

加勒比松、湿地松苗期生长及叶绿素荧光特性*

胡继文^{1,2} 代莹^{1,2} 李振^{1,2} 赵奋成¹ 黄少伟² 郭文冰¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;

2. 华南农业大学, 广东 广州 510642)

摘要 以加勒比松 (*Pinus caribaea*) 16 个种源、湿地松 (*P. elliottii*) 4 个种源 2.5 a 生营养袋苗木为材料, 定期开展生长调查, 于 2016 年 7—8 月、2017 年 2 月开展叶绿素荧光参数的测定, 分析加勒比松、湿地松针叶叶绿素荧光参数对树种、种源、不同测量时间的响应。结果表明, 不同种源加勒比松/湿地松的株高、地径生长均存在显著差异 ($P<0.01$); 测量时间与树种对最大 PSII 的光能转换效率 (F_v/F_m) 有显著影响 ($P<0.01$), 二者互作效应不显著, 与 7、8 月相比, 测量值均在第 2 年 2 月显著提高; 两个树种的实际量子产量 ($\Phi PSII$)、光化学淬灭 (qP) 与表观量子传递速率 (ETR) 对测量时间的响应模式相反; 加勒比松与湿地松叶绿素荧光参数受种源影响不显著; 相关性分析表明, 加勒比松与湿地松的株高和地径生长与 2 月 F_v/F_m 、PSII 有效光化学效率 (F_v'/F_m') 测量值呈一定的负相关关系; 高光强抑制了湿地松、加勒比松的叶绿素荧光参数, 但抑制效果与生长无明显相关关系; 低温造成的胁迫主要抑制了加勒比松的光化学反应, 并与其生长表现有一定的负相关关系。可考虑将 2 月份测量的叶绿素荧光参数作为加勒比松耐寒个体的筛选指标。

关键词 加勒比松; 湿地松; 生长; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S722.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2017) 04-0001-08

The Growth and Chlorophyll Fluorescence Characteristics of *Pinus caribaea* and *P. elliottii* at the Seedling Stage

HU Jiwen^{1,2} DAI Ying^{1,2} LI Zhen^{1,2} ZHAO Fencheng¹
HUANG Shaowei² GUO Wenbing¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract The nutrition pot experiments of *Pinus caribaea* and *P. elliottii* (PEE) were conducted to assess the response of chlorophyll(Chl) fluorescence parameters to different provenances and measured time. The materials were potted seedlings from 16 *P. caribaea* provenances and 4 PEE provenances. The growth of the seedlings and the Chl fluorescence parameters were measured in July and August 2016 and February 2017, separately. The result showed there were significant differences among seedlings of different provenances in height and diameter ($P<0.01$). The measured time and species had a significant effect on the value of the PS II maximal photochemical efficiency (F_v/F_m), while the interaction effect was not significant. The F_v/F_m was higher in February 2017 than in July 2016 and August 2016; the response models of measured times of two

* 基金项目: 国家林业局引进项目“加勒比松耐寒遗传资源及评价技术引进”(2013-4-39)。

第一作者: 胡继文 (1991—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为加勒比松耐寒性, E-mail: hujjwen020@126.com。

通信作者: 郭文冰 (1981—), 女, 副研究员, 主要从事林木营养研究, E-mail: wbguo@sinogaf.cn。

species were opposite in the effective quantum yield (Φ_{PSII}), the photochemical quenching coefficient (qP) and the apparent electron transport rates (ETR). The Chl fluorescence parameters of two species were affected by the measured times rather than provenances. The growth had a negative correlation with Fv/Fm and Fv'/Fm' in February 2017 in examined seedlings according to the correlation analysis. The Chl fluorescence parameters of *P. caribaea* and PEE were inhibited by high light intensity, which might not affect the growth. The Chl fluorescence parameters in *P. caribaea* were also inhibited by low temperature, which might be related to growth. The Chl fluorescence parameters of *P. caribaea* in February 2017 might be indicators of chilling tolerance among *P. caribaea* individuals.

Key words *Pinus caribaea*; *Pinus elliottii*; growth; traits chlorophyll fluorescence parameters

加勒比松 (*Pinus caribaea*) 为松科松属树种, 原产中南美地区, 划分为 3 个变种, 分别为本种加勒比松 (*P. caribaea* var. *caribaea*, 简称 PCC)、洪都拉斯加勒比松 (*P. caribaea* var. *hondurensis*, 简称 PCH) 和巴哈马加勒比松 (*P. caribaea* var. *bahamensis*, 简称 PCB) [1]。加勒比松具有生长快、分枝习性好、生长量大、抗逆的优点 [2], 是热带地区重要的商品林树种 [3]。湿地松 (*P. elliottii*) 原产于美国东南部暖热潮湿的低海拔地区 [4], 适应性强、抗旱耐瘠薄、造林成活率高、松脂产量高、质量好, 具有较高的经济价值 [5], 是我国南方主要的松脂原料栽培树种之一 [6]。

