

显脉金花茶的光合生理特性研究

韦 霄^{1,2} 王满莲¹ 蒋运生¹ 唐 辉¹ 陈宗游¹ 曹洪麟^{2*}

(1. 广西壮族自治区中国科学院 广西植物研究所 桂林 541006)

(2. 中国科学院华南植物园 广州 510650)

摘 要 采用 LI-6400 便携式光合测定系统(Li-Cor Inc., USA)对显脉金花茶光合特性进行研究。结果表明(1)在夏季,显脉金花茶叶片的 P_n 日变化呈单峰曲线,最高峰出现在中午 11:00。其最大净光合速率(P_{max})为 $3.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光饱和点(LSP)为 $459.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光补偿点(LCP)为 $6.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。显脉金花茶的光饱和点和光补偿点都比较低,表明其是一种阴生植物。(2)在控制光照强度和温度的条件下, CO_2 浓度小于 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, P_n 几乎呈直线上升,升高 CO_2 浓度可使显脉金花茶的净光合速率增大,提高了叶片对光能的利用率。其叶片 CO_2 饱和点(CSP)大约在 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右, CO_2 的补偿点(Γ^*)为 $70.1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,最大羧化速率(V_{cmax})为 $17.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大电子传递速率(J_{max})为 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词 显脉金花茶 净光合速率 光饱和点 光补偿点

The Photosynthetic Characteristics of *Camellia euphlebia*

WEI Xia¹ WANG Man-Liang¹ JIANG Yun-Sheng¹ TANG Hui¹ CHEN Zhong-You¹ CAO Hong-Lin^{2*}

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006)

(2. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650)

Abstract The photosynthetic characteristics of leaves in *Camellia euphlebia* were studied with LI-6400 (Li-Cor Inc., USA) portable photosynthesis system. The results showed that the diurnal changes of photosynthetic rate (P_n) in *C. euphlebia* exhibited a mono-peak style, and the maximum value of P_n appeared at 11:00 am in summer. The maximum photosynthetic rate (P_{max}), light saturation point (LSP), light compensation point (LCP) for the leaves of *C. euphlebia* were $3.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $459.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $6.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The light saturation and compensation point were very low, which indicated that *C. euphlebia* was a shade plant. Under the condition of optimum light intensity and temperature, the net photosynthetic rate of *Camellia euphlebia* increased linearly when the concentration of CO_2 enhanced from $50 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ to $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. Elevation of CO_2 concentration increased the P_n and the efficiency of light utilizing in *Camellia euphlebia*. The CO_2 saturation (CSP), compensation point (Γ^*), the maximum carboxylation rate (V_{cmax}) and maximum rate of electron transport (J_{max}) were about $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, $70.1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, $17.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

Key words *Camellia euphlebia* net photosynthetic rate light saturation point light compensation point

基金项目 国家自然科学基金(编号 30560015)、广西自然科学基金(桂科基 0575115)和广西区攻关(桂科技攻 0718002-3-7)项目资助
第一作者简介:韦霄(1967—),男,博士,研究员,主要从事经济植物的引种驯化和濒危植物的保护生物学研究。

* 通讯作者:曹洪麟(1966—),男,研究员,主要从事植被生态、保护生态和恢复生态学研究。

收稿日期 2006-12-03

金花茶组(*Camellia sect. chrysantha* Chang)植物是世界珍贵、稀有的观赏植物和种质资源,目前已有4种列为我国一级和二级保护植物^[1]。列为国家一级保护植物的有金花茶(*Camellia chrysantha*)1种;列为国家二级保护植物的有显脉金花茶(*C. euphlebia*)、平果金花茶(*C. pingguoensis*)、东兴金花茶(*C. tunghinensis*)、毛瓣金花茶(*C. pubipetalata*)等4种^[2]。显脉金花茶为常绿小乔木或灌木,天然分布在广西防城港及越南凉山,主要集中分布于防城港的那良镇(107°50'E)以东、那梭镇(108°07'E)以西的范围约710 km²^[3],分布范围十分狭窄。一些学者已经对显脉金花茶的生态^[3]、群落类型^[4]和遗传多样性^[5]等进行了研究,但关于其生理生态方面至今未见报道。本文探讨了显脉金花茶叶片净光合速率对光照强度和CO₂浓度的响应,旨在了解显脉金花茶的光合生理特性,为其人工栽培和资源保护提供理论依据。

