

桂西南不同种源蚬木光合和生长特征的研究

谭长强, 欧芷阳, 申文辉*, 彭玉华, 朱积余, 郑威

(广西林业科学研究院; 广西优良用材林资源培育重点实验室; 国家林业局中南速生材繁育实验室, 南宁 530002)

摘要: 为选择喀斯特特有树种蚬木(*Excentrodendron hsienmu*)优良种源, 采用完全随机区组试验设计, 研究了不同种源蚬木光合生理和生长特征的月动态变化。结果表明, 蚬木光合生理特性在不同月份、不同种源间差异显著, 净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率表现出对气候变化的适应, 均随月份发生变化。各种源蚬木净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均在8月份最高, 4月份和12月份较低。水分利用效率则在8月份最低, 4月份和12月份较高。相关分析表明, 蚬木各种源苗高与地径、净光合速率均显著正相关, 而净光合速率与地径也表现一定的正相关关系, 说明净光合速率可作为蚬木生长过程中的指示性监测指标。蚬木大新、武鸣、隆安种源在整个生长季节均表现较高的净光合速率和生长量, 以及较低的蒸腾速率, 因此, 这3个蚬木种源更适合在南宁地区引种植。

关键词: 蚬木; 光合参数; 喀斯特山地; 地理变异; 生长

doi: 10.11926/jtsb.3799

Photosynthetic and Growth Characteristics of Different *Excentrodendron hsienmu* Provenances from Karst District of Southwestern Guangxi, China

TAN Chang-qiang, OU Zhi-yang, SHEN Wen-hui*, PENG Yu-hua, ZHU Ji-yu, ZHENG Wei

(Guangxi Academy of Forestry; Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation; Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation, Nanning 530002, China)

Abstract: In order to selection of excellent provenance of *Excentrodendron hsienmu*, the monthly changes in photosynthetic and growth characteristic were studied by using a completely random zone experiment design. The results showed that the photosynthetic and growth characteristics of *E. hsienmu* had significantly differences among different months and different provenances. The net photosynthetic rate, stomata conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) changed with the month, indicated the adaptability to climate changes. The net photosynthetic rate, stomata conductance and transpiration rate of different provenances were the highest in August, but low in April and December. However, the WUE were the lowest in August, and high in April and December. The seedling height had significant positive correlation with ground diameter and net photosynthetic rate and seedling height, as well as the net photosynthetic rate and ground diameter. The net photosynthetic rate could be used as indicative monitoring indicators in the growth process of *E. hsienmu*. The provenances of Daxin, Wuming and Long'an had high net photosynthetic rate and growth increment and low transpiration rate during whole growing season. Therefore, the three provenances of Daxin, Wuming and Long'an

收稿日期: 2017-08-15

接受日期: 2017-10-13

基金项目: 广西林业科技项目(桂林科学[2014]02号); 广西科技计划项目(桂科 AB16380300); 广西优良用材林资源培育重点实验室课题(15-A-02-02, 14B0101)资助

This work was supported by the Guangxi Forestry Science and Technology Project (Grant No. [2014]02), the Plan Project for Science and Technology in Guangxi (Grant No. AB16380300), and the Project of Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation (Grant No. 15-A-02-02, 14B0101).

作者简介: 谭长强(1987~), 男, 工程师, 硕士, 主要从事森林培育和森林生态研究。E-mail: 315990730@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: shenwenhui2003@163.com

were more suitable to introduction planting in Nanning area.

Key words: *Excentrodendron hsienmu*; Photosynthetic parameter; Karst mountain; Geographic variation; Growth

光合作用是树木物质积累与生理代谢的基础, 光合作用的强弱与树木生产力密切相关, 光合作用受外界环境以及树木自身特性的影响^[1], 并且在相同条件下, 同一种植物不同品种或种源的光合能力不尽相同, 这是其固有的遗传特性以及对原产地环境适应的结果^[2-3], 因此, 研究植物光合生理特征可有效地揭示植物对生存环境的适应机制^[4]。

