术是近年来探测和分析植物光合作用光化学性能的有效手段。任何逆境对光合作用光反应阶段产生的影响,都可通过检测叶片叶绿素荧光的变化得以反映^[8],并且与其他检测植物光合作用手段相比,叶绿素荧光测定具有快速、无损、精度高和费用低的特点。目前,该方法已广泛应用于光合作用机理、植物抗逆生理、作物增产潜力预测等诸多方面的研究^[9]。杨树和紫丁香是我国常见的栽培林木,杨树是我国诸多地区用于绿化和水土保持的优良树种,在经济建设和生态环境建设中发挥着重要作用^[10-12];而紫丁香是提取蜜源、芳香油^[7]的重要经济林木,并具有一定的药用价值^[13]。然而,杨树和紫丁香的生长常受到土壤盐渍化的影响。尽管已有研究报道了盐胁迫下杨树和紫丁香代谢产物和解剖学结构的变化^[14-15],但盐胁迫对杨树和紫丁香光化学性能影响的研究却少有报道。

本研究以杨树和紫丁香叶片为材料,以研究盐胁迫对这 2 种植物光合作用光化学性能的影响为目的,利用叶绿素荧光仪,检测了不同浓度 NaCl 胁迫处理对杨树和紫丁香叶片叶绿素荧光参数的影响,有助于进一步认知和掌握盐胁迫下杨树和紫丁香光合生理特性的变化规律,并为杨树和紫丁香抗盐生理学的研究提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

在夏季清晨(2012-06-10),摘取校园内 10 年生

的杨树和紫丁香(36.065°N,103.440°E,海拔 1 542 m)带有叶柄的向阴生的叶片,将叶柄浸入 Hoagland 营养液中,于光照 $137 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 25 °C 条件下适应 6 h;再将适应后的叶片转入含有不同浓度 NaCl 的 Hoagland 营养液中,NaCl 浓度依次为 0(对照),200,400,600,800 mmol/L,每个浓度梯度设定 3 个平行,置于光照 $137 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 25 °C 条件下处理 24 h。

1.2 叶绿素荧光参数的测定方法

将上述盐胁迫处理后的叶片经暗适应后,用调制叶绿素荧光仪(PAM-2500,德国)测量不同浓度 NaCl 胁迫处理后杨树和紫丁香叶片各叶绿素荧光参数。首先,给经过暗适应的叶片照射检测光(1~2 min),在荧光水平稳定后得到荧光参数 F_o ,接着,给饱和脉冲光,1 个脉冲后关闭,得到荧光参数 F_m ,于是得到 PS II 最大光能转化效率 F_v/F_m ($F_v = F_m - F_o$)。其次,打开可以引起叶片光合作用的作用光, $PAR = 240 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,几分钟后叶片光合作用达到稳态,得到荧光参数 F_s ,这时再给饱和脉冲光,1 个脉冲后关闭,得到荧光参数 F_m' ,计算作用光存在时 PS II 实际光能转化效率 Φ_{PSII} ,即 $(F_m' - F_s)/F_m'$;荧光的非光化学猝灭系数 NPQ ,即 $(F_m - F_m')/F_m'$;以及非循环光合电子传递速率 ETR ($ETR = \Phi_{PSII} \times I \times a \times f$,其中: I 为光强, a 为吸收入射光的比例,通常为 80%, f 为能量分布比例的估计值,在 C3 植物中常为 50%)^[16]。最后,关闭作用光,立即打开远红光,几秒钟后关闭,得到荧光参数 F_o' ,计算 PS II 有效光化学量子效率 F_v'/F_m' ,即 $(F_m' - F_o')/F_m'$,以及荧光的光化学猝灭系数 qp ,即 $(F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$ 。 F_v/F_m 及经作用光照后的 ETR 、 Φ_{PSII} 、 qp 和 NPQ ,由软件直接读取。

1.3 数据处理

试验中数据均采用 Origin6.1t-Test(Two Populations,即关联双总体 t 检验)进行差异显著性 ($P < 0.05$) 分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 F_v/F_m 的影响

