

# 移栽胁迫对红鳞蒲桃群落 5 种优势植物苗木生理特征的影响\*

## The Influence of Transplanting Stress on Seedlings Physiological Characteristic of Five Dominant Species in *Syzygium hancei* Communities

曾 聪\*\* , 史小芳, 邱广龙, 李蕾鲜

ZENG Cong, SHI Xiao-fang, QIU Guang-long, LI Lei-xian

(广西科学院 广西红树林研究中心, 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536000)

(Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Mangrove Research-Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**摘要:**【目的】筛选出红鳞蒲桃 (*Syzygium hancei*) 群落 5 种优势植物中最适宜移栽的种类。【方法】通过考察移栽失水对植物叶绿素荧光参数的影响来探讨红鳞蒲桃对移栽胁迫的抗逆性。【结果】起苗后 24h 内, 5 种植物的叶绿素含量下降未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ), 但叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、 $NPQ$  和  $F_v/F_0$  变化显著 ( $P < 0.01$ ), 其失水率与起苗时间显著正相关 ( $P < 0.01$ )。移栽胁迫对喙果皂帽花 (*Dasydaschalon rostratum*) 的影响最大, 其次为红鳞蒲桃, 对打铁树 (*Rapanea linearis*) 和紫荆木 (*Madhuca pasquieri*) 的影响相对较小, 对下龙新木姜 (*Neolitsea alongensis*) 的影响最小。【结论】5 种优势植物中, 下龙新木姜为最适合移栽的种类, 其次为打铁树和紫荆木, 喙果皂帽花对移栽胁迫抗逆性较差, 不宜选择; 建议各树种的最佳移栽时间为起苗后 16h 内。

**关键词:** 移栽胁迫 叶绿素荧光参数 红鳞蒲桃群落

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2014)04-0263-06

**Abstract:**【Objective】The purpose of this study is to select the most suitable transplanting species from five dominant plants in *Syzygium hancei* communities in Wutou, Jiangping and Fangchenggang, Guangxi.【Method】The changes of plant chlorophyll fluorescence parameters was used to study the plant stress resistance to transplanting stress.【Result】During the first 24h after lifting of seedlings, the chlorophyll content of the five species showed no significantly change ( $P > 0.05$ ), while the chlorophyll fluorescence parameters ( $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $qP$ ,  $NPQ$  and  $F_v/F_0$ ) significantly changed with time ( $P < 0.01$ ). The water loss rates correlated significantly with time ( $P < 0.01$ ). The results showed the influence of transplanting stress on five dominant species was significant. The order of transplanting stress effects on *Syzygium hancei* was *D. rostratum*, *S. hancei*, *R. linearis*, *M. pasquieri* and *N. alongensis*.【Conclusion】The most suitable species for transplanting was *N. alongensis*, then *R. linearis* and *M. pasquieri*. *D. rostratum* demonstrated low stress resistance and was not suitable for transplanting. The optimal time for transplanting of the selected species was 0 to 16h after lifting of seedlings.

**Key words:** transplanting stress, chlorophyll fluorescence parameters, *Syzygium hancei* communities

收稿日期: 2014-08-10

作者简介: 曾 聪 (1979-), 女, 硕士, 主要从事滨海植被和滨海湿地研究。

\* 广西科学院基本科研业务费专项资金项目 (12YJ25HS14) 资助。

\*\* 通讯作者。

【研究意义】红鳞蒲桃 (*Syzygium hancei*) 季雨林是广西滨海 2km 范围内唯一存留的地带性植被, 现以片林残存于村边, 总面积仅 19.1hm<sup>2</sup>[1], 已

