

DOI: 10.5846/stxb201309232337

吴寿国, 余学军, 李凯, 蒋玉俭, 张汝民. 海盐对绿竹叶片反射光谱及叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 4920-4930.

Wu S G, Yu X J, Li K, Jiang Y J, Zhang R M. Effects of sea salt stress on reflectance spectrum and chlorophyll fluorescence parameters in *Bambusa oldhamii* leaves. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4920-4930.

# 海盐对绿竹叶片反射光谱及叶绿素荧光参数的影响

吴寿国<sup>1,2</sup>, 余学军<sup>1,\*</sup>, 李 凯<sup>1</sup>, 蒋玉俭<sup>1</sup>, 张汝民<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 临安 311300; 2. 瑞安市林业局, 瑞安 325200)

**摘要:**沿海防护林是海岸生态系统中最基本的生物资源, 由于沿海地区地下水位高, 土壤含盐量高, 肥力低, 生态环境恶劣等特点, 所以优良植物种选择是加快沿海优良防护林体系建设的关键。为了探讨绿竹耐盐性以及为沿海地区防护林选择优良植物种, 以 2 年生绿竹 (*Bambusa oldhamii*) 为材料, 采用水培法进行不同浓度的海盐处理, 利用 Unispec-SC 型单通道光纤光谱仪和非调制式叶绿素荧光仪对绿竹叶片反射光谱和叶绿素荧光参数等进行测定。结果表明: 当海盐浓度小于 1.2% 时, 绿竹叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量, 以及“三边”参数与对照无显著差异, 当海盐浓度升高到 1.6% 时, 色素与对照相比分别降低了 63.2%、62.8% 和 47.2% ( $P < 0.01$ ), 红边位置 ( $\lambda_{red}$ ) 和红边面积 ( $S_{red}$ ) 相比对照显著减小 ( $P < 0.05$ )。1.2% 浓度的海盐处理, 红边归一化指数 ( $rNDVI$ )、绿度归一化指数 ( $gNDVI$ )、类胡萝卜素反射指数 2 ( $CRI_{700}$ ) 和光化学反射指数 ( $PRI$ ) 显著降低 ( $P < 0.05$ ), 与对照相比分别降低了 27.3%、23.3%、19.5% 和 43.9%; 当海盐浓度增加到 1.6% 时,  $rNDVI$ 、改良红边比值指数 ( $mND$ )、 $gNDVI$ 、改良归一化差值指数 ( $mSR_{700}$ )、类胡萝卜素反射指数 1 ( $CRI_{550}$ )、 $CRI_{700}$  和  $PRI$  等参数与对照相比分别下降了 42.4%、43.9%、32.6%、21.5%、47.2%、49.9% 和 58.5%。绿竹叶片 PS II 最大量子产率 ( $F_v/F_m$ )、电子传递的量子产额 ( $\Phi E_o$ )、单位反应中心捕获的用于电子传递的能量 ( $ET_o/RC$ )、单位面积反应中心数目 ( $RC/CS$ ) 和叶片性能指数 ( $PI_{Abs}$ ) 等参数, 1.6% 海盐处理与对照相比分别降低了 50.8%、28.6%、21.7%、52.1% 和 92.3%, 单位反应中心复合体吸收的能量 ( $ABS/RC$ ) 比对照提高了 96.9%。说明绿竹具有一定的耐盐性。

**关键词:** 绿竹; 叶绿素含量; 叶绿素荧光; 反射光谱; 耐盐性

## Effects of sea salt stress on reflectance spectrum and chlorophyll fluorescence parameters in *Bambusa oldhamii* leaves

WU Shouguo<sup>1,2</sup>, YU Xuejun<sup>1,\*</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, JIANG Yujian<sup>1</sup>, ZHANG Rumin<sup>1</sup>

1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China

2 Forest Enterprise of Ruian City, Ruian 325200, China

**Abstract:** The coastal protection forest is the most basic living resources in the coastal ecosystem. Due to the high underground water level, high soil salt content, low fertility, and deteriorated ecological environment in the coastal area, the selection of plant species is the key to speed up the construction of coastal protection forest system. To evaluate the salt tolerance of *Bambusa oldhamii* and provide plant species for coastal protection forest in the coastal area, we investigated reflectance spectra and chlorophyll fluorescence parameters in the leaves of 2 years *B. oldhamii* under sea salt stress by hydroponics using Unispec-SC spectrometer and non-modulated chlorophyll fluorometer, respectively. Results showed that when the sea salt concentration was under 1.2%, the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids, and reflectance spectra parameters were not significantly different with that under control. However, when the sea salt

基金项目: 国家星火重点资助项目 (2007EA701051)

收稿日期: 2013-09-23; 修订日期: 2014-07-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxj@zjfc.edu.cn

concentration was 1.6%, the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids were decreased by 63.2%, 62.8%, and 47.2% ( $P < 0.01$ ), respectively and reflectance spectra parameters red wavelength ( $\lambda_{\text{red}}$ ) and red area ( $S_{\text{red}}$ ) were significantly reduced ( $P < 0.05$ ) compared with control. The red-edge normalized difference vegetation index ( $rNDVI$ ), greenness normalized index ( $gNDVI$ ), carotenoids reflectance indexes II ( $CRI_{700}$ ) and photochemical reflectance index ( $PRI$ ) under 1.2% sea salt concentration was reduced by 27.3%、23.3%、19.5% and 43.9%, respectively compared with control. The  $rNDVI$ , modified red-edge normalized difference vegetation index ( $mND$ ),  $gNDVI$ , modified red-edge ratio ( $mSR_{700}$ ), carotenoids reflectance indexes I ( $CRI_{550}$ ),  $CRI_{700}$  and  $PRI$  under 1.6% sea salt concentration was reduced by 42.4%, 43.9%, 32.6%, 21.5%, 47.2%, 49.9% and 58.5%, respectively compared with control. The maximum quantum yield of photosystem II ( $F_v/F_m$ ), quantum yield for electron transport ( $\Phi E_o$ ), electron transport flux per reaction center ( $ET_o/RC$ ), density of reaction center (QA-reducing PS II reaction centers) ( $RC/CS$ ) and performance index on absorption basis ( $PI_{\text{ABS}}$ ) under 1.6% sea salt concentration was reduced by 50.8%, 28.6%, 21.7%, 52.1%, and 92.3% respectively while the absorption flux per reaction center ( $ABS/RC$ ) increased 96.9% compared with control. The above results showed that high salt stress inhibited the synthesis of the chlorophyll, reduced the absorption of the light energy, resulted in light inhibition and the damage of the acceptor side from PS II, reaction center degradation or inactivation, and inhibited directly growth and development of bamboo. While under low salt stress, the salt tolerance of bamboo was improved by increasing chlorophyll content, light absorption,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi E_o$ ,  $ET_o/RC$ ,  $RC/CS$  and  $PI_{\text{ABS}}$ .

