

# 多效唑对太阳扇叶片叶绿素含量及其 荧光参数的影响

李 源<sup>1</sup>,何丙辉<sup>1\*</sup>,毛文韬<sup>1</sup>,黄小辉<sup>2</sup>,曾清苹<sup>1</sup>,李 艳<sup>3</sup>,苏健波<sup>4</sup>  
(1. 西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 300715; 2. 重庆市林业科学研究院/  
三峡库区森林生态保护与恢复重庆市市级重点实验室,重庆 300036; 3. 重庆市南岸区峡口  
镇政府农业经济服务中心,重庆 400072; 4. 重庆市美樱时代生态农业开发有限责任公司,重庆 402256)

**摘要:** 为了探讨多效唑(PP<sub>333</sub>)对澳大利亚太阳扇(*Scaevola aemula* ‘Sunfan’)叶绿素含量及其荧光参数的影响,以1年生太阳扇扦插苗为试材,于2013年5月用Junior-PAM调制叶绿素荧光仪研究了10、50、100、200、300 mg/L PP<sub>333</sub>处理对太阳扇叶片叶绿素a(Chla)含量、叶绿素b(Chlb)含量、总叶绿素(Chl)含量和叶绿素荧光参数,即PS II的最大光化学效率(Fv/Fm)、PS II天线转化效率(Fv’/Fm’)、潜在光化学效率(Fv/Fo)、电子传递速率(ETR)、实际光化学效率(ΦPS II)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)、PS II处非调节性能量耗散的量子产量[Y(NO)]的影响。结果显示:太阳扇叶片Chla、Chlb、Chl含量及Fv/Fm、Fv’/Fm’、Fv/Fo、ΦPS II、ETR均随着PP<sub>333</sub>浓度的增加先增大后减小,且均在PP<sub>333</sub>质量浓度为100 mg/L时达到最大值,依次为1.36 mg/g、0.62 mg/g、1.98 mg/g、0.63、0.81、4.78、0.62、49.80,分别比蒸馏水对照组显著增加20.83%、39.30%、26.04%、25.43%、11.90%、68.46%、25.44%、25.42%。相关分析表明:Chla、Chlb、Chl含量均与Fv/Fm、Fv’/Fm’、Fv/Fo、ETR、ΦPS II、qP呈极显著正相关(P<0.01)。由最优回归方程可知:Chla、Chl含量均随着Fv/Fo和ΦPS II的增加而增加,Chlb含量随着Fv’/Fm’和qP的增加而增加。研究表明,PP<sub>333</sub>对太阳扇叶绿素及其荧光参数的影响显著,且叶绿素含量与叶绿素荧光参数之间有着紧密复杂的联系。

**关键词:** 澳大利亚太阳扇; 多效唑; 叶绿素; 叶绿素荧光参数  
**中图分类号:** S682      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2015)11-0097-07

## Effects of Paclobutrazol on Chlorophyll Content and Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Scaevola aemula* ‘Sunfan’

LI Yuan<sup>1\*</sup>, HE Binghui<sup>1\*</sup>, MAO Wentao<sup>1</sup>, HUANG Xiaohui<sup>2</sup>, ZENG Qingping<sup>1</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, SU Jianbo<sup>4</sup>  
(1. College of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments  
of Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 300715, China; 2. Chongqing Academy  
of Forestry/Chongqing Key Laboratory of The Three Gorges Area Forest Ecology Protection and Restoration, Chongqing  
300036, China; 3. Fgricultural Economic Service Center in Xiakou Town of Nan’an District of Chongqing,  
Chongqing 400072, China; 4. Beautiful Sakura Era of Ecological Agriculture Development  
Limited Liability Company of Chongqing, Chongqing 402256, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of paclobutrazol(PP<sub>333</sub>) on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of *Scaevola aemula* ‘Sunfan’, the effects of PP<sub>333</sub> on chlorophyll a(Chla) content,

收稿日期:2015-04-20  
基金项目:国家林业局公益性行业科研专项(201104043);国家自然科学基金项目(40971166);国家科技支撑计划项目(2011BAD31B03)  
作者简介:李 源(1990-),女,重庆人,在读硕士研究生,研究方向:森林生态和城市林业。  
E-mail:1006333510@qq.com  
\* 通讯作者:何丙辉(1966-),男,湖南汨罗人,教授,博士生导师,主要从事森林生态、城市林业、水土保持等方面研究。  
E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

