

陈雅琦, 莫正海, 姜文睿, 等. 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种的光合特性[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 968-973.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.020

## 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种的光合特性

陈雅琦<sup>1,2,3</sup>, 莫正海<sup>1,2,3</sup>, 姜文睿<sup>1,2,3</sup>, 翟敏<sup>1,2,3</sup>, 郭忠仁<sup>1,2,3</sup>, 宣继萍<sup>1,2,3</sup>

(1. 江苏省中国科学院植物研究所, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014; 3. 江苏省农业种质资源保护与利用平台, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为探究煤污病对薄壳山核桃光合特性的影响, 以 Stuart、Wichita、Pawnee 3 种受煤污病危害程度不同的品种为对象, 测定染病叶片及健康叶片的光合参数、光响应曲线以及叶绿素荧光参数。结果表明: 煤污病可显著影响薄壳山核桃叶片的光合气体交换, 3 个品种染病叶片光合气体交换参数[净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )及气孔导度( $G_s$ )]较健康叶片均出现显著下降( $P < 0.05$ ), 其程度从大到小依次为 Stuart > Wichita > Pawnee。就  $P_n$  而言, Stuart 染病叶片下降 61.07%, Wichita 染病叶片下降 51.26%, Pawnee 染病叶片下降 40.62%。光响应曲线显示, 3 个品种染病叶片的最大净光合速率( $P_{n\max}$ )均显著低于健康叶片, 暗呼吸速率( $R_d$ )与健康叶片无显著差异, 表观量子效率(AQY)均显著低于健康叶片, 光补偿点(LCP)均显著高于健康叶片。3 个品种染病叶片的叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、ETR、 $qP$ )相比于健康叶片, 整体而言均出现了下降, 但未达到显著水平。说明煤污病可造成薄壳山核桃叶片光合速率下降, 净光合速率下降程度为 40.62%~61.07%。染病叶片利用弱光的能力下降, 合成的光合产物减少, 而实际光合效率并未显著降低, 光合机构仍较为稳定。

**关键词:** 薄壳山核桃; 煤污病; 光响应曲线; 叶绿素荧光参数

**中图分类号:** S436.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-0968-06

## Effects of sooty mold on photosynthetic characteristics of three pecan cultivars

CHEN Ya-qi<sup>1,2,3</sup>, MO Zheng-hai<sup>1,2,3</sup>, LOU Wen-rui<sup>1,2,3</sup>, ZHAI Min<sup>1,2,3</sup>, GUO Zhong-ren<sup>1,2,3</sup>, XUAN Ji-ping<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Nanjing 210014, China; 3. The Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** To explore the effects of sooty mold on photosynthetic characteristics of pecan, photosynthetic parameters, light response curves and chlorophyll fluorescence parameters of infected and healthy leaves of Stuart, Wichita and Pawnee were measured. The results showed that sooty mold could significantly affect the photosynthetic gas exchange of pecan leaves, and the gas exchange parameters [net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ), stomatal conductance ( $G_s$ )] of infected leaves of three cultivars were significantly decreased compared with those of healthy leaves ( $P < 0.05$ ), with the order of Stuart > Wichita > Pawnee. The  $P_n$  of infected leaves of Stuart, Wichita, Pawnee decreased by 61.07%, 51.26% and 40.62%, respectively.

The results of light response curves showed that maximum net photosynthetic rate ( $P_{n\max}$ ) of infected leaves was significantly lower than that of healthy leaves, dark respiration rate ( $R_d$ ) of infected leaf had no significant difference with that of healthy leaves, apparent quantum efficiency (AQY) of infected leaves was significantly

收稿日期: 2021-01-28

基金项目: 江苏省林业局林业科技创新项目[LYKJ(2020)04]

作者简介: 陈雅琦(1994-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事薄壳山核桃种质资源利用研究。(E-mail) yqchen94@163.com

