

## 5 种半蒴苣苔属植物光合特性的比较

李莹, 吕惠珍, 黄雪彦, 郭晓云<sup>①</sup>

(广西壮族自治区药用植物园 广西药用资源保护与遗传改良重点实验室, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 对半蒴苣苔属(*Hemiboea* C. B. Clarke)植物半蒴苣苔(*H. henryi* C. B. Clarke)、贵州半蒴苣苔(*H. cavaleriei* H. Lév.)、疏脉半蒴苣苔(*H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li)、华南半蒴苣苔(*H. follicularis* C. B. Clarke)和红苞半蒴苣苔(*H. rubribracteata* Z. Y. Li et Yan Liu)叶片的光合特性进行了分析和比较。结果表明:5种植物的光合参数及其日变化曲线、光响应参数[包括最大净光合速率( $P_{\max}$ )、表观量子效率(AQY)、光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)]、 $\text{CO}_2$ 响应参数[包括 $\text{CO}_2$ 饱和净光合速率(CSPn)、羧化效率(CE)、 $\text{CO}_2$ 补偿点(CCP)和 $\text{CO}_2$ 饱和点(CSP)]均有较大差异。半蒴苣苔、疏脉半蒴苣苔和红苞半蒴苣苔的净光合速率(Pn)日变化曲线均呈“单峰型”,而贵州半蒴苣苔和华南半蒴苣苔的Pn日变化曲线均呈“双峰型”且“午休”现象明显;贵州半蒴苣苔和疏脉半蒴苣苔的气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)日变化曲线均呈“单峰型”,而其他3种植物的Gs和Tr日变化曲线均类似“双峰型”;5种植物的胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )日变化均呈先降后升的趋势;此外,5种植物的Pn与Gs均呈显著正相关、与Tr均呈正相关、与 $C_i$ 均呈负相关。5种植物的光响应曲线和 $\text{CO}_2$ 响应曲线均有差异,但在光合有效辐射(PAR)低于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或环境 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_e$ )低于 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下,它们的Pn均随PAR或 $C_e$ 的升高急剧增加。5种植物中,贵州半蒴苣苔的 $P_{\max}$ 最高,疏脉半蒴苣苔的CSPn最高;贵州半蒴苣苔的LCP最高( $55.74 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),其他4种的LCP均小于 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;5种植物的LSP均介于 $600 \sim 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,CCP介于 $50 \sim 150 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之间,而CSP均在 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 以上。研究结果揭示:供试5种植物均为阴生植物,但因产地生境及遗传特性差异使它们各自适应不同的光照条件,因而,在引种栽培过程中应根据各种类型的光合特性采取适当的遮阳措施。

**关键词:** 半蒴苣苔属; 净光合速率; 光合参数日变化; 光响应曲线;  $\text{CO}_2$ 响应曲线; 相关性

中图分类号: Q945.11; Q949.778.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)02-0019-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.02.03

**Comparison on photosynthetic characteristics of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke** LI Ying, LYU Huizhen, HUANG Xueyan, GUO Xiaoyun<sup>①</sup> (Guangxi Key Laboratory of Medicinal Resources Protection and Genetic Improvement, Guangxi Botanical Garden of Medicinal Plant, Nanning 530023, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(2): 19-25

**Abstract:** The photosynthetic characteristics of leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke including *H. henryi* C. B. Clarke, *H. cavaleriei* H. Lév., *H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li, *H. follicularis* C. B. Clarke and *H. rubribracteata* Z. Y. Li et Yan Liu were analyzed and compared. The results show that there are greater differences in photosynthetic parameters and their diurnal change curves, light response parameters including the maximum net photosynthetic rate ( $P_{\max}$ ), apparent quantum yield (AQY), light compensation point (LCP) and light saturation point (LSP), and  $\text{CO}_2$  response parameters including  $\text{CO}_2$  saturated net photosynthetic rate (CSPn), carboxylation efficiency (CE),  $\text{CO}_2$  compensation point (CCP) and  $\text{CO}_2$  saturation point (CSP) of five species. Diurnal change curves of net photosynthetic rate (Pn) of *H. henryi*, *H. cavaleriei* var. *paucinervis* and *H. rubribracteata* all are “single-peak” type, while those of *H. cavaleriei* and *H. follicularis* are “double-

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31200305); 广西壮族自治区自然科学基金资助项目(2011GXNSFA018203)