光是影响植物生长的重要因子 [7], 植物的光合作用是其有机物质合成、能量贮存与转化的基础 [8], 不同种源间的植物因种源特异性需求和适应特点导致其光合特性存在差异 [9]。叶绿素荧光动力学能够快速灵敏、无损伤地反映光系统 II (PSII) 对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面的状况 [10-11]。前人研究发现, 红叶桃 (*Rhus chinensis*) 的 Fv/Fm, qP, ETR 等叶绿素荧光参数随夏季干旱胁迫时间的延长和胁迫程度的加深而逐渐下降 [12]。欧洲赤松 (*P. sylvestris*) 的 Fv/Fm, Fv'/Fm', qP, Φ_{PSII} , ETR 与盐胁迫表现出显著负相关 [13]。目前, 针对松属树种光合作用和叶绿素荧光动力学特征对梯度光强响应的研究尚少 [14], 本文以加勒比松 3 个变种 16 个种源、湿地松 4 个种源为对象开展试验, 测定不同种源加勒比松和湿地松在广州地区的叶绿素荧光参数, 旨在揭示加勒比松与湿地松之间以及树种内种源间叶绿素荧光特性的差异, 为速生、耐寒的种源与个体选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在广东省林业科学研究院苗圃, 地处 23°20' N, 113°20' E, 属亚热带季风气候, 年均温 21.8 °C, 绝对最高温 38.1 °C, 绝对最低温 0 °C; 年降水量 1 694 mm。

1.2 试验材料

本次试验材料包括加勒比松 3 个变种共 16 个种源, 其中 1-10#、12#、18# 为洪都拉斯加勒比松变种 (PCH) 种源, 1-10# 引种自洪都拉斯天然林, 12# 引自澳大利亚种子园, 18# 引自巴西种子园; 11#、13#、17# 为古巴加勒比松变种 (PCC) 种源, 11# 引种自古巴天然林, 13# 来自湛江种子园、17# 引自巴西种子园; 16# 为巴哈马加勒比松变种 (PCB) 种源, 引自巴西种子园。湿地松 (PEE) 4 个种源分别为 21#、22#、24#、25#, 分别来自台山红岭种子园、遂溪县苗圃场、美国佛罗里达湿地松种子园、美国佐治亚湿地松种子园。试验材料于 2014 年 9 月播种, 2015 年 8 月种植于直径 30 cm 的无纺布袋, 以黄心土为基质, 株行距 30 cm × 30 cm。试验采用随机完全区组设计, 共设 8 个区组, 区组内每个种源为 12 株单行, 在第二次生长调查时, 即 2017 年 1 月上旬, 13# 种源每个区组存活 3~6 株, 17# 种源每个区组仅存活 1~5 株, 共保存 1 927 株。

1.3 试验方法

2016 年 1 月下旬, 广州出现近几十年来的最大寒潮, 对当时营养袋苗木生长表型观察发现, 其表现出较大的冷害反应, 2016 年 3—5 月, 生长逐渐恢复。2017 年 1 月, 广州天气相对温和, 苗木未表现明显冷害。本研究于 2016 年 5 月下旬

及 2017 年 1 月上旬使用电子游标卡尺和直尺分别对每株参试加勒比松 / 湿地松植株进行株高 (cm) 和地径 (mm) 调查。

叶绿素荧光测定分别于 2016 年 7 月下旬至 8 月上旬及 2017 年 2 月上旬开展。7 月下旬至 8 月上旬平均最高气温 35.5 °C, 最低气温 28.1 °C; 2017 年 2 月上旬平均最高气温 23.1 °C, 最低气温 11.9 °C。利用配置调制荧光叶室 (Li-6400-40) 的便携式光合测定系统 Li-6400-XT (Li-COR, USA) 对待测叶片的叶绿素荧光各参数进行测定。每个种源选择 4 株生长健康的单株, 由于 13#、17# 种源生长缓慢、保存率较低, 在叶绿素荧光特性测定试验中未做测定分析。于测定前一天 18:00 时, 选择树顶向下第二轮枝的向阳枝条, 用锡箔纸将 4 束待测针叶包裹好, 进行叶片暗适应过夜, 第二天 8:30—17:30 时进行测定, 先测定暗适应叶绿素荧光参数, 再打开活化光 ($1\ 500\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 活化 20 min, 测定光适应下的相应参数, 分析参数包括: 初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m)、最大 PSII 的光能转换效率 (F_v/F_m)、光下最小荧光产量 (F_0')、光下最大荧光产量 (F_m')、光化学淬灭 (qP)、非光化学淬灭 (NPQ)、PSII 有效光化学效率 (F_v'/F_m')、实际量子产量 (ΦPSII) 和表观量子传递速率 (ETR) [15]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft excel 2010 和 SAS 9.4 软件对试验数据进行统计分析, 株高、地径的方差分析调用 SAS 的 GLM 过程, MODEL 语句指定区组与种源的双因素有交互作用的统计模型; 树种的叶绿素荧光特性调用 SAS 的 MIXED 过程, 指定测量时间、树种及区组三因素有交互作用的统计模型, 树种内种源为随机项; 种源的叶绿素荧光特性调用 SAS 的 GLM 过程, 指定测量时间、种源及区组的三因素有交互作用的统计模型。各指标间的相关性分析调用 SAS 的 CORR 过程, 计算 Pearson 积矩相关系数。当概率 P 值 <0.05 时, F 检验达到显著水平。