通讯作者: 宣继萍, (E-mail) xuanjiping@cnbg.net

lower than that of healthy leaves, and light compensation point ( $LCP$ ) of infected leaves was significantly higher than that of healthy leaves. Compared with those of healthy leaves, the chlorophyll fluorescence parameters ( $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $ETR$ ,  $qP$ ) of infected leaves of the three cultivars decreased, but the difference was not significant. In conclusion, sooty mold can reduce the photosynthetic rate of pecan leaves, and the  $P_n$  decreases by 40.62%–61.07%. The ability of weak light utilization and the photosynthetic production of infected leaves are decreased. The actual photosynthetic efficiency of infected leaves is not significantly reduced, and the photosynthetic mechanism is still relatively stable.

**Key words:** pecan; sooty mold; light response curve; chlorophyll fluorescence parameters

薄壳山核桃 (*Carya illinoensis*) 又名美国山核桃、长山核桃、碧根果, 原产于北美洲的美国和墨西哥, 属于胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属植物<sup>[1]</sup>。它是一种高经济价值的树种, 其种仁油脂含量可高达 70%, 油脂中有 90% 的成分为不饱和脂肪酸<sup>[2]</sup>。自 2010 年以来, 江苏、安徽等省将薄壳山核桃作为重要的木本油料作物而进行推广。薄壳山核桃是一种喜光的强阳性树种, 由于光合作用产物是植物生长和果实形成的物质基础<sup>[3]</sup>, 光照不足时会引起该树种长势的衰减以及产量的下降。

煤污病是一种真菌病害, 其病原菌在寄主植物表面会产生黑色菌落、黑斑, 常为害植物的叶片、茎秆和果实<sup>[4]</sup>。危害叶片时, 症状表现为叶片的上表面有黑色煤烟状霉层<sup>[5]</sup>。该症状会削弱到达叶片的入射光强度, 影响植物的光合作用。据报道, 桃花心木 (*Swietenia macrophylla*) 煤污病的霉层在叶片中的遮光率可达到 40%<sup>[6]</sup>; 受煤污病危害的油橄榄 (*Olea europaea*) 叶片蒸腾速率、最大荧光、可变荧光均显著低于健康叶片<sup>[7]</sup>。

近年来, 在薄壳山核桃果园中常发现有煤污病发生, 受煤污病危害的叶片其光合作用可能受到一定程度上的影响, 但具体影响程度目前尚不清楚。本研究以薄壳山核桃 Stuart、Wichita、Pawnee 3 种受煤污病危害程度不同的品种为对象, 测定叶片的光合参数、光响应曲线以及叶绿素荧光参数, 以期了解煤污病的危害程度以及为该病害的防治提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试的薄壳山核桃品种分别为: Stuart (受煤污病危害程度严重)、Wichita (受煤污病危害程度中等) 和 Pawnee (受煤污病危害程度较轻), 2013 年春定植于南京市六合区雄州街道龙虎营村的试验基地 (118°53′17″E, 32°18′24″N), 种植密度为 4 m×8 m,

采用常规水、肥管理。

### 1.2 光合指标测定

**1.2.1 光合生理参数测定** 利用 LI-6800 光合-荧光测量系统 (美国 LI-COR 公司产品), 在 2020 年 9 月 26 日对 3 个品种健康及染病叶片进行光合生理参数的测定, 叶室面积 2 cm<sup>2</sup>, 气体流速为 500 μmol/s, 湿度控制为 50%, CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μmol/mol, 测定温度 28 ℃, 测定光照度 1 500 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。测定时间为上午 8:30–11:30, 测定环境为野外自然环境。选择树冠中部无遮挡、受光照条件好的叶片进行测定, 每个品种健康及染病叶片各重复 5 次。测定参数包括: 净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ ) 及气孔导度 ( $G_s$ )。参考 Berry 等<sup>[8]</sup> 的公式计算气孔限制值 ( $L_s$ ), 计算公式为  $L_s = 1 - C_i/C_a$  ( $C_a$  为大气 CO<sub>2</sub> 浓度)。