作者简介: 李莹(1984—),女,河南长垣人,硕士,研究实习员,主要从事植物生理学和植物分子生物学研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: gxyun2008@hotmail.com

peak” type with obvious “midday depression” phenomenon; diurnal change curves of stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $Tr$ ) of *H. cavaleriei* and *H. cavaleriei* var. *paucinervis* are “single-peak” type, while those of other three species are similar to “double-peak” type; diurnal change curves of intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) all appear a trend of firstly decreasing and then increasing. Moreover,  $P_n$  of five species has a significantly positive correlation with  $G_s$ , a positive correlation with  $Tr$  and a negative correlation with  $C_i$ . There are a certain differences in light response curves and  $CO_2$  response curves of five species, but under conditions of photosynthetic active radiation (PAR) below  $200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  or environment  $CO_2$  concentration ( $C_e$ ) below  $800 \mu mol \cdot mol^{-1}$ ,  $P_n$  of five species all dramatically increases with enhancing of PAR or  $C_e$ . In five species,  $P_{max}$  of *H. cavaleriei* is the highest and  $CSP_n$  of *H. cavaleriei* var. *paucinervis* is the highest; LCP of *H. cavaleriei* is the highest ( $55.74 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), while that of other four species is less than  $10 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ; LSP of five species is in  $600 - 800 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ , their CCP is in  $50 - 150 \mu mol \cdot mol^{-1}$ , and their CSP is above  $1\ 000 \mu mol \cdot mol^{-1}$ . It is suggested that all of five species tested are sciophyte, but they are suitable for different light conditions because of differences in location habitat and genetic characteristics, therefore, feasible shading measures should be taken in process of introduction and cultivation according to photosynthetic characteristics of each species.

**Key words:** *Hemiboea* C. B. Clarke; net photosynthetic rate; diurnal change of photosynthetic parameter; light response curve;  $CO_2$  response curve; correlation

目前已知中国有苦苣苔科 (Gesneriaceae) 植物 58 属 470 余种<sup>[1]</sup>, 种类丰富, 但大部分属包含的种类数量都较少, 特有属、独种属和寡种属较多, 很多种类处于濒危状态, 据统计, 列入《中国物种红色名录》的苦苣苔科植物有 24 属 38 种<sup>[2]</sup>。对环境要求严格、适应能力弱、分布范围狭窄及生境和野生种群的人为破坏<sup>[1,3-4]</sup>是导致苦苣苔科濒危物种多的主要原因, 因而, 迁地保护是该科植物保护的主要途径之一。

研究植物的光合生理特性及其与环境因子的相互关系、了解植物的生理生态特性, 对植物的迁地保护和可持续利用具有重要意义<sup>[5-9]</sup>。目前研究者对苦苣苔科植物的研究主要集中在亲缘关系<sup>[10]</sup>、系统发育<sup>[11-12]</sup>、分类<sup>[13-15]</sup>和化学成分<sup>[16-18]</sup>等方面, 对该科植物光合特性的研究尚不多见<sup>[19-20]</sup>。

苦苣苔科半蒴苣苔属 (*Hemiboea* C. B. Clarke), 共有 21 种, 中国均产, 主要分布于热带和亚热带地区<sup>[21]</sup>。作者收集了广西较为常见的 5 种半蒴苣苔属植物, 对它们的光合特性进行测定和比较, 以期了解这些种类的环境适应性, 为苦苣苔科植物尤其是半蒴苣苔属植物的保护和利用提供实验依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试种类半蒴苣苔 (*Hemiboea henryi* C. B. Clarke)、贵州半蒴苣苔 (*H. cavaleriei* H. Lév.)、疏脉

半蒴苣苔 (*H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li)、华南半蒴苣苔 (*H. follicularis* C. B. Clarke) 和红苞半蒴苣苔 (*H. rubibracteata* Z. Y. Li et Yan Liu) 均于 2010 年采自广西百色石灰岩地区, 在广西药用植物园引种圃进行统一驯化栽培。

选择透气性良好的瓦盆进行栽植, 基质为堆肥土、园土、草木灰和细沙混合基质 (体积比 2:2:1:1); 每盆栽植 1 株, 置于引种圃内并覆盖遮阳网, 夏季用水帘风机降温; 至 2012 年, 供试的各种类所有植株均已栽植 2 a 以上, 平均株高分别为 74.5、50.1、63.8、44.2 和 67.5 cm。

于 2012 年 8 月至 9 月, 在植物生长旺盛、生理活动强烈的时期进行光合参数测定。每种植物随机选取 5 株健壮植株, 在每株的主茎上选择自上向下第 1 和第 2 枚成熟叶片作为测试叶。

### 1.2 方法

1.2.1 光合参数日变化测定 于 2012 年 8 月 26 日至 28 日的 5:30 至 19:30, 使用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统 (美国 LI-COR 公司) 分别测定 5 种植物的光合参数日变化, 包括叶片的净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $Tr$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 等参数, 每隔 2 h 测定 1 次。为了消除时间上的误差, 测定时 5 种植物随机排序。

1.2.2 光响应曲线测定 于 2012 年 8 月 30 日和 31 日、9 月 7 日至 9 日 9:00 至 11:00, 使用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统分别测定 5 种植物的光响