处于濒危状态,急需保护、恢复和重建。移栽是植被恢复和重建的主要组成部分,苗木从起苗到栽植期间可能会受到失水、高低温、光照不足等异常因素的影响,导致苗木活力下降,从而直接影响移栽成活率。因此研究苗木忍耐移栽胁迫的能力,对其移栽成活及生长非常重要。【前人研究进展】在国外“移栽胁迫”分别采用 *transplanting stress*<sup>[2,3]</sup>, *transplanting shock*<sup>[4]</sup>, *transplant stress*<sup>[5]</sup> 和 *post-planting stress*<sup>[6]</sup> 等词进行描述,但没有对其内含进行定义。在国内这一概念首次由李继东等<sup>[7]</sup>提出,将其定义为移栽期间受到诸如断根、失水、高低温、光照不足、光周期紊乱、缺氧、擦伤、振动、根际环境改变等各种因子对移栽植物生长发育造成的不良影响。国内外关于移栽胁迫对苗木的影响研究有失水、机械伤害、温度及多因子共同胁迫等方面的报道<sup>[7]</sup>。其中失水被认为是移栽过程中最容易发生的伤害, Margolis 等<sup>[8]</sup>、Wilson 等<sup>[9]</sup>和 Radoglou 等<sup>[10]</sup>认为水分胁迫是移栽胁迫的主要因素。国内关于水分胁迫对植物叶绿素荧光参数的影响的报道主要有王可玢<sup>[11]</sup>、张秋英<sup>[12]</sup>、史胜青<sup>[13]</sup>、杨晓青<sup>[14]</sup>、毕会涛<sup>[15]</sup>、柏祥<sup>[16]</sup>等的研究。【本研究切入点】植物叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程紧密相关,任何逆境对光合作用各个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<sup>[17]</sup>。因此,叶绿素荧光参数可作为逆境条件下植物抗逆反应的指标之一,是快速、灵敏、无损伤地研究和探测逆境胁迫对植物光合作用影响的理想方法<sup>[11,18~20]</sup>,同时叶绿素荧光参数的测定方法简便易行,且可快速反映出植株受胁迫状况,所以在水分胁迫研究中也应用较多<sup>[21]</sup>。本研究以红鳞蒲桃群落中的5种优势植物:红鳞蒲桃 (*Syzygium hancei*)、打铁树 (*Rapanea linearis*)、紫荆木 (*Madhuca pasquieri*)、下龙新木姜 (*Neolitsea alongensis*) 和喙果皂帽花 (*Dasymaschalon rostratum*) 为研究对象,通过移栽失水对它们叶绿素荧光参数的影响来探讨其对移栽胁迫的抗逆性。【拟解决的关键问题】筛选出最佳移栽树种以及确定它们的最佳移栽时间,以指导今后的滨海植被特别是红鳞蒲桃季雨林的恢复和重建。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

正常生长的2年生野生幼苗,包括红鳞蒲桃、打铁树、紫荆木、下龙新木姜和喙果皂帽花5种植物,

每种植物取4株,取其完好成熟的叶片进行实验,其中喙果皂帽花的叶片为纸质,打铁树为坚纸质近革质,其他3种为革质;幼苗平均鲜重分别为13.10g、22.80g、16.57g、22.27g和9.94g;平均苗高分别为25cm、20cm、32cm、36cm和26cm;平均地径分别为5mm、7mm、5mm、8mm和6mm;平均主根长分别为12cm、13cm、16cm、15cm和20cm;幼苗带完整根系,根系不带土。采集时间为2012年12月15日。采苗地点在广西防城港市江平镇巫头村,中心地理坐标为108°07.189'E,21°31.941'N。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 叶绿素含量的测定

分别在起苗后的0h、8h、16h、24h对植株叶片进行取样,以无水乙醇:丙酮=1:1的混合液为浸提液,浸提至材料刚好变白为准,取浸提液进行分光光度比色测定叶绿素含量。