蚬木(*Excentrodendron hsienmu*)是桂西南喀斯特地区特有的原生性树种之一^[5], 在维持桂西南区域生物多样性和改善生态环境方面具有重要作用。同时, 蚬木作为我国著名硬木和优良材用树种^[6], 长期遭受乱砍滥伐, 导致野生种群数量急剧下降, 现已被列为国家二级保护植物。目前对蚬木的研究仅限于生物学特性^[7-8]、繁殖生物学^[9]、种群动态和群落结构描述^[10-11]等方面, 对蚬木种源生长及光合作用的研究未见报道。为此, 本研究采集了大新、隆安、武鸣、靖西、龙州和弄岗等 6 个种源的蚬木幼苗, 种植于广西南宁北郊的试验苗圃中, 比较不同种源蚬木的光合参数及生长年度变化, 以期为进一步研究不同种源蚬木对生态环境条件的适应提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西林业科学院科研试验基地(108°20' E, 22°55' N), 海拔约 80 m, 属湿润的亚热带季风气候, 年均气温为 21.7℃, 1 月平均气温 12.80℃, 极端最低温 -1.5℃, 7-8 月平均气温 28.2℃, 极端最高气温 39.4℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温为 7 200℃, 日照时数 1 550 h 以上, 全年几乎无霜; 干湿季节明显, 年均降雨量 1 300 mm, 降雨主要集中在 4-9 月。土壤为赤红壤, pH 值为 5.6, 肥力中等。

1.2 材料

6 个种源蚬木幼苗分别来自武鸣、靖西、大新、隆安、龙州和弄岗。武鸣(107°51'53" E, 23°16'4" N)蚬木群落分布在四周高山环绕的小石山峰上, 气候类型较为封闭, 干湿季明显; 靖西(106°26'33" E, 22°53'33" N)蚬木群落位于与越南交界的靖西邦亮

长臂猿自然保护区内, 地被苔藓植物较为丰富, 全年气候较温和, 素有气候“小昆明”之称; 大新(106°46'16" E, 22°49'14" N)蚬木群落更靠近靖西, 气候类型与靖西较为相似; 隆安(107°24'6" E, 23°4'24" N)种源地气候类型与南宁相似, 年均温比其他种源地要高; 龙州(106°55'7" E, 22°20'59" N)蚬木群落为上世纪 70 年代由龙州蚬木林场进行人工种植的林分, 湿热、干冷同季; 弄岗(106°56'37" E, 22°27'53" N)蚬木群落位于龙州弄岗国家自然保护区内, 气候相对封闭, 干湿季节较为明显。

于 2015 年 9 月左右, 分赴 6 个种源地蚬木林下采集苗高、地径基本一致的小苗(平均苗高、地径分别为 12.3 和 2.37 mm), 置于营养袋中进行正常苗期管理。于 2016 年 2 月, 选择生长健壮, 长势基本一致(平均苗高、地径分别为 42.7 和 4.85 mm)的各种源蚬木种植于苗圃地中, 按株行距 1 m×1 m 种植, 6 个种源完全随机区组排列, 3 次重复, 10 株 1 小区。定植挖穴(穴面宽 30 cm、穴底宽 30 cm、穴深 30 cm), 施入复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15, m/m/m), 覆土, 并每穴定植 1 株。之后统一抚育管理。

1.3 生长及光合参数测定

从 4 月起, 每 2 个月测定一次苗高、地径及光合参数。光合作用参数测定采用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR, USA), 于上午 9:00-11:00 测定, 设置光强 1 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、叶温 30℃、空气流量 500 $\mu\text{mol s}^{-1}$ 、CO₂ 浓度 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 每种源每小区随机抽取 3 株, 每株取完全展开的成熟叶 1 片测定净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr), 确保每种源 9 次重复观测。水分利用效率(WUE)=Pn/Tr。

1.4 数据分析和统计

利用 Excel 以及 DPS 7.05 对试验数据进行整理和统计分析。

2 结果和分析

2.1 净光合速率变化

不同种源蚬木净光合速率(Pn)在不同月份呈

现明显变化(表 1)。4 月份,隆安种源的 P_n 最高,其次是靖西、大新种源,最低为弄岗种源。进入 6 月份,龙州、弄岗种源明显要高于其他种源,大新种源则显著低于其他种源。8 月份,大新、武鸣种源相对较高,其次为隆安、靖西种源,最低的为龙州、弄岗种源。10 月份,各种源 P_n 大小顺序与 8 月份相似。12 月份,武鸣、隆安显著高于其他种源,最低的为龙州和弄岗种源。蚬木的 P_n 平均值为大新 > 隆安 > 武鸣 > 靖西 > 龙州 > 弄岗。