如表 1 所示,杨树和紫丁香叶片的 PS II 最大光能转化效率 F_v/F_m ,均随着 NaCl 浓度的增大呈一定水平下降。其中杨树叶片的 F_v/F_m 在 NaCl 浓度 ≥ 600 mmol/L 时与对照有显著差异 ($P < 0.05$);而不同浓度 NaCl 处理对紫丁香叶片的 F_v/F_m 均

有显著影响($P<0.05$)。杨树与紫丁香叶片 Fv/Fm 异($P<0.05$)。
 Fm 仅在 0 和 200 mmol/L NaCl 胁迫下存在显著差

表 1 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 Fv/Fm 的影响

Table 1 Effects of different concentrations of NaCl on Fv/Fm of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	0.789±0.011 a *	0.780±0.012 ab *	0.778±0.007 ab	0.773±0.014 b	0.749±0.046 b
紫丁香 Lilac	0.803±0.009 a	0.797±0.007 b	0.784±0.010 c	0.780±0.005 c	0.770±0.007 d

注:表中数据后所标小写字母代表不同浓度 NaCl 处理下同一树种叶片间的差异性,不同字母代表差异显著($P<0.05$);* 代表同一浓度 NaCl 处理下杨树与紫丁香 2 种叶片间有显著差异($P<0.05$)。下表同。

Note:The lowercase letters reflect the differences among the same species leaves under different salt stresses and different letters indicate significant differences at $P<0.05$;The significant differences ($P<0.05$) among poplar and lilac leaves under the same salt stress are marked with *. The same below.

2.2 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 Fv'/Fm' 的影响

如表 2 所示,杨树和紫丁香叶片的 PSⅡ有效光化学量子效率 Fv'/Fm' ,均随着 NaCl 浓度的增大

呈下降趋势;且在各浓度 NaCl 处理时均与对照有显著差异($P<0.05$)。杨树与紫丁香叶片的 Fv'/Fm' 在 0,200,400 mmol/L NaCl 胁迫下存在显著差异($P<0.05$)。

表 2 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 Fv'/Fm' 的影响

Table 2 Effects of different concentrations of NaCl on Fv'/Fm' of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	0.689±0.033 a *	0.633±0.053 b *	0.616±0.066 b *	0.540±0.056 c	0.483±0.049 c
紫丁香 Lilac	0.595±0.023 a	0.559±0.027 b	0.515±0.025 c	0.514±0.026 cd	0.497±0.023 d

2.3 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 ETR 的影响

如表 3 所示,杨树和紫丁香叶片的非循环光合电子传递速率 ETR ,均随着 NaCl 浓度的增大呈下降趋势;且在 200 mmol/L NaCl 处理时与对照无显著差异,≥400 mmol/L 时与对照存在显著差异($P<$

0.05)。杨树与紫丁香叶片的 ETR 在 0,200,400,600 mmol/L NaCl 胁迫下存在显著差异($P<0.05$)。

2.4 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 $\Phi_{PSⅡ}$ 的影响

如表 4 所示,杨树和紫丁香叶片的 PSⅡ实际光能转化效率 $\Phi_{PSⅡ}$ 的变化趋势与 ETR 相似。

表 3 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 ETR 的影响

Table 3 Effects of different concentrations of NaCl on ETR of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	61.717±2.593 a *	58.420±5.379 ab *	54.737±4.009 b *	44.252±6.305 c *	29.362±7.016 d
紫丁香 Lilac	46.533±4.187 a	43.802±3.304 a	35.630±1.390 b	29.363±3.608 c	24.297±1.850 d

表 4 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 $\Phi_{PSⅡ}$ 的影响

Table 4 Effects of different concentrations of NaCl on $\Phi_{PSⅡ}$ of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	0.605±0.036 a *	0.580±0.060 ab *	0.544±0.039 b *	0.437±0.059 c *	0.289±0.069 d
紫丁香 Lilac	0.474±0.030 a	0.444±0.032 a	0.354±0.015 b	0.293±0.035 c	0.242±0.028 d

