

Sunfan 叶绿素及荧光参数对矮壮素的响应^①

李 源¹, 何丙辉¹, 黄小辉², 毛文韬¹,
于 传³, 秦华军¹, 曾清萍¹, 苏健波⁴

- 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 400715;
- 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 400036;
- 湖南省湘潭市林业局, 湖南 湘潭 411100;
- 重庆市美樱时代生态农业开发有限责任公司, 重庆 400064

摘要: 以 1 年生澳大利亚‘太阳扇’(*Scaevola aemula* ‘Sunfan’)扦插苗为试验材料, 研究了(10,50,100,200,300) mg/L 矮壮素(CCC)处理对 Sunfan 叶片叶绿素 a(*Chla*), 叶绿素 b(*Chb*), 叶绿素总量(*Chl*)和叶绿素荧光参数[PS II]的最大光化学效率 F_v/F_m , PS II 天线转化效率 F_v'/F_m' , 潜在光化学活性 F_v/F_o , 实际光化学效率 $\Phi_{PS II}$, 电子传递速率 ETR , 光化学猝灭 qP , 非光化学猝灭 NPQ , PS II 处调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$]的影响。结果表明: (10,50,100,200,300) mg/L CCC 处理均可显著提高 Sunfan 叶片的 *Chla*, *Chb*, *Chl*, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi_{PS II}$, ETR , qP ($p < 0.05$), 且均随着 CCC 质量浓度的增加呈先增大后减小趋势; CCC 处理可显著降低 $Y(NPQ)$, NPQ ($p < 0.05$), 且均随着 CCC 质量浓度的增加呈递减趋势。当质量浓度为 200 mg/L 时, *Chla*, *Chb*, *Chl*, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi_{PS II}$, ETR 达到最大值。相关分析表明, *Chla*, *Chb*, *Chl* 均与 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , ETR , $\Phi_{PS II}$, qP 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 但与 NPQ 均呈负相关, 与 $Y(NPQ)$ 均呈显著负相关 ($p < 0.05$)。由回归分析可知, *Chla* 随着 F_v/F_m 值, qP 值的增加而增加; *Chb* 随着 F_v/F_m 值的增加而增加; *Chl* 随着 F_v/F_m 值, qP 值的增加而增加。

关键词: 澳大利亚‘太阳扇’; 矮壮素; 叶绿素; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S718.45

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)08-0020-08

澳大利亚‘太阳扇’(*Scaevola aemula* ‘Sunfan’), 草海桐科(Goodeniaceae)草海桐属(*Scaevola*), 为多年生常绿草本, 适应性强, 易管理, 观赏性极佳, 花为淡蓝色, 呈扇子形、花期长达 9 个月。可治疗皮肤、食管、胃、泌尿等方面疾病的草本植物。Sunfan 广泛分布于澳大利亚、波利尼西亚和其他海岸, 作为良好的园林地被植物, 深受消费者的青睐。

近年来, 我国注重引种栽培观赏价值高、适应性强、易管理的新型优良花卉, 并大力提倡园林绿化、城市森林。Sunfan 作为国家林业局“948”引进项目被引种到我国进行试验栽培。但国内种植范围非常小, 主要集中在西南大学资源环境学院和华中农业大学园艺林学院, 其市场开发空间巨大。目前国外对此属植物的研究主要在组织培养^[1]、生长形态和花期调控^[2]、分子遗传^[3]等方面。国内对其的研究主要为

① 收稿日期: 2014-11-19

基金项目: 国家林业局公益性行业科研专项(201104043); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2009AB1115); 西南大学青年基金项目(SWU208048); 西南大学生态学重点学科“211 工程”三期建设项目。