1 试验地自然概况

试验地设在广西桂林广西植物研究所金花茶园,位于北纬25°11'N,东经110°12'E,属中亚热带气候。年均气温19.2℃,最热月均温28.4℃,最冷月均温7.7℃,绝对高温38℃,绝对低温-6℃,冬季有霜冻,月平均气温高于20℃有6~7个月,年积温6950℃,年降雨量1655.5 mm,年相对湿度78.0%。土壤为砂质酸性红壤,pH值5.5~6.5。土壤中氮、钾、镁含量高,有机质含量较高(4.20%),土壤肥力中等。海拔高度178 m。上层树种有枫香、樟树、榔榆、泡桐、马尾松等高大乔木,郁闭度在65%左右。

2 材料与方法

2.1 材料

供试材料为引种栽培20年生的显脉金花茶成熟植株,种源来自广西防城港防城区。20年生实生苗平均高192.00 cm ± 5.6 cm,基径3.05 cm ± 0.18 cm,平均冠幅(东西×南北)204.5 cm × 217.8 cm。

2.2 研究方法

采用Li-6400便携式光合作用系统(LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA)对显脉金花茶叶片的光合日进程、光响应曲线和CO₂响应曲线测定。选树冠中部外层向阳一年生枝的中位叶进行光合测定,选择生长正常的5株树,每株测定一片叶,空间取向和角度尽量一致,所有叶片都为西向且基本与地

面水平。

(1)光合作用日进程测定:选择典型晴天(2005年6月24日),采用自然光和空气CO₂浓度进行测定。从当地时间7:00~18:00间每隔小时测1次,每次5个重复。测定项目包括植物的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间CO₂浓度(C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和水蒸汽压差(VPD)等,环境参数包括光合有效辐射(PPFD, $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气温(T_a , °C)、空气二氧化碳浓度(C_a , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、叶温(T_l , °C)和空气湿度(R_H , %)等微气象参数。

(2)光响应曲线测定:选择晴朗的天气进行光响应曲线测定,测定时间为9:00~12:00进行。使用开放气路,设定空气流速为0.5 L · min⁻¹,叶片温度27℃,CO₂浓度370 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。随机选择生长良好的健康成熟叶片(重复5次),根据 P_n 日变化曲线,确定其大概的饱和光强,并将待测叶片在接近饱和光强下诱导20 min(仪器自带的红蓝光源)以充分活化光合系统,然后在0~1800 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强范围内设定13个光强梯度(从高到低逐渐下降到0)进行光合作用光响应动态测定。

(3)CO₂响应曲线测定:随机选择生长良好的健康成熟叶片进行5次重复测定,设定叶温为25℃,光强为600 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,参比室CO₂浓度从400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 降到0 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,然后再从0 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 升至1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,共设置12个浓度水平。

2.3 数据分析

(1)光合参数计算:拟合 $P_n \sim PFD$ ^[6]曲线依据方程

$$P_n = P_{\max} (1 - C_0 e^{-\Phi PFD/P_{\max}}) \quad (1)$$

其中 P_{\max} 为最大净光合速率, Φ 为弱光下光化学量子效率, C_0 为度量弱光下净光合速率趋于0的指标。通过适合性检验,拟合效果良好,然后用下列公式计算光补偿点(LCP):

$$LCP = P_{\max} \ln(C_0) / \Phi \quad (2)$$

假定 P_n 达到 P_{\max} 的99%的PPFD为光饱和点(LSP),则:

$$LSP = P_{\max} \ln(100 C_0) / \Phi \quad (3)$$

表观量子利用效率AQY为 $P_n \sim PFD$ 曲线初始部分(0~150 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)直线回归的