2.5 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 qp 的影响

如表 5 所示,杨树和紫丁香叶片的光化学猝灭系数 qp ,均随着 NaCl 浓度的增大呈下降趋势;杨树叶片 qp 在较低浓度 NaCl 处理时与对照相比无显著差异,≥600 mmol/L NaCl 处理时与对照存在显著差异($P<0.05$);紫丁香叶片 qp 在 ≥400

mmol/L NaCl 处理时与对照差异显著($P<0.05$)。杨树和紫丁香叶片的 qp 在各浓度 NaCl 胁迫处理下均存在显著差异($P<0.05$)。

2.6 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 NPQ 的影响

如表 6 所示,杨树和紫丁香叶片非光化学猝灭系数 NPQ ,均随着 NaCl 浓度的增大呈先升后降

的变化趋势;杨树叶片的 NPQ 在各浓度 NaCl 处理时均与对照差异显著 ($P<0.05$);紫丁香叶片的 NPQ 在 200 mmol/L NaCl 处理时与对照无显著差

异, ≥ 400 mmol/L 时与对照存在显著差异 ($P<0.05$)。杨树和紫丁香叶片的 NPQ 在各浓度 NaCl 胁迫处理下均存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 5 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 qp 的影响

Table 5 Effects of different concentrations of NaCl on qp of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	0.890±0.017 a *	0.911±0.037 a *	0.818±0.112 a *	0.814±0.082 b *	0.588±0.073 c *
紫丁香 Lilac	0.764±0.044 a	0.757±0.040 a	0.702±0.041 b	0.603±0.061 c	0.517±0.041 d

表 6 不同浓度 NaCl 处理对杨树和紫丁香叶片 NPQ 的影响

Table 6 Effects of different concentrations of NaCl on NPQ of poplar and lilac leaves

树种 Tree species	NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) Salt concentrations				
	0	200	400	600	800
杨树 Poplar	0.350±0.155 d *	0.472±0.124 c *	0.595±0.178 b *	0.978±0.177 ab *	0.807±0.238 b *
紫丁香 Lilac	1.050±0.253 c	1.285±0.195 c	1.532±0.194 a	1.302±0.185 b	1.048±0.090 d

3 讨 论

Fv/Fm (PSⅡ最大光能转化效率)在非胁迫环境下因植物种类的不同而异,但其降低程度是反应植物光合机构受环境胁迫损伤程度的重要指标^[16-17]。本研究中,在未经 NaCl 处理时,杨树叶片的 Fv/Fm 小于紫丁香叶片,随着盐胁迫浓度的增加,二者的 Fv/Fm 值均呈现下降趋势。杨树叶片的 Fv/Fm 在 ≥ 600 mmol/L NaCl 处理时与对照相比下降显著;而紫丁香叶片的 Fv/Fm 在各浓度 NaCl 处理时与对照相比均显著下降;表明随着 NaCl 浓度的增大,杨树叶片的光合机构较之紫丁香叶片更不易受盐胁迫的影响。

Fv'/Fm' (PSⅡ有效光化学量子效率)反映了在光适应条件下,PSⅡ反应中心完全开放时的光化学效率^[18]。 ETR (非循环光合电子传递速率)反映了光适应条件下表观光合电子的传递速率^[19]。 $\Phi_{PSⅡ}$ (PSⅡ实际光能转化效率)反映了光适应条件下叶片实际的光化学效率^[20]。本研究显示,随着 NaCl 处理浓度的增大,杨树和紫丁香叶片的 Fv'/Fm' 、 ETR 和 $\Phi_{PSⅡ}$ 均呈显著性下降趋势;且 NaCl 处理浓度越高,这 3 种叶绿素荧光参数下降越多,表明盐胁迫浓度的增加明显阻碍了 2 个树种叶片的光反应性能。杨树叶片的 Fv'/Fm' 在 0, 200 和 400 mmol/L NaCl 处理时均显著高于紫丁香叶片, ETR 和 $\Phi_{PSⅡ}$ 值在 0, 200, 400 和 600 mmol/L NaCl 处理时均显著高于紫丁香叶片,但在 800 mmol/L NaCl 处理时,杨树叶片的这 3 种叶绿素荧光参数与紫丁香叶片相比无显著差异,表明在非胁迫环境或较低盐胁迫条件下,杨树叶片光合作用的光化学性能优于紫