作者简介: 李 源(1990-), 女, 重庆南岸人, 硕士研究生, 主要从事森林生态和城市林业的研究。

通信作者: 何丙辉, 博士, 教授。

扦插繁殖技术^[4]、组织培养^[5]、抗性生理^[6-7]、遗传转化^[8]等方面。而 Sunfan 引种后茎枝徒长、叶色偏黄、花小且少,且国内对与其观赏性状变差直接相关的光合作用方面的研究尚未见报道,且涉及草本植物的叶绿素荧光参数对矮壮素处理的响应研究甚少。矮壮素(chlorocholine chloride, CCC)是常用的植物生长延缓剂,不仅能促进叶绿素的形成,增加净光合速率,还能通过提高叶绿素荧光参数值进而提高抵抗光抑制能力^[9-10]。则喷施 CCC 能有效使 Sunfan 矮化,提高其光合作用,进而提高其观赏价值。且叶绿素荧光分析技术是一种以光合作用理论为基础,能快速、简便、精确、无损伤地检测不同生长条件下植物叶片的光合效能的新技术。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,是研究植物光合作用的良好探针^[11]。

鉴于此,为了探讨 CCC 是如何调控引种花卉 Sunfan 的光合作用,本试验通过对 Sunfan 叶片喷施不同质量浓度的 CCC,研究了 Sunfan 叶片叶绿素质量分数和叶绿素荧光参数的变化规律,揭示了叶绿素质量分数和叶绿素荧光参数的相关性;并进行了叶绿素质量分数与叶绿素荧光参数的回归分析。旨在为澳大利亚太阳扇高效引种栽培提供理论依据,并为草本植物的叶绿素荧光参数对矮壮素的响应方面的研究提供科学依据。进而为园林绿化、森林城市提供优质的草本花卉。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为西南大学资源环境学院的无病害且生长发育形态指标基本一致的 *Scaevola aemula* ‘Sunfan’ 1 年生扦插苗,试验于 2013 年 5 月在西南大学资源环境学院温室进行,温室白天温度控制在 26~28 ℃,夜温控制在 18~20 ℃,空气相对湿度控制在 60%~80%。根据李薇等^[12]的研究, Sunfan 最适种植土壤的基质(细土,腐殖质,珍珠岩配比为 1:2:1),土壤有机质、全钾、全磷、碱解氮、速效钾、速效磷质量分数分别为 27.33 g/kg, 4.15 g/kg, 1.69 g/kg, 88.75 mg/kg, 76.23 mg/kg, 48.66 mg/kg。试验所用药剂为安阳市全丰农药化工有限责任公司生产的矮壮素 50% 水剂。

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。在预备试验基础上,对 Sunfan 叶面喷施(0, 10, 50, 100, 200, 300) mg/L 的 CCC,每 7d 喷施 1 次,连续喷施 2 次。喷施量以叶面刚滴水为准。喷施 CCC 14d 后,每种处理随机抽选 10 株,选择其主茎最高点向下数的第 5 片功能叶进行测定。

1.2.2 光合色素质量分数的测定

采用 80% 丙酮浸提法和紫外分光光度计 UV-5200 对叶绿素 a(Ch_a),叶绿素 b(Ch_b),叶绿素总量(Ch_l)进行测定^[13]。计算公式: Ch_a (mg/L) = 12.72A₆₆₃ - 2.59A₆₄₅; Ch_b (mg/L) = 22.88A₆₄₅ - 4.67A₆₆₃; Ch_l (mg/L) = Ch_a + Ch_b = 20.29A₆₄₅ + 8.05A₆₆₃; 叶绿素(mg/g) = [叶绿素(mg/L) × 提取液体体积 V(L) × 稀释倍数]/样品鲜质量(g)^[14]。

1.2.3 叶绿素荧光参数的测定指标及方法

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倒数第 2~3 片功能叶中部的叶绿素荧光参数值。暗适应测定: Sunfan 植株经暗适应 30 min 后,先照射检测光[<0.1 μmol/(m² · s)]测得最小荧光 F_o,再照射饱和脉冲光[10 000 μmol/(m² · s)]测定最大荧光 F_m。光适应测定:先照射内源光化光[190 μmol/(m² · s)]15 min 后测定光下实时荧光 F';再照射饱和脉冲光测定最大荧光(F_{m'});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_{o'})和光合电子传递速率(ETR)。计算公式: PSⅡ 的最大光化学量子产量 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 天线转化效率 F_{v'}/F_{m'} = (F_{m'} - F_{o'})/F_{m'}; PSⅡ 实际光化学效率 ΦPSⅡ = (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) =

$1/[NPQ+1+qP \times (F_m/F_o-1)]$ 和 $Y(NPQ)=1-Y(II)-Y(NO)$ ^[15-16].

