

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.021

吴志华, 李天会, 周旭东. 微量元素营养对桉树无性系苗木叶绿素及荧光参数影响[J]. 广西植物, 2013, 33(6):832—838

Wu ZH, Li TH, Zhou XD. Effects of trace elements on chlorophyll fluorescence parameters of clonal eucalypt seedling[J]. *Guihaia*, 2013, 33(6):832—838

微量元素营养对桉树无性系苗木叶绿素及荧光参数影响

吴志华, 李天会, 周旭东*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 研究了不同微量元素营养液,对栽培的三种桉树无性系苗木叶绿素及荧光参数变化。结果表明:各无性系苗木在全部测试性状的差异表现出极显著。在六个测试的微量元素因子中,Fe(B)显著地影响苗木的 F_o 、 F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 $Zn(C)$ 显著地影响 F_o 、 F_v/F_m 、 $Mn(D)$ 显著地影响叶绿素含量(SPAD值), $Mo(F)$ 显著地影响叶绿素含量、 $Bo(G)$ 显著地影响叶绿素含量 F_o 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 。相关分析表明 F_m 与 F_o 、 F_v/F_o 与 F_o 、叶绿素含量与 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 与 F_v/F_o 均存在显著的相关性。随着微量元素 Fe、Zn、Cu、Mo、B 浓度增大, F_o 、 F_v/F_m 均呈增大趋势,但在不利的高浓度环境下, F_v/F_m 降低。对三个无性系叶绿素荧光比较, U_6 与 DH_{32-29} 具有高的 F_o 、 F_m 和低的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 DH_{201-2} 却具有低的 F_o 、 F_m 和高的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 。对微量元素浓度变化, DH_{32-29} 较敏感。因此,叶绿素荧光参数可作为诊断植物微量元素营养状况的指标之一。

关键词: 桉树; 微量元素; 营养液; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S718.43; Q945.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2013)06-0832-07

Effects of trace elements on chlorophyll fluorescence parameters of clonal eucalypt seedling

WU Zhi-Hua, LI Tian-Hui, ZHOU Xu-Dong*

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: The effects of level and form of trace elements on chlorophyll and its fluorescence in seedling leaves from 3 eucalypt clones were studied by way of sand culture. The results showed that the chlorophyll content and fluorescence parameters were influenced by factors significantly. The eucalypt clone was an important effective factor and had high significantly influence on all traits. In the factors of trace elements, there existed high significant differences in Fe(B) to F_o , F_m , F_v/F_o and F_v/F_m , Zn(C) to F_o and F_v/F_m , Mn(D) to chlorophyll content (SPAD value), Mo(F) to chlorophyll content and Bo(G) to chlorophyll content, F_o , F_v/F_o and F_v/F_m , respectively. There were also significant relationships between F_m and F_o , between chlorophyll content and F_o , F_m , F_v/F_m and F_v/F_o . With the increase of Fe, Zn, Cu, Mo, B solution nutrition, F_o and F_v/F_m increased, but F_v/F_m decreased under the higher concentration. Compared with chlorophyll fluorescence, U_6 and DH_{32-29} had higher F_o , F_m value and lower F_v/F_m , F_v/F_o value, but DH_{32-29} was more susceptible to abundance and deficiency of trace elements in soil. The results also showed that applying chlorophyll fluorescence would be a good method to evaluate the health of eucalypt species in trace element nutrient.

Key words: eucalypt; trace element; nutrition; chlorophyll fluorescence parameter

收稿日期: 2013-03-29 修回日期: 2013-05-02

基金项目: 广东省自然科学基金(10145624536-400000); 广东省林业创新专项(2010KJ CX015-03)

作者简介: 吴志华(1974-), 男, 湖南涟源人, 硕士, 高级工程师, 从事植物生理生化研究, (E-mail) wzhua2889@163.com。

*通讯作者: 周旭东, 博士, 研究员, 从事森林保护研究, (E-mail) cerc.zhou@gmail.com。

桉树(*Eucalyptus*)是高大乔木并具有多种效益的优良经济树种(谢耀坚, 2006)。由于桉树速生丰产, 长期经营必然会造成林地土壤必需微量元素养分失衡, 导致桉树林分低产(吴志华等, 2011)。植物生长发育需要一定组合、比例和形式的微量元素, 微量元素在植物中的作用不容忽视, 特别是光合系统, 大多微量元素是酶或辅酶的组成部分, 与叶绿素合成有直接或间接的关系。微量元素参与了植株光合色素、光合电子传递链的合成。外界微量元素变化将不可避免地造成光合器中活性氧生成和清除系统的变化从而使植株对光能的捕获发生变化, 影响电子传递速度, 进而导致光化学效率的降低。