**Key Words:** *Bambusa oldhamii*; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence; reflection spectrum; salt tolerance

沿海防护林是海岸生态系统中最基本的生物资源,由于沿海地区地下水位高,土壤含盐量高,肥力低,生态环境恶劣等特点<sup>[1]</sup>,所以优良植物种选择是加快沿海优良防护林体系建设的关键。光谱和叶绿素荧光技术具有无损伤、快速、高效的优越性,已在监测植物胁迫过程中得到广泛的应用<sup>[2-5]</sup>。张丽平等研究发现盐胁迫处理不同品种的黄瓜 (*Cucumis sativus*),其叶片在可见光区的光谱反射率明显增加,改良归一化差值指数 (modified red-edge ratio,  $mSR_{705}$ )、改良红边比值指数 (modified red-edge normalized difference vegetation,  $mND_{705}$ ) 和光化学反射指数 (photochemical reflectance index,  $PRI$ ) 与黄瓜的盐害程度及不同品种的耐盐程度有密切关系<sup>[3]</sup>。随着盐浓度增加,蓖麻子 (*Ricinus communis*) 叶片的光谱反射率在可见光范围内与叶绿素含量成反相关,最大荧光强度 (maximal fluorescence intensity,  $F_m$ )、光系统 II (photosystem II, PS II) 最大量子产率 (maximum quantum yield of PS II,  $F_v/F_m$ ) 和 PS II 实际量子产量 (actual photochemical efficiency of PS II,  $\Phi_{\text{PSII}}$ ) 等叶绿素荧光参数逐渐降低<sup>[6]</sup>。刘炳响等认为盐胁迫使白榆 (*Ulmus pumila*) 叶片电子传递的量子产额 (quantum yield for electron transport,  $\Phi E_o$ )、单位面积内反应中心的数量

(density of reaction centers,  $RC/CS$ ) 和叶片性能指数 (performance index of absorption basis,  $PI_{\text{ABS}}$ ) 降低<sup>[7]</sup>。小麦 (*Triticum aestivum* L.) 叶片  $F_v/F_m$ 、单位反应中心吸收的光能 (absorption flux per reaction center,  $ABS/RC$ ) 以及  $PI_{\text{ABS}}$  的降低来适应盐胁迫对其伤害<sup>[8]</sup>。

绿竹 (*Bambusa oldhamii*), 禾本科绿竹属。绿竹笋是夏秋季节群众喜爱的蔬菜, 俗称最美味的笋。绿竹根系发达庞大, 耐水力强, 能固土护岸、保持水土等。目前, 绿竹的研究主要集中在光合<sup>[9]</sup>、保护酶活性<sup>[10]</sup>、基因克隆<sup>[11]</sup>、笋营养成分<sup>[12]</sup> 和组织培养<sup>[13]</sup> 等方面, 但是利用荧光和反射光谱对其耐盐的研究较少。本研究采用 Unispec-SC 型单通道光纤光谱仪和非调制式叶绿素荧光仪对绿竹叶片反射光谱和叶绿素快速荧光参数进行测定, 分析了绿竹反射光谱和叶绿素荧光参数对盐胁迫的响应特征, 为今后绿竹的栽培应用及优良品种选育奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及材料培养

供试材料为绿竹 2 年生组培苗 (第 1 年生长在组培室, 第 2 年移栽至温室大棚), 缓苗期使用水培方式, 选用 1/2 Yoshida 营养液配方<sup>[14]</sup>。选择生长健

康,大小基本一致(高 80—100 cm,鲜质量 90—110 g)的绿竹苗,并用清水冲洗植物根部,在茎基部位裹海绵条,然后将苗塞进桶盖的孔中。装入 10 L 的红色塑料桶内(桶盖上均匀烙 3 个直径 1 cm 左右的孔),红桶外在 10 L 处做好标记,桶外用黑色塑料袋封住,每桶加一个气泵,保持每天持续通气,并调节 pH 5.0。每 6—7 d 更换 1 次培养液,每天观察桶内水分情况,蒸发的水分及时补充,绿竹在水培条件下

适应 20 d 左右后(自然光照,湿度 80%,日平均温 28 ℃),待用。

## 1.2 人工海水的配制

胁迫用的海盐按照 Mocledon 的人工海水配方配制(表 1)<sup>[15]</sup>。先依照 Mocledon 人工海水配方配制母液,将母液和 1/4 Yoshida 营养液混合,再按照所需的海盐胁迫浓度配制模拟海盐溶液。胁迫过程的管理同缓苗期。

表 1 人工海水成分\*

Table 1 Artificial seawater composition

成分 Composition								
	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	KCl	NaBr	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
含量 Content/(g/L)	26.726	2.226	3.248	1.153	0.198	0.721	0.058	0.058

\* 数字来源 <http://zhidao.baidu.com/question/26278104.html?fr=ql>

## 1.3 实验设计

实验时间为 2012 年 8 月上旬,地点选择在浙江农林大学智能楼温室大棚,自然光照,湿度控制在 80%,日平均温度控制在 28 ℃。待用苗采用随机分组,海盐浓度分别为 0 (对照)、0.4% (Tr1)、0.8% (Tr2)、1.2% (Tr3)、1.6% (Tr4),设置 5 个处理,每个处理 5 个重复,每个重复 3 丛绿竹苗。胁迫处理 15 d 后开始各指标测定。选晴朗、无风天气,10:00—12:00 进行测量。每丛选取顶端的第 3 或第 4 片光照充分生长状况良好的无病斑叶片,采样点 1 个/叶。

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 叶绿素含量的测定

去除叶脉后剪碎混匀后称取 0.1 g,加入 80% 丙酮溶液 5 mL,遮光室温萃取,叶片发白后测量,每个处理 3 个重复。用紫外-可见分光光度计 UV-2500 (日本岛津)测定在 470、645、663 nm 波长下的吸光度值。采用 Lichtenthaler<sup>[16]</sup> 的公式计算叶绿素 a (Ca)、叶绿素 b (Cb) 和类胡萝卜素含量 (Car)。公式如下:

$$Ca = 12.25 \times D_{663} - 2.79 \times D_{645}$$

$$Cb = 21.50 \times D_{645} - 5.10 \times D_{663}$$

$$Car = (1000 \times D_{470} - 1.82 \times Ca - 85.02 \times Cb) / 198$$

### 1.4.2 反射光谱的测定

采用仪器为光谱分析仪 (UniSpec-SC, US),波段设置 310—1150 nm,采样间隔 1 nm,光谱分辨率 1 nm。每个处理选取 3 个样株,每个样株选取 5 片

叶子,即每个处理重复 15 次,取平均值作为该样品叶片光谱反射率。测量过程中及时进行标准白板校正。用 Multispec 5.1 数据处理软件读取反射光谱原始数据。

### 1.4.3 叶绿素荧光参数的测定

采用非调制式叶绿素荧光仪 (Yaxin-1161 型,北京雅欣理仪科技有限公司,北京)进行叶片叶绿素荧光动力学参数的测定。叶片暗适应 10 min 后,选取叶肉部分用 3000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  饱和蓝光照射 1 s,以 10  $\mu\text{s}$  (2 ms 之前) 和 1 ms (2 ms 之后) 的间隔记录荧光信号,测得叶绿素荧光动力学参数。每株测定 3 次,计算平均值和标准误差。