应曲线。测定时 LED 红/蓝光源的光照强度设定为 1 200、1 000、800、600、500、400、300、200、100、50、30、20、10 和 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,测定前先将待测叶片在 1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度下诱导 20 min,每种类重复测定 3 d。采用非直线双曲线模型对数据进行非线性回归拟合,并对光合有效辐射(PAR) 0 ~ 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的测定值与 Pn 进行直线回归分析,得到最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )、表观量子效率(AQY)、光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)。

1.2.3 CO<sub>2</sub>响应曲线测定 于2012年9月10日、13日、14日、19日和20日9:00至11:00,使用LI-6400XT便携式光合作用测量系统分别测定供试5种植物的CO<sub>2</sub>响应曲线。测定时设置光照强度为800  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、叶室温度为25℃,利用CO<sub>2</sub>钢瓶控制CO<sub>2</sub>浓度为50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600和1 800  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,每种类重复测定3 d。采用非直角双曲线模型对Pn和Ci数据进行非线性回归拟合,并将环境CO<sub>2</sub>浓度0 ~ 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的测定值与Pn进行直线回归分析,得到CO<sub>2</sub>饱和净光合速率(CSPn)、羧化效率(CE)、CO<sub>2</sub>补偿点(CCP)和CO<sub>2</sub>饱和点(CSP)。

### 1.3 数据分析

采用 EXCEL 2007 软件进行数据整理和作图,采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行差异显著性分析,采用 Origin 7.0 软件对各响应曲线进行拟合。

## 2 结果和分析

### 2.1 光合参数日变化

供试的5种半蒴苣苔属植物叶片光合参数的日变化见表1。结果表明:5种植物的叶片净光合速率(Pn)日变化趋势明显不同,总体上可分为2类。半蒴苣苔、疏脉半蒴苣苔和红苞半蒴苣苔的Pn值随时间推移均呈先增大后减小的趋势,呈“单峰型”曲线,但三者达到峰值的时间不同,半蒴苣苔和疏脉半蒴苣苔的Pn值在13:30达到峰值后迅速下降,红苞半蒴苣苔的Pn值在15:30达到峰值且随后急剧降低。贵州半蒴苣苔和华南半蒴苣苔的Pn值则随时间推移呈“双峰型”曲线,分别在7:30和11:30达到第1个峰值后逐渐降低,并分别在11:30和13:30达到最低值,然后逐渐升高,在15:30达到第2个峰值后又降低,说明这2个种存在光合作用的“午休”现象。

表1 5种半蒴苣苔属植物叶片光合参数的日变化( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Diurnal change of photosynthetic parameter in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

种类 <sup>2)</sup> Species <sup>2)</sup>	不同时间的净光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Net photosynthetic rate at different times							
	5:30	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30
HH	-0.67±0.08b	0.87±0.13a	0.82±0.11a	1.49±0.12a	2.14±0.07a	1.09±0.05a	0.62±0.08a	-1.75±0.15d
HC	-0.78±0.03b	0.48±0.06c	0.34±0.12c	0.03±0.13b	0.33±0.07c	1.07±0.07a	0.13±0.08b	0.09±0.14b
HCP	-0.32±0.09a	0.81±0.09b	0.82±0.11a	0.89±0.08a	1.35±0.13b	0.21±0.08b	0.09±0.12b	-1.03±0.08c
HR	-0.37±0.07a	0.69±0.07bc	0.68±0.12bc	1.21±0.11a	1.21±0.04b	1.32±0.08a	0.62±0.09a	0.57±0.05a
HF	-0.33±0.08a	0.51±0.14c	0.71±0.09ab	1.68±0.13a	1.09±0.06b	1.51±0.06a	0.59±0.11a	0.47±0.07a
种类 <sup>2)</sup> Species <sup>2)</sup>	不同时间的蒸腾速率/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Transpiration rate at different times							
	5:30	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30
HH	0.58±0.05a	0.72±0.03b	0.83±0.05a	0.87±0.06b	0.89±0.07b	0.41±0.03b	0.52±0.06a	0.37±0.04a
HC	0.53±0.03a	0.55±0.03c	0.55±0.02b	0.58±0.03b	1.01±0.06ab	0.92±0.05a	0.58±0.11a	0.38±0.07a
HCP	0.44±0.04a	0.87±0.06a	0.87±0.05a	1.02±0.09a	0.91±0.04ab	0.47±0.05b	0.43±0.02a	0.36±0.03a
HR	0.41±0.04a	0.47±0.03d	0.67±0.02b	0.91±0.06a	1.07±0.06a	0.54±0.05b	0.69±0.11a	0.37±0.06a
HF	0.48±0.08a	0.49±0.02d	0.56±0.03b	0.64±0.09b	0.66±0.03c	0.44±0.03b	0.64±0.03a	0.32±0.05a
种类 <sup>2)</sup> Species <sup>2)</sup>	不同时间的气孔导度/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Stomatal conductance at different times							
	5:30	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30
HH	0.08±0.01a	0.09±0.01b	0.11±0.01a	0.11±0.01a	0.11±0.01a	0.04±0.00c	0.05±0.01ab	0.04±0.01a
HC	0.05±0.01b	0.08±0.01bc	0.11±0.01a	0.12±0.01a	0.12±0.01a	0.12±0.01a	0.05±0.01ab	0.04±0.01a
HCP	0.07±0.01ab	0.11±0.01a	0.11±0.01a	0.11±0.01a	0.09±0.01b	0.04±0.00c	0.04±0.00b	0.04±0.00a
HR	0.05±0.01b	0.07±0.01c	0.11±0.00a	0.11±0.00a	0.13±0.01a	0.06±0.00b	0.07±0.01a	0.04±0.01a
HF	0.04±0.00b	0.04±0.00d	0.07±0.00b	0.07±0.01b	0.07±0.01b	0.04±0.00c	0.05±0.00ab	0.03±0.01a