**1.2.2 光响应曲线测定** 于 2020 年 9 月 27 日和 28 日上午 8:30–11:30 对 3 个品种健康及染病叶片进行光响应曲线参数的测定, 光照度梯度依次为 2 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 800 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 500 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 300 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、900 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、700 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、500 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、300 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、150 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、70 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、30 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、0 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 每次间隔 2 min, 仪器自动记录相应的净光合速率 ( $P_n$ ) 值。根据 Prado 等<sup>[9]</sup> 提出的指数方程模型进行拟合, 拟合软件为光合计算 4.1.1, 得出相应的最大净光合速率 ( $P_{nmax}$ )、表观量子效率 ( $AQY$ )、光补偿点 ( $LCP$ ) 和暗呼吸速率 ( $R_d$ )。

**1.2.3 荧光参数测定** 参考方法 1.2.1 的程序及操作进行荧光参数的测定。光下荧光参数与叶片光合生理参数同时进行测定, 暗适应下的荧光参数于当天 18:00–19:00 (充分暗适应后) 进行测定。测定的基本参数有: 最小初始荧光 ( $F_0$ )、暗适应下最大荧光

( $F_m$ )、光下最小荧光( $F_o'$ )、光下最大荧光( $F_m'$ )和光下稳态荧光( $F_s$ )。参考 Beer 等<sup>[10]</sup>的方法计算 PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II 实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、电子传递速率( $ETR$ )和光化学淬灭系数( $qP$ )。相关计算公式为: $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ ;  $\Phi_{PSII} = \Delta F/F_m' = (F_m' - F_s)/F_m'$ ;  $ETR = \Phi_{PSII} \times PAR \times AF \times 0.5$  ( $AF$  为叶片吸光系数,取值为 0.84;  $PAR$  光合有效辐射);  $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$ 。

### 1.3 数据分析

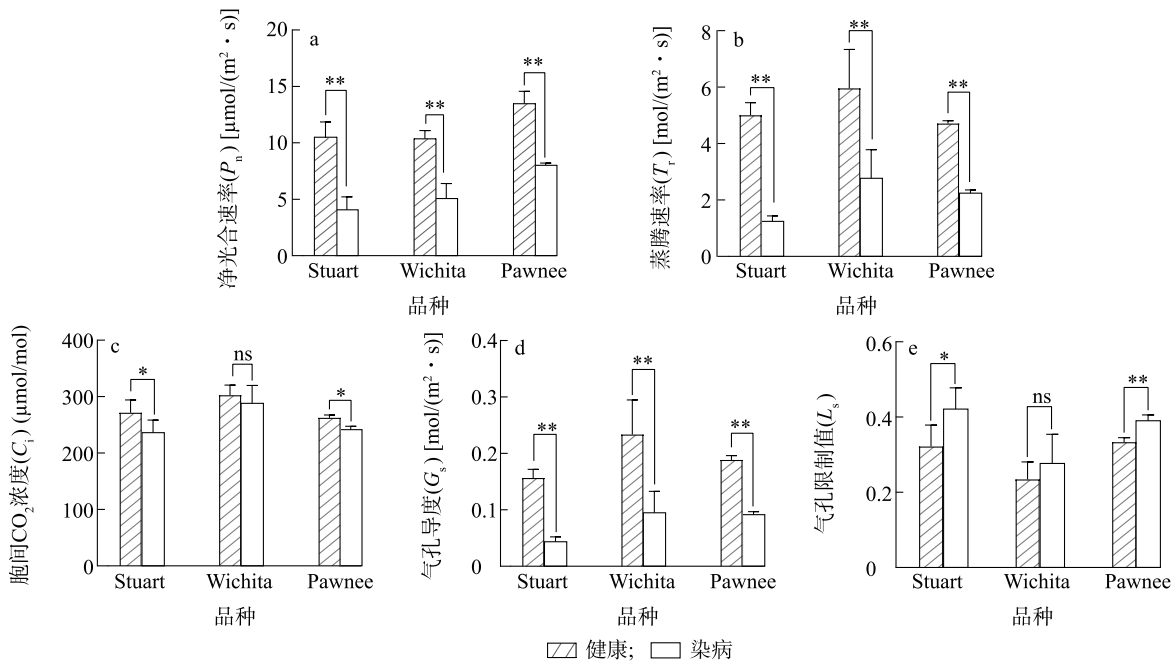
采用 Excel 2016 和 SPSS 25 对数据进行处理分析,显著性检验采用独立样本  $t$  检验法。柱状图绘制软件为 GraphPad Prism 8。