## 1.5 数据处理

### 1.5.1 光谱分析

将毛竹叶片反射光谱通过下列公式进行一阶微分处理得到微分光谱。

$$D_{\lambda_i} = \frac{|R\lambda(i+1) - R\lambda(i-1)|}{2\Delta\lambda}$$

式中, $\lambda_i$  为波段  $i$  处的波长值; $R_{\lambda_i}$  为波长  $\lambda_i$  处的光谱反射率值; $\Delta\lambda$  为波长  $\lambda_{(i-1)}$  到  $\lambda_i$  的差值,由光谱采样间隔决定。

“三边”参数的计算方法:分别在 505—545、560—640 nm 和 680—750 nm 范围内确定蓝边、黄边和红边位置、幅值和面积。红边位置 (red wavelength,  $\lambda_{\text{red}}$ ) 为红光范围内一阶导数光谱最大值所对应的波长,红边幅值 ( $D_{\lambda_{\text{red}}}$ ) 为一阶导数光谱的最大值,红边面积 ( $S_{\text{red}}$ ) 为一阶导数光谱线所

包围的面积。黄边和蓝边参数与红边参数意义类似,黄边位置 ( $\lambda_{\text{yellow}}$ ),黄边幅值 ( $D_{\lambda_{\text{yellow}}}$ ),黄边面积 ( $S_{\text{yellow}}$ );蓝边位置 ( $\lambda_{\text{blue}}$ ),蓝边幅值 ( $D_{\lambda_{\text{blue}}}$ ),蓝边

面积 (blue area,  $S_{\text{blue}}$ )。根据叶片特征,筛选出较能反应叶片特征结构的光谱参数及相关公式见表 2。

表 2 反射光谱参数  
Table 2 The reflectance spectrum parameters

反射光谱参数 Reflectance spectrum parameters	定义 Definition	文献来源 Reference
红边归一化指数 Red-edge normalized difference vegetation index	$rNDVI_{705} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$	[17]
改良红边比值指数 Modified red-edge normalized difference vegetation index	$mND_{705} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2R_{445}}$	[17]
绿度归一化指数 Greenness normalized index	$gNDVI = \frac{R_{750} - R_{550}}{R_{750} + R_{550}}$	[18]
改良归一化差值指数 Modified red-edge ratio	$mSR_{705} = \frac{R_{750} - R_{445}}{R_{705} + R_{445}}$	[17]
类胡萝卜素反射指数 1 Carotenoid reflectance index I	$CRI_{550} = \frac{1}{R_{510}} - \frac{1}{R_{550}}$	[19]
类胡萝卜素反射指数 2 Carotenoid reflectance index II	$CRI_{700} = \frac{1}{R_{510}} - \frac{1}{R_{700}}$	[19]
光化学反射指数 Photochemical reflectance index	$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$	[20]

公式中:  $R$  代表反射,下标代表光谱波段或波长

### 1.5.2 叶绿素荧光动力学参数的计算

参考 Strasser 等<sup>[21]</sup>的计算方法。下述公式中,  $F_m$  表示暗适应后的最大荧光强度;  $F_o$  表示暗适应后的最小荧光强度;  $F_{300\mu s}$  表示在暗适应后照光 300  $\mu s$  时的荧光强度;  $F_j$  表示在暗适应后照光 2 ms 时的荧光强度。2 ms 时的可变荧光  $V_j = (F_j - F_o) / (F_m - F_o)$ ; 荧光曲线的相对初始斜率  $M_o = 4 \times (F_{300\mu s} - F_o) / (F_m - F_o)$ 。暗适应下 PS II 最大量子产率  $F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m$ ; 单位面积反应中心数目  $RC / CS = (F_v / F_m) \times (V_j / M_o) \times F_o$ ; 单位反应中心复合体吸收的能量  $ABS / RC = M_o / V_j / (F_v / F_m)$ ; 捕获的激子将电子传递到电子传递链中  $QA^-$  下游的其他电子受体的概率  $\Psi_o = (1 - V_j)$ ; 电子传递的量子产额  $\Phi E_o = (1 - F_o / F_m) \times \Psi_o$ ; 用于电子传递的能量  $ET_o / RC = M_o \times (1 / V_j) \times \Psi_o$ ; 叶片性能指数  $PI_{ABS} = 1 / ABS / RC \times [F_v / F_m / (1 - F_v / F_m)] \times [\Psi_o / (1 - \Psi_o)]$ 。

### 1.5.3 数据处理

采用 Origin 8.0 软件进行数据统计分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同海盐浓度胁迫对光合色素含量的影响

海盐胁迫下了绿竹叶片光合色素含量的变化如

表 3 显示。从表 3 可以看出,随着海盐浓度的增大,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均出现先增大后下降的趋势;海盐浓度小于 1.2% 时,叶绿素总量和类胡萝卜素与对照无显著差异,当海盐浓度增加到 1.6% 时,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均呈极显著的降低,与对照相比分别降低了 63.2%、62.8%、47.2%。叶绿素 a/b 值在 0.4% 浓度处理下显著降低,比对照降低了 12.7%。

### 2.2 不同浓度海盐对绿竹叶片反射光谱参数的影响

#### 2.2.1 不同浓度海盐的绿竹叶片反射光谱特征

不同浓度海盐的绿竹叶片反射光谱曲线的整体变化趋势一致,均具有典型的反射光谱特征,420—500 nm 蓝光谷、550 nm 处绿光反射峰、600—680 nm 红光谷、680—740 nm 红边区的快速上升以及 780—1000 nm 的近红外高原平台。但是在不同浓度下反射光谱的反射率大小则存在差异,尤其是在绿光区 (525—605 nm) 和近红外区 (780—1000 nm) 差异明显,1.6% 浓度处理处理在绿光区 (525—605 nm) 明显高于其他处理,在 556 nm 和处达到最高值,相比较对照高出了 30.8% (图 1)。



表 3 不同浓度海盐对绿竹叶片色素含量的影响 (平均值±标准误差)

Table 3 Effects of different concentration of sea salt on pigment contents of *Bambusa oldhamii* leaves (mean±SE)

海盐浓度/% Sea salt concentration	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b	叶绿素总量/(mg/g) Chlorophyll a+b	类胡萝卜素/(mg/g) Carotenoids	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
0 (CK)	2.20±0.25Aab	0.97±0.15Aab	3.14±0.40ABab	0.53±0.09Aab	2.37±0.11Aa
0.40	2.39±0.32Aa	1.16±0.17Aa	3.54±0.49Aa	0.62±0.00Aa	2.07±0.02Bb
0.80	2.19±0.22Ab	0.93±0.10Ab	3.13±0.31ABab	0.59±0.05Aa	2.35±0.03Aa
1.20	2.01±0.35Ac	0.86±0.14Ac	2.87±0.49Cc	0.52±0.12Ac	2.32±0.04Aa
1.60	0.81±0.05Dd	0.35±0.00Dd	1.15±0.05Dd	0.28±0.01Dd	2.30±0.15Aa

相同字母表示差异不显著;不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ );不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )

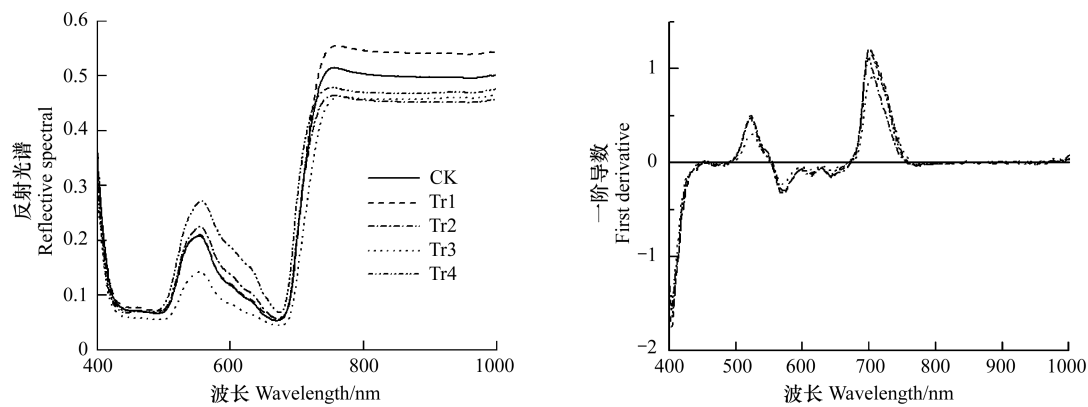


图 1 绿竹叶片反射光谱曲线和一阶导数曲线

Fig.1 Reflectance spectra and first derivative of *Bambusa oldhamii* leaves

### 2.2.2 不同浓度海盐的绿竹叶片反射光谱的三边特征

由于光谱微分技术对光谱的噪声非常敏感,在实际分析光谱数据过程中,为了减少背景噪声的影响以提高生化参数的监测效果,常常需要对原始光谱数据进行微分变换,把实验测得光谱数据进行一阶求导(图1)。图中可以看出,在蓝光区505—545 nm和红光区680—750 nm出现最大峰值,黄光区560—640 nm出现最小峰值。红边是绿色植物光谱最明显的特征之一,它是指绿色植物反射光谱位于红光范围(680—750 nm)的光谱。不同浓度处理的绿竹叶片反射光谱值在红光区680—750 nm只有一个峰值,相比对照,随着海盐浓度的增加, $\lambda_{red}$ 先增大后减小,也就是说先向长波方向移动,后向短波方向移动,1.2%浓度处理下减小不显著,但是1.6%浓度处理, $\lambda_{red}$ 显著减小, $S_{red}$ 相比对照出现减小趋势(表4)。

### 2.2.3 不同浓度海盐的绿竹叶片反射光谱参数变化

光谱参数是绿色植物的光谱反射特征,是反映植物生长状况的最常用光谱变量。当海盐浓度为

1.2%时,叶绿素参数 $rNDVI_{705}$ 和 $gNDVI$ 显著下降( $P < 0.05$ ),与对照相比分别降低了27.3%和23.3%;当海盐浓度达到1.6%时, $rNDVI_{705}$ 、 $mND_{705}$ 、 $gNDVI$ 和 $mSR_{705}$ 呈极显著的降低( $P < 0.01$ ),与对照相比分别下降了42.4%、43.9%、32.6%、21.5%。在1.2%海盐浓度处理下,类胡萝卜素参数 $CRI_{700}$ 和 $PRI$ 显著降低( $P < 0.05$ ),与对照相比分别降低了19.5%和43.9%;当海盐浓度增加到1.6%时, $CRI_{550}$ 、 $CRI_{700}$ 和 $PRI$ 相比较对照分别下降了47.2%、49.9%和58.5%(表5)。

### 2.3 绿竹叶片色素含量与反射光谱参数的相关性

相关分析表明(表6),绿竹叶片叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b及类胡萝卜素含量与反射光谱参数都存在显著的相关性( $P < 0.05$ )。叶绿素a、叶绿素b和叶绿素a+b含量与 $rNDVI$ 、 $mND$ 、 $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$ 、 $CRI_{550}$ 、 $CRI_{700}$ 、 $PRI$ 等呈极显著( $P < 0.01$ )正相关,其中与 $CRI_{700}$ 相关系数最小,与 $mND$ 的相关系数最大。类胡萝卜素含量与 $rNDVI$ 、 $mND$ 、 $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$ 等呈极显著( $P < 0.01$ )正相关,与 $CRI_{550}$ 、 $CRI_{700}$ 、

$PRI$  等呈显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关,其中与  $mSR_{705}$  相 关系数最小,与  $mND$  的相关系数最大。

表 4 不同浓度海盐绿竹叶片的“三边”参数 (平均值±标准误差)

参数 Parameter	海盐浓度 Sea salt concentration/%				
	0 (Ck)	0.40	0.80	1.20	1.60
蓝光波长 Blue wavelength( $\lambda_{blue}$ )	521.80±1.10a	523.10±0.99a	522.67±1.58a	522.30±2.11a	513.00±0.82b
蓝光幅值 Blue amplitude ( $D_{\lambda blue}$ )	0.48±0.03b	0.50±0.05b	0.47±0.06b	0.31±0.06c	0.58±0.05a
红光面积 Blue area( $S_{blue}$ )	11.88±0.89b	12.70±1.67b	12.57±1.32b	7.96±1.43c	16.48±1.40a
黄光波长 Yellow wavelength( $\lambda_{yellow}$ )	627.33±2.50b	628.70±1.95a	628.11±1.69a	627.80±2.84ab	626.67±0.52c
黄光幅值 Yellow amplitude ( $D_{\lambda yellow}$ )	-0.06±0.02b	-0.06±0.01b	-0.06±0.01b	-0.04±0.01a	-0.09±0.01c
黄光面积 Yellow area( $S_{yellow}$ )	-13.10±1.92bc	-12.33±1.45b	-11.96±1.22b	-8.03±1.27a	-14.11±0.97c
红光波长 Red wavelength( $\lambda_{red}$ )	698.50±1.64b	701.50±0.11a	699.67±0.87ab	698.25±3.77b	695.25±0.69c
红光幅值 Red amplitude ( $D_{\lambda red}$ )	1.32±0.07ab	1.23±0.11b	1.11±0.07c	0.95±0.05d	1.40±0.10a
红光面积 Red area( $S_{red}$ )	44.66±2.74a	25.03±2.42c	38.93±3.87b	40.64±0.97b	39.92±2.74b

小写字母不同表示 0.05 水平上的差异性 ( $P < 0.05$ )

表 5 不同浓度海盐的绿竹叶片反射光谱参数变化(平均值±标准误差)