2.2 气孔导度的变化

蚬木气孔导度(G_s)与外界环境具有明显的相关性(表 2)。4 月份,蚬木的 G_s 在各种源间无显著差

异。6 月份,蚬木龙州、弄岗种源要明显高于其他种源,并且弄岗种源与大新、武鸣、隆安、靖西种源间的差异均达到显著水平。8 月份,龙州、弄岗种源仍然要高于其他种源,龙州与大新、武鸣、隆安、靖西种源间的差异均达到显著水平。12 月份与 10 月份相似,均表现出大新、武鸣、隆安种源显著高于靖西、龙州、弄岗种源。蚬木的 G_s 各月份均值为龙州 > 弄岗 > 武鸣 > 靖西 > 隆安 > 大新。

2.3 蒸腾速率的变化

蚬木蒸腾速率(Tr)呈现明显的季节性变化(表 3)。4 月份,蚬木隆安、靖西、武鸣种源的 Tr 最高,与弄岗、龙州、大新种源间均存在显著差异。进入

表 1 不同种源蚬木净光合速率($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)的月变化

Table 1 Monthly changes in net photosynthesis rate ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) of different *Excentrodendron hsiennmu* provenances

种源 Provenance	月份 Month				
	4	6	8	10	12
大新 Daxin	13.5 ± 0.31b	13.6 ± 0.23d	20.7 ± 0.57a	18.4 ± 0.31a	14.5 ± 0.24b
武鸣 Wuming	12.8 ± 0.17c	14.3 ± 0.19c	19.0 ± 0.77b	17.3 ± 0.12b	15.3 ± 0.24a
隆安 Long'an	14.4 ± 0.09a	15.3 ± 0.15b	17.9 ± 0.24c	17.2 ± 0.11b	15.1 ± 0.09a
靖西 Jingxi	13.5 ± 0.16b	13.2 ± 0.23e	17.7 ± 0.13c	16.5 ± 0.18c	13.8 ± 0.26c
龙州 Longzhou	13.1 ± 0.15c	16.0 ± 0.19a	16.2 ± 0.59d	13.9 ± 0.33e	13.6 ± 0.10cd
弄岗 Nonggang	12.4 ± 0.23d	15.6 ± 0.19ab	16.1 ± 0.11d	14.6 ± 0.16d	13.4 ± 0.12d

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Tables.

表 2 不同种源蚬木气孔导度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)的月变化

Table 2 Monthly changes in stomatal conductance ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) of different *Excentrodendron hsiennmu* provenances

种源 Provenance	月份 Month				
	4	6	8	10	12
大新 Daxin	0.19 ± 0.02a	0.23 ± 0.02c	0.28 ± 0.03c	0.24 ± 0.03a	0.26 ± 0.02a
武鸣 Wuming	0.21 ± 0.01a	0.27 ± 0.02bc	0.24 ± 0.03c	0.23 ± 0.02a	0.26 ± 0.02a
隆安 Long'an	0.23 ± 0.03a	0.24 ± 0.01c	0.27 ± 0.01c	0.21 ± 0.02a	0.26 ± 0.01a
靖西 Jingxi	0.21 ± 0.05a	0.25 ± 0.04c	0.36 ± 0.02b	0.18 ± 0.01b	0.21 ± 0.01b
龙州 Longzhou	0.24 ± 0.05a	0.31 ± 0.04ab	0.42 ± 0.01a	0.16 ± 0.02b	0.20 ± 0.01b
弄岗 Nonggang	0.20 ± 0.04a	0.33 ± 0.02a	0.40 ± 0.03ab	0.17 ± 0.01b	0.20 ± 0.01b

表 3 不同种源蚬木蒸腾速率($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)的月变化

Table 3 Monthly changes in transpiration rate ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) of different *Excentrodendron hsiennmu* provenances