丁香叶片。

qp 值是衡量 PSⅡ原初电子受体质体醌(QA)的氧化程度和 PSⅡ开放中心数目的重要参数^[21], qp 越大,表明有更多的 QA 处于氧化态,PSⅡ接收电子的能力越强^[20]。本研究中,随着 NaCl 处理浓度的增大,杨树和紫丁香叶片的 qp 值下降,表明 NaCl 胁迫降低了 QA 的氧化程度和 PSⅡ开放中心的数目。而杨树叶片的 qp 值在各浓度 NaCl 处理时均显著高于紫丁香叶片,说明在非胁迫环境及盐胁迫条件下,杨树叶片较紫丁香叶片具有较好的光化学性能。

NPQ 反映了 PSⅡ所吸收的光能中无法用于光合电子传递而以热的形式耗散的程度^[20,22]。本研究中,随着 NaCl 处理浓度的增大,杨树和紫丁香叶片的 NPQ 值均先升后降,但比较而言,在各浓度 NaCl 处理时,紫丁香叶片的 NPQ 值均显著高于杨树叶片,表明在非胁迫环境及盐胁迫条件下,杨树叶片能将更多的光能用于光合电子传递,而紫丁香叶片中更多的光能被耗散。

综上所述,杨树叶片在非胁迫环境或较低盐胁迫条件下的光化学性能优于紫丁香叶片,表明杨树叶片自身光合机构的组成或与光化学性能相关酶类的活性优于紫丁香叶片。在较高盐胁迫条件下,紫丁香叶片皱缩并出现大量暗褐色的坏死斑点,杨树叶片也出现失绿斑点,且斑点数量随着盐浓度的递增而增多,表明杨树和紫丁香叶片均受到较高盐胁迫的伤害,但测得二者主要的叶绿素荧光参数 Fv/Fm 、 Fv'/Fm' 、 ETR 和 $\Phi_{PSⅡ}$ 等未出现显著性差别,猜测较高的盐胁迫破坏了杨树叶片自身光化学的优势性能,其内在原因还有待于进一步研究。

[参考文献]