#### 1.2.2 失水率的测定及表示方法

起苗后24h内每隔2h称量1次植株的鲜重(FW)(精确到0.01g),于试验结束时将植株放入烘箱(80℃)烘至恒重后称量干重(DW),计算失水率,计算公式如下:

$$\text{失水率} = [(FW_1 - FW_i) / (FW_1 - DW)] \times 100\%$$

其中  $FW_i$  ( $i = 2, 3, \dots, 11$ ) 表示每次测定时的植株鲜重。

#### 1.2.3 叶绿素荧光的测定

起苗后24h内每隔2h测定一次叶绿素荧光,共测定10次。叶绿素荧光测定采用水下调制叶绿素荧光仪 DIVING-PAM(德国, WALZ)。植株叶片经10min暗适应后打开测量光( $1\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),测定本底荧光  $F_0$ ,再打开饱和脉冲( $3000\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),测定最大荧光  $F_m$ ,然后照射光化光( $157\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )30s后打开饱和脉冲,测定实时荧光  $F$  和光照状态下的最大荧光  $F_m'$ ,通过测定出的荧光值,按以下公式计算其它叶绿素荧光参数。

$$\text{实际量子产量: } \Phi_{\text{PSII}} = \Delta F / F_m' = (F_m' - F) / F_m'$$

$$\text{最大量子产量: } F_v / F_m = (F_m - F_0) / F_m$$

$$\text{光化学淬灭系数: } qP = (F_m' - F) / (F_m' - F_0)$$

$$\text{非光化学淬灭(热耗散): } NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$$

### 1.3 实验环境条件

本实验于室外完成。实验期间天气多云间晴,南风微风,气温21~24℃,最高气温和最低气温分别出现在起苗后的2h和19h,即15:00和第2天8

:00;大气相对湿度变化范围为 86%~94%,出现时间与温度正好相反(图 1)。

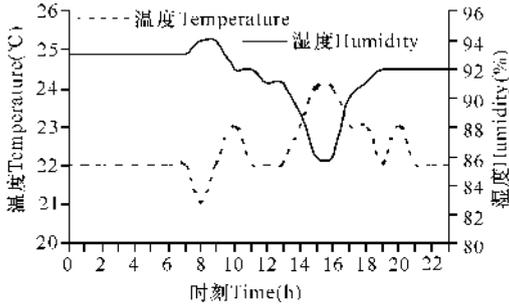


图 1 实验期间的温度和湿度变化

Fig. 1 The temperature and humidity changes of experiment

## 2 结果与分析

### 2.1 失水率的变化

起苗时 5 种植物的含水量分别为打铁树 63.6%、下龙新木姜 59.2%、紫荆木 54.9%、红鳞蒲桃 54.7%和喙果皂帽花 53.8%。起苗后 0~2h 出现最高气温和最低湿度,水分的散失最快,2~18h 趋于平缓,18h 后再次出现加快现象(图 2)。起苗后 24h 内,5 种植物的失水率随着起苗时间的延长,逐渐增大,失水率与起苗时间的相关性均达到了极显著水平( $P < 0.01$ ),相关性方程见表 1,但变化速度存在显著差异( $P < 0.01$ ),5 种植物失水率的变化趋势为喙果皂帽花>红鳞蒲桃>紫荆木>下龙新木姜>打铁树。

表 1 失水率与起苗时间相关性分析

Table1 Correlation analysis between water loss rate and time after lifting of seedlings

植物种类 Species	相关性方程 Correlation equations	R	Sig.
喙果皂帽花 <i>Dasymaschalon rostratum</i>	$y = 0.016x + 0.132$	0.856	0.000
红鳞蒲桃 <i>Syzygium hancei</i>	$y = 0.014x + 0.005$	0.940	0.000
打铁树 <i>Rapanea linearis</i>	$y = 0.006x + 0.026$	0.786	0.000
紫荆木 <i>Madhuca pasquieri</i>	$y = 0.014x - 0.021$	0.884	0.000
下龙新木姜 <i>Neolitsea alongensis</i>	$y = 0.008x + 0.109$	0.597	0.000