续表1 Table 1 (Continued)

种类 <sup>2)</sup> Species <sup>2)</sup>	不同时间的胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ Intercellular CO <sub>2</sub> concentration at different times							
	5:30	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30
HH	508.35±5.01b	481.63±7.93ab	394.33±5.26bc	393.02±3.74b	410.63±2.72a	383.16±8.38a	434.05±7.57b	593.68±5.36a
HC	517.26±1.63ab	460.91±4.87ab	444.43±8.43a	401.26±7.42a	371.99±2.86bc	362.45±3.89bc	378.08±4.32c	396.20±7.23b
HCP	497.95±5.91b	499.66±9.26a	381.15±3.49c	398.12±8.66b	380.68±2.37b	373.35±8.28b	453.67±8.88a	610.62±7.15a
HR	532.16±5.06a	444.58±4.89b	409.92±5.19b	368.31±2.38bc	359.75±2.78bc	333.82±3.22c	377.46±3.46c	384.99±5.33b
HF	495.26±3.25b	448.47±8.71b	408.50±3.24b	340.57±6.89c	349.35±6.09c	319.36±4.61c	382.09±6.25c	458.92±6.07b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different species ( $P < 0.05$ ).

<sup>2)</sup> HH: 半蒴苣苔 *Hemiboea henryi* C. B. Clarke; HC: 贵州半蒴苣苔 *H. cavaleriei* H. Lév.; HCP: 疏脉半蒴苣苔 *H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li; HR: 红苞半蒴苣苔 *H. rubibracteata* Z. Y. Li et Yan Liu; HF: 华南半蒴苣苔 *H. follicularis* C. B. Clarke.

由表1还可见:半蒴苣苔、红苞半蒴苣苔和华南半蒴苣苔的气孔导度( $G_s$ )日变化随时间推移呈现“上升—基本平稳—下降—上升—下降”的趋势,第1个峰值出现在9:30至13:30,第2个峰值出现在17:30;这3种植物的蒸腾速率( $T_r$ )日变化趋势与 $G_s$ 相似,也呈“双峰型”,2个峰值分别出现在13:30和17:30,不同的是 $T_r$ 值在上午持续增大,没有出现平台期。疏脉半蒴苣苔和贵州半蒴苣苔的 $G_s$ 和 $T_r$ 的日变化则均呈“单峰型”曲线,但峰值出现的时间不同;疏脉半蒴苣苔和贵州半蒴苣苔的 $G_s$ 峰值分别出现在7:30至11:30和11:30至15:30,而它们的 $T_r$ 峰值则分别出现在13:30和15:30。供试5种植物的胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )日变化均表现出先降低后增大的趋势。

方差分析结果显示:5种半蒴苣苔属植物叶片的Pn值差异显著,物种因素和时间因素的影响都达到显著水平( $P < 0.05$ )。

## 2.2 净光合速率与其他光合参数的相关性

供试5种半蒴苣苔属植物叶片的净光合速率(Pn)与蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )之间的相关系数见表2。5种植物的Pn与 $G_s$ 均呈显著正相关;半蒴苣苔和疏脉半蒴苣苔的Pn与 $T_r$ 分别呈显著和极显著正相关,其他3种植物的Pn与 $T_r$ 均呈不显著的正相关;贵州半蒴苣苔的Pn与 $C_i$ 呈不显著负相关,华南半蒴苣苔叶片的Pn与 $C_i$ 呈极显著负相关,其他3种植物叶片的Pn与 $C_i$ 均呈显著负相关。

表2 5种半蒴苣苔属植物叶片的净光合速率(Pn)与其他光合参数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between net photosynthetic rate (Pn) and other photosynthetic parameters in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke

参数 Parameter	各种类的Pn与其他参数的相关系数 <sup>1)</sup> Correlation coefficient between Pn and other parameters of different species <sup>1)</sup>				
	HH	HC	HCP	HR	HF
蒸腾速率 Transpiration rate	0.57*	0.48	0.85**	0.39	0.43
气孔导度 Stomatal conductance	0.50*	0.50*	0.64*	0.49*	0.64*
胞间CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration	-0.57*	-0.41	-0.50*	-0.57*	-0.86**