## 2 结果与分析

### 2.1 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种光合生理特征

植物叶片通过气孔的开合调节体内的气体交换

及水分活动, $P_n$ 、 $T_r$ 、 $C_i$ 、 $G_s$ 等生理参数可直观反映植物光合作用与蒸腾作用的变化。在煤污病胁迫下,3 个品种染病叶片光合生理参数较健康叶片均出现不同程度的下降,就  $P_n$  而言,Stuart、Wichita 及 Pawnee 染病叶片的  $P_n$  下降幅度极为显著,分别下降了 61.07%、51.26%及 40.62%(图 1a)。3 个品种染病叶片与健康叶片相比, $T_r$ 均出现大幅下降,下降幅度均超过 50%,Stuart  $T_r$ 下降 75.17%,Wichita  $T_r$ 下降 53.53%,Pawnee  $T_r$ 下降 52.37%(图 1b)。3 个品种中,染病叶片与健康叶片相比, $C_i$ 下降幅度均较小,但在 Stuart 与 Pawnee 品种中该参数差异均达到显著水平(图 1c)。Stuart 染病叶片与健康叶片相比, $G_s$ 下降 72.20%,Wichita 及 Pawnee 分别下降 59.32%和 51.42%(图 1d)。与健康叶片相比,染病叶片的  $L_s$ 均出现了上升,Stuart 染病叶片的  $L_s$ 增加了 30.97%,Wichita 及 Pawnee 的染病叶片的  $L_s$ 分别增加了 18.01%与 17.13%(图 1e)。



\*、\*\*、ns 分别表示差异显著 ( $P < 0.05$ )、差异极显著 ( $P < 0.01$ )、差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

图 1 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种光合生理特征

Fig.1 Photosynthetic characteristics of three pecan cultivars under sooty mold stress

### 2.2 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种光响应曲线

光响应曲线可以反映不同条件或处理下植物光合作用对光的响应。3 个薄壳山核桃品种在煤污病胁迫下的光响应曲线见图 2。由图 2 可知,3 个薄壳

山核桃品种染病和健康叶片的光响应曲线变化规律相似, $P_n$ 都随光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)的增加而增加,并最终达到平稳状态,且与健康叶片相比,染病叶片  $P_n$ 均处于较低水平。

表 1 为 3 个品种健康及染病叶片的光响应曲线特征参数。 $P_{n_{max}}$  可以反映单叶对强光的适应能力<sup>[11]</sup>。3 个品种染病叶片的  $P_{n_{max}}$  均显著低于健康叶片。 $AQY$  可反应植物在弱光下的光合能力<sup>[12]</sup>。3 个品种染病叶片的  $AQY$  均显著低于健康叶片。 $LCP$  是指植物光合作用形成有机物与呼吸作用消耗有机物达到平衡时的光照度<sup>[13]</sup>。3 个品种染病叶片的

$LCP$  均显著或极显著高于健康叶片。 $R_d$  反映了植物对有机物的消耗。3 个品种染病叶片  $R_d$  在  $1.197 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  至  $1.529 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间,健康叶片  $R_d$  值在  $1.139 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  至  $1.451 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间,染病叶片及健康叶片  $R_d$  无显著差异。