1.3 数据处理

本研究的试验数据均采用 SPSS 18.0 和 Excel 2010 软件进行分析与制图. 并用平均值±标准误表示测定结果. 不同 CCC 处理对 Sunfan 叶绿素、叶绿素荧光参数的影响采用单因素方差分析和 Duncan 新复极差法; 其相关性分析采用两变量相关分析法; 其最优回归方程采用逐步回归法.

2 结果与分析

2.1 CCC 处理对 Sunfan 叶绿素的影响

由表 1 可知, 经过(10, 50, 100, 200, 300) mg/L CCC 处理的 Sunfan 叶片的 Ch_a , Ch_b , Ch_l 均显著高于对照($p<0.05$), 且随着质量浓度的增加呈现先增大后减小的变化趋势. 在 200 mg/L CCC 处理下, Ch_a , Ch_b , Ch_l 均达到最大值, 分别为 1.70 mg/g, 0.75 mg/g, 2.46 mg/g, 分别较对照组显著增加了 50.93%, 69.94%, 56.30% ($p<0.05$). 以下图表中同列小写字母不同表示处理间在 0.05 水平上差异具有统计学意义.

表 1 CCC 对 Sunfan 叶绿素质量分数的影响

CCC/(mg·L ⁻¹)	Ch_a /(mg·g ⁻¹)	Ch_b /(mg·g ⁻¹)	Ch_l /(mg·g ⁻¹)
0(CK)	1.13a±0.072	0.44a±0.030	1.57a±0.073
10	1.21b±0.040	0.57b±0.018	1.78 b±0.022
50	1.45c±0.022	0.61bc±0.031	2.06 c±0.047
100	1.57d±0.020	0.74d±0.010	2.31 d±0.023
200	1.70e±0.013	0.75d±0.008	2.46 e±0.017
300	1.43c±0.026	0.61c±0.011	2.04 c±0.016

2.2 CCC 处理对 Sunfan 叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 PS II 的活性的变化规律

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^[17]. 由图 1 可知, 经过(10, 50, 100, 200, 300) mg/L CCC 处理的 Sunfan 叶片的 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 均呈现类似的变化趋势, 即随着质量浓度的增加先增大后减小. 当 CCC 质量浓度为 200 mg/L CCC 时, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 的值均显著高于其他质量浓度的处理($p<0.05$), 其值依次为 0.81, 0.61, 4.40, 分别比对照组显著增加了 10.39%, 23.03%, 55.77% ($p<0.05$).

2.2.2 PS II 实际光化学效率和电子传递速率的变化规律

如图 2 所示, Sunfan 叶片 PS II 反应中心的实际原初光化学效率 $\Phi_{PS II}$ 和相对电子传递速率 ETR 在(10, 50, 100, 200, 300) mg/L CCC 质量浓度处理下, 均随着 CCC 质量浓度的增加呈先增加后减小趋势, 其变化规律与 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 相似. $\Phi_{PS II}$, ETR 均在 CCC 质量浓度为 200 mg/L 时达最大值, 均显著高于其他质量浓度处理($p<0.05$).

2.2.3 叶绿素荧光猝灭参数的变化规律

叶绿素荧光猝灭包括光化学猝灭(qP)和非光化学猝灭(NPQ). $Y(NPQ)$ 是非光化学猝灭的量子产量.

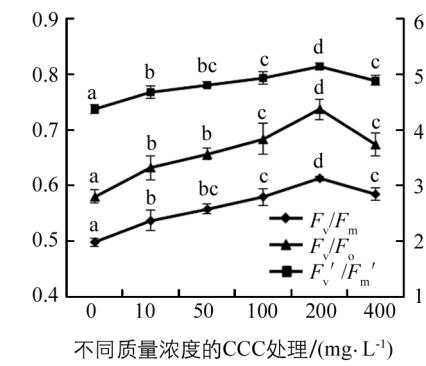


图 1 CCC 对 Sunfan 叶片 F_v/F_m , F_v'/F_m' 和 F_v/F_o 的影响

由图3可知,随着CCC质量浓度的增加,Sunfan叶片的 qP 先增大后减小,均高于对照($p<0.05$),且以100 mg/L CCC处理效果最明显,高达0.61,则此时Sunfan叶片的光合活性最高。但随着CCC质量浓度的增加,Sunfan叶片的 NPQ 和 $Y(NPQ)$ 均呈现相似的下降趋势,与对照组相比差异具有统计学意义($p<0.05$)。各处理中以CCC质量浓度为300 mg/L时,Sunfan叶片的 NPQ 和 $Y(NPQ)$ 值最低,分别为2.16,0.26,分别为对照组值的3.01,4.53倍。