### 2.2 叶绿素含量的变化

起苗时红鳞蒲桃叶片的叶绿素含量最高,为 6.33mg/dm<sup>2</sup>,下龙新木姜、打铁树和紫荆木依次为 6.24mg/dm<sup>2</sup>、5.41mg/dm<sup>2</sup> 和 4.86mg/dm<sup>2</sup>,喙果皂帽花最小,为 2.53mg/dm<sup>2</sup>。起苗后,喙果皂帽花

的叶绿素含量下降最大,下降量为 0.14mg/dm<sup>2</sup>,其次为下龙新木姜,下降量为 0.12mg/dm<sup>2</sup>,打铁树和紫荆木下降量为 0.11mg/dm<sup>2</sup>,红鳞蒲桃最小,为 0.02mg/dm<sup>2</sup>。起苗后(图 3)24h 内 5 种植物的叶片叶绿素含量变化均不明显( $P > 0.05$ ),与叶绿素荧光参数的相关性不显著。

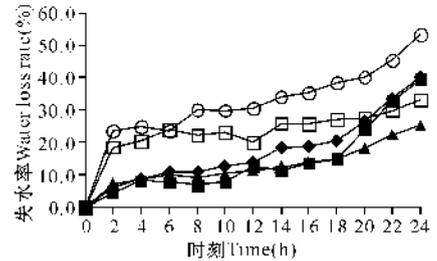


图 2 起苗后 5 种植物的失水率变化

Fig. 2 The water loss rate of 5 plants after lifting of seedlings

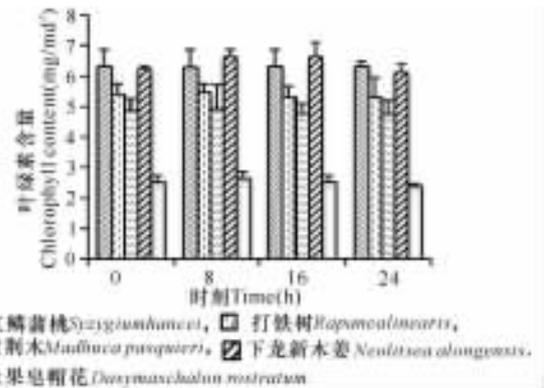


图 3 起苗后 5 种植物的叶绿素含量变化

Fig. 3 The chlorophyll content of 5 plants after lifting of seedlings

### 2.3 叶绿素荧光参数的变化

#### 2.3.1 最大量子产量 $F_v/F_m$ 的变化

最大量子产量  $F_v/F_m$  反映 PSII 反应中心内禀光能转换效率<sup>[22]</sup>,是植物的潜在最大光合能力的表征<sup>[15]</sup>,也是植物健康状况的有效探针,可以反映植物受胁迫程度。通常  $F_v/F_m$  值在 0.70~0.85<sup>[23]</sup>,低于 0.70 表明植物受到了较强的胁迫。起苗时喙果皂帽花的  $F_v/F_m$  值稍低,为 0.78,其他 4 个种均为 0.8 左右;起苗后 4h 内和 16h 后下降速度最快;其他 4 个种 18h 前变化平缓,18h 后开始明显下降(图 4a)。喙果皂帽花的  $F_v/F_m$  值低于 0.70 的时间为 4h,红鳞蒲桃和下龙新木姜为 20h,紫荆木和打铁树 20h 后仍维持在 0.70 以上。统计分析表明,5 种植物的  $F_v/F_m$  变化均显著( $P < 0.01$ ),但 5 种