叶绿素荧光分析具有观测手续简便、获得结果迅速、反应灵敏、可以定量测定, 以及对植物无破坏、少干扰等特点。它既可用于叶绿体、叶片, 也可遥感用于群体、群落; 既是室内光合研究的先进工具, 也是室外自然条件下诊断植物体内光合机构运转状况、分析植物对逆境响应机理的重要方法。本文研究了不同微量元素营养液对栽培的桉树无性系苗木叶绿素及荧光参数变化, 揭示微量元素对桉树叶绿素及荧光参数影响规律, 为明晰桉树滞长、林分低产营养原因及桉树营养诊断和施肥等提供依据。

1 试验地概况

试验地设在广东湛江南方国家级林木种苗示范基地中, 地处雷州半岛(21°30' N, 110°38' E), 属南亚热带气候, 年均气温 23 °C, 最低气温 1 月, 平均气温 16 °C, 最高气温 7 月, 平均气温 28 °C。年均降水量 1 400~1 700 mm, 5~10 月为雨季, 有明显的干湿季之分, 年相对湿度为 80.4%。试验于 2009 年 10 月至 2010 年 1 月进行。

2 材料与方

2.1 材料

试验植物材料为桉树无性系 DH₃₂₋₂₉(尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grangdis*)、DH₂₀₁₋₂(巨细桉 *E. grangdis* × *E. tereticornis*) 和 U₆(尾叶桉 *E. urophylla*) 组培瓶苗, 试验苗高 12~15 cm, 地径 0.2 mm, 鲜重 1.0~1.9 g。

2.2 试验设计和栽培

处理营养液设计以 Hoagland 平衡营养液配方

(大中量元素 N、P、K、Ca、Mg、S 的浓度分别为 5、1、1.5、0.5、0.25、0.25 mmol · L⁻¹) 为基础, 采取 D-最优试验设计。分别以 A-G 因素对试验三个无性系苗木和 Fe、Zn、Mn、Cu、Mo、B 微量元素共 7 因素进行编码, 水平采用不同二层次编码, 如无性系(A_[1], A_[2])形式表示, 其中无性系和 B 元素(0、10 和 100 mg · L⁻¹) 均为 3 水平, 其他 5 种微量元素设 2 处理水平(0 和 100mg · L⁻¹), 具体见表 1, 共获得 49 个处理组合。每个处理苗木 6 株, 设平衡营养液对照 CK(Fe、Zn、Mn、Cu、Mo、B 含量分别为 2.87、0.05、0.5、0.2、0.015、1.5、2.87 mg · L⁻¹), 对照处理设 3 个小区重复。按照吴志华等(2011)的方法, 试验苗木经炼苗后, 采取砂培法定植于育盘中, 以处理营养液每隔 3~5 d 进行浇淋栽培(淋透为止)。

表 1 试验各因素水平

Table 1 Factors and code of trial

因素 Factor	编号 Code	水平编码 Code of level		
		1	2	3
无性系 Clone	A	U ₆ (1, 0)	DH ₂₀₁ (0, 1)	DH ₃₂₋₂₉ (-1, 1)
Fe	B	0(-1, 0)	100(0, 1)	
Zn	C	0(-1, 0)	100(0, 1)	
Mn	D	0(-1, 0)	100(0, 1)	
Cu	E	0(-1, 0)	100(0, 1)	
Mo	F	0(-1, 0)	100(0, 1)	
B	G	0(1, 0)	10(0, 1)	100(-1, 1)

2.4 试验检测指标

第 64 天时苗木出现明显元素丰缺症状时, 对苗木叶绿素含量、叶绿素荧光参数调查和测定。以手持式 SPAD2502 叶绿素仪(Soil and Plant Analyzer Development chlorophyll meter)测定苗木冠层中部完全展开成熟叶的叶绿素含量, 以 SPAD 值表示叶片相对叶绿素含量。先将叶片暗处理 20 min 后, 使用 PAM-2100 便携式调制叶绿素荧光仪(德国 WALZ 公司)测定叶绿素荧光参数 Fo、Fm 等指标。