2 结果与分析

2.1 加勒比松与湿地松种源的苗期生长

不同种源加勒比松 / 湿地松的株高、地径生长均存在显著差异 ($P<0.01$)。加勒比松 3 个变种生长分化大, 其中, PCH 明显高于 PCC、PCB 4 个

种源, PCH 变种中, 只有 12#、2# 生长表现较为一般, 其余 10 个均为速生种源, 播种后 20 个月平均株高为 63.26 cm, 地径为 13.06 mm, 28 个月平均株高为 104.14 cm, 地径为 25.27 mm。PCC 变种苗期生长总体不如 PCH, 其中 11# 种源生长相对速生, 13#、17# 种源的株高与地径在 16 个加勒比松种源中表现最差, 也远低于湿地松 4 个种源。PCB16# 种源较 PCC 3 个种源具明显生长优势, 播种 28 个月, 生长超过 PCH12# 种源。根据湿地松的株高地径生长情况, 21#、22# 种源苗期相对慢生, 24#、25# 相对速生, 后者播种后 20 个月的生长与 PCH 相似, 28 个月后, 生长相对 PCH 有所下降 (表 1)。

2.2 加勒比松与湿地松叶绿素荧光参数的树种差异

测量时间对加勒比松与湿地松叶绿素荧光最大 PSII 的光能转换效率 (F_v/F_m) 有显著影响 ($P<0.01$)。由图 1 可知, 湿地松与加勒比松 2 月测量值显著高于 7、8 月。湿地松 2 月的 F_v/F_m 值显著高于加勒比松, 7、8 月树种间则无显著差异。 F_v/F_m 常用于度量植物叶片 PSII 的光能转换效率 [15], 在受到逆境胁迫时会有所下降。本试验说明湿地松与加勒比松在 7、8 月受到了一定程度的胁迫, 可能与 7、8 月高光强环境有关。湿地松 2 月的 F_v'/F_m' 值显著高于同期的加勒比松, 同时也显著高于 7、8 月两个树种的测定值。实际量子产量 (ΦPSII)、光化学淬灭 (qP)、表观量子传递速率 (ETR) 表现出一致的变化趋势, 且均呈现显著的测量时间与树种交互作用效应 ($P<0.01$): 加勒比松在 7、8 月 ΦPSII 、 qP 、ETR 值显著高于其在 2 月的对应参数值, 湿地松在 7、8 月 ΦPSII 、 qP 、ETR 值显著低于其在 2 月的对应参数值。加勒比松与湿地松 F_v/F_m 在树种间存在显著差异, 暗示着不同针叶树种光系统 II 光化学机制存在差异。