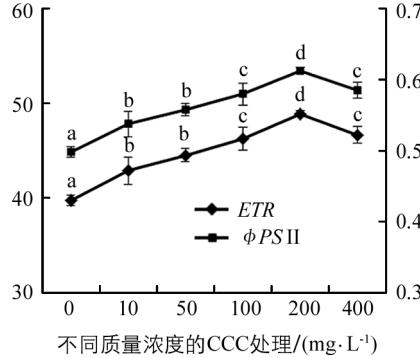


图2 CCC对Sunfan叶片 $\Phi PS II$, ETR 的影响

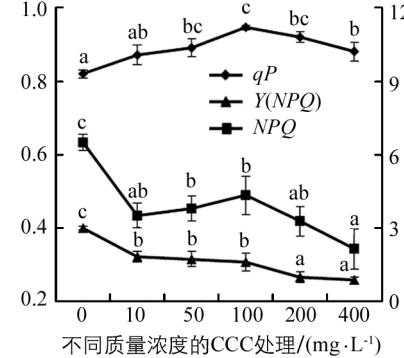


图3 CCC处理对Sunfan叶片 qP , NPQ 和 $Y(NPQ)$ 的影响

2.3 CCC处理对Sunfan叶片叶绿素质量分数与叶绿素荧光参数相关性的影响

通过对经CCC处理的Sunfan叶片的叶绿素与叶绿素荧光参数的相关性分析(表2)可知: $Ch a, Ch b, Ch l$ 之间,互为极显著正相关关系($p<0.01$)。且 $Ch a, Ch b, Ch l$ 均与 $F_v/F_m, F_v'/F_m', F_v/F_o, ETR, \Phi PS II, qP$ 呈极显著正相关($p<0.01$),但与 NPQ 均呈负相关关系,无显著性,与 $Y(NPQ)$ 均呈显著负相关($p<0.05$)。 $F_v/F_m, F_v'/F_m', F_v/F_o, ETR, \Phi PS II, qP$ 之间,互为极显著正相关关系($p<0.01$)。 NPQ 与 $F_v/F_m, F_v'/F_m', F_v/F_o, ETR, \Phi PS II$ 呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)负相关,但与 qP 仅呈负相关关系,差异无统计学意义。 $Y(NPQ)$ 与 $F_v/F_m, F_v'/F_m', F_v/F_o, ETR, \Phi PS II$ 均呈极显著负相关($p<0.01$);与 qP 呈显著负相关($p<0.05$),与 NPQ 呈极显著正相关($p<0.01$)。

表2 叶绿素与叶绿素荧光参数的相关系数

	$Ch b$	$Ch l$	F_v'/F_m'	F_v/F_m	F_v/F_o	ETR	$\Phi PS II$	qP	NPQ	$Y(NPQ)$
$Ch a$	0.934**	0.995**	0.762**	0.818**	0.799**	0.762**	0.762**	0.796**	-0.384	-0.586*
$Ch b$		0.965**	0.701**	0.776**	0.755**	0.700**	0.701**	0.742**	-0.426	-0.570*
$Ch l$			0.754**	0.815**	0.795**	0.754**	0.754**	0.793**	-0.401	-0.589*
F_v'/F_m'				0.923**	0.914**	1.000**	1.000**	0.749**	-0.629**	-0.887**
F_v/F_m					0.993**	0.923**	0.923**	0.723**	-0.569*	-0.796**
F_v/F_o						0.914**	0.914**	0.693**	-0.520*	-0.765**
ETR							1.000**	0.749**	-0.628**	-0.886**
$\Phi PS II$								0.749**	-0.629**	-0.887**
qP									-0.226	-0.494*
NPQ										0.911**