2.5 数据统计和分析

数据进行多项式回归分析, 通过回归方程得各试验因子响应值(测试性状指标)影响模型。

3 结果与分析

3.1 不同微量元素对桉树苗木叶绿素及叶绿素荧光参数的影响

3.1.1 Fo[初始/最小荧光(minimal/initial fluorescence)] Fo 是已经暗适应的光合机构全部 PS II 中

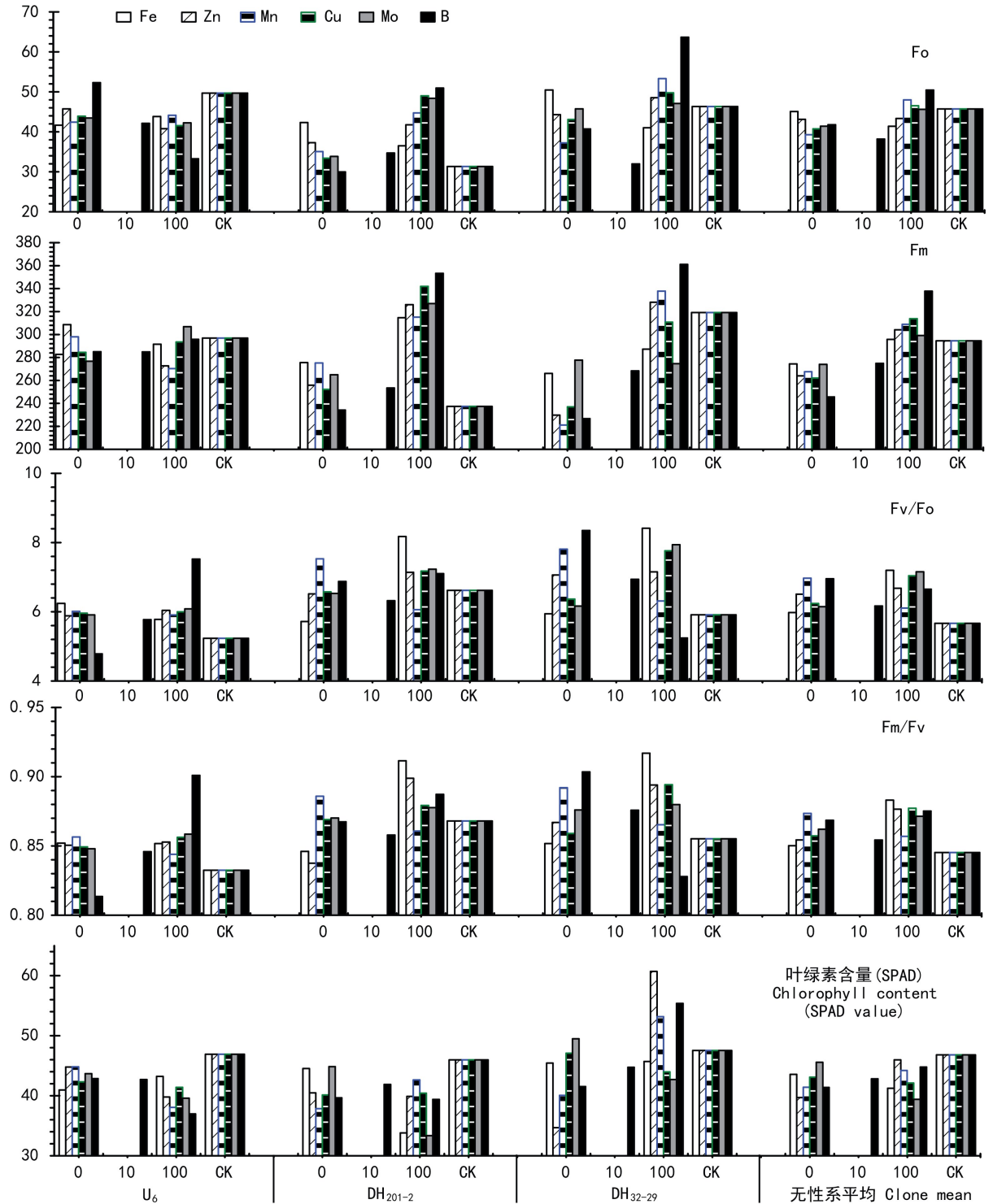


图 1 不同微量元素状况下三个桉树无性系苗木的叶绿素荧光参数情况

Fig. 1 Effects of trace elements on chlorophyll fluorescence parameters of 3 clonal eucalypt seedlings

心都完全开放时的荧光强度。据试验调查,通过回归方程后获得各苗木叶绿素荧光参数结果(图1)。

从不同微量元素培养下苗木的 F_0 结果显示, Fe 对叶绿素荧光 F_0 影响存在着差别,除 U_6 外,

DH_{32-29} 和 DH_{201-2} 均表现 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下的 Fe 要高于 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe,而在平衡营养状况下 CK 中, U_6 的处理植株的 F_0 均低于其 CK 值,而 DH_{201-2} 刚好相反,其处理植株的 F_0 均高于 CK 值, DH_{32-29}

的 CK 的 F_o 介于两处理之间; 在平衡营养液培养下 CK 之间比较, F_o 值大小为 $U_6 > DH_{32-29} > DH_{201-2}$, 相比之下, 变异程度由大至小的是 $DH_{32-29} > DH_{201-2} > U_6$, 表明 DH_{32-29} 对 Fe 浓度反应比 DH_{201-2} 和 U_6 更敏感; 从无性系 F_o 平均值来说, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Fe 会导致桉树苗木 F_o 的降低。