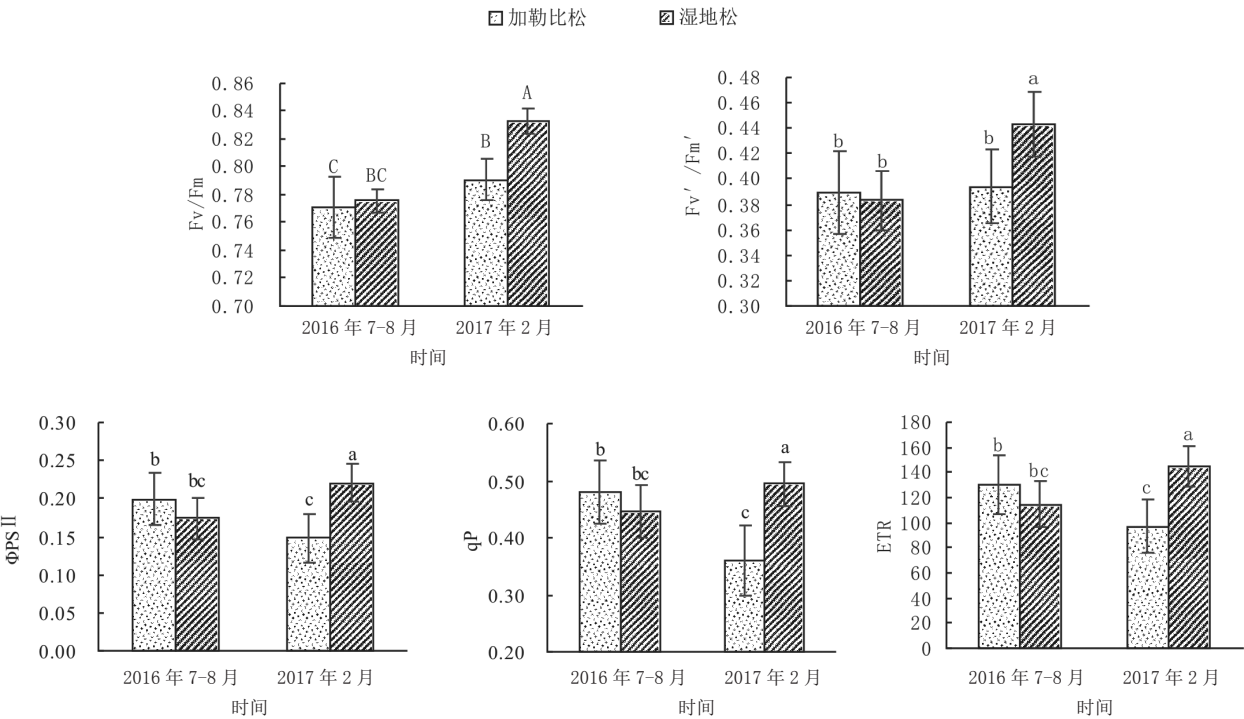
2.3 加勒比松、湿地松叶绿素荧光参数的种源差异

分析树种内种源、测量时间及其交互作用对叶绿素荧光参数的影响, 发现: 测量时间对加勒比松的 ΦPSII 、 qP 有显著作用 ($P<0.01$), 除 12# 外, 其它 15 个种源 ΦPSII 在 7、8 月均大于其在 2 月的测定值, 所有种源 7、8 月的 qP 均大于其在 2 月的测定值 (图 2); 而测量时间、种源以及交互作用对加勒比松的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、NPQ、

表 1 加勒比松与湿地松 20 个种源苗期生长

树种	变种	种源	播种后 20 个月		播种后 28 个月	
			株高 /cm	地径 /mm	株高 /cm	地径 /mm
加勒比松	PCH	1#	68.45 ± 14.17	15.34 ± 3.70	101.80 ± 18.88	28.42 ± 6.95
	PCH	2#	49.96 ± 16.04	10.14 ± 4.17	87.52 ± 21.70	20.83 ± 7.33
	PCH	3#	66.00 ± 12.05	13.83 ± 3.07	101.24 ± 19.93	24.45 ± 5.58
	PCH	4#	63.36 ± 13.96	11.78 ± 3.61	108.02 ± 22.20	24.34 ± 6.18
	PCH	5#	63.55 ± 13.33	13.25 ± 3.68	109.34 ± 21.87	27.40 ± 6.22
	PCH	6#	66.35 ± 11.64	13.56 ± 3.30	108.50 ± 16.75	27.15 ± 6.86
	PCH	7#	56.93 ± 12.04	13.44 ± 3.71	99.60 ± 20.27	25.46 ± 5.97
	PCH	8#	60.52 ± 15.79	11.99 ± 3.61	105.46 ± 25.08	24.56 ± 7.27
	PCH	9#	62.89 ± 13.52	13.64 ± 2.93	99.79 ± 20.55	24.15 ± 6.44
	PCH	10#	64.18 ± 13.86	12.13 ± 2.94	103.97 ± 22.32	22.86 ± 6.49
	PCH	12#	41.79 ± 12.33	7.86 ± 2.99	75.35 ± 20.16	16.86 ± 6.14
	PCH	18#	60.36 ± 18.03	11.67 ± 4.50	103.58 ± 23.44	23.88 ± 7.12
湿地松	PCC	11#	39.50 ± 9.75	6.75 ± 1.74	64.89 ± 18.62	12.13 ± 3.08
	PCC	13#	13.60 ± 6.93	2.67 ± 1.47	27.92 ± 14.76	5.85 ± 2.63
	PCC	17#	11.47 ± 4.30	2.28 ± 0.70	20.08 ± 9.22	3.74 ± 1.64
	PCB	16#	37.82 ± 10.07	8.20 ± 1.79	79.67 ± 22.76	15.17 ± 3.88
		21#	35.67 ± 14.50	6.50 ± 2.65	55.33 ± 22.89	14.26 ± 5.68
		22#	45.67 ± 16.20	8.37 ± 3.26	71.98 ± 24.47	17.28 ± 7.20
		24#	58.62 ± 11.82	10.84 ± 2.10	83.26 ± 20.19	21.86 ± 6.05
		25#	63.53 ± 13.59	10.56 ± 2.36	87.81 ± 18.29	21.97 ± 6.21