<sup>1)</sup> HH: 半蒴苣苔 *Hemiboea henryi* C. B. Clarke; HC: 贵州半蒴苣苔 *H. cavaleriei* H. Lév.; HCP: 疏脉半蒴苣苔 *H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li; HR: 红苞半蒴苣苔 *H. rubibracteata* Z. Y. Li et Yan Liu; HF: 华南半蒴苣苔 *H. follicularis* C. B. Clarke.  
\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

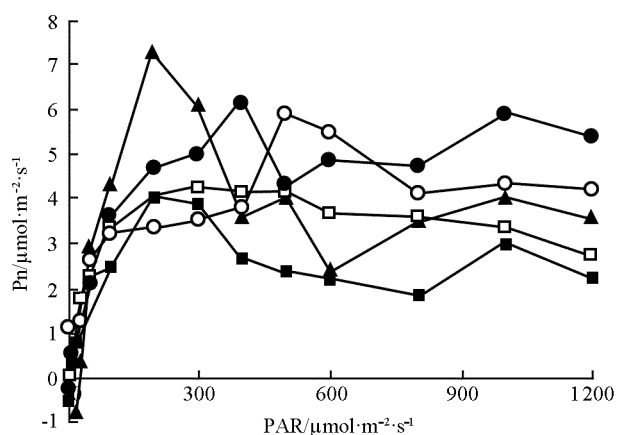
## 2.3 光响应曲线和CO<sub>2</sub>响应曲线分析

供试5种半蒴苣苔属植物叶片的光响应曲线见图1,它们的CO<sub>2</sub>响应曲线见图2。

2.3.1 光响应曲线 由图1可以看出:在光合有效辐射(PAR)低于200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,5种植物的净光合速率(Pn)均随PAR的增加急剧增大;在PAR超过200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,随PAR

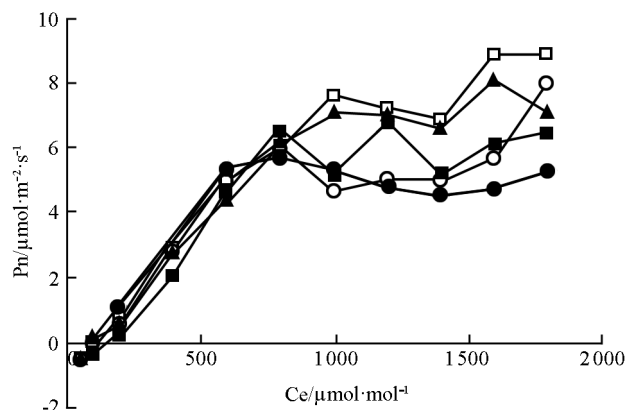
持续增加Pn增幅趋缓,达到最大值后趋于稳定或略有下降。

2.3.2 CO<sub>2</sub>响应曲线 从图2可见:5种植物的CO<sub>2</sub>响应曲线差异明显。在环境CO<sub>2</sub>浓度( $C_e$ )低于800  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下,5种植物的净光合速率(Pn)均随 $C_e$ 的增加迅速增大;在 $C_e$ 高于800  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下,随 $C_e$ 持续增加5种植物的Pn增幅趋缓;其



—●—: 半蒴苣苔 *Hemiboea henryi* C. B. Clarke; —▲—: 贵州半蒴苣苔 *H. cavaleriei* H. Lév.; —□—: 疏脉半蒴苣苔 *H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li; —○—: 红苞半蒴苣苔 *H. rubibracteata* Z. Y. Li et Yan Liu; —■—: 华南半蒴苣苔 *H. follicularis* C. B. Clarke. Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetic active radiation.

图 1 5 种半蒴苣苔属植物叶片的光响应曲线  
Fig. 1 Light response curve in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke



—●—: 半蒴苣苔 *Hemiboea henryi* C. B. Clarke; —▲—: 贵州半蒴苣苔 *H. cavaleriei* H. Lév.; —□—: 疏脉半蒴苣苔 *H. cavaleriei* var. *paucinervis* W. T. Wang et Z. Y. Li ex Z. Y. Li; —○—: 红苞半蒴苣苔 *H. rubibracteata* Z. Y. Li et Yan Liu; —■—: 华南半蒴苣苔 *H. follicularis* C. B. Clarke. Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Ce: 环境 CO<sub>2</sub> 浓度 Environment CO<sub>2</sub> concentration.