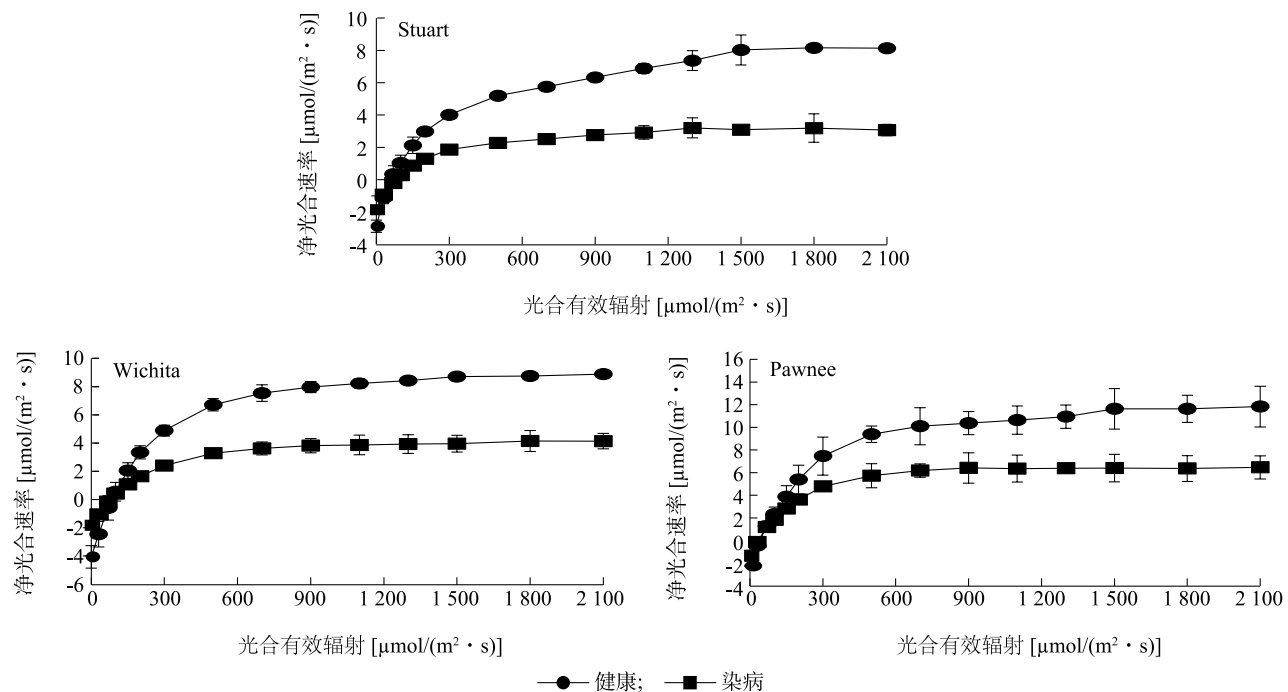


图 2 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种光响应曲线  
Fig.2 Light response curves of three pecan cultivars under sooty mold stress

表 1 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种光响应曲线特征参数

Table 1 Characteristic parameters of light response curves of three pecan cultivars under sooty mold stress

| 品种      | 叶片类型 | 净光合速率( $P_n$ )<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] | 表观量子效率( $AQY$ )<br>( $\text{mol}/\text{mol}$ ) | 光补偿点( $LCP$ )<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] | 暗呼吸速率( $R_d$ )<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |
|---------|------|---|--|--|---|
| Stuart  | 健康   | $8.261 \pm 0.892$   | $0.021 \pm 0.003$                              | $62.377 \pm 2.698$   | $1.209 \pm 0.120$   |
|         | 染病   | $3.032 \pm 0.019^{**}$  | $0.014 \pm 0.002^*$                            | $149.561 \pm 11.985^{**}$  | $1.529 \pm 0.109$   |
| Wichita | 健康   | $8.521 \pm 0.136$   | $0.036 \pm 0.002$                              | $44.724 \pm 6.062$   | $1.451 \pm 0.003$   |
|         | 染病   | $3.987 \pm 0.636^{**}$  | $0.018 \pm 0.001^{**}$                         | $103.869 \pm 20.932^{**}$  | $1.448 \pm 0.158$   |
| Pawnee  | 健康   | $11.890 \pm 1.118$  | $0.040 \pm 0.010$                              | $23.629 \pm 4.168$   | $1.139 \pm 0.030$   |
|         | 染病   | $6.402 \pm 0.821^*$   | $0.032 \pm 0.007^*$                            | $40.294 \pm 6.543^*$   | $1.197 \pm 0.022$   |