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$, 差异有统计学意义。 $Ch a$: 叶绿素 a; $Ch b$: 叶绿素 b; $Ch l$: 叶绿素总量; F_v/F_m : PS II 最大光化学量子产量; F_v'/F_m' : PS II 天线转化效率; F_v/F_o : PS II 潜在光化学效率; ETR : 光合电子传递速率; $\Phi PS II$: PS II 实际光化学效率; qP : 光化学猝灭系数; NPQ : 非光化学猝灭系数; $Y(NPQ)$: 非光化学猝灭的量子产量。

2.4 叶绿素质量分数和叶绿素荧光参数的回归分析

鉴于叶绿素质量分数的测定方法较为繁琐,测定结果容易存在误差,且叶绿素荧光分析技术能快速、简便、精确、无损伤的测定叶绿素荧光参数,可建立叶绿素和叶绿素荧光参数之间的最优回归方程,通过

Sunfan 叶片的叶绿素荧光参数值更准确地表示出其叶绿素质量分数, 进而更好地阐述 Sunfan 叶片叶绿素和叶绿素荧光参数之间的关系。

采用逐步回归分析可得到叶绿素 a(*Cha*), 叶绿素 b(*Chb*), 叶绿素总量(*Chl*)的最优回归方程

$$Y_1 = -1.77 + 2.64X_1 + 1.20X_2$$

式中, Y_1 : *Cha*, X_1 : F_v/F_m , X_2 : qP . 其中叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的标准化线性回归系数为 0.508, $p = 0.015 < 0.05$; qP 的标准化线性回归系数为 0.428, $p = 0.035 < 0.05$, 均具显著性, 故被引入方程. 而叶绿素荧光参数 F_v'/F_m' , F_v/F_o , ETR , $\Phi PS II$, qP , NPQ , $Y(NPQ)$ 的 p 值均大于或等于 0.05, 为不重要变量. 由 *Cha* 最优方程可知: *Cha* 随着 F_v/F_m 值, qP 值的增加而增加。

$$Y_2 = -0.729 + 1.622X_1$$

式中, Y_2 : *Chb*, X_1 : F_v/F_m . 其中 F_v/F_m 的 $p = 0.000 < 0.01$, 对 *Chb* 最优方程的影响具有统计学意义 ($p < 0.01$) 且贡献较大. 而其余叶绿素荧光参数 F_v'/F_m' , F_v/F_o , ETR , $\Phi PS II$, qP , NPQ , $Y(NPQ)$ 的偏相关系数分别为 -0.066, -202, -0.068, -0.066, 0.414, 0.030, 0.125, 其 p 值均大于 0.05, 无统计学意义, 故不引入方程. 由 *Chb* 最优方程可知: *Chb* 随着 F_v/F_m 值增加而增加。

$$Y_3 = -2.409 + 3.631X_1 + 1.636X_2$$

式中, Y_3 : *Chl*, X_1 : F_v/F_m , X_2 : qP . 其中 F_v/F_m , qP 的标准化线性回归系数分别为 0.508 ($p < 0.05$), 0.425 ($p < 0.05$), 可知 F_v/F_m 值, qP 值对 *Chl* 的贡献较大. 随着 F_v/F_m 值, qP 值的增加, *Chl* 也增加。