注：表中数据为平均值 ± 标准差；PCH 为洪都拉斯加勒比松变种种源，PCC 为古巴加勒比松变种种源，PCB 为巴哈马加勒比松变种种源；P 值为采用 SAS9.4 的 GLM 过程的不同种源方差分析结果；播种时间为 2014 年 9 月。



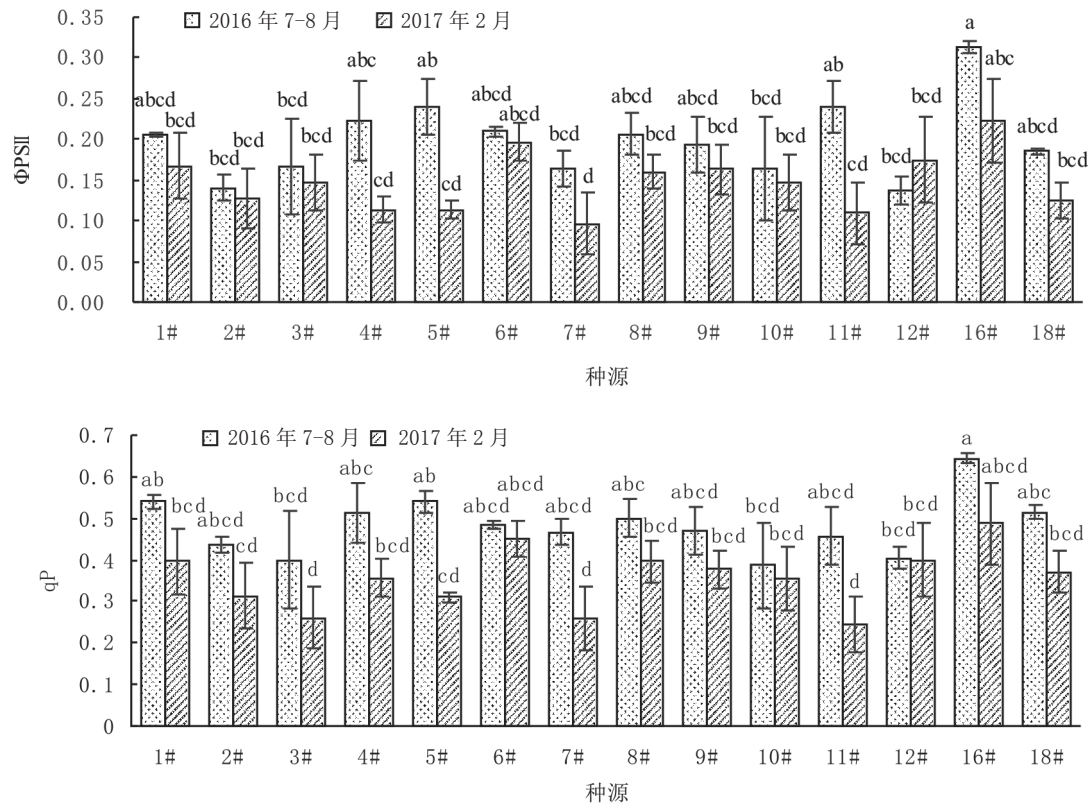
注：图中的值为最小二乘均数 (Lsmeans) 及其标准误差；柱子上凡有 1 个相同小写或者大写字母者，分别表示树种间、同一树种不同测定时间在 0.05 或 0.01 水平差异不显著；两种树种播种时间为 2014 年 9 月。

图 1 测定时间对加勒比松与湿地松叶绿素荧光参数的影响

ETR 影响不显著。湿地松 4 个种源中, 不同测量时间, F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 存在显著差异 ($P<0.01$); 2 月测量的 F_v'/F_m' 在 22# 与 25# 种源间存在显著差异, 其余各项间差异未达到显著水平, 但总体而言, 相对速生的 24#、25# 种源的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 小于 21#、22# 种源 (图 3)。