参数 Parameters	海盐浓度 Sea salt concentration/%				
	0 (Ck)	0.40	0.80	1.20	1.60
红边归一化指数 ( $rNDVI_{705}$ )	0.33±0.12ab	0.37±0.25a	0.28±0.19b	0.24±0.21b	0.19±0.11c
Red-edge normalized difference vegetation index					
改良红边比值指数 ( $mND_{705}$ )	0.41±0.2ab	0.46±0.14a	0.36±0.22b	0.35±0.19b	0.23±0.09c
Modified red-edge normalized difference vegetation index					
绿度归一化指数 ( $gNDVI$ )	0.43±0.15a	0.45±0.28a	0.36±0.18b	0.33±0.26b	0.29±0.16c
Greenness normalized index					
改良归一化差值指数 ( $mSR_{705}$ )	1.35±0.48ab	1.43±0.65a	1.20±0.65b	1.19±0.59b	1.06±0.54c
Modified red-edge ratio					
类胡萝卜素反射指数 1 ( $CRI_{550}$ )	6.72±1.56a	6.91±2.45a	6.82±2.69b	5.89±3.10c	3.55±2.46d
Carotenoid reflectance index I					
类胡萝卜素反射指数 2 ( $CRI_{700}$ )	6.55±2.05a	6.63±1.96a	6.58±2.98ab	5.27±3.45b	3.28±2.58c
Carotenoid reflectance index II					
光化学反射指数 ( $PRI$ )	0.41±0.03a	0.38± 0.01a	0.32±0.07b	0.23± 0.06b	0.17± 0.06c
Photochemical reflectance index					

小写字母不同表示 0.05 水平上的差异性 ( $P < 0.05$ )

## 2.4 不同浓度海盐胁迫对叶片叶绿素荧光动力学曲线的影响

绿竹叶片经过暗适应后转入饱和脉冲光强照射,叶绿素荧光迅速上升,经过  $O$ 、 $J$ 、 $I$ 、 $P$  各点后逐渐平稳。海盐浓度 0.8%处理的  $O$  点和  $P$  点的荧光强度上升幅度较大,1.6%浓度处理出现了  $K$  点 (图 2A)。1.2%和 1.6%处理的  $J$  点最高,然后骤然下降,达到  $I$  点时最低然后又上升。 $J$  点的相对可变荧光强度在 1.2%和 1.6%浓度处理明显下降,1.6%下降最明显之后随时间而上升 (图 2B)。在  $J$ 、 $I$  点各处

理间的相对可变荧光强度差值明显增加,其中 1.2%和 1.6%浓度处理差值增加最为明显。随着时间推移,处理间的相对可变荧光强度恢复到同一水平 (图 2C)。

## 2.5 不同浓度海盐对叶片叶绿素荧光动力学参数的影响

基于生物膜能量流动理论<sup>[21]</sup> 计算损伤后各时间点的荧光动力学参数,可以观察到不同海盐浓度处理后叶片叶绿素荧光动力学参数发生明显变化 (表 7)。

表 6 绿竹叶片反射光谱参数与色素含量的相关性

光谱参数 Spectral parameters	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	类胡萝卜素 Carotenoid
红边归一化指数 ( $rNDVI_{705}$ ) Red-edge normalized difference vegetation index	0.883 **	0.911 **	0.895 **	0.785 **
改良红边比值指数 ( $mND_{705}$ ) Modified red-edge normalized difference vegetation index	0.901 **	0.909 **	0.917 **	0.870 **
绿度归一化指数 ( $gNDVI$ ) Greenness normalized index	0.877 **	0.927 **	0.874 **	0.702 **
改良归一化差值指数 ( $mSR_{705}$ ) Modified red-edge ratio	0.856 **	0.901 **	0.868 **	0.761 **
类胡萝卜素反射指数 I ( $CRI_{550}$ ) Carotenoid reflectance index I	0.778 **	0.846 **	0.795 **	0.642 *
类胡萝卜素反射指数 II ( $CRI_{700}$ ) Carotenoid reflectance index II	0.736 **	0.814 **	0.755 **	0.699 *
光化学反射指数 ( $PRI$ ) Photochemical reflectance index	0.818 **	0.836 **	0.805 **	0.671 *

\* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )

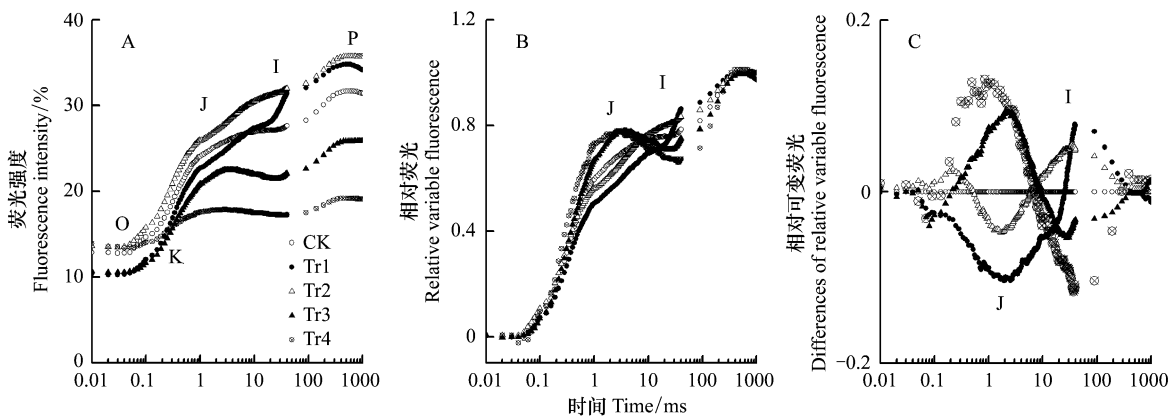


图 2 不同海盐浓度对绿竹叶片荧光动力学曲线的变化

**Fig.2** Variation of chlorophyll fluorescence transients different concentration of sea salt stressed leaves of *Bambusa oldhamii*  
A: 不同海盐浓度对绿竹叶片 O-J-I-P 荧光诱导曲线 (3 次重复的平均值); B:  $F_0$  (minimal fluorescence intensity) 与  $F_m$  (maximal fluorescence intensity) 间相对可变荧光强度 (relative variable fluorescence,  $V_t$ ) 随时间的变化,  $V_t = (F_t - F_0) / (F_m - F_0)$ ,  $F_t$  (description fluorescence at time  $t$ ) 表示  $t$  时的荧光强度,  $F_0$  表示暗适应后的最小荧光强度,  $F_m$  表示暗适应后的最大荧光强度; C:  $V_t$  与对照的差值  $\Delta V_t$ ,  $\Delta V_t = V_t$  (处理) -  $V_t$  (对照); O、J、I、P 各点含义详见李鹏民等<sup>[22]</sup>

由表 7 可以看出:随着盐胁迫强度的增加, $ABS/RC$  呈现先下降后上升的趋势,在 1.6% 浓度处理处达到最大值,比对照上升了 1.23 倍 ( $P < 0.05$ );  $ET_0/RC$  呈现先上升后下降的趋势,相比较对照下降了 21.7% ( $P < 0.05$ )。  $RC/CS$  随着浓度的升高呈现下降趋势,1.6% 浓度处理比对照下降了 52.1% ( $P < 0.05$ );  $\Phi E_0$  呈现先增加后下降的趋势,比对照下降了 28.6% ( $P < 0.05$ )。  $F_v/F_m$  和  $PI_{ABS}$  呈现先升高后下降的趋势,相比对照,1.2% 浓度处理下降,但不显著,