3 讨论与结论

3.1 Sunfan 叶绿素对 CCC 处理的响应

植物喷施矮壮素后, 普遍表现为促进地下部分生长, 延缓地上部分生长, 促进叶绿素的合成, 使叶色加深^[15]. 叶绿素是植物进行光合作用的主要色素. 叶绿素质量分数的增加不仅有利于叶片净光合速率的提高. 还能有效防止膜脂过氧化, 保障光合作用的正常进行. 本研究表明: 在 CCC 质量浓度为 (10, 50, 100, 200, 300) mg/L 时, Sunfan 叶片的 *Cha*, *Chb*, *Chl* 均显著提高 ($p < 0.05$), 且随着质量浓度的增加呈现先增大后减小的变化趋势, 则低质量浓度 CCC 促使 *Cha*, *Chb*, *Chl* 形成, 而高质量浓度 CCC 抑制 *Cha*, *Chb*, *Chl* 形成. 表明 Sunfan 叶片的 *Cha*, *Chb*, *Chl* 对 CCC 处理的响应具有统计学意义 ($p < 0.05$). 这与许锋^[14]等对银杏植株、董倩^[18]等对黄连木植株、张剑^[19]等对万寿菊植株的叶绿素质量分数对 CCC 处理的响应类似. Sunfan 叶片的 *Cha*, *Chb*, *Chl* 在 200 mg/L CCC 处理下均达到最大值, 这与万寿菊叶片的 *Chl* 在 300 mg/L CCC 处理下达到最大值的质量浓度相近. 而银杏叶片的 *Cha* 和 *Chb* 分别在 1 000 mg/L 和 2 000 mg/L CCC 处理下达到最大值; 黄连木叶片在 500 mg/L CCC 处理下, 其 *Cha*, *Chb*, *Chl* 均值最大. 这可能是因为 Sunfan 和万寿菊同为草本, 银杏、黄连木均为木本. 它们的生理机制不同, 导致最能提高叶片光合色素的 CCC 质量浓度不同。

3.2 Sunfan 叶绿素荧光参数对 CCC 处理的响应

CCC 能提高植物叶绿素荧光参数值, 进而提高植物抵抗光抑制能力, 同时也促进了植物的光合作用. 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^[15]. 叶绿素荧光是研究植物光合功能的良好探针^[20], 能够快速、灵敏、无损地反映 PS II 反应中心的状况, 进而反映植物对光能的吸收、传递、耗散、分配等“内在性”的特点^[21], 其变化能在一定程度上说明植物对 CCC 处理的耐受能力。

胁迫条件下, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 将会明显下降^[22-23]. 当 CCC 质量浓度范围为 10~300 mg/L 时, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 均随着 CCC 质量浓度的增加先增大后减小, 且显著高于对照 ($p < 0.05$). 当 CCC 质量浓度为 200 mg/L 时, 三者的值均最大. 这说明 200 mg/L 以下质量浓度的 CCC 处理对 Sunfan 无胁迫, 且能改善因过量光照引起的光合作用效率较低的现状, 并提高 Sunfan 叶片中 PS II 反应中心的光能

捕获、传递和转化能力,这与杨福孙^[24]等对槟榔苗的研究结论相符。

当 CCC 质量浓度范围为 10~300 mg/L 时, $\Phi PS II$ 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 相似, 均显著高于对照($p<0.05$), 差异有统计学意义, 在 200 mg/L CCC 处理其值均最大。这说明 10~300 mg/L 的 CCC 处理, 使 $\Phi PS II$, ETR 显著增加($p<0.05$), 并能促进 Sunfan 叶片的光合电子传递, 将较多的光能用于 CO_2 同化, 阻止了过量的激发能在 PS II 反应中心的积累。与李雪芹等^[25]对草坪草的研究结论一致。

qP 在一定程度上反映了植物光合活性的高低。当 CCC 质量浓度范围为 10~300 mg/L 时, qP 随着 CCC 质量浓度的增加呈先增大后减小, 均显著高于对照($p<0.05$), 差异有统计学意义。且以 100 mg/L CCC 处理时光合活性最高。这说明 CCC 能增加 PS II 反应中心氧化态 QA 的比例与 PS II 反应中心开放部分的比例, 这与杨福孙^[29]等的研究一致。NPQ 反映了植物耗散过剩光能为热的能力^[26]。 $Y(NPQ)$ 是指 PS II 处调节性能量耗散的量子产量, 是光保护的重要指标。若 $Y(NPQ)$ 较高, 则表明植物接受的光强过剩, 仍可以通过调节(如将过剩光能耗散为热)来保护自身^[27]。当 CCC 质量浓度范围为 10~300 mg/L 时, NPQ 和 $Y(NPQ)$ 随着 CCC 质量浓度的增加均显著低于对照($p<0.05$), 差异有统计学意义。则说明一定质量浓度范围的 CCC 处理, 叶片 NPQ 和 $Y(NPQ)$ 的降低将增加其将过剩光能耗散为热的能力, 而自我保护的能力稍微下降, 这与郑有飞^[28]等对臭氧胁迫下冬小麦和 Borowski^[29]等对番茄的研究相符。而杨福孙^[29]等则认为生长延缓剂多效唑和烯效唑最能降低其光的热能耗散, 保护槟榔苗的光合生理功能。这可能是因为试验处理选用植物生长延缓剂种类及处理质量浓度范围不同。