斜率。

(2) 根据实测参数的平均值作 CO_2 响应曲线, 估算出 CO_2 饱和点 (CSP)。 P_n 在 $P_n \sim C_i$ 曲线的初始部分(低胞间 CO_2 浓度)受低 CO_2 浓度的限制, 在曲线的饱和部分受最大电子传递速率的限制。在低 C_i 下 ($0 < C_i < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 由下面方程拟合 $P_n \sim C_i$ 曲线, 求得 V_{cmax} 、 Γ^* 和 R_d [7]:

$$P_n = \{V_{\text{cmax}}(C_i - \Gamma^*) / [C_i + K_c(1 + O_i / K_o)]\} - R_d \quad (4)$$

其中 C_i 为胞间 CO_2 浓度, Γ^* 为 CO_2 补偿点, R_d 为暗呼吸速率, K_c 和 K_o 分别为 Michaelis-Menten 羧化、氧化常数, 叶温 25°C 时分别为 406 和 $277 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ [8], O_i 为胞间 O_2 浓度, 叶温 25°C 时为 $205 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ [9]。 J_{max} 由下面方程求得 [10]:

$$J_{\text{max}} = 4(P'_{\text{max}} + R_d)(C'_i + 2\Gamma^*) / (C'_i - \Gamma^*) \quad (5)$$

其中 P'_{max} 、 C'_i 为光强 $600 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (饱和光强), 参比室 CO_2 浓度 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (饱和 CO_2 浓度) 时的实测值。

(3) 测定获得的参数利用 Excel 进行统计分析并利用 SigmaPlot 9.0 (SPSS Inc., USA) 绘图。

3 结果与分析

3.1 实验地环境因子日变化

样地小环境温度、湿度、 CO_2 浓度和光照强度见图 1 和图 2。从 7:00 ~ 18:00, 温度的日变化在 $19.3 \sim 29.2^\circ\text{C}$ 之间; 空气相对湿度在 $39.5 \sim 66.9\%$ 之间; CO_2 浓度 (C_a) 的日变化在 $365.6 \sim 393.4 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之间; 在自然条件下, 由于显脉金花茶生长在林下, 其叶表直接接受的光合有效辐射较少, 日变化为 $1.6 \sim 280 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 最大值在中午的 11:00。

3.2 显脉金花茶叶片净光合速率日变化

在自然条件下, 显脉金花茶主要受散射光的影响, 光照强度往往达不到光饱和点水平。在秋季, 显脉金花茶的净光合速率 (P_n) 日变化呈“单峰”曲线型。其净光合速率 (P_n) 日变化呈现出随光合有效辐射变化而变化的趋势, 光合有效辐射增大, 显脉金花茶的 P_n 也增大(在 11:00 左右达到最大值), 反之亦然(图 3)。日平均 P_n 为 $1.14 \pm 0.32 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而最大值为 $3.2 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

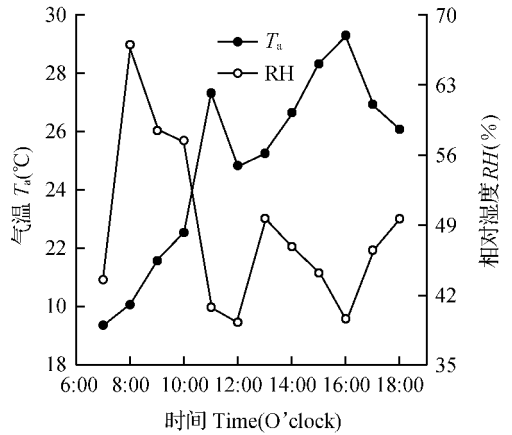


图 1 样地气温和相对湿度的日变化

Fig. 1 Diurnal changes of air temperature and relative humidity at experimental site