- [1] 喻方圆,徐锡增. 植物逆境生理研究进展 [J]. 世界林业研究, 2003,16(5):6-11.
Yu F Y, Xu X Z. A review on plant stress physiology [J]. World Forestry Research, 2003, 16(5): 6-11. (in Chinese)
- [2] 符秀梅,朱红林,李小靖,等. 盐胁迫对水稻幼苗生长及生理生化影响 [J]. 广东农业科学, 2010(4):19-21.
Fu X M, Zhu H L, Li X J, et al. Effects of NaCl stress on the growth and physio-biochemical characteristics of rice seedlings [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010(4): 19-21. (in Chinese)
- [3] 杨颖丽,杨宁,王菜,等. 盐胁迫对小麦幼苗生理指标的影响 [J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2007, 43(2):29-34.
Yang Y L, Yang N, Wang C, et al. Effect of salinity on the physiological characteristics in two wheat cultivars [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(2): 29-34. (in Chinese)
- [4] 汪贵斌,曹福亮,游庆方,等. 盐胁迫对4树种叶片中 K^+ 和 Na^+ 的影响及其耐盐能力的评价 [J]. 植物资源与环境学报, 2001, 10(1):30-34.
Wang G B, Cao F L, You Q F, et al. Effects of salt stress on concentrations of Na^+ , K^+ and $Na^+//K^+$ in the leaves of four tree species and evaluation of salt tolerance [J]. Journal of Plant Resources Environment, 2001, 10(1): 30-34. (in Chinese)
- [5] 孟凡娟,王建中,黄凤兰,等. 盐胁迫对两种刺槐叶肉细胞超微结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4):97-102.
Meng F J, Wang J Z, Huang F L, et al. Ultrastructure of mesophyll cells in two *Robinia pseudoacacia* hybrids under NaCl stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 97-102. (in Chinese)
- [6] 王守超,王得祥,彭少兵,等. 盐胁迫对木本滨藜植物细胞膜透性及生理特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007(4):281-285.
Wang S C, Wang D X, Peng S B, et al. Effects of salt stress on cell membrane permeability and physiological property in woody saltbush [J]. Agricultural Research in the Arid, 2007(4): 281-285. (in Chinese)
- [7] 严俊鑫,刘晓东,张晓娇,等. 6种丁香的光合特性 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(7):23-41.
Yan J X, Liu X D, Zhang X J, et al. Photosynthetic characteristics of six species of *Synga* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(7): 23-41. (in Chinese)
- [8] 蔡丽敏,董丽. 叶绿素荧光技术在园林植物中的应用 [J]. 北方园艺, 2007(3):75-77.
Cai L M, Dong L. Application of chlorophyll fluorescence technique in garden plants [J]. Northern Horticulture, 2007(3): 75-77. (in Chinese)
- [9] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用 [J]. 经济林研究, 2012, 20(4):14-18.
Feng J C, Hu X L, Mao X J. Application of chlorophyll fluorescence dynamics to plant physiology in adverse circumstance [J]. Economic Forest Researches, 2012, 20(4): 14-18. (in Chinese)
- [10] 天锡,陈章水. 中国杨树集约栽培 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 1994.
Tian X, Chen Z S. Intensive cultivation of poplar in China [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [11] 万雪琴,夏新莉,尹伟伦,等. 不同杨树无性系扦插苗木水分利用效率的差异及其生理机制 [J]. 林业科学, 2006, 42(5):133-137.
Wan X Q, Xia X L, Yin W L, et al. Water use efficiency difference among four poplar clones and its physiological mechanism [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5): 133-137. (in Chinese)
- [12] 张勇,张守攻,齐力旺,等. 杨树:林木基因组学研究的模式物种 [J]. 植物学通报, 2006, 23(3):286-293.
Zhang Y, Zhang S G, Qi L W, et al. Poplar as a model for forest tree in genome research [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2006, 23(3): 286-293. (in Chinese)
- [13] 李永吉,吕邵佳,王艳宏,等. 丁香叶药用研究进展 [J]. 中医药信息, 2003, 20(1):22-23.
Li Y J, Lü S W, Wang Y H, et al. Clove leaf medicinal research progress [J]. Information on Traditional Chinese Medicine, 2003, 20(1): 22-23. (in Chinese)
- [14] 陈少良,李金克,毕望富,等. 盐胁迫条件下杨树盐分与甜菜碱及糖类物质变化 [J]. 植物学通报, 2001, 18(5):587-596.
Chen S L, Li J K, Bi W F, et al. Genotypic variation in accumulation of salt ions, betaine and sugars in poplar under conditions of salt stress [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(5): 587-596. (in Chinese)
- [15] 杨忠顺. 五种木本植物颞颥盐逆境演化结构比较研究 [D]. 长春:东北师范大学, 2004.
Yang Z S. Comparative study of the evolving structure on salt resistance in five kinds of xylophyta [J]. Changchun: North-east Normal University, 2004. (in Chinese)
- [16] 陈建明,俞晓平,程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用 [J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1):51-55.
Chen J M, Yu X P, Cheng J A. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2006, 18(1): 51-55. (in Chinese)
- [17] Hong S S, Xu D Q. Light induced increase in initial fluorescence parameters to strong light between wheat and soybean leaves [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42:684-688.
- [18] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰. 高温胁迫对切花菊“神马”光合作用与叶绿素荧光的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2149-2154.
Sun X Z, Zheng C S, Wang X F. Effects of high temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of cut flower chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* 'Jinba') [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2149-2154. (in Chinese)