除 U_6 外, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Zn 对叶绿素荧光 F_o 影响比缺 Zn 的 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 要高; 平衡营养状况下 CK 中, U_6 处理植株的 F_o 均低于 CK 值, 而 DH_{201-2} 的两处理均高于其对照, DH_{32-29} 的 CK 介于两处理之间, 无性系之间的 F_o 变异程度与 Fe 一样, 即 $DH_{32-29} > DH_{201-2} > U_6$ 。Mn 对叶绿素荧光 F_o 的影响是为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度比缺 Mn 的 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 要高。Cu 和 Mo 对叶绿素荧光 F_o 影响表现与 Zn 的作用一致。Zn、Mn、Cu 和 Mo 中, 平衡营养状况下 CK 中, U_6 处理植株的 F_o 值均低于其 CK, 而 DH_{201-2} 的两处理均高于其对照, DH_{32-29} 的 CK 介于两处理之间, 无性系之间的 F_o 变异程度大小为 $DH_{32-29} > DH_{201-2} > U_6$ 。B 对叶绿素荧光 F_o 影响表现不一, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度使 DH_{201-2} 和 U_6 的 F_o 值降低, 而 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度对 DH_{201-2} 和 DH_{32-29} 影响很大, 起到促进作用, 使其高于相应的对照。

3.1.2 F_m [最大荧光产量 (maximal fluorescenc)]

F_m 是 PSII 反应中心处于完全关闭时的荧光产量。根据图 1 中 F_m 部分发现不同处理对苗木 F_m 情况影响很大。除了 U_6 的 Zn、Mn 和 Mo 外, 微量元素浓度高其处理的 F_m 值也越大, 从无性系平均值来看也表现如此, 表明微量元素能对 F_o 起促进作用。

3.1.3 F_v/F_m 和 F_v/F_o 在荧光测定中, 可变荧光 F_v 为 F_m 与 F_o 的差值, F_v/F_m 是指没有遭受环境胁迫并经过充分暗适应的植物叶片 PSII 最大的或潜在的量子效率指标, 它是比较恒定, 一般在 $0.80 \sim 0.85$ 之间。有时 F_v/F_m 也被称为开放的 PSII 反应中心的能量捕捉效率 (张其德等, 2000), 而 F_v/F_o 表示 PSII 的潜在活性 (陈建明等, 2006)。

分别对不同无性系和营养液培养下苗木的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 分析, 发现两者变化趋势完全一致。随着 Fe 浓度升高, 除 U_6 外, F_v/F_m 和 F_v/F_o 均表现为降低趋势, 即微量元素亏缺时, F_v/F_m 和 F_v/F_o 表现出下降; Mn 对所有无性系都起到降低作用; 而 Zn、Cu、Mo 却起促进作用; B 对无性系作用不同, 随着其浓度增大, 发现在 U_6 中呈上升趋势, 在

DH_{32-29} 呈下降趋势, DH_{201-2} 中, 却先降低, 再升高的 V 形变化; 从无性系各 CK 来比较, F_v/F_m 的值大小为 $DH_{201-2} > DH_{32-29} > U_6$, 变异程度同样由大至小的是 $DH_{32-29} > DH_{201-2} > U_6$; 从无性系平均值来看, 随着微量元素浓度增大, Mn 呈下降趋势、Fe、Zn、Cu、Mo 均呈增大趋势, B 呈 V 形趋势, 但均比对照要大。 F_v/F_m 和 F_v/F_o 比较, 发现前者比后者变异较小, 变化很敏感。

3.1.4 叶绿素 分别对叶绿素含量进行检测分析, 结果如图 1 所示。在 U_6 中, 发现 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Fe 是唯一引起其叶绿素含量比缺 Fe 处理 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 高的元素。在 DH_{201-2} 中却是 Mn, 而 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 B 会使得苗木叶片有较高的叶绿素含量, 而合适的量 (如 CK) 却使其含量达到最大。在 DH_{32-29} 中, Zn、Mn、B 对苗木叶片叶绿素含量呈正向作用, 即随着其浓度增大, 叶绿素含量呈上升增大的趋势。从无性系的平均值来看, 合适的微量元素浓度的溶液有利于苗木叶绿素含量的积累, 低浓度 Fe、Mo、Cu 含量有利用于其叶绿素含量合成。

3.2 性状相关分析

分别对叶绿素含量及荧光参数之间进行相关分析, 结果如表 2。表 2 显示 F_m 与 F_o 、 F_v/F_o 与 F_o 、叶绿素含量与 F_o 、叶绿素含量与 F_m 、 F_v/F_m 与 F_v/F_o 均存在显著的相关性。上述结果也表明叶绿素含量对荧光强度均存在正相关的影响, 而 F_v/F_m 和 F_v/F_o 具有较高的相关性, 说明两者均能一致性反映其叶绿素荧光变化趋势。

表 2 相关系数矩阵表

Table 2 Correlation matrix of traits

性状 traits	项目 Terms	F_o	F_m	F_v/F_m	F_v/F_o
F_m	相关系数 r	0.641**			
	显著性 P 值	2.725×10^{-6}			
F_v/F_m	相关系数 r	-0.258	0.197		
	显著性 P 值	0.099	0.189		
F_v/F_o	相关系数 r	-0.527**	-0.081	0.867**	
	显著性 P 值	2.339×10^{-4}	0.580	7.167×10^{-7}	
叶绿素含量 Chlorophyll content	相关系数 r	0.423*	0.454**	-0.210	-0.264
	显著性 P 值	0.018	0.005	0.233	0.120

* 表示模型中因子或因因子组合差异为 0.05 水平上相关性显著; ** 表示差异为 0.01 水平上显著 (二尾检测)。下同。

* Correlation is significant different at the 0.05 level; ** Correlation is significant different at the 0.01 level (2-tailed). The same below.