种源 Provenance	月份 Month				
	4	6	8	10	12
大新 Daxin	2.17 ± 0.05c	2.58 ± 0.08c	5.14 ± 0.14d	4.54 ± 0.07a	2.02 ± 0.11e
武鸣 Wuming	2.49 ± 0.24ab	2.68 ± 0.53bc	5.40 ± 0.17d	4.30 ± 0.15a	2.50 ± 0.05c
隆安 Long'an	2.64 ± 0.14a	2.70 ± 0.07bc	5.34 ± 0.19d	4.53 ± 0.11a	2.67 ± 0.08bc
靖西 Jingxi	2.61 ± 0.05a	2.51 ± 0.08c	6.13 ± 0.23c	4.00 ± 0.16b	2.32 ± 0.10d
龙州 Longzhou	2.28 ± 0.16c	3.23 ± 0.17a	7.32 ± 0.27a	3.53 ± 0.09c	3.09 ± 0.07a
弄岗 Nonggang	2.36 ± 0.10bc	3.07 ± 0.10ab	6.57 ± 0.31b	3.38 ± 0.16c	2.81 ± 0.13b

6 月份, 蚬木各种源的 Tr 表现升高趋势, Tr 最高的为龙州和弄岗种源, 且与其他种源间均达到显著差异水平, 其次是武鸣和隆安种源, 最低为大新和靖西种源。到 8 月份, 蚬木各种源的 Tr 均达到最高值, 以龙州种源最高, 且与其他种源间均存在显著差异, 其次是弄岗、靖西种源, 最低为隆安、武鸣、大新种源。10 月份, 蚬木的 Tr 整体开始下降, 龙州、弄岗种源的 Tr 下降最快, 在所有种源中最低, 比 8 月份分别下降了 51.7% 和 48.6%, 且与其他种源间存在显著差异。到 12 月份, 大新种源的 Tr 下降最为明显, 比 10 月份下降了 55.50%, 在所有种源中最低, 且与其他种源间均存在显著差异。蚬木的 Tr 均值为龙州 > 弄岗 > 隆安 > 靖西 > 武

鸣 > 大新。

2.4 水分利用效率变化

蚬木水分利用效率(WUE)随生长季呈现明显的“V”字型变化趋势(表 4)。4 月份, 蚬木大新种源的 WUE 最大, 其次为龙州, 然后是隆安、弄岗、靖西、武鸣。到 6 月份, 各种源间的 WUE 并无显著差异。进入 8 月份, 蚬木各种源的 WUE 均降至最低, 仍以大新种源的最大且与其他种源间达显著差异, 最小的为弄岗和龙州种源。10 月份, 各种源的 WUE 开始回升, 到 12 月, 大新种源的最高, 其次是武鸣、靖西、隆安, 最小的为弄岗和龙州。蚬木各月份的 WUE 均值为大新 > 武鸣 > 隆安 > 靖西 > 弄岗 > 龙州。

表 4 不同种源蚬木水分利用效率($\mu\text{mol mol}^{-1}$)的月变化

Table 4 Monthly changes in water use efficiency ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) of different *Excentrodendron hsiennmu* provenances

种源 Provenance	月份 Month				
	4	6	8	10	12
大新 Daxin	6.23 ± 0.09a	5.28 ± 0.22a	4.03 ± 0.19a	4.05 ± 0.11bc	7.16 ± 0.42a
武鸣 Wuming	5.15 ± 0.55c	5.35 ± 0.99a	3.52 ± 0.19b	4.02 ± 0.13bc	6.13 ± 0.20b
隆安 Long'an	5.47 ± 0.30bc	5.67 ± 0.19a	3.36 ± 0.11b	3.79 ± 0.07c	5.64 ± 0.15c
靖西 Jingxi	5.19 ± 0.15c	5.27 ± 0.15a	2.89 ± 0.12c	4.13 ± 0.20ab	5.96 ± 0.36bc
龙州 Longzhou	5.75 ± 0.40ab	4.96 ± 0.25a	2.21 ± 0.09d	3.94 ± 0.10bc	4.41 ± 0.07d
弄岗 Nonggang	5.23 ± 0.31c	5.10 ± 0.17a	2.46 ± 0.12d	4.34 ± 0.21a	4.76 ± 0.19d

2.5 苗高和地径的生长变化

蚬木各种源地径的累积生长量表现了直线增长趋势(图 1, 2), 说明蚬木地径在整个年度生长过程中无休眠期。地径净生长量最高的时期为 8-10 月, 其中隆安种源的最高, 为 3.24 mm; 其次为武鸣、