chlorophyll b (Chlb) content, total chlorophyll (Chl) content, maximum photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ ), effective photochemical quantum yield of PS II ( $F_v'/F_m'$ ), potential activities of PS II ( $F_v/F_o$ ), effective photochemical quantum yield of PS II ( $\Phi PS II$ ), electron transport rate (ETR), photochemical quench ( $qP$ ), non-photochemical quench (NPQ), and quantum yield of non-regulatory quantum of energy dissipation of PS II [ $Y(NO)$ ] in one-year-old *Scaevola aemula* 'Sunfan' leaves were investigated by Junior-PAM modulated chlorophyll fluorometer in May, 2013. The results exhibited that Chla, Chlb, Chl contents,  $F_v/F_m$ ,  $F_v'/F_m'$ ,  $F_v/F_o$ ,  $\Phi PS II$  and ETR of Sunfan leaves all first increased and then decreased with the increase of  $PP_{333}$  concentration, and reached maximum with 100 mg/L  $PP_{333}$ , which were 1.36 mg/g, 0.62 mg/g, 1.98 mg/g, 0.63, 0.81, 4.78, 0.62, 49.80, respectively, and significantly increased by 20.83%, 39.30%, 26.04%, 25.43%, 11.90%, 68.46%, 25.44%, 25.42% compared with the control (water) group. Correlation analysis indicated that there were highly significant positive correlations between Chla, Chlb, Chl contents and  $F_v/F_m$ ,  $F_v'/F_m'$ ,  $F_v/F_o$ , ETR,  $\Phi PS II$ ,  $qP$ . According to regression analysis, Chla and Chl contents tended to increase with the increase of  $F_v/F_o$  and  $\Phi PS II$ , Chlb tended to increase with the increase of  $F_v'/F_m'$  and  $qP$ . Overall, the effects of  $PP_{333}$  on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of *Scaevola aemula* 'Sunfan' were significantly, and the relationship between chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters were close and complicated.

**Key words:** *Scaevola aemula* 'Sunfan'; paclobutrazol ( $PP_{333}$ ); chlorophyll; chlorophyll fluorescence parameters

太阳扇属草海桐科 (Goodeniaceae) 草海桐属 (*Scaevola*), 是澳大利亚扇子花 (*Scaevola aemula*) 的一种。太阳扇为多年生草本, 花淡蓝色, 呈扇子形, 着生于顶端或叶腋, 总状花序。具有当年开花、花量大、花期长达 9 个月的特点。其适应性强、生长快、株型较紧凑、观赏性状好、易养护。医学上可提取香精用来治疗食管、泌尿和胃等方面的疾病, 且燃烧的烟雾可治疗伤寒。太阳扇是优良的盆栽和地栽特色花卉, 主要分布于澳大利亚及印度洋—太平洋区。目前, 国内大力提倡园林绿化, 注重引种栽培观赏价值高、易养护的新型特色花卉。太阳扇作为国家林业局“948”引进项目被引种到国内进行试验栽培, 其种植范围小, 市场开发空间巨大, 但太阳扇引种到我国后茎枝徒长、叶色偏黄、花小且少, 其引种不良问题亟待解决。

近年来, 国外对澳大利亚扇子花的主要研究方向为组织培养<sup>[1-2]</sup>、形态和花期控制<sup>[3-4]</sup>、营养控制<sup>[5]</sup>。国内对其的主要研究方向为扦插繁殖<sup>[6]</sup>、组织培养<sup>[7]</sup>、抗性生理<sup>[8]</sup>。国内对致使太阳扇观赏性状变差的光合作用方面的研究尚未见报道, 涉及多效唑 ( $PP_{333}$ ) 对草本植物叶绿素荧光参数的影响的相关研究甚少, 且所研究的叶绿素荧光参数指标较少。而叶绿素荧光作为光合作用的良好探针, 能快速、灵敏、无损伤地检测植物叶片在不同生长条件下的光合效能, 光合作用的任何变化都可以通过叶绿

素荧光参数的变化反映出来<sup>[9]</sup>。 $PP_{333}$  是一种高效低毒的生长延缓剂和光谱性杀菌剂<sup>[10]</sup>, 既能有效地使植物矮化, 又能提高叶片叶绿素含量和净光合速率<sup>[11-12]</sup>。

以太阳扇叶片为研究对象, 研究不同质量浓度  $PP_{333}$  处理下太阳扇叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数的变化规律, 并分析叶绿素含量和叶绿素荧光参数的相关性, 探讨影响其叶绿素含量的主要荧光参数指标, 旨在为澳大利亚太阳扇的高效引种栽培和矮化改良提供理论依据, 并为  $PP_{333}$  对草本植物的叶绿素荧光参数的影响方面的研究提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

以健康且生长发育形态基本一致的澳大利亚太阳扇 *Scaevola aemula* 'Sunfan' 1 年生扦插苗为试验材料, 于 2013 年 5 月份在重庆市西南大学资源环境学院温室进行试验, 温室白天温度控制在 26 ~ 28 °C, 夜温控制在 18 ~ 20 °C, 空气相对湿度控制在 60% ~ 80%。将太阳扇种植于最适土壤基质中 (质量配比为细土: 腐殖质: 珍珠岩 = 1: 2: 1)<sup>[1]</sup>, 土壤有机质、碱解氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾含量分别为 27.33 g/kg, 88.75 mg/kg, 1.69 g/kg, 4.15 g/kg, 48.66 mg/kg, 76.23 mg/kg。试验药剂为江苏托球农化有限公司生产的 15% 的  $PP_{333}$  可湿性粉剂。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验采用随机区组设计,每小区 30 株。以蒸馏水为对照 (CK),在预备试验基础上分别设置 10、50、100、200、300 mg/L 5 个 PP<sub>333</sub> 质量浓度处理水平,每 7 d 喷施 1 次,连续喷施 2 次,喷施量以叶面刚滴水为准。14 d 后,每种处理随机抽选 10 株,选择其主茎中部向阳的功能叶进行测定。