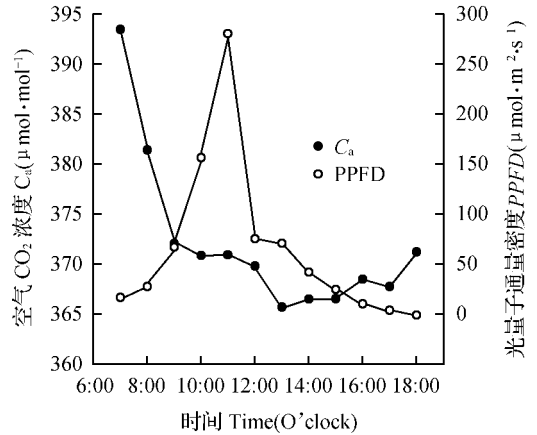


图 2 样地空气 CO_2 浓度和辐射强度的日变化

Fig. 2 Diurnal changes of the concentration of CO_2 and PPFD at experimental site

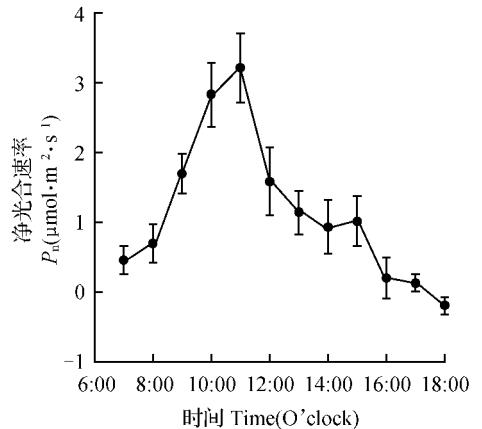


图 3 显脉金花茶叶片净光合速率 (P_n) 的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of the net photosynthetic rate (P_n) of leaves in *C. euphlebica*

3.3 叶片净光合速率对光照强度的响应

在稳定的 CO_2 浓度和温度下测定的显脉金花茶叶片光响应曲线见图 4。当光照强度在 $0 \sim 200$ 范围内时,净光合速率(P_n)呈线性增长,随着光照强度的继续增加, P_n 的增长速度减缓;当光照强度达到光饱和点以后, P_n 的增长处于稳定状态。根据叶片光响应曲线的数学模型,计算出显脉金花茶的最大净光合速率(P_{\max})、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)和表观量子利用效率(AQY)分别为 $3.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $459.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $6.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.039 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ photon}$ 。