大新、靖西、弄岗种源, 分别为 3.00、2.95、2.63 和 2.52 mm; 最低为龙州种源, 为 2.25 mm。年度累积生长量最高的为武鸣、大新、隆安种源, 分别为 10.64、10.59、10.49 mm, 且三者间无显著差异; 其次是靖西种源(9.62 mm), 与其他种源间达显著差

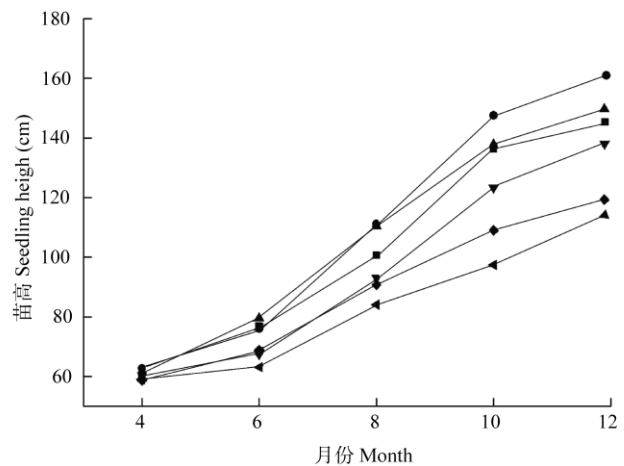
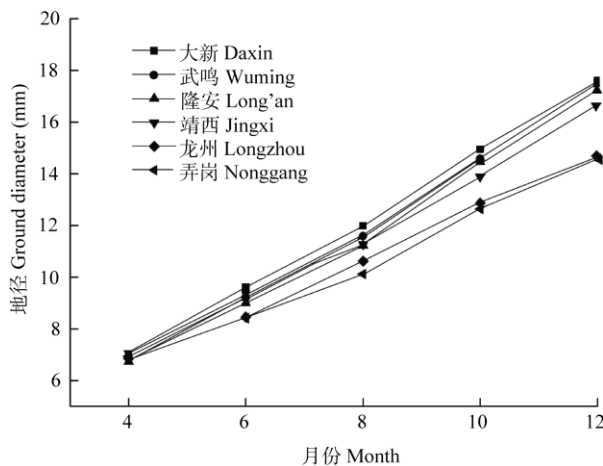


图 1 不同种源蚬木苗高和地径的月变化

Fig. 1 Monthly changes in ground diameter and seedling height of different *Excentrodendron hsiennmu* provenances

异；最低的为龙州(7.84 mm)和弄岗(7.64 mm)，两者间无显著差异，与其他种源间达显著差异(图 3)。

蚬木各种源苗高的累积生长量不断增加(图 1, 2)，增长量变化可以分为 3 个阶段：4-6 月，苗高生长比较缓慢，以隆安种源的生长量最高，为 20.3 cm，弄岗种源的最低，为 4.0 cm；6-10 月为苗高快速增长期，武鸣种源的生长量最高达到 71.5 cm，其次为大新、隆安、靖西、龙州种源，分别为 59.4、58.2、

55.8 和 40.1 cm，弄岗种源最低，仅为 34.3 cm；10-12 月，苗高增长开始趋缓，弄岗种源的苗高增长量最高，为 17.9 cm，其次为靖西、武鸣、隆安、龙州、大新种源，分别为 16.0、14.5、12.8、11.1 和 9.7 cm。苗高总增长量以武鸣>隆安>大新>靖西>龙州>弄岗(图 3)，分别为 99.3、91.3、85.4、78.8、61.4 和 56.2 cm；龙州种源与其他种源间均达显著差异，龙州、弄岗与其他种源间也达显著差异水平。