3.3 测试因子效应比较

分别对试验各处理组合数据与各响应值 (测试性状指标) 进行 $2F_1$ 多项式回归分析 (Backward 法),

表3 各测试因子的响应回归方程
Table 3 Regression equations of models in terms of selected factors

项目 Item	回归方程系数 Coefficient of regression equation				叶绿素含量 Chlorophyll content
	F ₀	F _m	F _v /F ₀	F _v /F _m	
常数 Intercept	46.70	307.21	5.81	0.865	42.39
A _[1]	-5.10**	-17.06**	0.13**	-0.014**	-12.32**
A _[2]	-9.35**	-13.38**	1.12**	0.021**	6.53**
B	2.15*	13.63*	0.02**	0.013**	2.39
C	-1.93*	-7.70	-0.14	0.008*	9.01
D	8.24	29.75	-0.28	-0.014	-10.63**
E	3.06*	14.77	-0.49	-0.013	-8.40
F	1.06*	9.73	0.40	0.010	-12.57
G _[1]	-5.83*	-53.41	0.04*	-0.015**	-2.28**
G _[2]	-2.48*	-7.86	0.04*	0.001**	-6.66**
A _[1] B	1.00*	-11.13	-0.22**	-0.017**	-7.75**
A _[2] B	-9.98*	-13.61	0.98**	0.012**	-6.03
A _[1] C	0.74*	-2.58**		-0.011*	-0.59*
A _[2] C	12.72*	66.83**		0.002*	2.37*
A _[1] D	-12.72*	-42.79*	0.39**	0.011*	-13.57**
A _[2] D			-0.26*		6.38**
A _[1] E	-3.05	-16.71	0.38*	0.010**	-2.94**
A _[2] E	-1.73	17.33	0.81*	0.025**	2.90**
A _[1] F			-0.36*	-0.011*	
A _[2] F					
A _[1] G _[1]	19.54	50.4	-1.49**	-0.029*	14.56**
A _[2] G _[1]					-16.87**
A _[1] G _[2]					10.35**
A _[2] G _[2]					13.31**
BC	1.65*		-0.17*		4.15**
BD	1.65				-14.38**
BE	-1.25		0.18*		-8.44**
BF	-1.99*		0.11		-10.20**
BG _[1]	1.29	-44.37*	-0.94**	-0.042**	-4.15**
BG _[2]					3.36**
CD					12.37**
CE	3.51*	13.16	-0.11		
CF	3.12*	13.16	-0.19*		
CG _[1]					-13.84**
CG _[2]					6.81**
模型					
F 值 (df, P)	1029.04	4.57*	20.18*	14.07**	73.98**
F Value	(24, 0.0246)	(20, 0.0498)	(20, 0.0110)	(19, 0.0018)	(30, 0.0022)

注: 表中的空处表示因苗木死亡导致因子组合缺失或因因子组合效应很弱使得 F 值很小, 在因子模型建立中该项纳入随机误差中。

Note: Empty cells are lack of factor combination because of seeding death or weak factor effects, whose F value is very little and not selected for model as random error.

获得不同的影响因子模型(表3), 从表3中模型 F 值看, 叶绿素荧光参数及叶绿素含量与各测试因素建立起来的回归方程非常有效, 均达到显著性水平; 且各测试因子主效应和双重相互效应均显著性。由表3可知, 主要试验因子的 F₀ 影响模型是显著的 (P=0.0246*), 除其中 Mn(D) 外, 测试因子苗木无性系(A)、Fe(B) 和 B(G) 等均显著地影响其大小, 特别是不同无性系之间差异。在 7 个主因子中, 因子

效应(回归方程系数绝对值)由大至小的顺序为无性系(A) > Mn(D) > B(G) > Cu(E) > Fe(B) > Zn(C) > Mo(F), 其中微量元素 Zn(C) 和 B(G) 均为一致的负向效应。各测试因子之间存在着主效应外, 无性系(A) 与微量元素, Fe(B) 与其他微量元素之间, 以及 Zn(C) 与 Cu(E)、Mo(F) 之间均存在不同程度的交互作用。

对于 F_m 来说, 主效因子中, 苗木无性系(A) 和 Fe(B) 是重要的影响因子, 但 Mn(D) 和 B(G) 因子作用较大, 超过无性系(A) 和 Fe(B), 同样测试因子之间均存在不同程度的相互作用。

从 F_v/F₀ 和 F_v/F_m 看, 发现前者回归系数绝对值比后者更大, 说明 F_v/F₀ 对各测试因子响应更加敏感。在主因子中, 除了 Mo(F) 和 Cu(E) 差异不显著外, 其他均存在着 0.05 水平以上显著差异, 苗木无性系(A)、Cu(E)、Mo(F) 因子作用影响较大。