3.3 Sunfan 叶绿素与叶绿素荧光参数的相关性

叶绿素与叶绿素荧光参数关系密切相关。由 Sunfan 叶片的叶绿素质量分数(Ch_a , Ch_b , Ch_l)与叶绿素荧光参数 [F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi PS II$, ETR , qP , NPQ , $Y(NPQ)$] 的相关性分析可知: Sunfan 叶片 Ch_a , Ch_b , Ch_l 均与 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , ETR , $\Phi PS II$, qP 呈极显著正相关($p<0.01$)。表明 PS II 叶绿体色素质量分数依赖于叶绿体荧光参数, 且随着叶绿体荧光参数的增加极显著增加($p<0.01$)。这与程建峰^[30]等的研究结论相同。PS II 系统的 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o 随着 NPQ 下降和 qP 增加而增加, 与 Calatayud^[31]等的研究观点一致。 Ch_a , Ch_b , Ch_l 的最优回归方程表明 F_v/F_m 值和 qP 值对 Ch_a 的影响最大; F_v/F_m 值对 Ch_b 的影响最大; F_v/F_m 值和 qP 值对 Ch_l 的影响最大。则叶绿素荧光参数 F_v/F_m 值, qP 值对叶绿素质量分数的影响最大。

综上所述, 引种花卉澳大利亚‘太阳扇’*Scaevola aemula* ‘Sunfan’经矮壮素处理后, 其叶绿素和叶绿素荧光参数之间存在着复杂且密切的联系。当 CCC 质量浓度为 200 mg/L 时, 叶绿素质量分数(Ch_a , Ch_b , Ch_l)和叶绿素荧光参数 F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi PS II$, ETR 均达到最大值, 叶片 PS II 反应中心对光能捕获、传递和转化能力以及光合作用效率最大。接下来将探讨持续喷施生长延缓剂、多种生长延缓剂对叶绿素质量分数和叶绿素荧光参数的影响。旨在借助叶绿素荧光技术, 为草本植物的高效种植研究开辟新的思路和方法。

参考文献:

- [1] BHALLA P L, SWEENEY K. Direct in Vitro Regeneration of the Australian Fan Flower, *Scaevola aemula* R. Br [J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 79(1): 65—74.
- [2] BURNETT S E, ZHANG D, STACK L B, et al. Effects of Phosphorus on Morphology and Foliar Nutrient Concentrations of Hydroponically Grown *Scaevola aemula* R. Br. ‘Whirlwind Blue’ [J]. *HortScience*, 2008, 43(3): 902—905.
- [3] SWOBODA I, BHALLA P L. RAPD Analysis of Genetic Variation in the Australian Fan Flower, *Scaevola* [J]. *Genome*, 1997, 40(5): 600—606.
- [4] 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.
- [5] 于传, 何丙辉, 刘玉民, 等. 太阳扇愈伤组织培养及植株再生体系建立 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(11): 12—17.
- [6] 夏钦, 何丙辉, 刘玉民, 等. 磷胁迫对粉带扦插苗生长和生理特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 228—231, 242.
- [7] 夏钦, 何丙辉, 刘玉民, 等. 模拟酸雨对粉带扦插苗形态与生理特征的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 100—103.
- [8] 张伟. 八个扇子花品种 ISSR 鉴别及‘梦幻白’的遗传转化 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [9] 许峰, 张威威, 孙楠楠, 等. 矮壮素对银杏叶片光合代谢与萜内酯生物合成的影响 [J]. 园艺学报, 2011, 38(12): 2253—2260.
- [10] 贾挺进, 马文慧, 曾海鹏, 等. 喷施营养液对切花菊‘神马’种苗形态及生理指标的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3892—3900.
- [11] 温国胜, 田海涛, 张明如, 等. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1973—1977.
- [12] 李薇. 澳大利亚特色花卉 Sunfan 无性繁殖研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [13] 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.
- [14] 张哲, 杨姝, 杜桂娟, 等. 遮阴对三种豆科牧草光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22(5): 212—219.
- [15] 贾中民, 冯汉茹, 魏虹. 镍对枫杨幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(8): 27—35.
- [16] 凌丽俐, 朱春钊, 彭良志, 等. 镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光日变化特性的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014(6): 67—73.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张剑, 张志国, 隋艳晖. 植物生长延缓剂对万寿菊穴盘苗生长的控制作用研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 101—103.
- [20] CALATAYUD A, IGLESIAS D J, TALÓN M, et al. Effects of Long-Term Ozone Exposure on Citrus: Chlorophyll a Fluorescence and Gas Exchange [J]. Photosynthetica, 2006, 44(4): 548—554.
- [21] 张志刚, 尚庆茂. 低温、弱光及盐胁迫下辣椒叶片的光合特性 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 123—131.
- [22] 宋家壮, 李萍萍, 付为国. 水分胁迫及复水对薺草生理生化特性的影响 [J]. 草业学报, 2012, 21(2): 62—69.
- [23] 陈小凤, 李杨瑞, 叶燕萍, 等. 利用叶绿素荧光参数和净光合速率评价引进禾本科牧草的抗旱性 [J]. 草业科学, 2007, 24(5): 53—57.
- [24] 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.
- [25] 李雪芹, 徐礼根, 金松恒, 等. 4种草坪草叶绿素荧光特性的比较 [J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 164—167.
- [26] 莫亿伟, 郭振飞, 谢江辉. 温度胁迫对柱花草叶绿素荧光参数和光合速率的影响 [J]. 草业学报, 2011, 20(1): 96—101.
- [27] LAASCH H. Non-Photochemical Quenching of Chlorophyll a Fluorescence in Isolated Chloroplasts Under Conditions of Stressed Photosynthesis [J]. Planta, 1987, 171(2): 220—226.
- [28] 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.
- [29] BOROWSKI E, BLAMOWSKI Z K, MICHALEK W. Effects of Tomatex/Triacontanol on Chlorophyll Fluorescence and Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Yields [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2000, 22(3): 271—274.

- [30] 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.
- [31] 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.

Response of Chlorophyll and Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Scaevola aemula* ‘Sunfan’ to Chlorocholine Chloride

LI Yuan¹, HE Bing-hui¹, HUANG Xiao-hui², MAO Wen-tao¹, YU Chuan³, QIN Hua-jun¹, ZENG Qing-ping¹, SU Jian-bo⁴

1. School of Resources and Environment, Southwest University, 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. Forestry Bureau of Xiangtan City of Hunan Province, Xiangtan, Hunan 411100, China;

4. Beautiful Sakura Era of Ecological Agriculture Development Limited Liability Company of Chongqing, Chongqing 400064, China

Abstract: One-year-old *Scaevola aemula* ‘Sunfan’ cutting seedlings were foliar sprayed with CCC at 0 (control), 10, 50, 100, 200 and 300 mg/L to investigate the effects of CCC on chlorophyll a (Ca), chlorophyll b (Cb), total chlorophyll (CT), 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-photochemical quench ($Y(NPQ)$) in the leaves. The results showed that all the CCC treatments significantly enhanced Ca, Cb, CT, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi PS II$, ETR and qP ($p < 0.05$) of Sunfan leaves and showed an increase first with increasing CCC concentration, followed by a decrease afterwards, and steadily decreased $Y(NPQ)$ and NPQ ($p < 0.05$) of Sunfan leaves with increasing CCC concentration. Ca, Cb, CT, F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , $\Phi PS II$ and ETR reached their maximum with 200 mg/L CCC. Correlation analysis indicated that Ca, Cb and CT were in highly significant positive correlations ($p < 0.01$) with F_v/F_m , F_v'/F_m' , F_v/F_o , ETR, $\Phi PS II$ and qP and were in negative correlations with NPQ , and in significant negative correlation with $Y(NPQ)$ ($p < 0.05$). According to regression analysis, Ca tended to increase with increasing F_v/F_m and qP , Cb tended to increase with increasing F_v/F_m and qP and CT tended to increase with increasing F_v/F_m and qP .

Key words: *Scaevola aemula* ‘Sunfan’; chlorocholine chloride (CCC); chlorophyll; chlorophyll fluorescence parameter