\*、\*\* 分别表示同一品种染病叶片与健康叶片相比差异显著 ( $P < 0.05$ )、差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

2.3 煤污病胁迫下 3 个薄壳山核桃品种荧光参数比较

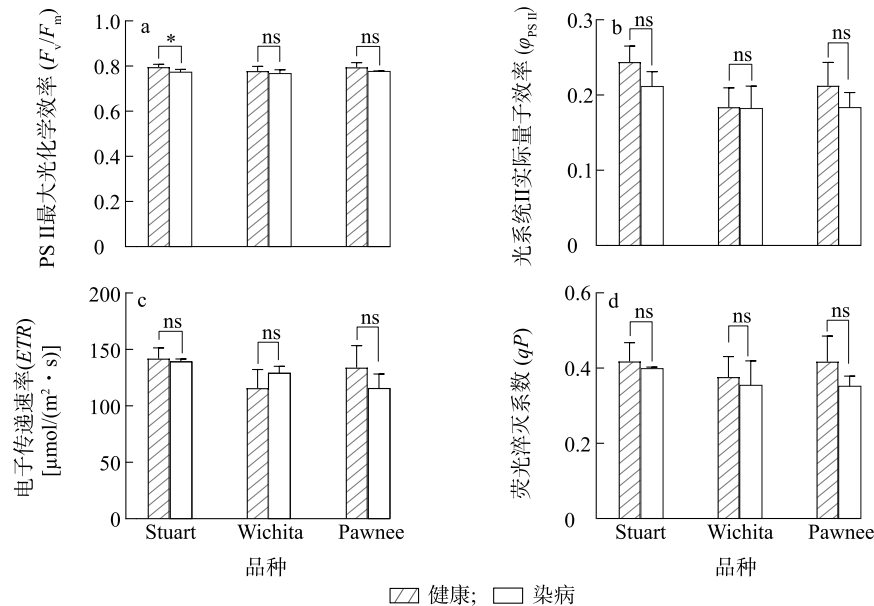
$F_v/F_m$  比值可反映叶片的光能转换效率。正常情况下,  $F_v/F_m$  比值在 0.75 至 0.85 之间<sup>[14]</sup>。如图 3a

所示, Stuart 染病叶片与健康叶片  $F_v/F_m$  分别为 0.773 与 0.796, Wichita 分别为 0.767 与 0.778, Pawnee 分别为 0.776 与 0.795。3 个品种染病及健康叶片  $F_v/F_m$  比值均处于正常范围。Stuart 染病叶



片与健康叶片  $F_v/F_m$  差异达到显著水平, Wichita、Pawnee 染病叶片与健康叶片  $F_v/F_m$  差异不大。 $\Phi_{PSII}$ 、 $ETR$  及  $qP$  的变化如图 3b、图 3c、图 3d 所示。

总体而言, 3 个品种染病叶片的  $\Phi_{PSII}$ 、 $ETR$  及  $qP$  均较健康叶片的小, 但差异不显著, 说明薄壳山核桃染病后的光合性能仍较为稳定。



\*、ns 分别表示差异显著 ( $P < 0.05$ )、差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

图3 煤污病胁迫下3个薄壳山核桃品种叶片荧光参数

Fig.3 Chlorophyll fluorescence parameters of three pecan cultivars under sooty mold stress

