

不同闽楠优树子代苗期生长及光合生理特性比较

姜顺邦¹, 张 怡¹, 韦小丽¹, 范辉华², 徐小琴¹, 段如雁¹

(1. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012)

摘要: 采集福建政和 11 个闽楠 *Phoebe bournei* 优树和福建建瓯 13 个闽楠优树种子为试验材料, 进行容器育苗试验, 测定不同优树苗木生长及光合速率和蒸腾速率, 以了解不同闽楠优树的苗期变异性。结果表明: 24 个闽楠优树的 1~2 年生子代苗高、地径、生物量及光合、蒸腾指标均存在显著差异($P < 0.05$)。2 年生苗高、地径和生物量变异大于 1 年生苗, 变化幅度分别为 29.3~56.4 cm, 3.50~4.91 cm 和 5.985~27.965 g, 变异系数分别为 27.6%, 14.8% 和 37.6%。2 年生闽楠苗光合速率、蒸腾速率、光能利用效率和水分利用效率变化幅度分别为 2.081~5.122 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.715~1.829 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 4.36%~12.31% 和 2.224~3.703 $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 变异系数分别为 6.1%, 21.9%, 19.7% 和 13.8%。1~2 年生闽楠优树子代的苗高、地径和生物量均以福建建瓯 8 号优树表现最好。因此, 福建建瓯的优树子代生长、生理特性都优于福建政和的优树。按 20% 的入选率, 筛选出 J8, J1, J13, J12, J4 等 5 个优树。表 6 参 23

关键词: 林木育种学; 闽楠; 优树; 苗期变异; 生长特性; 光合特性

中图分类号: S722.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)01-0051-09

Growth and photosynthetic physiology for two groups of *Phoebe bournei* plus tree seedlings

JIANG Shunbang¹, ZHANG Yi¹, WEI Xiaoli¹, FAN Huihua², XU Xiaoqin¹, DUAN Ruyan¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, Fujian, China)

Abstract: To understand variability in different plus tree seedlings of *Phoebe bournei*, seeds from 11 plus trees from Zhenghe, Fujian Province were compared to 13 plus trees from Jianou, Fujian Province for growth indices, photosynthetic rate, and transpiration rate of one- to two-year-old seedlings in a container seedling experiment. Results showed strong differences in height, ground diameter, biomass, photosynthesis, and transpiration among the progeny. Two-year-old seedlings were greater than one-year-old seedlings with average height of 56.4 compared to 29.3 cm [coefficient of variation (cv) of 27.6%], average ground diameter of 4.91 compared to 3.50 cm (cv of 14.8%), and average biomass variation of 27.965 compared to 5.985 g (cv of 37.6%). Two-year-old families compared to one-year-old had an average net photosynthetic rate of 5.122 compared to 2.081 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (cv of 6.1%), average transpiration rate of 1.829 compared to 0.715 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (cv of 21.9%), average water utilization efficiency of 12.31% compared to 4.36% (cv of 19.7%), and average light energy utilization efficiency of 3.703 compared to 2.224 $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (cv of 13.8%). The family seedling of No. 8 plus tree (J8) from Jianou, Fujian had the best growth performance in height, round diameter, biomass, net photosynthetic rate, water utilization efficiency, and light energy utilization efficiency. So the growth and physiology characteristics of plus trees from Jianou, Fujian were superior to Zhenghe, Fujian. Based on a selection rate of 20%, five

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-04-21

基金项目: 贵州省林业厅重大专项(黔林科合[2010]重大 02); 贵州省优秀青年科技人才基金[黔科人合字(2011)15 号]

作者简介: 姜顺邦, 从事森林培育学研究。E-mail: 1127103013@qq.com。通信作者: 韦小丽, 教授, 博士生导师, 从事森林培育研究。E-mail: gdwxl-69@126.com

plus trees (J8, J1, J13, J12, and J4) were chosen. [Ch, 6 tab. 23 ref.]

Key words: forest tree breeding; *Phoebe bournei*; plus trees; seedling variation; growth characteristics; photosynthetic characteristics