植物中除紫荆木和下龙新木姜之间的  $F_v/F_m$  差异不显著外,其他种间的差异均达到了 0.05 显著水平。

### 2.3.2 实际量子产量 $\Phi_{PSII}$ 的变化

实际量子产量  $\Phi_{PSII}$  反映植物的实际光合效率<sup>[24]</sup>,表示 PSII 反应中心受到环境胁迫时,存在部分反应中心关闭情况下的实际原初光能转化效率<sup>[22]</sup>。起苗 24h 内,5 种植物的  $\Phi_{PSII}$  总体呈降低趋势;喙果皂帽花一直下降,20h 趋于零;其他 4 个种呈上下小幅度波动,变化平缓(图 4b)。统计分析表明,起苗后 24h 内 5 种植物的  $\Phi_{PSII}$  变化显著 ( $P < 0.01$ );除紫荆木和下龙新木姜之间的  $\Phi_{PSII}$  差异不显著外,其他种间的差异达到了 0.05 显著水平,与  $F_v/F_m$  的差异性相同。

### 2.3.3 光化学淬灭系数 $qP$ 的变化

光化学淬灭系数  $qP$  反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学的份额<sup>[22]</sup>,即植物光合活性的高低<sup>[24]</sup>。喙果皂帽花的  $qP$  值一直呈下降趋势,4~6h 特别明显,下降总量为 0.70;其他 4 个种一直呈小幅度的上下波动(图 4c)。起苗 24h 内 5 种植物的  $qP$  变化显著 ( $P < 0.01$ )。  $qP$  与  $\Phi_{PSII}$  的变化规律相似。虽然 5 种植物的叶绿素含量 24h 内变化不显著,但是植物的光合活性已显著降低,特别是喙果皂帽花,20h 时它的  $qP$  值已趋于零。

### 2.3.4 非光化学淬灭 $NPQ$ 的变化

非光化学淬灭  $NPQ$  反映 PSII 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分<sup>[22]</sup>,即植物耗散过剩光能为热的能力,也就是光保护能力。喙果皂帽花的  $NPQ$  值起苗后 2h 内有一个上升,之后一直呈下降趋势,20h 趋于 0;其他 4 个种 4h 降至最低值后变化趋于平缓,14~16h 有所上升,之后又开始下降(图 4d)。起苗 24h 内 5 种植物的  $NPQ$  变化显著 ( $P < 0.01$ )。

### 2.3.5 $F_v/F_o$ 的变化

$F_v/F_o$  反映了 PSII 的潜在活性<sup>[22]</sup>。起苗 24h 内 5 种植物的  $F_v/F_o$  总体呈下降趋势,变化显著 ( $P < 0.01$ ),与  $F_v/F_m$  的变化规律相似。起苗时,除喙果皂帽花的  $F_v/F_o$  值较低外,其他 4 个种基本相同,变化趋势也基本一致(图 4e)。

### 2.3.6 $F_v/F_m$ 与失水率变化的相关性

$F_v/F_m$  反映植物潜在最大光合能力,表明植物的健康状况,它在非胁迫条件下变化极小<sup>[22]</sup>,当其下降时,表明植物受到了胁迫,而失水率是植物移栽过程中主要的胁迫因子, $F_v/F_m$  与失水率的相

关性分析(表 2)表明,除下龙新木姜的  $F_v/F_m$  与失水率相关性不显著外,其他 4 种呈极显著负相关关系。从表 2 判断,移栽胁迫对喙果皂帽花影响最大,其他依次为红鳞蒲桃>打铁树>紫荆木>下龙新木姜。