### 3 讨论

光合气体交换各参数的变化与气孔的活动状态有密切的联系<sup>[15]</sup>。造成  $P_n$  下降的原因可分为气孔因素与非气孔因素: 当  $P_n$  下降,  $C_i$  和  $G_s$  也随着下降时, 光合作用的降低主要是由于气孔因素; 当  $P_n$  和  $G_s$  下降而  $C_i$  上升时, 限制光合作用的主导因子为非气孔因素<sup>[16]</sup>。本研究中, 3 个品种的染病叶片与健康叶片相比, 其  $P_n$ 、 $G_s$  及  $C_i$  均下降, 说明受煤污病危害的叶片其光合速率降低, 限制因子为气孔因素。 $L_s$  反映气孔因素的限制情况。相比于健康叶片, 3 个品种的染病叶片  $G_s$  下降,  $L_s$  升高, 进一步说明煤污病胁迫下气孔因素是造成  $P_n$  下降的主要因素<sup>[17]</sup>。蒸腾作用与气孔的开闭有密切联系<sup>[18]</sup>。本研究中, 3 个品种染病叶片的  $T_r$  均出现显著下降, 推测其气孔开度受煤污病胁迫而降低。综合分析认为煤污病引起光合速率的下降, 可能是由于煤污病的霉层造成了叶片气孔导度和开度的降低, 导致  $\text{CO}_2$  在细胞内的扩散阻力增加。3 个品种染病叶片气体交换参数 ( $P_n$ 、 $T_r$ 、 $C_i$ 、 $G_s$ ) 下降的程度从大到小依次为 Stuart > Wichita > Pawnee, 这与 3 个品种受煤污病危害的严重程度一致。受煤污病危

害最为严重的 Stuart, 其染病叶片  $P_n$  较正常叶片下降 61.07%, 危害程度中等的 Wichita 染病叶片  $P_n$  下降 51.26%, 危害程度最轻的 Pawnee 染病叶片  $P_n$  下降 40.62%。因此, 薄壳山核桃受到煤污病危害时, 依据危害程度不同, 叶片光合速率可下降 40.62%~61.07%。

光响应曲线既可以反映植物对光的利用效率, 也可以体现植物对不同光照度的适应能力<sup>[19]</sup>。3 个品种染病叶片的  $P_{n_{max}}$  均显著低于健康叶片, 推测煤污病导致叶片合成的光合产物降低。染病叶片  $R_d$  与健康叶片无显著差异, 说明呼吸作用消耗的光合产物并未发生较大变化。综合  $P_{n_{max}}$  和  $R_d$  推测染病叶片光合产物的合成量显著低于健康叶片。 $AQY$  是根据照射到叶片上的光量子数计算的量子效率, 反映了植物叶片在弱光条件下的光合能力<sup>[20]</sup>。3 个品种染病叶片的  $AQY$  均显著低于健康叶片, 说明染病叶片利用弱光的能力下降。此外, 3 个品种染病叶片  $LCP$  均显著高于健康叶片, 进一步说明了染病叶片利用弱光的能力下降。

叶绿素荧光是光合作用的有效探针, 相比于反映表观特征的气体交换参数, 其更能反映光合机构的内

在特征<sup>[21]</sup>。 $qP$ 反映的是PS II中原初电子受体(QA)的氧化还原状态,其值越低表示PS II的电子传递活性越低<sup>[22]</sup>; $F_v/F_m$ 反映PS II反应中心内在光能转换效率,其值降低时表明植物受到了逆境胁迫<sup>[23]</sup>; $\Phi_{PS II}$ 和 $ETR$ 是反应中心部分关闭情况下的实际光能转换效率和电子传递速率。本研究,3个品种染病叶片的 $qP$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PS II}$ 以及 $ETR$ 相比于健康叶片,整体而言均出现了下降,但只有Stuart品种的 $F_v/F_m$ 达到显著差异( $P<0.05$ )。造成Stuart品种 $F_v/F_m$ 显著下降的原因可能是由于该品种受煤污病危害程度最为严重,其PS II受到一定抑制,尽管如此,染病叶片经光适应后的 $\Phi_{PS II}$ 并未发生显著下降。综合3个品种叶绿素荧光参数,推测薄壳山核桃煤污病并未引起光合机构的损伤,光合机构仍较为稳定,这可能是由于煤污病致病菌只是附生在叶片表面未侵入寄主内部机构所造成的<sup>[24]</sup>。