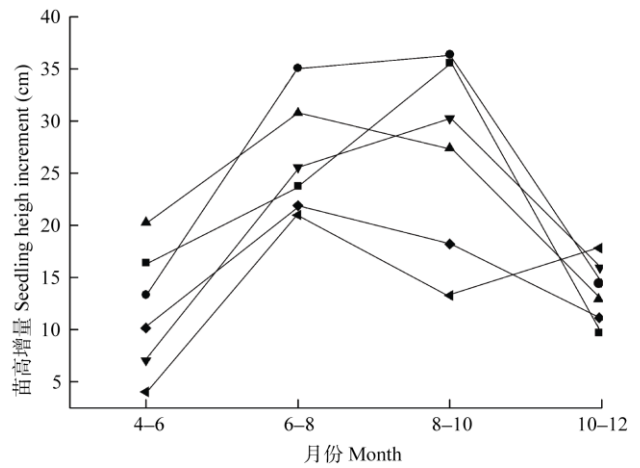
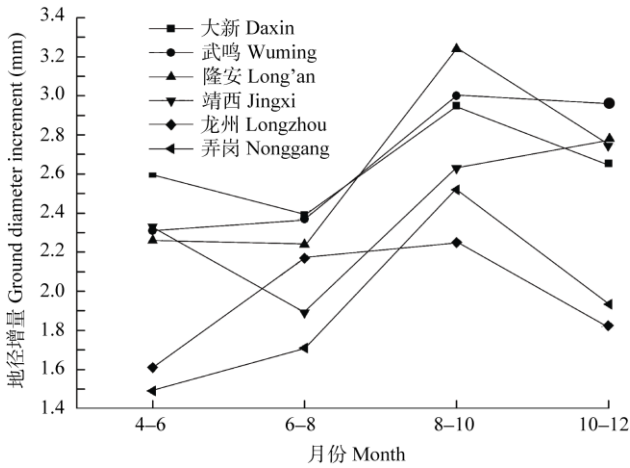


图 2 不同种源蚬木苗高、地径的月净生长量

Fig. 2 Monthly net increment of ground diameter and seedling height of different *Excentrodendron hsiennu* provenances

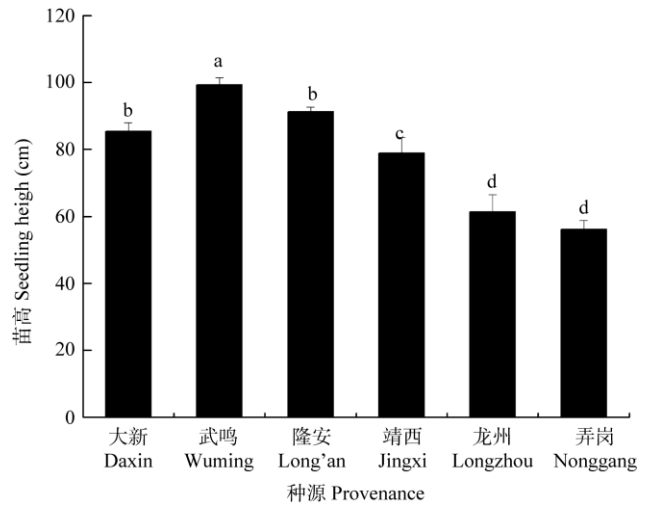
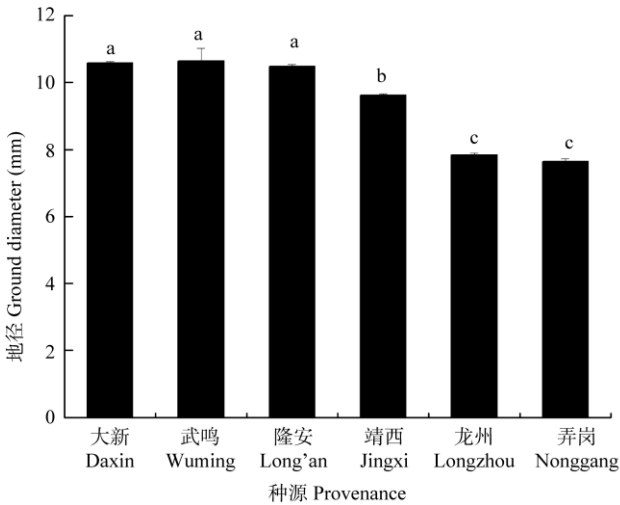


图 3 不同种源蚬木苗高、地径的年净生长量。柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Fig. 3 Annual net increment of ground diameter and seedling height of different *Excentrodendron hsiennu* provenances. Different letters upon column indicate significant difference at 0.05 level.