1.2.2 叶绿素含量的测定 采用 80% 丙酮浸提法,用紫外分光光度计 UV-5200 对太阳扇叶片的叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、总叶绿素 (Chl) 质量浓度进行测定<sup>[2]</sup>。计算公式:  $Chla\ (mg/L) = 12.72A_{663} - 2.59A_{645}$ ;  $Chlb\ (mg/L) = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$ ;  $Chl\ (mg/L) = Chla + Chlb = 20.29A_{645} + 8.05A_{663}$ ; 叶绿素含量 (mg/g) =  $CV_T n / 1\ 000 F_M$ , 式中: C: 叶绿素质量浓度 (mg/L)、V<sub>T</sub>—提取液总体积 (mL)、F<sub>M</sub>—样品鲜质量 (g)、n—稀释倍数。

1.2.3 叶绿素荧光参数的测定指标及方法 于天气晴朗的 9:00—11:00,采用德国生产的 Junior-PAM 调制叶绿素荧光仪,通过饱和脉冲分析方法测定太阳扇主茎中部向阳的功能叶中部的叶绿素荧光参数值。暗适应测定:测定前对整株植物进行 30 min 的暗处理,先照射检测光 [ $<0.1\ \mu mol/(m^2 \cdot s)$ ]测得最小荧光(F<sub>o</sub>),再照射饱和脉冲光 [ $10\ 000\ \mu mol/(m^2 \cdot s)$ ]测定最大荧光(F<sub>m</sub>)。光适应测定:打开内源光化光 [ $(190\ \mu mol/(m^2 \cdot s))$ ],15 min 后测定光下的稳态荧光(F');再照射饱和脉冲光测定光下最大荧光(F<sub>m'</sub>);最后关闭光化光,打开远红光的同时测定光下的最小荧光(F<sub>o'</sub>)和光合电子传递速率(ETR)。试验所用到的荧光参数及公式:PSII 的最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ ) =  $(F_m - F_o)/F_m$ ;PSII 天线转化效率( $F_v'/F_m'$ ) =  $(F_m' - F_o')/F_m'$ ;PSII 潜在光化学效率( $F_v/F_o$ ) =  $(F_m - F_o)/F_o$ ;PSII 实际光化学效率( $\Phi PSII$ ) =  $(F_m' - F')/F_m'$ ;光化学猝灭系数( $qP$ ) =  $(F_m' - F')/(F_m' - F_o')$ ;非光化学猝灭系数(NPQ) =  $(F_m - F_m')/F_m'$ ;非光化学猝灭的量子产量 [ $Y(NO)$ ] =  $1/[NPQ + 1 + qP \times (F_m/F_o - 1)]$ <sup>[3-4]</sup>。

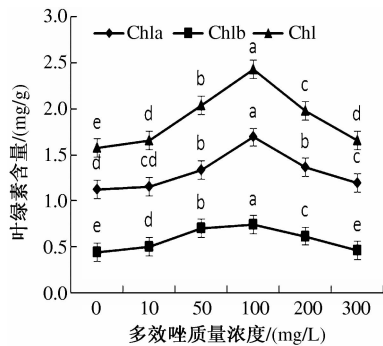
1.3 数据处理

试验数据均为平均值 ± 标准差,并采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件进行数据分析与制图。先选择单因素方差分析和 Duncan's 新复极差法分析不同质量浓度的 PP<sub>333</sub> 处理对太阳扇叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数的影响,再用两变量相关分析法 (bivariate correlations) 对其进行相关性分析,并采用逐步回归法 (stepwise) 得到其最优回归方程。

2 结果与分析

2.1 PP<sub>333</sub> 处理对太阳扇叶绿素含量的影响

如图 1 所示,太阳扇叶片的 Chla、Chl 含量在 10、50、100、200、300 mg/L PP<sub>333</sub> 处理下,均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ),Chlb 含量在 10、50、100、200 mg/L PP<sub>333</sub> 处理下,显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。Chla、Chlb、Chl 含量随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加均呈现相同的变化趋势,即随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加先增大后减小,且均在 100 mg/L PP<sub>333</sub> 处理下达到最大值,其值依次为 1.36 mg/g、0.62 mg/g、1.98 mg/g,分别较 CK 显著增加 20.83%、39.30%、26.04% ( $P < 0.05$ )。



同一测定指标不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同  
图 1 PP<sub>333</sub>对太阳扇叶片叶绿素含量的影响