综上所述,煤污病可造成薄壳山核桃染病叶片光合速率的下降,主要是由气孔限制引起的,下降程度依煤污病严重程度不同在40.62%至61.07%之间。煤污病导致薄壳山核桃染病叶片利用弱光能力下降,光合产物减少,但其实际光合效率并未显著降低,光合机构仍较为稳定。

## 参考文献:

- [1] 常君,姚小华,杨水平,等.水分胁迫对美国山核桃苗木生长的影响[J].林业科学研究,2009,22(1):134-138.
- [2] 贾晓东,王婵,莫正海,等.美国山核桃与浙江山核桃果实品质的比较研究[J].天津农业科学,2013,19(3):28-31.
- [3] 刘壮壮,骆敏,彭方仁,等.不同品种薄壳山核桃光合及快速叶绿素荧光诱导动力学特性[J].东北林业大学学报,2017,45(4):36-42.
- [4] CHOMNUNTI P, HONGSANAN S, BEGOÑA A H, et al. The sooty moulds[J]. Fungal Diversity, 2014, 66(1):1-36.
- [5] 孙福金,陈永新.油桃煤污病发生规律及防治[J].北方果树,2012(1):49.
- [6] LEMOS-FILHO J P, PAIVA É A S. The effects of sooty mold on photosynthesis and mesophyll structure of mahogany (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae)[J]. Bragantia, 2006, 65(1):11-17.
- [7] SANTOS S A P, SANTOS C, SILVA S, et al. The effect of sooty mold on fluorescence and gas exchange properties of olive tree[J]. Turkish Journal of Biology, 2013, 37(5):620-628.
- [8] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis[M]. Berlin: Springer, 1982:263-343.
- [9] PRADO C H, MORAES J A P V D. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of cerrado vegetation under field conditions[J]. Photosynthetica, 1997, 33(1):103-112.
- [10] BEER S, BJÖRK M, BEARDALL J. Basic concepts and key parameters of chlorophyll fluorescence[M]//GAO K, HUTCHINS D A, BEARDALL J. Research methods of environmental physiology in aquatic sciences. Singapore: Springer, 2020:221-229.
- [11] 谭晓红,彭祚登,贾忠奎,等.不同刺槐品种光合光响应曲线的温度效应研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):64-68.
- [12] 许晨璐,孙晓梅,张守攻.日本落叶松与长白落叶松及其杂种光合特性比较[J].北京林业大学学报,2012,34(4):62-66.
- [13] 刘思祝.不同光照条件下红鳞蒲桃幼苗生长特性研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [14] 白文玉,铁烈华,冯茂松,等.不同种源桉木嫁接幼苗光合和叶绿素荧光特征[J].四川农业大学学报,2020,38(6):670-676.
- [15] 孙龙,彭祚登,王冲,等.干旱胁迫对两种沙地灌木能源树种光合特性的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2):99-104.
- [16] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33:317-345.
- [17] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997(4):241-244.
- [18] 潘俊倩,谷小红,郭宝林.2种淫羊藿的光合日变化比较[J].农学学报,2017,7(4):51-57.
- [19] 汤文华,窦全琴,潘平平,等.不同薄壳山核桃品种光合特性研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(3):81-88.
- [20] 何海洋,彭方仁,张瑞,等.不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较[J].南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(4):19-25.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 徐德聪,吕芳德,潘晓杰.叶绿素荧光分析技术在果树研究中的应用[J].经济林研究,2003,21(3):88-91.
- [24] 郎剑锋,杜开书,赵荣艳,等.烟煤病研究进展[J].安徽农业科学,2010,38(7):3525-3527,3541.

(责任编辑:张震林)