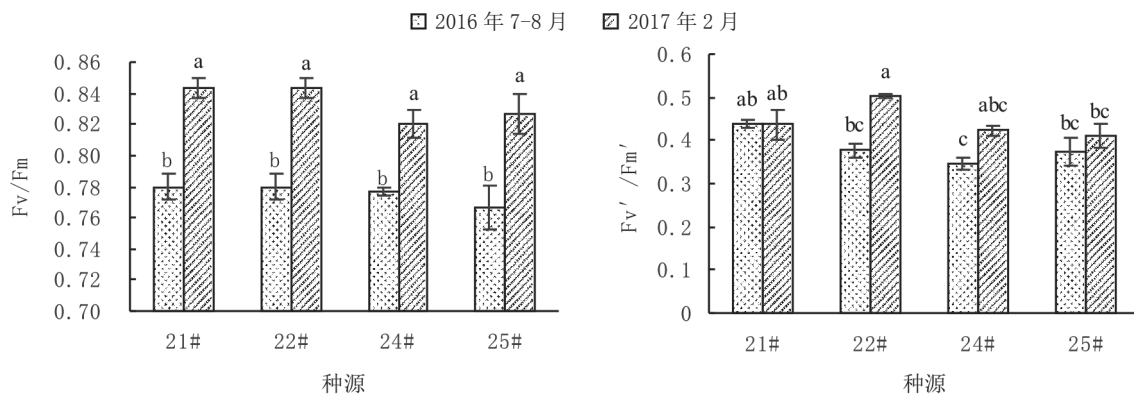
2.4 苗期生长与针叶叶绿素荧光特性的相关性

分别将 2 月、7、8 月的叶绿素荧光参数值与加勒比松、湿地松苗期个体生长进行相关性分析 (表 2、3), 结果表明: 播种 20 个月后, 加勒比松与湿地松的生长与 2 月 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 测量值呈一定的负相关关系, 其中, 加勒比松播种 20 个月的地径与 2 月 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 呈显著



注: 图中的值为最小二乘均值 (Lsmeans) 及其标准误; 柱子上凡有 1 个相同小写字母者, 表示树种间、同一树种不同测定时间在 0.05 水平差异不显著; 两种树种播种时间为 2014 年 9 月。

图 2 加勒比松叶绿素荧光参数的种源差异



注: 图中的值为最小二乘均值 (Lsmeans) 及其标准误; 柱子上凡有 1 个相同小写字母者, 表示树种间、同一树种不同测定时间在 0.05 水平差异不显著; 两种树种播种时间为 2014 年 9 月。

图 3 湿地松叶绿素荧光参数的种源差异

表 2 加勒比松、湿地松生长与 2 月叶绿素荧光参数值的相关关系

树种	苗龄	指标	R 值					
			Fv/Fm	Fv' /Fm'	ΦPSII	qP	NPQ	ETR
加勒比松	播种后 20 个月	株高	0.255	-0.025	-0.001	0.017	0.390*	-0.001
		地径	-0.363*	-0.327*	-0.154	-0.064	-0.227	-0.168
	播种后 28 个月	株高	-0.075	-0.316	-0.070	0.078	0.277	-0.071
		地径	-0.164	-0.251	-0.143	-0.020	0.038	-0.156
湿地松	播种后 20 个月	株高	-0.649*	-0.660*	-0.340	0.047	0.477	-0.321
		地径	-0.464	-0.562	-0.237	0.115	0.481	-0.214
	播种后 28 个月	株高	-0.556	-0.506	-0.218	0.094	0.295	-0.193
		地径	-0.558	-0.379	-0.008	0.311	0.105	0.015

注：“*”表示在 0.05 水平相关性显著；表中的叶绿素荧光参数分别为最大 PSII 的光能转换效率（Fv/Fm）、光化学淬灭（qP）、非光化学淬灭（NPQ）、PSII 有效光化学效率（Fv'/Fm'）、实际量子产量（ΦPSII）、表观量子传递速率（ETR）。

表 3 加勒比松、湿地松生长与 7-8 月叶绿素荧光特性的相关关系

树种	苗龄	指标	R 值					
			Fv/Fm	Fv' /Fm'	ΦPSII	qP	NPQ	ETR
加勒比松	播种后 20 个月	株高	-0.262	-0.092	-0.240	-0.122	-0.055	-0.233
		地径	0.033	-0.178	-0.158	0.009	-0.018	-0.159
	播种后 28 个月	株高	-0.202	-0.181	-0.326*	-0.094	0.198	-0.327*
		地径	-0.077	-0.125	-0.221	-0.049	-0.039	-0.213
湿地松	播种后 20 个月	株高	-0.224	-0.422	-0.310	-0.204	0.380	-0.303
		地径	-0.230	-0.547	-0.379	-0.257	0.366	-0.376
	播种后 28 个月	株高	-0.294	-0.439	-0.311	-0.196	0.286	-0.307
		地径	-0.456	-0.423	-0.246	-0.124	0.297	-0.234

注：“*”表示在 0.05 水平相关性显著；表中的叶绿素荧光参数分别为最大 PSII 的光能转换效率（Fv/Fm）、光化学淬灭（qP）、非光化学淬灭（NPQ）、PSII 有效光化学效率（Fv'/Fm'）、实际量子产量（ΦPSII）、表观量子传递速率（ETR）。

的弱负相关，湿地松播种 20 个月株高与 Fv/Fm、Fv' /Fm' 呈显著的中等负相关，相关系数分别达 -0.649，-0.660；加勒比松播种 20 个月株高与 NPQ 呈显著的弱正相关（R=0.390）；此时期的株高地径生长与 7、8 月的叶绿素荧光各参数未呈现显著相关。播种 28 月后，苗期生长与叶绿素荧光参数无显著正负相关关系，仅加勒比松株高与 7、8 月 ΦPSII、ETR 测量值呈显著弱负相关关系。