2.2 PP<sub>333</sub> 处理对太阳扇叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 PS II 活性的变化 由图 2 可知,经过 10、50、100、200、300 mg/L PP<sub>333</sub> 处理的太阳扇叶片的  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$  均随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加呈现先增大后减小趋势。当 PP<sub>333</sub> 质量浓度为 100 mg/L 时, $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$  显著高于其他浓度处理 ( $P < 0.05$ ),且均达到最大值,依次为 0.63、0.81、4.78,分别比 CK 显著增加 25.43%、11.90%、68.46% ( $P < 0.05$ )。

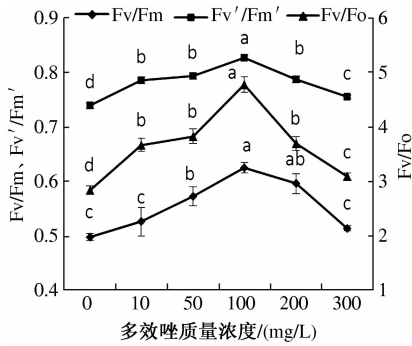


图 2 PP<sub>333</sub>对太阳扇叶片  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 和  $F_v/F_o$  的影响

2.2.2 PS II 实际光化学效率和电子传递速率的变化 ETR 是 PS II 反应中心的相对电子传递速率,  $\Phi$ PS II 是 PS II 实际光化学效率。由图 3 可知, 经过 10、50、100、200、300 mg/L PP<sub>333</sub> 处理的太阳扇叶片 ETR 和  $\Phi$ PS II 均随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加呈先增加后减小的变化趋势, 其变化规律与 Fv/Fm、Fv'/Fm'、Fv/Fo 相似。在 PP<sub>333</sub> 质量浓度为 100 mg/L 时, ETR、 $\Phi$ PS II 高于其他浓度处理, 且值最大, 依次是 49.80、0.62, 分别比 CK 显著增加 25.42%、25.44% ( $P < 0.05$ )。

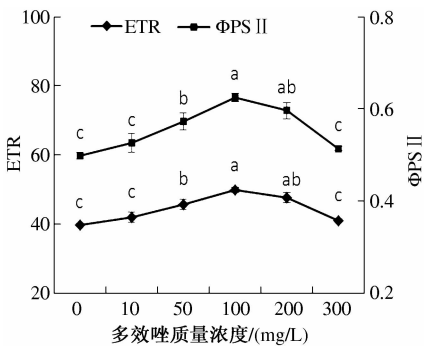


图 3 PP<sub>333</sub>对太阳扇叶片  $\Phi$ PS II、ETR 的影响

2.2.3 叶绿素荧光猝灭的变化 叶绿素荧光猝灭包括光化学猝灭和非光化学猝灭。Y(NO)是指 PS II 处非调节性能量耗散的量子产量。如图 4 所示, 当 PP<sub>333</sub> 质量浓度为 10~300 mg/L 时, 随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加, 太阳扇叶片的 qP 先增大后减小。在 50 mg/L、100 mg/L 的 PP<sub>333</sub> 处理下, qP 值分别为 0.94、0.91, 均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 而在 300 mg/L 的 PP<sub>333</sub> 处理下显著低于 CK ( $P < 0.05$ )。当 PP<sub>333</sub> 质量浓度为 10、50、100、200、300 mg/L 时, 太阳

扇叶片的 NPQ 均显著低于 CK, 且在 300 mg/L PP<sub>333</sub> 质量浓度处理下, NPQ 值最低 (3.57), 仅为 CK 的 NPQ 值的 54.87%; 而太阳扇叶片的 Y(NO) 均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 且随着 PP<sub>333</sub> 质量浓度的增加呈上升趋势, 在 300 mg/L PP<sub>333</sub> 质量浓度处理下, Y(NO) 值最高 (0.15), 比 CK 的 Y(NO) 值显著增加 4.29%。

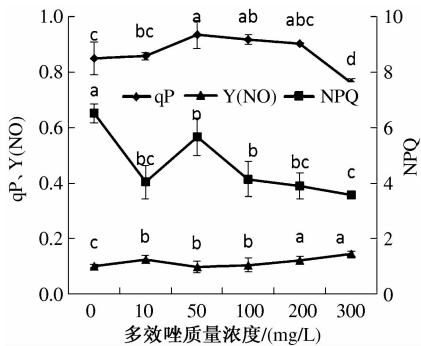


图 4 PP<sub>333</sub>对太阳扇叶片 qP、NPQ 和 Y(NO) 的影响

2.3 PP<sub>333</sub> 处理下太阳扇叶片叶绿素含量与叶绿素荧光参数的相关性

从表 1 可以看出, Chla 含量、Chlb 含量、Chl 含量、Fv/Fm、Fv'/Fm'、Fv/Fo、ETR、 $\Phi$ PS II、qP 9 个指标, 互为极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); Chla、Chlb、Chl 含量及 Fv/Fm、Fv'/Fm'、Fv/Fo、ETR、 $\Phi$ PS II 均与 NPQ 均呈负相关关系, 但不显著; 仅 qP 与 NPQ 呈正相关关系, 但不显著。Y(NO) 与 Chlb 含量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 并与 qP、NPQ 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 但与 Chla 含量、Chl 含量、Fv/Fm、Fv'/Fm'、Fv/Fo、ETR、 $\Phi$ PS II 均呈负相关关系, 但不显著。