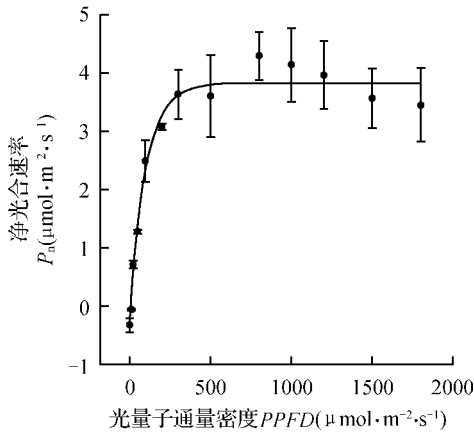


图 4 光强对显脉金花茶叶片光合速率的影响

Fig. 4 The effect of PPFD on P_n of leaves in *C. euphlebia*

3.4 叶片净光合速率对 CO_2 浓度的响应

CO_2 浓度的高低直接影响植物的光合作用, CO_2 浓度升高,一方面增加了 CO_2 对 Rubisc 酶结合位点的竞争,从而提高羧化效率,另一方面通过抑制光呼吸提高光合效率^[11]。在 PPFD 稳定于 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和温度控制在 25°C 的条件下,显脉金花茶成熟叶在不同 CO_2 浓度下的净光合速率响应曲线见图 5。结果表明,当 CO_2 浓度增加时,显脉金花茶叶片净光合速率随着 CO_2 浓度的增加也不断升高。当 CO_2 浓度由 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, P_n 几乎呈直线上升, CO_2 浓度从 $800 \sim 1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 范围内, P_n 变化逐渐平缓, CO_2 浓度到 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 以后, P_n 几乎不变。由曲线估算 CO_2 饱和点(CSP)大约在 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右。另外,由模型计算出有关 CO_2 响应参数见表 1。 CO_2 的补偿点(Γ^*)为 $70.1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,最大羧化速率(V_{\max})为 $17.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大电子传递速率(J_{\max})为 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

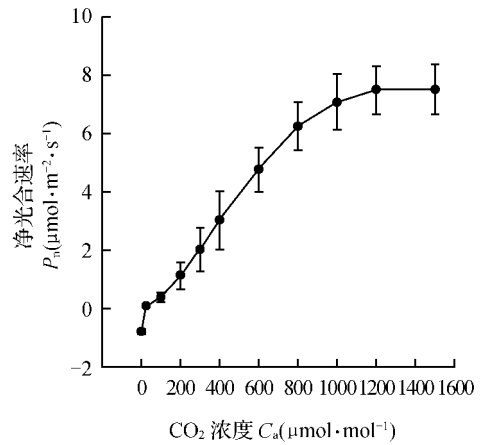


图 5 显脉金花茶叶片净光合速率对环境 CO_2 浓度的响应

Fig. 5 The response of P_n to environmental CO_2 concentration in leaves of *C. euphlebia*

表 1 显脉金花茶叶片的 $P_n \sim C_i$ 响应参数

Table 1 The photosynthetic parameters derived from $P_n \sim C_i$ curves of *C. euphlebia*

CO_2 响应参数 CO_2 -response parameters	显脉金花茶 Planted <i>C. nitidissima</i>
Γ^* ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	70.1 ± 1.6
V_{\max} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	17.5 ± 2.1
R_d ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.11 ± 0.04
J_{\max} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	40 ± 3.50

Γ^* : CO_2 补偿点; V_{\max} : 最大羧化速率; R_d : 暗光下呼吸速率; J_{\max} : 最大电子传递速率

Γ^* : CO_2 compensation concentration; V_{\max} : Maximum carboxylation rate of rubisco; R_d : Dark respiratory rate; J_{\max} : Maximum rate of electron transport

4 结论与讨论

光合作用是植物十分复杂的生理过程,受到很多环境因素如光照强度、气温、空气相对湿度的影响^[12]。本研究的显脉金花茶生境与其自然生境类似,全天光强很低,没有出现光抑制现象,但由于光强很低,净光合速率也很低,其光合生理参数的日变化主要受光强的影响。显脉金花茶叶片的 P_n 日变化呈单峰曲线,最高峰出现在中午 11:00,林下显脉金花茶叶表面接受的光合有效辐射较少,往往达不到光饱和点水平,不存在光抑制的现象。

植物叶片的光饱和点和光补偿点反映了植物光照条件的要求,是判断植物耐阴性的一个重要指

标。大体上阴性植物的光补偿点小于 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光饱和点为 $500 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或更低^[13]。一般认为, 光补偿点和饱和点均较低的植物是典型的耐荫植物, 能充分地利用弱光进行光合作用, 反之是典型的阳性植物^[14, 15]。在夏季, 显脉金花茶的最大净光合速率 (P_{max}) 为 $3.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光饱和点为 $459.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光补偿点为 $6.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。显脉金花茶的光饱和点和光补偿点都比较低, 表明其是一种阴生植物。这与显脉金花茶生长在为荫蔽的自然条件相吻合。据笔者调查, 显脉金花茶天然多见生长于极荫蔽的沟谷两旁山坡的乔木林下或灌木丛中, 上层林冠盖度达 70% 以上, 阳光不易直射的林地, 在林外山坡、山脊空旷地未见有其天然生长。在产区, 由于人类对环境的破坏, 有些暴露于林外的显脉金花茶残株, 生长极为不良, 植株矮小, 叶子发黄。因此, 适当遮荫是显脉金花茶引种栽培过程中的必要条件之一。