1.6% 浓度处理下降显著,分别下降了 50.8% 和 92.3% ( $P < 0.05$ ) (表 7)。

2.6 不同浓度海盐的光谱色素参数与  $PRI$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi E_0$ 、 $PI_{ABS}$  的相关性

由表 8 可以看出,  $PRI$  与光谱色素参数在各个处理中具有相关性,尤其是与对照具有极显著性相关,0.4% 浓度处理下的  $mNDVI_{705}$ 、 $mND_{705}$ 、 $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$ 、 $CRI_{550}$  显著相关,0.8% 浓度处理下的  $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$  出现显著相关,  $CRI_{550}$  和  $CRI_{700}$  极显著性相关,

1.2%浓度与 1.6%浓度下的呈现显著相关性。

表 7 不同浓度海盐胁迫的绿竹叶片主要叶绿素荧光参数的变化(平均值±标准误差)

**Table 7 Variations of main chlorophyll fluorescence parameters in different concentration of sea salt stress in leaves of *Bambusaoldhamii* (mean ±SE)**

参数 Parameter	海盐浓度 Sea salt concentration/%				
	0(对照)	0.4	0.8	1.2	1.6
光系统Ⅱ最大量子产率( $F_v/F_m$ )	0.59±0.08b	0.70±0.01a	0.62±0.06ab	0.59±0.02b	0.29±0.04c
Maximum quantum yield of PSⅡ					
电子传递的量子产额( $\Phi E_o$ )	0.21±0.05bc	0.32±0.03a	0.25±0.04b	0.16±0.03c	0.07±0.01d
Quantum yield for electron transport					
单位反应中心吸收的能量( $ABS/RC$ )	3.38±0.43b	2.81±0.06c	3.61±0.35b	3.83±0.42b	7.54±0.83a
Absorption flux per PSⅡ reaction center					
用于电子传递的能量( $ET_o/RC$ )	0.69±0.11b	0.91±0.06a	0.90±0.08a	0.49±0.06c	0.54±0.06c
Electron transport per reaction center					
单位面积反应中心数目( $RC/CS$ )	3.80±0.21a	3.65±0.27a	3.70±0.44a	3.41±0.43a	1.82±0.31b
Density of reaction centers					
叶片性能指数( $PI_{ABS}$ )	0.26±0.15b	0.73±0.12a	0.34±0.14b	0.18±0.07bc	0.02±0.01c
Performance index of absorption basis					

小写字母不同表示 0.05 水平上的差异性 ( $P < 0.05$ )

表 8 不同浓度海盐的光谱色素参数与  $PRI$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi E_o$ 、 $PI_{ABS}$  的相关性

**Table 8 Relationships between  $PRI$ ,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi E_o$ ,  $PI_{ABS}$  and reflectance spectrum parameters at different concentration of sea salt**

参数 Parameters		$mNDVI_{705}$	$mND_{705}$	$gNDVI$	$mSR_{705}$	$CRI_{550}$	$CRI_{700}$
0 (Ck)	$PRI$	0.934 **	0.925 **	0.98 **	0.94 **	0.972 **	0.902 **
	$F_v/F_m$	0.776 *	0.779 *	0.851 **	0.771 *	0.632	0.996 **
	$\Phi E_o$	0.668	0.692	0.776 *	0.681	0.526	0.976 **
	$PI_{ABS}$	0.802 *	0.805 *	0.872 **	0.796 *	0.664	0.999 **
0.40%	$PRI$	0.767 *	0.739 *	0.867 **	0.809 *	0.864 **	0.696
	$F_v/F_m$	0.264	0.256	0.331	0.298	0.587	0.682
	$\Phi E_o$	0.874 **	0.878 **	0.838 *	0.856 **	0.926 **	0.873 **
	$PI_{ABS}$	0.900 **	0.903 **	0.867 **	0.883 **	0.904 **	0.844
0.80%	$PRI$	-0.52	-0.36	-0.719 *	-0.682 *	-0.910 **	-0.905 **
	$F_v/F_m$	0.834 *	0.822 *	0.887 **	0.824 *	0.884 **	0.768 *
	$\Phi E_o$	0.837 *	0.825 *	0.902 **	0.824 *	0.911 **	0.801 *
	$PI_{ABS}$	0.838 *	0.846 *	0.687	0.654	0.711 *	0.313
1.20%	$PRI$	0.724 *	0.734 *	0.842 *	0.716 *	0.135	0.148
	$F_v/F_m$	0.943 **	0.915 **	0.925 **	0.984 **	0.411	0.176
	$\Phi E_o$	0.994 **	0.998 **	0.998 **	0.966 **	0.763 *	0.528
	$PI_{ABS}$	0.979 **	0.989 **	0.999 **	0.981 **	0.718 *	0.526
1.60%	$PRI$	0.742 *	0.727 *	0.595	0.758 *	0.446	0.323
	$F_v/F_m$	0.986 **	0.983 **	0.992 **	0.996 **	0.999 **	0.999 **
	$\Phi E_o$	0.968 **	0.964 **	0.978 **	0.985 **	0.992 **	0.995 **
	$PI_{ABS}$	0.914 **	0.908 **	0.930 **	0.943 **	0.957 **	0.965 **

\* 代表显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\* 代表极显著相关 ( $P < 0.01$ );  $rNDVI_{705}$ : 红边归一化指数;  $mND_{705}$ : 改良红边比值指数;  $gNDVI$ : 绿度归一化指数;  $mSR_{705}$ : 改良归一化差值指数;  $CRI_{550}$ : 类胡萝卜素反射指数 I;  $CRI_{700}$ : 类胡萝卜素反射指数 2;  $PRI$ : 光化学反射指数;  $\Phi E_o$ , 电子传递的量子产额;  $F_v/F_m$ , PSⅡ最大量子产率;  $PI_{ABS}$ , 叶片性能指数; \* indicates correlation significant at 0.05 level, \*\* indicates correlation significant at 0.01 level.  $rNDVI_{705}$ : red-edge normalized difference vegetation index;  $mND_{705}$ : modified red-edge normalized difference vegetation index;  $gNDVI$ : greenness normalized index;  $mSR_{705}$ : modified red-edge ratio;  $CRI_{550}$ : carotenoid reflectance index I;  $CRI_{700}$ : carotenoid reflectance index Ⅱ;  $PRI$ : photochemical reflectance index;  $\Phi E_o$ , quantum yield for electron transport;  $F_v/F_m$ , maximum quantum yield of PSⅡ;  $PI_{ABS}$ , performance index of leaf



由表 8 可以看出,在对照水平, $F_v/F_m$ 与  $mNDVI_{705}$ 、 $mND_{705}$ 、 $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$ 、 $CRI_{550}$  具有相关性,0.4%浓度下无相关性,其他 3 个处理都具有良好的相关性;在对照水平, $\Phi E_o$ 与  $gNDVI$  和  $CRI_{700}$  显著相关,在其他处理水平,与  $mNDVI_{705}$ 、 $mND_{705}$ 、 $gNDVI$ 、 $mSR_{705}$ 、 $CRI_{550}$  都具有显著相关性;在对照、0.4%、1.2%和 1.6%浓度水平上, $PI_{ABS}$  与叶绿素光谱参数具有显著相关性,0.8%浓度处理水平与  $mNDVI_{705}$ 、 $mND_{705}$ 、 $CRI_{550}$  显著相关。