3 结论与讨论

目前，以加勒比松为父本、湿地松为母本杂交产生的湿加松已逐渐成为世界上工业原料林和速生丰产林的主要造林树种。本研究发现：不同种源加勒比松 / 湿地松的株高、地径生长均存在显著差异。加勒比松中，来自 PCH 变种除 12#、2# 种源外，其余均为速生种源。前期研究发现，PCH 变种苗期速生但耐寒性不强；PCB 的 16# 种源苗期生长较 PCC 3 个种源具明显优势，播种 28

个月生长超过 PCH12# 种源，成林后 PCB 变种可能更加速生，这与不同种源的生长高峰期出现的时间存在差异有关^[17]，前期研究也表明，种源 16# 在经历寒潮后无明显冷害表型，可作为进一步选育加勒比松耐寒种源速生、耐寒家系与单株。湿地松 4 个种源的生长也存在显著差异，24#、25# 较 21#、22# 速生。加勒比松变种 / 种源以及湿地松种源间生长差异大，有必要探讨加勒比松与湿地松生长与表型相关的光合生理机制。

本文首次开展加勒比松叶绿素荧光特性研究发现，加勒比松与湿地松叶绿素荧光参数受到测量时间的影响，且 2 月时树种间存在显著差异。理论上，针叶树种的光合作用在全年都是活跃的^[18]，正常生长下，针叶的 Fv/Fm 值应在 8.0 以上。湿地松与加勒比松 7、8 月 Fv/Fm 测量值低于 8.0，加勒比松 2 月平均测量值也在 8.0 以下，说明两个树种 7、8 月以及加勒比松 2 月均受到了环境胁迫。前人研究发现不同季节华东楠（*Machilus*

leptophylla)、乳源木莲 (*Manglietia yuyuanensis*) 的叶绿素荧光参数有显著差异^[19-20], 春秋季节的 Fv/Fm 显著大于冬夏季, 可能冬夏季受到环境胁迫。Sánchezgómez 等^[21] 研究发现, 其它条件相似的情况下, 高辐射会抑制樟子松 (*P. sylvestris*) 针叶的 Fv/Fm 值, 前人研究指出, 在低光照强度下, 叶片吸收的光能处于光化学反应, 光系统 II 中的 Fv/Fm 会升高, 高光照强度下, 叶片吸收的光能大部分通过非光化学过程而散失, 此时的 Fv/Fm 往往较低^[22], 广州的 7、8 月白天外界光强 $1\ 500 \sim 2\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 对湿地松与加勒比松可能均产生了胁迫, 这与前人研究结果较为一致^[21]。7、8 月, 加勒比松与湿地松的叶绿素荧光参数差异不大, 可能是两树种对 7、8 月高光强抗性相似。

湿地松 2 月 Fv/Fm、Fv/Fm' 测量值显著高于 7、8 月, 说明在广州高光强造成的胁迫可能比 2 月低温造成的胁迫要严重。2 月, 湿地松的 Fv/Fm、Fv/Fm'、 ΦPSII 、qP、ETR 均显著大于加勒比松对应各项参数, 可能是因为加勒比松是偏热带树种, 在我国的适宜种植范围最北到 23°N ^[23], 2 月气温偏低在一定程度上对加勒比松造成了胁迫, 而湿地松的适应性较广, 在我国可分布到 $33^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$, 2 月气温偏低对湿地松的影响相对较小。此外, ΦPSII 、qP、ETR 参数均表现出显著的测量时间与树种交互作用效应, 表明两个树种对高光强与低温的响应存在差异。

种源水平上, 不同加勒比松种源的叶绿素荧光特性未表现出显著差异, 表现为各种源的 Fv/Fm、Fv/Fm'、NPQ、ETR 受测量时间与种源的影响均无显著差异, 而各种源的 ΦPSII 与 qP 均在 7、8 月显著大于 2 月, 对气温的反映趋于一致, 只有 12# 下降最少。湿地松 4 个种源的 Fv/Fm 与 Fv/Fm' 基本表现为 2 月大于 7、8 月, 只有 21# 的 Fv/Fm' 差异较小。树种内叶绿素荧光参数对环境反应的差异再一次表明, 湿地松与加勒比松对逆境胁迫的反应不一致, 前人研究发现, 同种树种的叶绿素荧光参数主要受环境波动^[24-25], 本研究树种间大部分指标差异不显著, 种源间亦是大部分指标不同测定时间之间差异不显著, 这与前人结果基本一致, 参试材料的叶绿素荧光参数可能受基因型的影响相对较小。