2.6 生长量和光合参数的相关分析

由表 5 可见，Pn 与 Gs、Tr、苗高以及 Gs 与表 5 不同种源蚬木生长指标和光合指标间的相关系数

Ci、Tr 均表现显著正相关，而 WUE 与 Pn、Gs、Tr 均表现显著负相关；地径与苗高表现显著正相关。

Table 5 Correlation coefficient between growth and photosynthesis indexes of different *Excentrodendron hsienmu* provenances

	Pn	Gs	Ci	Tr	WUE	苗高 Seedling height
Gs	0.38*					
Ci	-0.32	0.49**				
Tr	0.73**	0.63**	-0.20			
WUE	-0.58**	-0.44*	0.32	-0.93**		
苗高 Seedling height	0.38*	-0.12	0.01	0.15	-0.05	
地径 Ground diameter	0.28	-0.11	0.09	0.09	0.01	0.97**

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论

光合作用是植物生产过程中物质积累与生理代谢的复杂生理过程, 其对环境条件季节性变化的适应性反映了植物的遗传特性和适应能力^[2-3]。不同品种即使在相同条件下, 对外界条件的光合生理响应也会不同, 这与物种本身的抗旱机制和长期对外界条件的适应性有关^[12]。本研究表明, 6 个蚬木种源在光合生理上的差异显著, 这可能来源于不同种源蚬木对原产地生长环境条件的适应。同时, 不同种源蚬木光合作用均随气候变化发生改变, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均表现出 8 月份较高, 4 月份和 12 月份较低。水分利用效率(WUE)是评价植物对环境适应能力的综合指标^[13], 蚬木各种源的 WUE 受净光合速率和蒸腾速率的共同影响, 在整个生长季呈现“V”字形变化, 表现出 8 月份最低, 4 月份和 12 月份较高, 这体现了蚬木固有适应环境的生存特征。大新、武鸣、隆安种源在整个生长季中均表现出较高的净光合速率和较低的蒸腾速率, 说明这 3 个蚬木种源对种植地南宁的气候具有更强的适应能力。

有研究表明, 植物南种北引后生长表现较差, 而由北向南引种较易, 并且引种在同一纬度气候相似地区的生长适应性较强^[14]。本文对蚬木的研究也有类似的结果, 结合各种源原产地纬度和引种南宁后的生长来看, 离南宁最近的武鸣种源具有最高的苗高和地径生长量, 其次为大新、隆安、靖西种源, 最低的为最南面的龙州和弄岗种源。方差分析也表明, 苗高、地径在各种源间均存在显著差异。

气孔在调节植物水分关系中所起作用就像压力调节器, 通过对蒸腾失水的控制来限制植物水势变化^[15]。WUE 是植物光合和蒸腾特性的综合反映, 也是确定植物生长所需水分供应的指标之一。当外界环境适宜时, 水分和 CO₂ 底物供应充足, 植物的

光合效率就会加强, 必然植物的 WUE 就会提高; 当外界环境不适宜时, 光强过高、蒸腾作用加大、水分散失过快或者 CO₂ 供应不足等会引起植物光合作用效率下降, 植物的 WUE 也会随之降低^[16]。本研究结果相似, 当 Gs 升高时, Tr 也随之升高, 而 WUE 则降低, 即 Gs 与 Tr 显著正相关, 而 WUE 与 Gs、Tr 显著负相关。同时, 相关分析表明, 6 个蚬木种源的苗高与地径、Pn 与苗高均呈显著正相关关系, 而 Pn 与地径也呈现一定的正相关关系, 这说明 Pn 可作为蚬木生长过程中的指示性监测指标。本研究中蚬木苗高、地径、Pn 及 Tr 均在 8 月份达到最高, 体现了蚬木种源来自北回归线以南的具有雨热同季的喀斯特石山地区的生长特性。

参考文献

- [1] KE S S. Seasonal variations of photosynthetic characteristics of 3 evergreen broad-leaved species in Tiantai Mountains [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2004, 24(5): 7-11. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2004.05.003.
柯世省. 天台山 3 种常绿阔叶树光合特性的季节变化 [J]. 浙江林业科技, 2004, 24(5): 7-11. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2004.05.003.
- [2] XIONG C Y, ZENG W, XIAO F M, et al. An analysis of photosynthetic parameters among *Schima superba* provenances [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(11): 3628-3634. doi: 10.5846/stxb201103080281.
熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等. 木荷种源间光合作用参数分析 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3628-3634. doi: 10.5846/stxb201103080281.
- [3] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art [J]. IEEE Transact Evolut Comput, 2011, 15(1): 4-31. doi: 10.1109/TEVC.2010.2059031.
- [4] SRIVASTAVA R. Implications of using approximate expressions for well function [J]. J Irrig Drain Eng, 1995, 121(6): 459-462. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:6(459).
- [5] LI X K, JIANG Z C, HUANG Y Q, et al. Dynamics of dominant