图 2 5 种半蒴苣苔属植物叶片的 CO<sub>2</sub> 响应曲线  
Fig. 2 CO<sub>2</sub> response curve in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke

中,半蒴苣苔和红苞半蒴苣苔的 Pn 呈先减小后逐渐增大的趋势,华南半蒴苣苔的 Pn 呈波动的变化趋势,贵州半蒴苣苔和疏脉半蒴苣苔的 Pn 均呈“增大—减小—增大”的趋势并在达到最大值之后趋于稳定或略有下降。

### 2.4 光响应参数和 CO<sub>2</sub> 响应参数分析

供试 5 种半蒴苣苔属植物叶片的光响应参数见表 3,它们的 CO<sub>2</sub> 响应参数见表 4。

2.4.1 光响应参数 由表 3 可以看出:5 种植物的最大净光合速率 ( $P_{max}$ )、表观量子效率 (AQY)、光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP) 均有一定差异。在 5 种植物中,  $P_{max}$  最高的为贵州半蒴苣苔、最低为华南半蒴苣苔,二者间差异显著; AQY 最高的为贵州半蒴苣苔、最低为红苞半蒴苣苔,且前者的 AQY 值与其他种

类的 AQY 值均有显著差异; LCP 最高的为贵州半蒴苣苔,最低为半蒴苣苔,二者的 LCP 值与其他 3 种植物的 LCP 值均有显著差异; LSP 最高的为半蒴苣苔、最低为疏脉半蒴苣苔,二者的 LSP 值与其他 3 种植物的 LSP 值均有显著差异。

2.4.2 CO<sub>2</sub> 响应参数 由表 4 可见:5 种植物的 CO<sub>2</sub> 饱和净光合速率 (CSPn)、羧化效率 (CE)、CO<sub>2</sub> 补偿点 (CCP) 和 CO<sub>2</sub> 饱和点 (CSP) 也有较大差异。在 5 种植物中, CSPn 最高的为疏脉半蒴苣苔,其 CSPn 值与其他 4 种植物的 CSPn 值差异显著; CE 最高的为半蒴苣苔,其 CE 值与其他 4 种植物的 CE 值差异显著; CCP 最高的为华南半蒴苣苔 (133.15  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 其 CCP 值与贵州半蒴苣苔的 CCP 值无显著差异,但均显著高于其他 3 种植物的 CCP 值; CSP 最高的为疏脉半

表 3 5 种半蒴苣苔属植物叶片的光响应参数 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
Table 3 Light response parameters in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

种类 Species	$P_{max}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	AQY	LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
半蒴苣苔 <i>H. henryi</i>	6.85±1.42a	0.024±0.002b	1.67±0.03c	775.00±24.03a
贵州半蒴苣苔 <i>H. cavaleriei</i>	7.24±1.42a	0.057±0.004a	55.74±0.71a	694.44±30.26b
疏脉半蒴苣苔 <i>H. cavaleriei</i> var. <i>paucinervis</i>	4.27±1.07b	0.018±0.001b	6.37±0.22b	628.57±17.90c
红苞半蒴苣苔 <i>H. rubibracteata</i>	5.91±0.77ab	0.016±0.003b	9.34±1.75b	712.50±27.67b
华南半蒴苣苔 <i>H. follicularis</i>	4.07±0.83b	0.020±0.003b	6.90±1.05b	707.14±21.10b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different species ( $P < 0.05$ ).  $P_{max}$ : 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate; AQY: 表观量子效率 Apparent quantum yield; LCP: 光补偿点 Light compensation point; LSP: 光饱和点 Light saturation point.

表4 5种半蒴苣苔属植物叶片的CO<sub>2</sub>响应参数( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 4 CO<sub>2</sub> response parameters in leaf of five species in *Hemiboea* C. B. Clarke ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

种类 Species	CSPn/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	CE	CCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	CSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
半蒴苣苔 <i>H. henryi</i>	5.63±1.37b	0.011±0.001a	58.65±7.01c	1 120.00±72.63c
贵州半蒴苣苔 <i>H. cavaleriei</i>	7.48±1.06b	0.008±0.001b	107.48±5.65a	1 475.00±152.63b
疏脉半蒴苣苔 <i>H. cavaleriei</i> var. <i>paucinervis</i>	9.80±1.76a	0.009±0.001b	93.01±10.52b	1 900.00±104.43a
红苞半蒴苣苔 <i>H. rubibracteata</i>	5.70±1.42b	0.007±0.001bc	57.53±9.66c	1 433.33±121.43b
华南半蒴苣苔 <i>H. follicularis</i>	6.55±1.15b	0.005±0.001c	133.15±11.29a	1 412.50±91.65b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同种间差异显著( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different species ( $P < 0.05$ ). CSPn: CO<sub>2</sub>饱和净光合速率 CO<sub>2</sub> saturated net photosynthetic rate; CE: 羧化效率 Carboxylation efficiency; CCP: CO<sub>2</sub>补偿点 CO<sub>2</sub> compensation point; CSP: CO<sub>2</sub>饱和点 CO<sub>2</sub> saturation point.