表 1 太阳扇叶片叶绿素含量与叶绿素荧光参数的相关系数

指标	Chlb 含量	Chl 含量	Fv/Fm	Fv'/Fm'	Fv/Fo	ETR	ΦPS II	qP	NPQ	Y(NO)
Chla 含量	0.856 **	0.980 **	0.904 **	0.851 **	0.895 **	0.904 **	0.904 **	0.539 **	-0.278	-0.254
Chlb 含量		0.942 **	0.859 **	0.879 **	0.872 **	0.859 **	0.859 **	0.749 **	-0.059	-0.473 *
Chl 含量			0.919 **	0.892 **	0.918 **	0.919 **	0.919 **	0.640 **	-0.202	-0.349
Fv/Fm				0.843 **	0.839 **	1.000 **	1.000 **	0.615 **	-0.296	-0.238
Fv'/Fm'					0.990 **	0.843 **	0.843 **	0.590 **	-0.337	-0.248
Fv/Fo						0.839 **	0.839 **	0.571 **	-0.306	-0.280
ETR							1.000 **	0.615 **	-0.296	-0.238
ΦPS II								0.615 **	-0.296	-0.238
qP									0.222	-0.653 **
NPQ										-0.813 **

注: \*、\*\* 分别表示相关性显著 ( $P < 0.05$ )、极显著 ( $P < 0.01$ )。

2.4 PP<sub>333</sub> 处理下太阳扇叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数的回归分析

为了进一步探讨太阳扇叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数指标之间的关系, 采用逐步回归分析得

到最优回归方程为:

$$Y_1 = -0.37 + 2.09X_1 + 0.14X_2 \quad (1)$$

式中,  $Y_1$ : Chla 含量,  $X_1$ :  $\Phi$ PS II,  $X_2$ : Fv/Fo。其中 Fv/Fo、 $\Phi$ PS II 的标准回归系数分别为 0.518、

0.460,其 $P$ 值均小于0.01,对Chla含量最优方程的影响均极显著( $P < 0.01$ ),故被引入方程。而其余叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、ETR、 $qP$ 、NPQ、 $Y(NO)$ 的 $P$ 值均大于0.05,无显著统计学意义,故不引入方程。由Chla含量最优回归方程可知:Chla含量随着 $F_v/F_o$ 、 $\Phi PS II$ 的增加而增加。

$$Y_2 = -2.16 + 2.78 X_1 + 0.65 X_2 \quad (2)$$

式中, $Y_2$ :Chlb含量, $X_1$ : $F_v'/F_m'$ , $X_2$ : $qP$ 。其中 $F_v'/F_m'$ 的标准回归系数为0.670, $P = 0.000 < 0.01$ ;  $qP$ 的标准回归系数为0.354, $P = 0.009 < 0.01$ ,均具有非常高的显著性,对Chlb含量最优方程贡献较大。而其余叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、ETR、 $\Phi PS II$ 、NPQ、 $Y(NO)$ 的 $P$ 值均大于0.05,无显著统计学意义,故不引入方程。由Chlb含量最优回归方程可知:Chlb含量随着 $F_v'/F_m'$ 、 $qP$ 的增加而增加。

$$Y_3 = -0.72 + 3.13 X_1 + 0.24 X_2 \quad (3)$$

式中, $Y_3$ :Chl含量, $X_1$ : $\Phi PS II$ , $X_2$ : $F_v/F_o$ 。其中 $F_v/F_o$ 、 $\Phi PS II$ 的标准化线性回归系数分别为0.498( $P < 0.05$ )、0.500( $P < 0.05$ ),可知 $F_v/F_o$ 、 $\Phi PS II$ 对Chl含量最优方程贡献较大。而其余叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、ETR、 $qP$ 、NPQ、 $Y(NO)$ 的 $P$ 值均大于0.05,无显著统计学意义,故不引入方程。由Chl含量最优回归方程可知:随着 $F_v/F_o$ 、 $\Phi PS II$ 的增加,Chl含量也增加。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 太阳扇叶片叶绿素对PP<sub>333</sub>的响应