- population and its influence on karstification in southwest Guangxi, China [J]. *Acta Geosci Sin*, 2008, 29(2): 253–259. doi: 10.3321/j.issn:1006-3021.2008.02.018.
- 李先琨, 蒋忠诚, 黄玉清, 等. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响 [J]. *地球学报*, 2008, 29(2): 253–259. doi: 10.3321/j.issn:1006-3021.2008.02.018.
- [6] TANG Y G, JIANG Y. Superior and rare species worth vigorous development (I) [J]. *Guangxi For Sci*, 2008, 37(3): 137–140.
- 唐玉贵, 蒋隸. 几个值得大力发展的优良珍贵树种(一) [J]. *广西林业科学*, 2008, 37(3): 137–140.
- [7] TANG Y, MAO L H, GAO H. Over-exploitation and lack of protection is leading to a decline of a protected calcicolous tree species *Excentrodendron hsienmu* (Tiliaceae) in China [J]. *Biol Conserv*, 2005, 126(1): 14–23. doi: 10.1016/j.biocon.2005.04.016.
- [8] LU Y Y, TAN Z Q, ZHU J Y, et al. Characteristics of diurnal photosynthesis variation in 10 rare tree species [J]. *Guangxi For Sci*, 2015, 44(2): 120–125. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2015.02.006.
- 鲁莹莹, 谭长强, 朱积余, 等. 10 个珍贵树种光合日变化特性 [J]. *广西林业科学*, 2015, 44(2): 120–125. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2015.02.006.
- [9] GAO H, TANG Y, ZHANG L Y. Megasporogenesis and embryo sac development in *Excentrodendron hsienmu* (Malvaceae) with reference to the systematic affinities of *Excentrodendron* [J]. *Acta Phytotaxon Sin*, 2006, 44(5): 538–550.
- 高辉, 唐亚, 张立芸. 蚬木的大孢子发生与胚囊发育兼论蚬木属的系统亲缘 [J]. *植物分类学报*, 2006, 44(5): 538–550.
- [10] WANG B. Ecological study of *Excentrodendron hsienmu* community in north tropical karst seasonal rainforest [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2012: 25–59.
- 王斌. 北热带喀斯特季节性雨林蚬木群落生态学研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2012: 25–59.
- [11] XIANG W S, WANG B, DING T, et al. Age structure and quantitative dynamics of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest in south China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32(4): 825–831. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0185.
- 向悟生, 王斌, 丁涛, 等. 喀斯特季节性雨林蚬木种群结构和数量动态 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 825–831. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0185.
- [12] HAN M, YANG L M, HAN Z M, et al. Photosynthetic characteristics, yield and quality of *Scutellaria baicalensis* from different provenances [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2015, 43(4): 197–202, 208. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.04.019.
- 韩梅, 杨利民, 韩忠明, 等. 不同种源黄芩光合特性及产量与品质的研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 197–202, 208. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.04.019.
- [13] UEDA Y, NISHIHARA S, TOMITA H, et al. Photosynthetic response of Japanese rose species *Rosa bracteata* and *Rosa rugosa* to temperature and light [J]. *Sci Hort*, 2000, 84(3–4): 365–371. doi: 10.1016/S0304-4238(99)00138-7.
- [14] LI Q L, HUANG S X, LI Z X, et al. Growth pattern of *Liriodendron chinense* seedlings from different provenances [J]. *Guihaia*, 2012, 32(3): 355–361. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.03.015.
- 李秋荔, 黄寿先, 李志先, 等. 中国马褂木不同种源苗期生长规律研究 [J]. *广西植物*, 2012, 32(3): 355–361. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.03.015.
- [15] SPETTY J S, HACKE U G, OREN R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply [J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25(2): 251–263. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00799.x.
- [16] SHEN W H, LI Z H, PENG Y H, et al. Light response of photosynthesis of different provenance *Erythrophleum fordii* Oliv. [J]. *J CS Univ For Technol*, 2014, 34(6): 13–18. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2014.06.004.
- 申文辉, 李志辉, 彭玉华, 等. 格木不同种源光合作用光响应分析研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(6): 13–18. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2014.06.004.