蒴苣苔(1 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、最低的为半蒴苣苔(1 120  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),二者的CSP值与其他3种植物的CSP值均有显著差异。

### 3 讨论和结论

光合作用对植物的生长发育至关重要,因而,了解植物的光合生理特性是植物引种栽培、保护和利用过程中必须的基础性工作<sup>[22-24]</sup>。本研究中,供试5种半蒴苣苔属植物叶片的净光合速率(Pn)及其日变化规律差异显著。从不同时间点的Pn值看,同种植物叶片的Pn值并非整体高于或低于其他植物,而是或高于或低于其他植物,呈现波动的趋势,这可能是因为供试的5种植物在分类上为同属植物,虽然具有一定的遗传相似性,但由于产地的生境差异较大,为适宜不同生境而衍生出各自特有的光合特性。从Pn日变化看,半蒴苣苔、疏脉半蒴苣苔和红苞半蒴苣苔的Pn日变化曲线均呈先增大再减小的变化趋势,而贵州半蒴苣苔和华南半蒴苣苔的Pn日变化曲线则有较明显的“午休”现象。郑月萍等<sup>[20]</sup>和邓涛等<sup>[19]</sup>的研究结果显示:苦苣苔科的一些植物叶片的Pn日变化均呈“双峰型”曲线,实验期间的高光照或高温低湿条件是引起这些种类“午休”的原因。在本研究中,供试的5种半蒴苣苔属植物种植于遮光条件下且测定时气温低于30℃、空气相对湿度达85%以上,因而,半蒴苣苔、疏脉半蒴苣苔和红苞半蒴苣苔叶片的光合作用没有出现明显的“午休”现象;而在同一条件下贵州半蒴苣苔和华南半蒴苣苔叶片的光合作用却出现“午休”现象,说明这2种植物的光合特性与另3种植物有一定差异,也进一步说明植物光合作用是自身生理特性和环境综合作用的结果。

相关性分析结果表明:供试5种半蒴苣苔属植物

叶片的Pn值与气孔导度(Gs)呈显著正相关;除贵州半蒴苣苔外,其他4种植物叶片的Pn值与胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)均呈极显著或显著负相关;半蒴苣苔和疏脉半蒴苣苔叶片的Pn值与蒸腾速率(Tr)分别呈显著和极显著正相关。表明5种植物的光合作用受Gs和Ci整体作用的综合影响,其中Gs的影响具有普遍性。

植物叶片光合能力的强弱在一定程度上反映出植物对环境的适应性,表观量子效率(AQY)、光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)是反映植物光合特性的常用指标;植物的AQY越低,其对光能的利用能力越弱;LCP越低,说明植物利用弱光能力越强;LSP较高的种类对强光环境较为适应,而较高的LCP可导致光合产物的消耗量增加<sup>[25-26]</sup>。供试的5种半蒴苣苔属植物的LCP都较低,最高的贵州半蒴苣苔的LCP为55.74  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他4种植物的LCP均小于10  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;5种植物的LSP为600~800  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明这5种植物均属于喜阴植物,反映出它们对长期弱光环境的适应。从采集地点和相关的记载可以看出:5种植物都分布于林下或水边阴湿处,可获取的光能资源较少,因而它们均具有较强的利用弱光的能力。这5种植物虽然都属于喜阴植物,但它们对光照的利用能力有明显差异:半蒴苣苔、红苞半蒴苣苔和华南半蒴苣苔具有较低的LCP和AQY以及较高的LSP,说明这3种植物适宜的光照条件较广、光能利用能力较弱;疏脉半蒴苣苔的LSP较低、而贵州半蒴苣苔的LCP较高,表明这2种植物适应的光照条件小于其他3种植物;贵州半蒴苣苔的AQY较高,显示其光能利用能力强于其他4种植物。

CO<sub>2</sub>浓度直接影响植物光合作用的强度。CO<sub>2</sub>浓度升高,一方面增加CO<sub>2</sub>对Rubisco酶结合位点的竞争能力,进而提高羧化效率;另一方面可抑制光呼吸作用,进而提高光合效率<sup>[25-26]</sup>。CO<sub>2</sub>补偿点(CCP)低

的植物通常具有光合效率高及物质积累多等特点,因此低 CCP 也是评价植物对环境适应性的重要指标之一<sup>[27]</sup>。供试 5 种半蒴苣苔属植物的 CCP 介于 50 ~ 150  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  之间,其中贵州半蒴苣苔和海南半蒴苣苔的 CCP 明显高于其他 3 种植物,说明它们对  $\text{CO}_2$  的利用能力低于其他 3 种植物。供试 5 种半蒴苣苔属植物的  $\text{CO}_2$  饱和点(CSP)均在 1 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  以上,远高于空气  $\text{CO}_2$  浓度,其中疏脉半蒴苣苔的 CSP 甚至达到 1 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,说明该种能够耐受较高浓度的  $\text{CO}_2$ 。

由上述分析可见:虽然 5 种半蒴苣苔属植物的光合能力明显不同,但它们均为阴生植物,具有光合效率较高、需光性不强、利用弱光能力较强、较不适应强光环境等共性,这是它们对生长环境长期适应的结果。根据半蒴苣苔属植物的这些光合特性,建议在该属植物的迁地保护和引种栽培过程中采取适当的遮阳措施,维持植株正常生长所需的光照条件,使植株能正常生长发育,提升植株的成活率。