在控制光照强度和温度的条件下, CO_2 浓度小于 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, P_n 几乎呈直线上升, 升高 CO_2 浓度可使显脉金花茶的净光合速率增大, 提高了叶片对光能的利用率。植物光合作用对 CO_2 浓度的响应是在低 CO_2 浓度的水平上最显著, 而在 CO_2 浓度较高的条件下其光合作用很大程度上受到环境条件, 如水分、养分、光照、植物生长空间的影响, 在较短时间高 CO_2 浓度处理时, 植物光合作用受到的促进作用是很显著的^[16]。显脉金花茶叶片 CO_2 饱和点大约在 $1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右, CO_2 的补偿点 (Γ^*) 为 $70.1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 最大羧化速率 (V_{cmax}) 为 $17.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大电子传递速率 (J_{max}) 为 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本研究仅在光照强度为 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下探讨 CO_2 浓度对显脉金花茶的叶片净光合速率的响应, 尚需进一步开展多种不同光照强度条件下的试验研究, 更能深入反映显脉金花茶在不同 CO_2 浓度下的光合特性。

参 考 文 献

1. 苏宗明, 莫新礼. 我国金花茶组植物的地理分布 [J]. 广西植物, 1988, 8(1): 75-81.
2. 傅立国. 中国植物红皮书: 第 1 册 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
3. 黎桦, 黄玉源, 何龙飞, 等. 人工林中显脉金花茶的生态特性 [J]. 广西农业大学学报, 1996, 15(3): 253-257.
4. 黄付平. 防城金花茶植物群落类型的研究 [J]. 广西林业科学, 2001, 30(3): 35-38.
5. WEI X, WEI J Q, CAO H L, et al. Genetic diversity and differentiation of *Camellia euphlebica* (Theaceae) in Guangxi, China [J]. Annales Botanici Fennici, 2005, 42(5): 365-370.
6. Bassman J, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoids* and *Populus trichocarpa* X *P. deltoids* clone [J]. Tree Physiol, 1991, 8: 145-159.
7. Von Caemmerer S, Farquhar G D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves [J]. Planta, 1981, 153: 376-387.
8. Bernacchi C J, Singsaas E L, Pimentel C, et al. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis [J]. Plant Cell and Environ, 2001, 24: 253-259.
9. Jordan D B, Ogren W L. The CO_2/O_2 specificity of rubulose 1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase, dependence on ribulose biphosphate concentration, pH and temperature [J]. Planta, 1984, 161: 308-313.
10. Loustau D, Ben Beahim M, Gaudillère J P et al. Photosynthetic responses to phosphorous nutrition in two-year-old maritime pine seedlings [J]. Tree Physiology, 1999, 19: 707-715.
11. 林伟宏. 植物光合作用对大气 CO_2 浓度升高的反应 [J]. 生态学报, 1998, 18(5): 529-537.
12. 苏培玺, 张立新, 杜明武, 等. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富 CO_2 的响应 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 34-40.
13. 蒋高明. 植物生理生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
14. 冷平生, 杨晓红, 胡月, 等. 5 种园林树木的光合和蒸腾特性的研究 [J]. 北京农学院学报, 2000, 15(4): 13-18.
15. 韦记青, 蒋水元, 唐辉, 等. 岩黄连光合与蒸腾特性及其对光照强度和 CO_2 浓度的响应 [J]. 广西植物, 2006, 26(3): 317-320.
16. 蒋高明, 渠春梅. 北京山区辽东栎林中几种木本植物光合作用对 CO_2 浓度升高的响应 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 204-208.