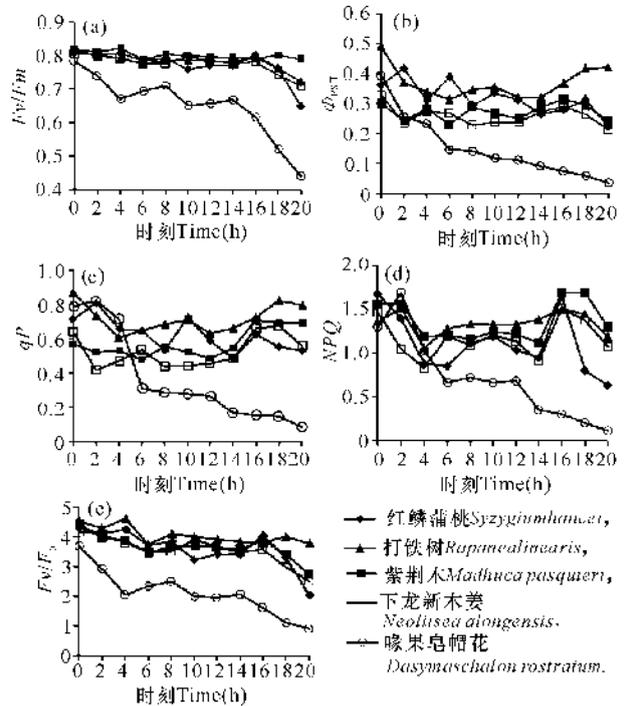


图 4 起苗后 5 种植物的  $F_v/F_m$  (a)、 $\Phi_{PSII}$  (b)、 $qP$  (c)、 $NPQ$  (d) 和  $F_v/F_o$  (e) 的变化

Fig. 4  $F_v/F_m$  (a),  $\Phi_{PSII}$  (b),  $qP$  (c),  $NPQ$  (d) and  $F_v/F_o$  (e) of 5 plants after lifting of seedlings

表 2  $F_v/F_m$  与失水率变化的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of the changes between  $F_v/F_m$  and water loss rate

植物种类 Species	相关性方程 Correlation equations	R	Sig.
喙果皂帽花 <i>Dasymaschalon rostratum</i>	$y = -0.659x + 0.851$	0.638	0.000
红鳞蒲桃 <i>Syzygium hancei</i>	$y = -0.553x + 0.850$	0.750	0.000
打铁树 <i>Rapanea linearis</i>	$y = -0.260x + 0.822$	0.618	0.000
紫荆木 <i>Madhuca pasquieri</i>	$y = -0.255x + 0.806$	0.610	0.000
下龙新木姜 <i>Neolitsea alongensis</i>	$y = -0.101x + 0.791$	0.201	0.200

## 3 讨论

植物起苗后会引引起植株体内叶绿素的降解<sup>[16]</sup>,本研究表明,起苗后 24h 内 5 种植物的叶绿素含量

有所下降,但未达到显著水平,而它们的叶绿素荧光参数变化是显著的( $P < 0.01$ ),叶绿素荧光参数是叶绿素生理活性的重要指标<sup>[22]</sup>,说明 5 种植物的叶绿素活性明显降低了。其中  $\Phi_{PSII}$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  总体呈降低趋势,并在 16h 后开始有显著下降,这与毕会涛等<sup>[15]</sup>、柏祥等<sup>[16]</sup>、张秋英等<sup>[12]</sup>、史胜青等<sup>[13]</sup>、杨晓青等<sup>[14]</sup>、路丙社等<sup>[25]</sup>、赵丽英等<sup>[26]</sup> 的研究结果一致;但红鳞蒲桃、打铁树和紫荆木的 NPQ 在 2h 和 16h 有一个小幅度的上升阶段,这与张秋英等<sup>[12]</sup>、史胜青等<sup>[13]</sup>、杨晓青等<sup>[14]</sup> 对核桃苗木和冬小麦的研究有相似的规律。

失水胁迫是移栽胁迫中最主要的因素<sup>[8~10]</sup>,同时也是抑制植物光合作用最主要的环境因子之一<sup>[7]</sup>。起苗后 24h 内 5 种植物的水分散失显著,失水率与时间表现出极显著相关,随起苗时间的延长,失水率的变化趋势为喙果皂帽花>红鳞蒲桃>紫荆木>下龙新木姜>打铁树。革质的植物叶片的角质层较厚,而纸质的较薄,发达的角质层可以减少植物水分的散失<sup>[27,28]</sup>,通常而言,革质叶片更有利于在干旱环境中蓄存水分。喙果皂帽花的叶片为纸质,打铁树的为坚纸质近革质,其它 3 种为革质,从叶片性状结构上来说,喙果皂帽花的水分散失速率最快,本研究结果与此基本一致。