#### 参考文献:

- [1] 李振宇,王印政. 中国苦苣苔科植物[M]. 郑州:河南科学技术出版社,2004:1-702.
- [2] 汪松,解焱. 中国物种红色名录:第一卷[M]. 北京:中国高等教育出版社,2005:405-406.
- [3] 韦毅刚,钟树华,文和群. 广西苦苣苔科植物区系和生态特点研究[J]. 云南植物研究,2004,26(2):173-182.
- [4] 温放,李湛东. 苦苣苔科植物研究进展[J]. 中国野生植物资源,2006,25(1):1-6.
- [5] XU Z Z, ZHOU G S, SHIMIZU H. Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewatering in grass [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(13): 3737-3749.
- [6] SUI N, LI M, MENG Q W, et al. Photosynthetic characteristics of a super high yield cultivar of winter wheat during late growth period [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(3): 346-354.
- [7] LING L L, ZHANG B J, JIAO D M. Photosynthetic characteristics of hybrid rice with phosphoenol-pyruvate carboxylase gene [J]. Photosynthetica, 2007, 45(3): 462.
- [8] LI Y M, JIAO Y X, ZHAO Q. Photosynthetic characteristics of arctic plants [M] // KUANG T Y, LU C M, ZHANG L X. Photosynthesis Research for Food, Fuel and the Future: 15th International Conference on Photosynthesis. Berlin: Springer, 2013: 633-637.
- [9] ZHANG T, LI J F, MA F, et al. Study of photosynthetic characteristics of the *Pyropia yezoensis* thallus during the cultivation process [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(2): 859-865.
- [10] 白贞芳. 苦苣苔科药用植物亲缘学研究[D]. 北京:北京中医药大学中药学院,2010:68-143.
- [11] 汪小全,李振宇. rDNA 片段的序列分析在苦苣苔亚科系统学研究中的应用[J]. 植物分类学报,1998,36(2):97-105.
- [12] 葛玉珍. 广西石山苣苔属(苦苣苔科)的系统发育研究[D]. 南宁:广西大学林学院,2012:6-46.
- [13] 李振宇,刘演,韦毅刚. 广西半蒴苣苔属(苦苣苔科)一新种——红苞半蒴苣苔[J]. 植物分类学报,2004,42(6):537-540.
- [14] WEN F, TANG W X, WEI Y G. *Hemiboea angustifolia* (Gesneriaceae), a new species endemic to a tropical limestone area of Guangxi, China [J]. Phytotaxa, 2011, 30: 53-59.
- [15] 张贵志,喻勋林. 湖南苦苣苔科一新纪录属——小花苣苔属 [J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(6):135-137.
- [16] 康文艺,张丽. 五种苦苣苔科植物  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 天然产物研究与开发,2010,22(1):122-125.
- [17] 闫文义,陈林,王金梅,等. 苦苣苔科三萜类化学成分研究进展[J]. 天然产物研究与开发,2012,24(5):698-701.
- [18] 白贞芳,王晓琴,肖培根,等. 苯乙醇苷类化合物在苦苣苔科药用植物中分布规律[J]. 中国中药杂志,2013,38(24):4267-4270.
- [19] 邓涛,莫丹,周太久,等. 菱叶唇柱苣苔光合特性日变化的初步研究[J]. 江苏农业科学,2010(4):195-197.
- [20] 郑月萍,沈宗根,姜波,等. 4种苦苣苔科植物光合特性的比较[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,2012,35(4):446-452.
- [21] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第六十九卷 [M]. 北京:科学出版社,1990:125-126.
- [22] 简在友,王文全,孟丽,等. 芍药组内不同类群间光合特性及叶绿素荧光特性比较[J]. 植物生态学报,2010,34(12):1463-1471.
- [23] 张卫强,肖辉林,殷祚云,等. 模拟氮沉降对入侵植物薇甘菊光合特性的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(12):1859-1866.
- [24] 吴志庄,杜旭华,熊德礼,等. 不同类型竹种光合特性的比较研究[J]. 生态环境学报,2013,22(9):1523-1527.
- [25] 李永华,张开明,于红芳. 10个秋菊品种的光合特性及净光合速率与部分生理生态因子的相关性分析[J]. 植物资源与环境学报,2012,21(1):70-76.
- [26] 蒋跃林,张庆国,杨书运,等. 28种园林植物对大气  $\text{CO}_2$  浓度增加的生理生态反应[J]. 植物资源与环境学报,2006,15(2):1-6.
- [27] MEDRANO H, KEYS A J, LAWLOR D W, et al. Improving plant production by selection for survival at low  $\text{CO}_2$  concentrations [J]. Journal of Experimental Botany, 1995, 46(S): 1389-1396.

(责任编辑:张明霞)