### 3 讨论

叶绿素是植物叶片中吸收和传递光能的主要色素分子,直接影响光合作用的效能与水平,是植物活力的重要体现;同时,叶绿素含量水平也是反映植物营养状况和生长发育进程的重要指标<sup>[23-24]</sup>。有研究表明,盐胁迫使黄瓜 (*Cucumis sativus*) 叶绿体大部分与细胞壁脱离,基粒片层数减少,叶片光合色素含量下降,引起植株光合能力降低<sup>[25]</sup>。随着 NaCl 处理浓度的加大,白柠条 (*Caragana korshinskii*) 和骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 的叶绿素 a 含量呈先升高后降低趋势<sup>[26]</sup>。NaCl 胁迫后,黄瓜叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量均显著降低<sup>[26]</sup>。本研究表明:随着海盐浓度的增大,光合色素呈现先升高后降低的趋势 (表 3),说明在低盐胁迫下,绿竹可能通过提高光合色素合成速度对低盐的适应<sup>[27]</sup>;高盐胁迫下,可能导致绿竹叶片光合色素合成速度降低,或降解速度加快 (表 3)。

光谱分析是一种快速、准确判断物体所含成分及含成分多少的有效方法。在植物生理监测过程中,反射光谱因其无损、快速、高效的优越性,成为获取农田生物环境信息的重要手段,在精确农业发展中发挥着重要作用。在可见光区域影响光谱反射的主导因子是叶绿素和类胡萝卜素<sup>[17]</sup>,叶绿素在可见光区有很强的光吸收能力。有研究表明,盐处理明显增加了黄瓜叶片在可见光区的光谱反射率<sup>[3]</sup>。Peñuelas 等<sup>[28]</sup>在大麦 (*Hordeum vulgare*) 上也做过类似研究,结果显示近红外反射随盐浓度升高而降低,而可见光反射随盐浓度升高而增加。随着海盐浓度的升高,光谱参数降低 (表 5),色素含量降低 (表 3) 说明两者具有一定的相关性 (表 6),这与张丽平<sup>[3]</sup>和 Peñuelas<sup>[28]</sup>研究结果相似。

叶绿素荧光具有反应内在性的特点,是研究植物光合生理与逆境胁迫最好的无损检测技术<sup>[21]</sup>。张蕾等<sup>[29]</sup>对 4 种珍稀观赏竹光合作用特性研究认为  $F_v/F_m$  都随光强增大而逐步下降。张秋英等<sup>[30]</sup>研究了水分胁迫对小麦 (*Triticum aestivum*) 旗叶叶绿素 a 荧光动力学参数的影响,发现旗叶的 T 1/2 值减少,旗叶  $F_v/F_m$  和潜在活性 (potential activity,  $F_v/F_o$ ) 降低。应叶青等<sup>[31]</sup>研究认为毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 幼苗叶片初始荧光表现出随干旱胁迫程度的加剧,不断增加的趋势,而  $F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $F_v/F_m$  呈逐渐降低的趋势。当盐胁迫浓度增加到 1.6%时,绿竹叶片叶绿素荧光动力学曲线出现明显的 K 点 (图 2),表明绿竹叶片光合作用放氧系统受到严重的抑制,以及  $Q_A$  供体侧受损<sup>[21]</sup>,导致  $ET_o/RC$ 、 $\Phi E_o$ 、 $F_v/F_m$  和  $PI_{ABS}$  降低,反应中心降解或失活<sup>[7]</sup>。 $PRI$  被认为是与叶绿素含量高度相关<sup>[32]</sup>,Rahimzadeh-Bajgiran 等<sup>[33]</sup>认为在植物叶片生长的各个阶段, $PRI$  以及叶绿素荧光参数和植物色素指数在短期密切相关。在海盐胁迫下, $PRI$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi E_o$  和  $PI_{ABS}$  与光谱色素参数具有良好的相关性 (表 8)。

综上所述,高盐胁迫 (1.6%) 条件下,抑制绿竹叶片光合色素的合成,降低光能的吸收,导致叶片发生光抑制,PS II 的受体侧受到伤害,PS II 反应中心降解或失活,直接抑制绿竹的生长发育。低盐胁迫下,绿竹通过提高叶片光合色素含量和光能的吸收,增加  $F_v/F_m$ 、 $\Phi E_o$ 、 $ET_o/RC$ 、 $RC/CS$  和  $PI_{ABS}$ ,提高绿竹的耐盐能力。从本研究的结果来看,当盐胁迫增加到 1.2%时,绿竹叶片保持较高的色素含量和光能吸收能力,以及  $F_v/F_m$ 、 $\Phi E_o$ 、 $ET_o/RC$ 、 $RC/CS$  和  $PI_{ABS}$ ,说明绿竹具有一定的耐盐性。

### References:

- [1] Hu H B, Zhang J C, Lu X Z. Study on environmental benefits of coastal windbreak system in China. *World Forestry Research*, 2001, 14(5): 37-43.
- [2] Shi Z, Shi S Q, Zhang Z X, Gao R F, Xiao W F. Effects of drought and excess salt stress on characteristics of chlorophyll fluorescence of leaves in *Haloxylon ammodendron*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(3): 20-25.
- [3] Zhang L P, Zhang G Y, Shi Q H, Ding F, Wang X F, Feng J P. Effects of NaCl stress on damage and reflectance characteristics of cucumber cultivars with different salt-tolerance. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 761-765.