叶绿素含量中, 苗木无性系(A)、Mn(D)、B(G) 对其影响均达到 0.01 水平以上的显著。在微量元素中 Fe(B) 和 Zn(C) 呈正效应, 主因子效应(回归方程系数绝对值大小) 顺序为 Mo(F) > Mn(D) > Zn(C) > Cu(E) > B(G) > Fe(B), 同样测试因素之间也存在一定的程度的交互作用。

4 结论与讨论

F₀ 荧光来自天线叶绿素(Chl)a, 因此其大小取决于 PSII 天线色素内的最初光子密度、天线色素之间及天线色素到 PSII 反应中心的激发能传递有关的结构状态, 因此与叶绿素浓度有关(陈建明等, 2005)。光抑制条件下会导致 F_m 的降低(Krause, 1988)。非光化学能量耗散易造成 F₀ 的降低, 而光合机构被破坏又使其升高, 所以该参数的变化趋势可以反映引起这种变化的内在机制(Ögren, 1991)。本研究结果也表明 F₀ 与叶绿素浓度成正相关, 不同的营养状况会导致 F₀ 以及 F_m 的变异, 桉树叶片的光合系统会对不同的微量元素产生响应。微量元素 Zn(C) 和 B(G) 对 F₀ 起负效应, 从微量元素对 F₀ 效应大小 [Mn(D) > B(G) > Cu(E) > Fe(B) > Zn(C) > Mo(F)], 以及微量元素对叶绿素含量效应大小 [Mo(F) > Mn(D) > Zn(C) > Cu(E) > B(G) > Fe(B)] 来看, 随着 Mn(D)、Cu(E)、Mo(F) 浓度增大会对叶绿素合成产生限制, 根据叶绿素含量与 F₀ 的关系而此时 F₀ 应该表现降低, 实际上 F₀ 升高,

说明 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的微量元素对植株造成胁迫,使光合反应中心被破坏或可逆性失活引起 F_o 增大。从 F_m 变化趋势(图 1)以及 F_m 回归方程系数看,微量元素浓度对 F_m 影响与 F_o 一致。

F_v/F_m 在胁迫条件下明显下降,非胁迫条件下 F_v/F_m 参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响。从试验结果看, F_v/F_m 与 F_v/F_o 变化趋势一致且两者之间具有很高的相关性,说明 F_v/F_o 是 F_v/F_m 的另一种表达形式。但从两者回归方程的系数和变异程度看, F_v/F_o 变化的幅度比 F_v/F_m 大得多,因此 F_v/F_o 比 F_v/F_m 更能反映微量元素差异带来的影响。

在叶绿素荧光特性与叶片矿物质含量之间关系的研究中,沙甜柚(*Citrus grandis*)叶片的 F_v/F_m 与土壤中 N、K、Mn 含量成极显著正相关,与 Mg、Cu 含量成显著正相关,并把 F_v/F_m 作为衡量营养水平的指标(聂磊等,1999)。Mn 胁迫对龙葵和小飞蓬叶绿素荧光特性的研究中,随着 Mn 含量增大, F_o 均呈先下降再上升趋势,而 F_v/F_m 、 F_m 都表现明显降低(吴惠芳等,2010)。低浓度在 $(2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 镉处理对金丝垂柳(*Salix aureo-pendula*)幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响不大,但高浓度对生长、净光合速率及叶绿素荧光参数均受到抑制(F_v/F_m 降低),而且随处理时间的增加而表现地更明显(孙晓灿等,2011)。对女贞(*Ligustrum robustum*)苗研究发现 F_o 、 F_v 和 F_m' 随着硒质量浓度的增加显著降低, F_v/F_m 呈先减小后增大的趋势(丁波等,2012)。对大麦两个栽培品种(cv. *Arabi Aswad* 和 cv. *Arabi Abiad*)在不同的非生物 Cd、Pb、Ca、S、Mg、K、N、P、Fe 胁迫下的叶绿素荧光参数比较,发现两品种对 Ca、Mg、K、P、Fe 亏缺表现相对更敏感(Sanchez & Gutierrez,2008)。

本试验无性系 F_v/F_m 和 F_v/F_o 平均结果表明,随着微量元素 Fe、Zn、Cu、Mo、B 浓度增大均呈增大趋势,在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 均比相应对照要大,表明 F_v/F_m 与矿物质营养水平正相关,陈琼等(2011)报道增加磷素营养可显著提高光化学效率(F_v/F_m),微量元素锌营养能提高 PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)等参数,能减轻因盐胁迫造成的叶片光合机构的破坏程度(徐建明等,2008);这表明光合作用与植物矿质营养有着密切的联系,但其各个环节均受到各种微量元素的影响,而 F_v/F_m 与 Mn 含量不成正相关,Mn 对叶绿素荧光参数 F_m 影响很大,很