叶绿素作为光合色素,在植物光合作用中起着关键性的作用,其受光激发后把光能转化为化学能,参与光合作用中光能的吸收、传递和转化<sup>[5]</sup>。植物生长延缓剂PP<sub>333</sub>能有效提高植物叶片叶绿素含量和净光合速率,使其叶色加深。本研究结果表明:当PP<sub>333</sub>处理质量浓度为10~300 mg/L时,太阳扇叶片的Chla、Chlb、Chl含量随着PP<sub>333</sub>质量浓度的增加均先增大后减小,另Chla、Chlb、Chl含量在10、50、100、200 mg/L PP<sub>333</sub>处理下,均显著高于CK( $P < 0.05$ ),而Chla、Chl含量在PP<sub>333</sub>质量浓度为300 mg/L时仍显著高于CK( $P < 0.05$ )。300 mg/L PP<sub>333</sub>处理下的Chlb含量与CK含量无显著差异( $P < 0.05$ )。这可能是因为低质量浓度PP<sub>333</sub>促进Chla、Chlb、Chl形成,而高质量浓度PP<sub>333</sub>抑制Chla、Chlb、Chl形成。这与董倩等<sup>[6]</sup>对黄连木、杨文权等<sup>[7]</sup>对高羊茅和草地早熟禾的研究结果相似。太阳扇叶片的Chla、Chlb、Chl含量均在PP<sub>333</sub>质量浓度为100 mg/L达到

最大值。而董倩等<sup>[6]</sup>研究的黄连木叶片Chla、Chlb、Chl含量均在PP<sub>333</sub>质量浓度为500 mg/L达到最大值;杨文权等<sup>[7]</sup>研究的高羊茅和草地早熟禾叶片Chl含量分别在300 mg/L和400 mg/L达到最大值。这可能是因为太阳扇与黄连木、高羊茅、草地早熟禾的科属种不同,其生长特性与生理特性存在差异,致使Chla、Chlb、Chl对PP<sub>333</sub>处理的响应不同。

#### 3.2 太阳扇叶片叶绿素荧光参数对PP<sub>333</sub>的响应

在国内,本研究是首次较完整地研究了8个叶绿素荧光参数对PP<sub>333</sub>的响应规律。PP<sub>333</sub>能显著提高植物的光合作用<sup>[8]</sup>,而叶绿素荧光能精确且整体无损伤检测植物光合作用生理状况,叶绿素荧光参数与光合作用的整个过程联系紧密,叶绿素荧光信号包含了十分丰富的光合作用过程变化的信息<sup>[9]</sup>。则PP<sub>333</sub>处理对太阳扇光合作用产生的影响,可通过体内叶绿素荧光参数的变化反映出来。PS II是植物光合作用的结构基础,其活性大小和光能转化效率的高低对光合作用有重要的影响。 $F_v/F_m$ 是PS II最大光化学量子产量,也是可变荧光与最大荧光的比值,反映了PS II反应中心内能转化效率; $F_v'/F_m'$ 是光条件下PS II天线转化效率,代表了开放光系统反应中心原初光能的捕获效率; $F_v/F_o$ 是PS II潜在光化学效率<sup>[10]</sup>。前人研究表明,胁迫条件下, $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$ 明显下降<sup>[11-12]</sup>。当PP<sub>333</sub>质量浓度为10~300 mg/L时, $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$ 均随着PP<sub>333</sub>质量浓度的增加呈先增大后减小的变化趋势。这说明质量浓度为10~300 mg/L的PP<sub>333</sub>均能改善由于光照过强引起的光合性能下降现象,与杨福孙等<sup>[13]</sup>对槟榔苗的研究结论相符。当PP<sub>333</sub>质量浓度为100 mg/L时, $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$ 高于其他质量浓度处理,且均达到最大值。这说明100 mg/L PP<sub>333</sub>处理太阳扇的光合作用效率最高,最能改善其因过量光照引起的光抑制现象。

当PP<sub>333</sub>质量浓度为10~300 mg/L时,太阳扇叶片 $\Phi PS II$ 和ETR随质量浓度的变化规律与 $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $F_v/F_o$ 类似。这与董倩等<sup>[6]</sup>对黄连木、杨福孙等<sup>[13]</sup>对槟榔苗的研究结论相似。太阳扇叶片 $\Phi PS II$ 和ETR在100 mg/L时值最大。这说明100 mg/L的PP<sub>333</sub>处理时,太阳扇叶片光合电子传递最快,实际光化学效率最高。 $qP$ 在一定程度上反映了植物光合活性的高低,胁迫环境会引起 $qP$ 的降低。 $qP$ 是对PS II原初电子受体QA氧化态的一种量度,代表PS II反应中心开放部分的比例<sup>[14-15]</sup>,反映PS II天线色素吸收的光能用于光化学反应的份额,与碳同化有关<sup>[16]</sup>。当PP<sub>333</sub>质量浓度为10~