5 个参数中  $F_v/F_m$  与失水率的关系最为密切,除下龙新木姜外,其他 4 种植物的  $F_v/F_m$  与失水率表现为极显著负相关关系。植物体内部生理的水分的平衡是植物成活的关键,所以失水率直接影响成活率,从失水率对  $F_v/F_m$  的影响判断,5 种植物移栽后成活的可能性为下龙新木姜>打铁树>紫荆木>红鳞蒲桃>喙果皂帽花。

综合上述,在红鳞蒲桃群落 5 种优势植物中,下龙新木姜为最适合移栽的树种,其次为打铁树和紫荆木,喙果皂帽花对移栽胁迫抗逆性较差,不宜选择;最佳移栽时间为 0~16h,因此起苗后应尽快栽植。

评判植物移栽时所受胁迫的指标比较多,故仅从失水方面来评估移栽时植物遭受的胁迫还有一定的局限性,而且影响苗木水分散失快慢的还有植株的高度、地径、叶面积等因素,所以相关的研究还有待于进一步加强和深入。

#### 参考文献:

[1] 曾聪,李蕾鲜,范航清. 广西滨海红鳞蒲桃资源现状与群落特征[J]. 广西科学,2011,18(3):283-288.

Zeng C, Li L X, Fan H Q. Resource status and community characteristics of *Syzygium hancei* along the coast of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2011, 18(3): 283-288.

[2] Guehl J M, Clement A, Kaushal P, et al. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentration in Corsican pine seedlings[J]. Tree Physiology, 1993, 12: 173-183.

[3] Mena-Petite A, Muñoz-Rueda A, Lacuesta M. Effect of cold storage treatments and transplanting stress on gas exchange, chlorophyll fluorescence and survival under water limiting conditions of *Pinus radiata* stock types[J]. Eur J Forest Res, 2005, 124: 73-82.

[4] Kaushal P, Aussenac G. Transplanting shock in corsican pine and cedar of Atlas seedlings: Internal water deficits, growth and root regeneration[J]. For Ecol Manage, 1989, 27: 29-40.

[5] South D B, Zwolinski J B. Transplant stress index: A proposed method of quantifying planting check[J]. New Forests, 1997, 13(1/3): 315-328.

[6] Girard S, Clement A, Cochard H, et al. Effects of desiccation on post-planting stress in bare-root corsican pine seedlings[J]. Tree Physiology, 1997, 17: 429-435.

[7] 李继东, 毕会涛, 武应霞, 等. 移栽期间胁迫对苗木影响的研究进展[J]. 林业科学, 2008, 44(6): 125-136.

Li J D, Bi H T, Wu Y X, et al. Recent advances in effects of different stresses in transplant on the seedling performance[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(6): 125-136.

[8] Margolis H A, Brand D G. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20: 375-390.

[9] Wilson S J, Clark R J. Changes in water relations of *Eucalyptus niteas* nursery stock during and after lifting and transplanting[J]. New Forests, 1998, 16: 199-211.

[10] Radoglou K, Raftoyannis Y. Effects of desiccation and freezing on vitality and field performance of broad-leaved tree species[J]. Annals of Forest Science, 2001, 58(1): 59-68.

[11] 王可玢, 许春辉, 赵福洪, 等. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 生物物理学报, 1997, 13(2): 273-278.

Wang K B, Xu C H, Zhao F H, et al. The effects of water stress on some *in vivo* chlorophyll a fluorescence parameters of wheat flag leaves[J]. Acta Biophysica Sinica, 1997, 13(2): 273-278.

[12] 张秋英, 李发东, 刘孟雨, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 80-84.

Zhang Q Y, Li F D, Liu M Y, et al. Effect of water stress on the photosynthesis of flag leaf of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(3): 80-84.