可能 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Mn 溶液使得苗木处于高浓度的生理胁迫状况,具有较高的 F_m 值,从而导致 F_v/F_m 减少,同样原因的还有 B、Zn 等元素。分别对叶绿素含量分析发现在正常情况下(对照),三个无性系的叶绿素含量差异不是很大,均在 45 左右,但在微量元素亏缺和过量的状况下,均导致叶绿素含量降低,叶绿素含量降低反映叶绿体异常的重要指标,微量元素浓度异常不仅降低叶绿素含量,说明其处理改变了叶片叶绿素组成,从而改变光合结构导致叶绿素荧光参数发生变化。

杨福孙等(2009)对遮光处理对槟榔苗期叶绿素荧光特征的影响研究发现遮光处理使槟榔叶片荧光参数 F_o 、 F_m 、 F_v 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 等提高,不同遮光处理的槟榔叶片叶绿素含量与 F_m 同步增加,说明叶绿素含量增加是 F_m 升高的内在原因,这与本试验的结果一致。

F_v/F_m 值是叶绿体 PSII 光化学效率的一种度量,植物的 F_v/F_m 值愈高,表明其对光能的利用率和对环境的适应能力愈强。分别对三个无性系叶绿素荧光比较,发现各无性系的叶绿素荧光参数不一,正常情况下, U_6 具有高的 F_o 、 F_m 和低的 F_v/F_m 、 F_v/F_o , DH_{201-2} 却具有低的 F_o 、 F_m 和高的 F_v/F_m 、 F_v/F_o , 而 DH_{32-29} 与 U_6 类似,即具有较高的 F_o 、 F_m 和低的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 。在三个无性系中 U_6 光能利用率最低,而 DH_{201-2} 最大,这与林分早期生长实际相符合。在微量元素 0 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的非正常条件下,桉树无性系为适应环境均表现出较高 F_v/F_m 值,而不适应的环境表现出较低的 F_v/F_m 值。其中 U_6 和 DH_{201-2} 表现类似,但 DH_{32-29} 对此较敏感,且 U_6 在响应/变化能力比 DH_{201-2} 低。对一品红四个品种叶片光强依赖的叶绿素荧光特性发现耐强光的品种、 F_o 、 F_m 、 F_v 值显著高于其它三个品种(李畅等,2009);而黄瓜耐盐性较强植株叶片叶绿素荧光具有较高的 F_o 值(魏国强等,2004);李淑顺等(2010)对不同品种的鸡爪槭叶绿素荧光特征与日灼伤害的关系研究中表明:日灼抗性较强的鸡爪槭原变种其 F_o 、 F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 等荧光参数显著高于日灼抗性较弱的荷兰红枫。根据我们以前报道 DH_{32-29} 的死亡率(88.5%)远大于 DH_{201-2} (12.7%) 和 U_6 (15.0%),且苗木生长状况也表现不好(吴志华等,2011)。因此本试验中的三个无性系中,具有高 F_o 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 值的无性系 DH_{201-2} 对微量元素的丰缺条件表现出好的适应性,其次是 U_6 , 适应性

最差的是 DH_{32-29} , 这进一步明晰了叶绿素荧光参数可与无性系对微量元素的丰缺间的对应关系。

植物在缺氮、磷、镁、锌、锰、铁等元素的胁迫下均会引起植物细胞抗氧化酶活性的降低以及膜脂过氧化程度加剧, 最终影响到细胞器的结构与功能, 抑制其正常的光合作用 (Huang *et al.*, 2004; Henriques *et al.*, 2001; 杨勇等, 2005)。微量元素丰缺及其作用会对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来。缺钾对各水稻品种叶绿素荧光参数的影响与其钾敏感性密切相关, $F'v/F'm$ 、 qP 、 $\Phi PS II$ 和 ETR 四个叶绿素荧光参数可作为快速筛选耐缺钾水稻品种的参考指标 (李峤等, 2006); 叶绿素荧光参数可作为菊芋抗钠盐品种筛选的诊断指标之一 (薛延丰等, 2008)。因此叶绿素荧光参数既可作为逆境条件下植物抗逆反应的指标, 也可作为诊断植物微量元素营养状况指标。

参考文献:

谢耀坚. 2006. 世纪初的桉树研究[M]. 北京: 中国林业出版社

Chen JM(陈建明), Yu XP(俞晓平), Cheng JA(程家安). 2006. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses(叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用)[J]. *Acta Agric Zhejiang* (浙江农业学报), **18**(1): 51-55

Chen Q(陈琼), Lu YG(陆引罡), Liao Yong(廖勇), *et al.* 2011. The effect of phosphorus nutrition to chlorophyll fluorescence characteristics of flue-cured tobacco(磷素营养对烤烟叶绿素含量及其荧光特性的影响)[J]. *J Mount Agric Biol* (山地农业生物学报), **30**(1): 12-15, 26

Ding B(丁波), Wang DL(王德炉). 2012. Effect of selenium on physiological characters and chlorophyll fluorescence parameters in *Ligustrum robustum* (硒对粗壮女贞生理特性及叶绿素荧光参数的调控效应)[J]. *J Henan Agric Sci* (河南农业科学), **41**(7): 58-61