300 mg/L 时,随着  $PP_{333}$  质量浓度的增加,太阳扇叶片的  $qP$  先增大后减小,且以 50 mg/L  $PP_{333}$  处理的  $qP$  值最大,效果最显著,此时太阳扇叶片的光合活性最高。300 mg/L  $PP_{333}$  处理的  $qP$  值显著低于 CK,此时  $qP$  受到高质量浓度  $PP_{333}$  的胁迫而下降。10 ~ 300 mg/L 的  $PP_{333}$  处理下太阳扇叶片的  $qP$  变化显著,这与杨福孙等<sup>[13]</sup>的研究结论不同。NPQ 反映了植物耗散过剩光能为热的能力<sup>[17]</sup>。10 ~ 300 mg/L 的  $PP_{333}$  处理下太阳扇叶片的 NPQ 均显著低于 CK ( $P < 0.05$ ),且在 300 mg/L  $PP_{333}$  质量浓度处理下 NPQ 最低。 $Y(NO)$  是指 PS II 处非调节性能量耗散的量子产量,是光损伤的重要指标。若  $Y(NO)$  较高,则表明光化学能量转换和保护性的调节机制(如热耗散)不足以将植物吸收的光能完全消耗掉。即入射光强超过了植物能接受的程度,植物可能已经受到损伤,或继续照光将导致植物受到损伤<sup>[18]</sup>。当  $PP_{333}$  质量浓度为 10 ~ 300 mg/L 时,太阳扇叶片的  $Y(NO)$  均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ),且随着  $PP_{333}$  质量浓度的增加呈上升趋势,但 300 mg/L  $PP_{333}$  处理的  $Y(NO)$  值比 CK 的  $Y(NO)$  值仅增加了 4.29%,虽然  $Y(NO)$  随着  $PP_{333}$  质量浓度的增加而增加,但增加量不大,这说明 10 ~ 300 mg/L  $PP_{333}$  对太阳扇自我保护机制无损伤或损伤较小,这与郑有飞等<sup>[17]</sup>对臭氧胁迫下冬小麦的研究结论一致。如  $PP_{333}$  处理质量浓度继续增大,则可能对太阳扇自我保护机制造成较大的损伤。

### 3.3 太阳扇叶片叶绿素含量与叶绿素荧光参数的相关性分析

植物叶绿素含量的变化,对叶片光合作用有着重要的影响,其中叶片叶绿素荧光参数与光合作用各种反应过程的联系密切<sup>[19]</sup>。通过对太阳扇叶片叶绿素荧光参数的研究,能进一步了解其对  $PP_{333}$  处理的生理响应。由经过 10、50、100、200、300 mg/L  $PP_{333}$  处理的太阳扇叶片的叶绿素 (Chla、Chlb、Chl) 含量与叶绿素荧光参数指标 [ $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$ 、ETR、 $\Phi PS II$ 、 $qP$ 、NPQ、 $Y(NO)$ ] 的相关性分析可知: Chla 含量、Chlb 含量、Chl 含量、 $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$ 、ETR、 $\Phi PS II$ 、 $qP$  9 个指标,互为极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),表明叶绿素含量随着叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$ 、ETR、 $\Phi PS II$ 、 $qP$  的增加极显著增加 ( $P < 0.01$ ),这与程建峰等<sup>[20]</sup>的研究结论一致。也表明  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$  随着  $qP$  的增加而增加,另  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$  与 NPQ 呈负相关,即随着 NPQ 的增加而减小,这与 Calatayud 等<sup>[21]</sup>的研究结论相符。Chla、

Chlb、Chl 含量的最优回归方程表明,Chla 含量主要受  $\Phi PS II$  和  $Fv/Fo$  的影响,Chlb 含量主要受  $Fv'/Fm'$  和  $qP$  的影响,Chl 含量则主要受  $\Phi PS II$  和  $Fv/Fo$  的影响。叶绿素荧光参数  $Fv/Fo$ 、 $\Phi PS II$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $qP$  为叶绿素含量的主要影响因素。

综上所述,当  $PP_{333}$  质量浓度为 10 ~ 300 mg/L 时,太阳扇叶片叶绿素 (Chla、Chlb、Chl) 含量和叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$ 、 $\Phi PS II$ 、ETR 随着  $PP_{333}$  质量浓度的增加均先增大后减小,且均在质量浓度为 100 mg/L 时达到最大值。太阳扇叶片叶绿素 (Chla、Chlb、Chl) 含量随着  $Fv/Fm$ 、 $Fv'/Fm'$ 、 $Fv/Fo$ 、ETR、 $\Phi PS II$ 、 $qP$  的增加极显著增加。太阳扇叶片 Chla 含量主要受  $\Phi PS II$  和  $Fv/Fo$  的影响; Chlb 含量主要受  $Fv'/Fm'$  和  $qP$  的影响; Chl 含量则主要受  $\Phi PS II$  和  $Fv/Fo$  的影响。表明,多效唑喷施处理后的引种花卉澳大利亚太阳扇叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数之间有着紧密且复杂的联系。下一步将研究多次持续喷施生长延缓剂、多种生长延缓剂对叶绿素含量和叶绿素荧光参数的影响,以借助叶绿素荧光技术,为草本植物的高效种植开辟新的思路和方法。