闽楠 *Phoebe bournei* 为樟科 Lauraceae 楠属 *Phoebe* 常绿乔木, 是中国珍稀濒危树种和国家二级保护树种。其树干通直、木材纹理结构细密, 剖面光滑美观, 有香气, 为高级建筑、家具、雕刻和精密木模的珍贵用材树种^[1]。长期以来, 由于人们对闽楠天然林资源的不合理利用与破坏, 加上闽楠生长缓慢, 成材期长, 对生境要求较高, 致使闽楠资源匮乏^[2-3]。现有闽楠资源已不能满足人们对其经济价值和生态效益的需求, 培育闽楠人工林是解决其天然资源不足的首要途径, 闽楠优良地理种源和优树选择是培育闽楠优质人工林的基础。目前, 对闽楠的研究多集中在群落生态、种苗繁育、造林和遗传多样性^[4-10]等方面, 少数学者对于闽楠地理种源和优树选择也进行了初步尝试^[11-12]。不同地理种源和优树在不同区域的生长表现不同, 各地需通过试验研究选择适合当地自然环境条件的地理种源和优树。因此, 本研究在福建建瓯和政和 2 个闽楠分布区采集闽楠优树种质共 24 份进行容器育苗试验, 对不同闽楠优树子代苗期生长及光合生理特性进行比较, 旨在探讨不同闽楠优树的生长潜力, 为贵州进行闽楠优树的选择及良种选育提供依据。

1 试验地概况

试验地位于贵州大学林学院苗圃, 地处 26°25'N, 106°40'E。该地年平均气温为 15.3 °C, 最高气温为 39.5 °C, 最低气温为 -9.5 °C, ≥10 °C 的年活动积温为 4 637.5 °C, 海拔高度约为 1 100 m, 年平均降水量为 1 129.5 mm, 年平均日照时数为 1 148.3 h, 光照充足, 属于亚热带季风性湿润气候。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验采用种子来源于福建政和的 11 株优树和福建建瓯的 13 株优树, 各优树采集地基本情况见表 1。种子采用混沙湿藏催芽。

表 1 优树采集地及基本情况

Table 1 Origin place of plus trees and basic situation

优树号	优树种源地	采种母树情况		优树号	优树种源地	采种母树情况	
		胸径/cm	树高/m			胸径/cm	树高/m
J1	福建建瓯防道镇际村	50.1	17.0	Z1	福建政和东平镇风头村	58.0	27.0
J2	福建建瓯防道镇际村	32.8	10.0	Z2	福建政和东平镇风头村	55.0	26.0
J3	福建建瓯防道镇际村	42.6	16.0	Z3	福建政和东平镇风头村	66.0	29.0
J4	福建建瓯防道镇际村	43.3	17.0	Z4	福建政和东平镇风头村	62.0	28.0
J5	福建建瓯万木林保护区	39.3	19.0	Z5	福建政和东平镇风头村	57.0	25.0
J6	福建建瓯万木林保护区	38.5	18.5	Z6	福建政和东平镇风头村	65.8	26.0
J7	福建建瓯万木林保护区	34.3	21.0	Z7	福建政和东平镇风头村	59.5	25.0
J8	福建建瓯防道镇南窠村	66.5	23.0	Z8	福建政和铁山镇余坑村	68.0	30.0
J9	福建建瓯防道镇南窠村	77.5	26.0	Z9	福建政和铁山镇余坑村	63.7	28.0
J10	福建建瓯防道镇九堡村	56.2	22.5	Z10	福建政和铁山镇余坑村	61.5	27.0
J11	福建建瓯防道镇九堡村	60.4	23.0	Z11	福建政和铁山镇余坑村	59.0	27.0
J12	福建建瓯防道镇尤墩村	40.0	18.0				
J13	福建建瓯防道镇西际村	53.0	21.0				

说明: Z 为福建政和优树, J 为福建建瓯优树。

2.2 育苗方法

本试验采用无纺布容器育苗, 1 年生时容器规格为 8 cm × 15 cm, 育苗基质为 *m*(腐殖土):*m*(泥炭):*m*(黄心土)=5:3:2 混合基质。试验于 2012 年 3 月 19 日开始播种, 用催芽的 24 个优树种子在试验地进行

容器袋播种育苗。试验采用完全随机化设计, 设小区 2 个·优树⁻¹, 100 袋·小区⁻¹。2 年生时换规格为 12 cm × 15 cm 的黑色无纺布容器, 育苗基质同 1 年生苗。

在播种后幼苗出土时, 搭盖遮阳网以保护幼苗生长, 由于闽楠为耐荫喜湿树种, 苗期管理适当多浇水; 夏秋两季每月定期施肥。对于 1 年生苗, 根据苗木生长各时期的需求进行不同肥料配比的施肥, 施肥 1 次·周⁻¹, 到 11 月上旬停止追肥, 施肥配方见表 2。2 年生苗主要以施尿素为主, 5-8 月每周喷施 1 次质量分数为 0.2% 的尿素溶液, 9 月停止施肥。

表 2 不同苗龄的肥料配比

Table 2 Fertilizer ratio of seedlings at different stages

苗龄/d	磷酸二氢钾	尿素	过磷酸钙	氯化钾	水/mL	稀释比例/%	施肥方式
20~50	0.6				300	0.2	叶面喷洒
50~180		3.9	3.6	0.5	800	0.8	浇灌
180~210			4.5	1.5	1 000	0.6	浇灌