- [ 4 ] Eklundh L, Johansson T, Solberg S. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1566-1573.
- [ 5 ] Fang X W, Turner N C, Li F M, Guo X S. Caragana korshinskii seedlings maintain positive photosynthesis during short-term severe drought stress. *Photosynthetica*, 2011, 49(4): 603-609.
- [ 6 ] Li G, Wan S W, Zhou J, Yang Z Y, Qin P. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products*, 2010, 31(1): 13-19.
- [ 7 ] Liu B X, Wang Z G, Yang M S, Liang H Y. Effects of simulated salt stress on seed germination, seedling emergence and growth of *Ulmus pumila*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 39-46.
- [ 8 ] Mehta P, Jajoo A, Mathur S, Bharti S. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(1): 16-20.
- [ 9 ] Zheng R M, Zheng Y S, Zhang M, Li Q R, Chen X D, Chen L G. Study on Impact of Photosynthesis and Chlorophyll of *Dendrocalamopsis oldhami* Grown in the Coastal Areas Under Salt Stress. *Journal of Bamboo Research*, 2002, 21(4): 76-80.
- [ 10 ] Zheng Y S, Zheng R M, Yao Q D. Effects of salt stress on physiology and biochemistry in the leaves of *Dendrocalamus oldhami* on the coast. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 2003, 32(4): 478-481.
- [ 11 ] Gao Z M, Liu Q, Mu S H, Li X P, Hu T. Cloning and primary functional analysis of a zinc finger protein gene of BoBZF from *Bambusa oldhamii*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10): 49-54.
- [ 12 ] Zhu Y, Luo C G. Analysis of nutrient components in *Dendrocalamopsis oldhami* bamboo shoot. *Nonwood Forest Research*, 2012, 30(3): 103-105.
- [ 13 ] Pei H Y, Fang W, Lin X C, Gui R Y, Huang L C. Micropropagation of *Bambusa oldhamii* f. *variegata* by tissue culture. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(1): 149-154.
- [ 14 ] Shao J F, Gui R Y, Ji H B, Li G D, Fang W. A preliminary study on establishment of hydroponic culture system for *Phyllostachys pubescens* seedlings. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2011, 28(1): 86-94.
- [ 15 ] Xiao J, Xiao Y K, Liu C Q, Zhao Z Q, He M Y, Liang C S. Boron isotopic fractionation during incorporation of boron into  $Mg(OH)_2$ . *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(17): 2363-2371.
- [ 16 ] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, 148: 350-382.
- [ 17 ] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [ 18 ] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3): 494-500.
- [ 19 ] Gitelson A A, Zur Y, Chivkunova O B, Merzlyak M N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 2002, 75(3): 272-281.
- [ 20 ] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [ 21 ] Strasser R J, Srivastava A, Tsimilli-Michael M. 2000. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples // Yunus M, Pathre U, Mohanty P, eds. *Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation*. London: Taylor and Francis, 445-483.
- [ 22 ] Li P M, Gao H Y, Strasser R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(6): 559-566.
- [ 23 ] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271-282.
- [ 24 ] Moorthy I, Miller J R, Noland T L. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: An assessment at the needle and canopy level. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 2824-2838.
- [ 25 ] Tong H, Zhang Z X, Li B, Wang J W, Guo S R. Effects of Iso-osmotic  $Ca(NO_3)_2$  and NaCl stress on chloroplast Ultra-structure and photosynthesis in cucumber leaves. *China Vegetables*, 2012, (18): 160-165.
- [ 26 ] Han Z X, Li L, Xu X W, Lü X F, Yue H X, Bian Z, Li L Z. Effect of NaCl on physiological features of 4 legume seedlings in desert areas of Xinjiang, China. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(5): 491-499.
- [ 27 ] Matoh T, Murata S. Sodium stimulates growth of *Panicum coloratum* through enhanced photosynthesis. *Plant Physiology*, 1990, 92(4): 1169-1173.
- [ 28 ] Peñuelas J, Isla R, Fillela I, Araus J L. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. *Crop Science*, 1997, 37(1): 198-202.
- [ 29 ] Zhang L, Jin S H, Fang W. Characteristics of photosynthesis in four rare ornamental bamboo species. *Journal of Zhejiang University*, 2009, 35(2): 165-172.
- [ 30 ] Zhang Q Y, Li F D, Liu M Y, Dong B D. Effect of water stress on the photosynthesis of flag leaf of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(3): 80-84.

- [31] Ying Y Q, Guo J, Wei J F, Zou Y Q, Hu D C, Fang W. Photosynthetic and chlorophyll fluorescent responses of *Phyllostachys pubescens* seedlings to water deficiency stress. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(6): 128-133.
- [32] Garbulsky M F, Peñuelas J, Gamon J, Inoue Y, Filella I. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies—a review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 281-297.
- [33] Rahimzadeh-Bajgiran P, Munehiro M, Omasa K. Relationships between the photochemical reflectance index (PRI) and chlorophyll fluorescence parameters and plant pigment indices at different leaf growth stages. *Photosynthesis Research*, 2012, 113(1/3): 261-271.
- 参考文献:
- [1] 胡海波, 张金池, 鲁小珍. 我国沿海防护林体系环境效应的研究. *世界林业研究*, 2001, 14(5): 37-43.
- [2] 施征, 史胜青, 张志翔, 高荣孚, 肖文发. 干旱与高盐对梭梭叶绿素荧光特性的影响. *北京林业大学学报*, 2012, 34(3): 20-25.
- [3] 张丽平, 张格英, 史庆华, 丁飞, 王秀峰, 冯建鹏. 氯化钠胁迫对不同耐盐黄瓜品种的损伤效应及反射光谱特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 761-765.
- [7] 刘炳响, 王志刚, 杨敏生, 梁海永. 模拟盐胁迫对白榆种子发芽、出苗及幼苗生长的影响. *草业学报*, 2012, 21(5): 39-46.
- [9] 郑容妹, 郑郁善, 张梅, 李庆荣, 陈羡德, 陈礼光. 盐分胁迫对沿海绿竹光合作用及叶绿素的影响. *竹子研究汇刊*, 2002, 21(4): 76-80.
- [10] 郑郁善, 郑容妹, 姚庆端. 盐分胁迫对沿海沙地绿竹生理生化的效应. *福建农林大学学报*, 2003, 32(4): 478-481.
- [11] 高志民, 刘青, 牟少华, 李雪平, 胡陶. 绿竹锌指蛋白基因BoBZF克隆及功能初步分析. *林业科学*, 2012, 48(10): 49-54.
- [12] 朱勇, 罗朝光. 绿竹笋营养成分的测定与分析. *经济林研究*, 2012, 30(3): 103-105.
- [13] 裴海燕, 方伟, 林新春, 桂仁意, 黄丽春. 花叶花秆绿竹的试管快繁研究. *浙江林学院学报*, 2010, 27(1): 149-154.
- [14] 邵继峰, 桂仁意, 季海宝, 李国栋, 方伟. 毛竹实生苗水培体系初步建立. *浙江农林大学学报*, 2011, 28(1): 86-94.
- [15] 肖军, 肖应凯, 刘丛强, 赵志琦, 贺茂勇, 梁重山. 硼掺入 $Mg(OH)_2$ 过程中的硼同位素分馏. *科学通报*, 2009, 54(16): 2363-2371.
- [22] 李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用. *植物生理与分子生物学报*, 2005, 31(6): 559-566.
- [25] 童辉, 张振兴, 李斌, 王军伟, 郭世荣. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和NaCl胁迫对黄瓜叶片叶绿体超微结构及光合特性的影响. *中国蔬菜*, 2012, (18): 160-165.
- [26] 韩张雄, 李利, 徐新文, 吕湘芳, 岳红霞, 边振, 李力争. NaCl对4种荒漠豆科植物幼苗生理参数的影响. *植物学报*, 2012, 47(5): 491-499.
- [29] 张蕾, 金松恒, 方伟. 4种珍稀观赏竹光合作用特性研究. *浙江大学学报*, 2009, 35(2): 165-172.
- [30] 张秋英, 李发东, 刘孟雨, 董宝娣. 水分胁迫对小麦旗叶叶绿素a荧光参数和光合速率的影响. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3): 80-84.
- [31] 应叶青, 郭璟, 魏建芬, 邹奕巧, 胡冬春, 方伟. 水分胁迫下毛竹幼苗光合及叶绿素荧光特性的响应. *北京林业大学学报*, 2009, 31(6): 128-133.