### 参考文献:

- [1] 蔡兴华,何丙辉,刘玉民,等. 澳大利亚特色花卉 Sunfan 嫩枝扦插快繁研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2010,32(2):95-99.
- [2] 孔祥生,易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社,2008:77-80.
- [3] 吴甘霖,段仁燕,王志高,等. 干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报,2010,30(14):3941-3946.
- [4] 凌丽俐,彭良志,王男麒,等. 缺镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报,2013,33(1):71-78.
- [5] 隆小华,刘兆普,蒋云芳,等. 海水处理对不同产地菊芋幼苗光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物生态学报,2006,30(5):827-834.
- [6] 董倩,王洁,庞曼,等. 生长调节剂对黄连木光合生理指标和荧光参数的影响[J]. 西北植物学报,2012,32(3):484-490.
- [7] 杨文权,寇建村,刘勇,等. 多效唑对 2 种冷季型草坪草生长的影响[J]. 草业科学,2008,25(11):117-119.
- [8] 毛铁清,郑青松,陈健妙,等. 喷施多效唑提高麻疯树幼苗耐盐性的生理机制[J]. 生态学报,2011,31(15):4334-4341.
- [9] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo* [J]. Annu Rev Plant Biol, 2008, 59:

- 89-113.
- [10] 李亮,董春娟,尚庆茂. 内源水杨酸参与黄瓜叶片光合系统对低温胁迫的响应[J]. 园艺学报,2013,40(3):487-497.
- [11] 胡学华,蒲光兰,肖千文,等. 水分胁迫下李树叶绿素荧光动力学特性研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):75-77.
- [12] Foyer C H, Noctor G. Leaves in dark see the light[J]. Science,2000,284:5414-5416.
- [13] 杨福孙,孙爱花,王燕丹,等. 生长延缓剂对槟榔苗期叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(2):255-257.
- [14] Stepień P, Kłbus G. Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress[J]. Biologia Plantarum,2006,50(4):610-616.
- [15] 江晓东,王芸,侯连涛,等. 少免耕模式对冬小麦生育后期光合特性的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(5):66-69.
- [16] Gilmore A M, Yamamoto H Y. Zeaxanthin formation and energy dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts[J]. Plant Physiology,1991,96:636-643.
- [17] 郑有飞,赵泽,吴荣军,等. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响[J]. 环境科学,2010,31(2):472-479.
- [18] Kramer D M, Johnson G, Kiirats O, et al. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes[J]. Photosynthesis Research,2004,79(2):209-218.
- [19] 梁红柱,窦德泉,冯玉龙. 热带雨林下砂仁叶片光合作用和叶绿素荧光参数在雾凉季和雨季的日变化[J]. 生态学报,2004,24(7):1421-1429.
- [20] 程建峰,陈根云,沈允钢. 植物叶片特征与光合性能的关系[J]. 中国生态农业学报,2012,20(4):466-473.
- [21] Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, et al. Effects of 2-month ozone exposure in spinach leaves on photosynthesis, antioxidant systems and lipid peroxidation[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2003,41(9):839-845.

\*\*\*\*\*

(上接第 92 页)

落叶病的防治应以保护为主。降雨对药剂持效期的影响随施药与降雨间隔时间的缩短而增强,但由于降雨是造成病菌大量侵入的关键因素,因此仍需将雨前喷药防止病原菌侵入作为防治苹果斑点落叶病的关键策略,建议在雨前 2~3 d 进行药剂防治。鉴于苹果斑点落叶病的严重危害性<sup>[7-8]</sup>,在本研究的基础上,明确用药时机并减少用药次数,对有效防治该病害、延缓病菌抗药性的产生均具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 李保华,王彩霞,董向丽. 我国苹果主要病害研究进展与病害防治中的问题[J]. 植物保护,2013,39(5):46-54.
- [2] 中国农业科学院果树研究所. 中国果树病虫志[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,1994.
- [3] Jung K H. Growth inhibition effect of pyroligneous acid on pathogenic fungus, *Alternaria mali*, the agent of *Alternaria* blotch of apple [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering,2007,12:318-322.
- [4] 胡同乐,曹克强,王树桐,等. 生长季苹果斑点落叶病流行主导因素的确定[J]. 植物病理学报,2005,35(4):374-377.
- [5] 方中达. 植病研究方法[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,1998.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 17980. 124—2004 农药田间药效试验准则(二)杀菌剂防治苹果斑点落叶病[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [7] Miyamoto Y, Ishii Y, Honda A, et al. Function of genes encoding acyl-CoA synthetase and enoyl-CoA hydratase for host-selective ACT-toxin biosynthesis in the tangerine pathotype of *Alternaria alternata* [J]. Phytopathology, 2009,99(4):369-377.
- [8] Li Y, Zhang L Y, Zhang Z, et al. A simple sequence repeat marker linked to the susceptibility of apple to *Alternaria* blotch caused by *Alternaria alternata* apple pathotype[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2011,136(2):109-115.