[13] 史胜青, 袁玉欣, 杨敏生, 等. 水分胁迫对 4 种苗木叶

- 绿素荧光的光化学淬灭和非光化学淬灭的影响[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 168-173.
- Shi S Q, Yuan Y X, Yang M S, et al. Effects of water stress on photochemical quenching and non-photochemical quenching of chlorophyll a fluorescence in four tree seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(1): 168-173.
- [14] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁, 等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 812-816.
- Yang X Q, Zhang S Q, Liang Z S, et al. Effects of water stress on chlorophyll fluorescence parameters of different drought resistance winter wheat cultivars seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(5): 812-816.
- [15] 毕会涛, 李继东, 黄付强, 等. 移植胁迫对枣苗叶片叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(34): 10992-10994, 10996.
- Bi H T, Li J D, Huang F Q, et al. Effects of transplanting stress on chlorophyll a fluorescence parameters in the leaves of *Jujuba* seedlings[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2007, 35(34): 10992-10994, 10996.
- [16] 柏祥, 陈开宁, 黄蔚, 等. 移栽胁迫对 3 种湿地植物的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 79-85.
- Bai X, Chen K N, Huang W, et al. Effects of transplanting stress on three types of hydrophyte [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 79-85.
- [17] Michelh, Florence Tardy. Temperature-dependent adjustment of thermal stability of photosystem II in *in vivo*: Possible involvement of xanthophyll-cycle pigments[J]. *Plants*, 1996, 198: 324-333.
- [18] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a non-intrusive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis [M]//Schuhe E D, Caldwell M M (eds). *Ecophysiology of photosynthesis*. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 49-70.
- [19] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1): 51-55.
- Chen J M, Yu X P, Cheng J A. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2006, 18(1): 51-55.
- [20] 赵会杰, 邹琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(3): 248-251.
- Zhao H J, Zou Q, Yu Z W. Chlorophyll fluorescence analysis technique and its application to photosynthesis of plant[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, 34(3): 248-251.
- [21] 郭春芳, 孙云. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理研究中的应用[J]. 福建教育学院学报, 2006, 7: 120-123.
- Guo C F, Sun Y. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses[J]. *Journal of Fujian Education Institute*, 2006, 7: 120-123.
- [22] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
- Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444-448.
- [23] 张燕琴, 李方, 郭延平, 等. 叶片叶绿素荧光参数用作采后切花菊衰老指标[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(6): 683-688.
- Zhang Y Q, Li F, Guo Y P, et al. Assessment of senescence of cut flowers in *Chrysanthemum morifolium* L. as judged from chlorophyll fluorescence characteristics of leaves on the same shoot[J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci*, 2005, 31(6): 683-688.
- [24] Müller P, Li X P, Niyogi K K. Non-photochemical quenching: A response to excess light energy [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125: 1558-1566.
- [25] 路丙社, 白志英, 孙浩元, 等. 土壤含水量对阿月浑子叶片净光合速率及叶绿素荧光参数的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(6): 727-731.
- Lu B S, Bai Z Y, Sun H Y, et al. Effects of soil water content level on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters in *Pistachio* leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(6): 727-731.
- [26] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学, 2005, 16(7): 1261-1264.
- Zhao L Y, Deng X P, Shan L. Effects of osmotic stress on chlorophyll fluorescence parameters of wheat seedling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1261-1264.
- [27] 薛立, 曹鹤. 逆境下植物叶性状变化的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 2004-2009.
- Xue L, Cao H. Changes of leaf traits of plants under stress resistance[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 2004-2009.
- [28] 李春阳, Tuomela K. 桉树的抗旱性研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 11(3): 22-27.
- Li C Y, Tuomela K. Advances in research on drought resistance of *Eucalyptus* [J]. *World Forestry Research*, 1998, 11(3): 22-27.

(责任编辑: 竺利波)