Fv/Fm 等叶绿素荧光参数一般跟生长无显著关系, 仅与胁迫相关^[26]。本研究中, 加勒比松、

湿地松生长与 2 月的叶绿素荧光参数呈显著相关, 可能是因为该批试验材料生长较快的种源耐寒性较弱^[16], 本次研究中 2016 年 5 月的生长可能受 2016 年 1 月下旬的寒潮影响, 2017 年 2 月气温相对较低, 测得的指标一定程度上可反映个体受低温影响的程度, 所以 2017 年 2 月测得的参数与 2016 年 5 月生长的相关性较强, 可考虑将 2 月份测量的叶绿素荧光参数作为加勒比松耐寒个体的筛选指标。7、8 月测得的 Fv/Fm 等参数与生长无显著相关关系, 可能是因为高光强对加勒比松与湿地松的生长无影响, 而 7、8 月测得的 ΦPSII 、ETR 与个体生长呈负相关, 可考虑作为筛选加勒比松生长优良个体的光合生理指标。

参考文献

- [1] FARJON A, STYLES B T. Flora Neotropica *Pinus* (Pinaceae) [M]. New York: the New York Botanical Garden, 1997: 1-291.
- [2] 李义良, 赵奋成, 林昌明, 等. 湿地松、加勒比松人工林优树选择研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(6): 29-34.
- [3] 郭文冰, 赵奋成, 戎洁庆, 等. 粤西 8 年生加勒比松施肥效果研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(4): 18-24.
- [4] 周珺, 魏虹, 吕茜, 等. 土壤水分对湿地松幼苗光合特征的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 30-37.
- [5] 李彦杰, 姜景民, 栾启福. 湿地松家系产脂力、树脂密度和松节油含量的测定与遗传分析[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 48-51.
- [6] 韦理电, 唐生森, 韦钧翔, 等. 湿地松人工林生长规律[J]. 广西林业科学, 2016, 45(3): 276-279.
- [7] ROZENDAAL D, HURTADO V H, POORTER L. Plasticity in leaf traits of 38 tropical tree species in response to light; relationships with light demand and adult stature[J]. Functional Ecology, 2006, 20(2): 207-216.
- [8] 董倩, 唐秀光, 王洁, 等. 不同种源黄连木光合参数比较及聚类分析[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(3): 58-62.
- [9] 王佩兰. 不同种源钩栗种子特征及幼苗光合特性比较研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [10] 赵弢, 高志奎, 徐广辉, 等. 非调制式荧光仪测定叶绿素荧光参数的研究[J]. 生物物理学报, 2006, 22(1): 34-38.
- [11] HENRIQUES F S. Gas exchange, chlorophyll a fluorescence kinetics and lipid peroxidation of pecan leaves with varying manganese concentrations[J]. Plant Science, 2003, 165(1): 239-244.
- [12] 王虹. 夏秋季节干旱胁迫对红叶桃光合特性及相关生

- 理指标的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [13] 张阿宏, 齐孟文, 张晔晖. 调制叶绿素荧光动力学参数及其计量关系的意义和公理化讨论[J]. 核农学报, 2008, 22(6): 909-912.
- [14] 王巧, 聂鑫, 刘秀梅, 等. 遮光对松属3个树种幼树光合特性和荧光参数的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 643-651.
- [15] 张毅龙, 张卫强, 甘先华. 低温胁迫对6种珍贵树种苗木光合荧光特性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 777-784.
- [16] 方连玉. 盐胁迫对欧洲赤松光合作用的影响及耐盐性评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [17] 何小勇. 翅荚木种源遗传多样性及其抗低温胁迫能力研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [18] GIELEN B, JACH M E, CEULEMANS R. Effects of season, needle age, and elevated atmospheric CO₂ on chlorophyll fluorescence parameters and needle nitrogen concentration in scots Pine (*Pinus sylvestris*) [J]. Photosynthetica, 2000, 38(1): 13-21.
- [19] 陈辰, 刘桂华, 赵海燕, 等. 华东楠叶绿素的荧光特性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 50-53.
- [20] 赵海燕, 刘桂华, 何小定, 等. 乳源木莲幼树叶片叶绿素荧光特性[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 1-5.
- [21] Sánchezgómez D, VALLADARES F, ZAVALA M A. Functional traits and plasticity in response to light in seedlings of four Iberian forest tree species[J]. Tree Physiology, 2006, 26(11): 1425-1433.
- [22] 申长青. 濒危植物四药门花对光照和水分胁迫的适应性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [23] 钟伟华. 林木遗传育种实践与探索[M]//钟伟华文集. 广州: 广东科技出版社, 2008: 256-262.
- [24] 胡晓健. 水分胁迫下不同种源马尾松苗木生理特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [25] 翁剑, 阮少宁, 黄淑燕, 等. 不同种源黑木相思抗旱性评估[J]. 福建林业, 2013, 167(4): 25-27.
- [26] 魏霞. 福建长汀重建生态系统马尾松叶片气体交换与叶绿素荧光特征研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2007.