Henriques FS. 2001. Loss of blade photosynthetic area and of chloroplasts photochemical capacity account for reduced CO_2 assimilation rates in zinc-deficient sugar beet leaves[J]. *Plant Physiol*, **158**: 915-919

Huang GA, Jiang DA, Yang Y, *et al.* 2004. Effect of nitrogen deficiency on gas exchange chlorophyll fluorescence and antioxidant enzymes in leaves of rice plants[J]. *Photosynthetica*, **42**: 357-364

Li C(李畅), Su JL(苏家乐), Liu XQ(刘晓青), *et al.* 2009. Comparison of chlorophyll fluorescence characteristics in the leaves of different *euphorbia pulcherrima* cultivars(一品红不同品种叶片叶绿素荧光特性比较)[J]. *Acta Horti Sin* (园艺学报), **36**(10): 1 519-1 524

Li Q(李峤), Sun JW(孙骏威), Li HX(李海霞). 2006. Effect of potassium limitation on chlorophyll fluorescence parameters in rice leaves(缺钾对水稻叶片叶绿素荧光参数的影响)[J]. *J Chin Jiliang Univ* (中国计量学院学报), **17**(1): 79-83

Li SS(李淑顺), Tang L(唐玲), Li QZ(李倩中), *et al.* 2010. Chlorophyll fluorescence parameters and their relationship with resistance to sunburn injury of *acer palmatum* cultivars with red-color(红色鸡爪槭叶绿素荧光特征参数及其与日灼伤害的关系)[J]. *Acta Agric Jiangxi* (江西农业学报), **22**(11): 15-17

Krause GH. 1988. Photoinhibition of photosynthesis: an evaluation of damaging and protective mechanisms[J]. *Physiol Plant*, **74**: 566-574

Nie L(聂磊), Li SY(李淑仪), Liao XR(廖新荣), *et al.* 1999. Chlorophyll fluorescence characteristics and its relationship with mineral element contents in leaves of shatianyou pomelo variety (沙田柚叶绿素荧光特性及其与叶片矿质元素含量的关系)[J]. *J Fruit Sci* (果树科学), **24**(4): 123-126

Ögren E. 1991. Prediction of photoinhibition of photosynthesis from measurements of fluorescence quenching components[J]. *Planta*, **184**(4): 538-54

Sanchez A, Gutierrez SJ. 2008. Photochemistry Research Progress[C]//Kalaji HM, Guo PG. Chlorophyll fluorescence: a useful tool in barley plant breeding programs. New York: Nova Science Pub Incorporated: 439-463

Sun XC(孙晓灿), Wei H(魏虹), Tian XF(田晓锋), *et al.* 2011. Effects of cadmium stress on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Salix × aureo-pendula* seedlings(镉胁迫对金丝垂柳幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响)[J]. *Guihaia* (广西植物), **31**(4): 490-494

Wei GQ(魏国强), Zhu ZJ(朱祝军), Fang XZ(方学智), *et al.* 2004. The effects of nacl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedlings of two cucumber cultivars(NaCl 胁迫对不同品种黄瓜幼苗生长、叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响)[J]. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **37** 711: 1 754-1 759

Wu HF(吴惠芳), Liu P(刘鹏), Gong CF(龚春风), *et al.* 2010. Effects of manganese stress on growth, chlorophyll fluorescence parameters of *Solanum nigrum* L. and *Conyza Canadensis* L. (Mn 胁迫对龙葵和小飞蓬生长及叶绿素荧光特性的影响)[J]. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), **29**(4): 653-658

Wu ZH(吴志华), Xie YJ(谢耀坚), Zhou XD(周旭东). 2011. Effects of trace elements on agronomic traits of eucalypt seedling (微量元素对桉树苗木艺性状的影响)[J]. *Eucalypt Sci & Technol* (桉树科技), **28**(1): 15-22

Xue YF(薛延丰), Liu ZP(刘兆普). 2008. A preliminary study of screening salt-resistive varieties of *Helianthus Tuberosus* L. using chlorophyll fluorescence parameters(利用叶绿素荧光参数筛选抗盐菊芋品种的初步研究)[J]. *Chin High Technol Lett* (高技术通讯), **18**(7): 766-770

Yang FS(杨福孙), Sun AH(孙爱花), Wang YD(王燕丹), *et al.* 2009. Effects of shading on chlorophyll fluorescence parameters of leaf in areca(*Areca catechu* L.) seedling stage(遮光处理对槟榔苗期叶绿素荧光特征的影响)[J]. *Guangdong Agric Sci* (广东农业科学), (5): 40-43

Zhang QD(张其德), Liu HQ(刘合芹), Zhang JH(张建华), *et al.* 2000. Effects of limited irrigation on some photosynthetic functions of flag leaves in winter wheat(限水灌溉对冬小麦旗叶某些光合特性的影响)[J]. *Acta Agron Sin* (作物学报), **26**(6): 869-873