2.3 测定指标与方法

2.3.1 生长指标测定 每个优树号随机选择 30 株苗木进行挂牌编号, 生长结束后测定其苗高、地径生长情况。用游标卡尺测量地径, 精度为 0.02 mm; 用钢卷尺测量苗高, 精度 0.10 cm。

2.3.2 生物量指标的测定 在黔中地区因气候的原因, 闽楠 1 年生苗较小, 不能出圃, 苗木生物量指标测定以 2 年生苗为对象进行。采用标准株法, 选择标准株 3 株·优树⁻¹·重复⁻¹进行测定, 整株挖取后分别将叶片、茎干、主根用信封装好后放入 80 °C 烘箱中, 烘干 24 h 至恒量后用电子天平称量, 精度 0.001 g, 并计算生物量根冠比。计算公式如下: 根冠比(R_{RS})= 根干质量/ 茎叶干质量^[13]。

2.4 光合生理指标的测定及计算方法

于 2012 年 8 月 12-14 日晴天进行光合生理指标测定。采用 Li-6400 便携式光合测定仪测定 24 个福建闽楠优树的净光合速率(P_n), 蒸腾速率(T_r), 胞间二氧化碳摩尔分数, 测定时间为上午 9:00-10:00, 重复测定 3 次·优树⁻¹。计算水分利用效率(W_{UE}), 光能利用效率(L_{UE})。计算公式如下: 水分利用效率(W_{UE})=净光合速率(P_n)/蒸腾速率(T_r); 光能利用效率(L_{UE})=净光合速率(P_n)/ 光合有效辐射(P_{AR})^[14-15]。

2.5 数据处理

用 Excel 软件进行数据整理, 用 SPASS 软件进行制图及统计分析。不同闽楠优树综合评价用隶属函数法, 其公式为:

$$u(x_{ij})=(x_{ij}-x_{jmin})/(x_{jmax}-x_{jmin}); \quad (1)$$

$$u(x_{ij})=1-(x_{ij}-x_{jmin})/(x_{jmax}-x_{jmin})。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $u(x_{ij})$ 为 i 优树 j 指标的标准化值, x_{ij} 为 i 优树 j 指标值, x_{jmax} 为各优树 j 指标的最大值, x_{jmin} 为各优树 j 指标的最小值。若所测指标与优树的优劣呈正相关, 则采用(1)式计算隶属函数值; 若测定指标与优树的优劣呈负相关, 则用(2)式计算隶属函数值。其次, 确定不同指标的权重, 权重确定采用标准差系数法。计算标准差系数 V_j , 再求各指标的权重 W_j 。

$$V_j=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (X_{ij}-X_j)^2\right)} \div X_j; \quad (3)$$

$$W_j=V_j \Big/ \sum_{j=1}^n V_j。 \quad (4)$$

最后, 求不同优树各指标的综合评价值, 用来衡量不同闽楠优树的优劣情况。

$$D=\sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j]。 \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 不同闽楠优树生长差异性比较

对不同闽楠优树家系 1~2 年生苗高、地径进行单因素方差分析。24 个闽楠优树 1~2 年生苗高、地

径均表现出显著差异($P<0.05$, 表3)。1年生闽楠优树子代苗高、地径差异相对较小, 变化幅度分别为6.23~14.57 cm和0.17~0.29 cm; 2年生苗高、地径差异较大, 变化幅度分别为29.28~56.35 cm和3.50~4.91 cm。由表3可知: 福建建瓯优树家系生长明显优于政和优树, 1年生苗高和地径均值分别比政和优树高27.6%和9.1%, 2年生苗高和地径均值分别比政和优树高24.7%和17.4%。24个闽楠优树1~2年生家系的苗高生长变异系数均大于地径。在1~2年生闽楠优树家系中, J8优树家系苗高、地径均为最大值, 明显优于其他优树, 而Z11则生长最差。此外, J12, J7, J1, J2优树家系生长表现也较好。

表3 不同闽楠优树家系生长比较

Table 3 Comparison of growth of family from different *Phoebe bournei* plus trees

优树号	1年生闽楠幼苗		2年生闽楠幼苗	
	苗高/cm	地径/cm	苗高/cm	地径/cm
Z1	10.73 ± 1.55 bcde	0.23 ± 0.04 cdefgh	40.82 ± 11.48 abcd	4.17 ± 0.48 ab
Z2	8.97 ± 1.75 abc	0.21 ± 0.01 abcde	43.14 ± 10.78 abcde	3.88 ± 0.63 abc
Z3	9.80 ± 0.95 abcd	0.22 ± 0.02 bcdefgh	39.46 ± 12.11 abcde	3.89 ± 0.59 abcd
Z4	9.67 ± 0.74 abcd	0.25 ± 0.05 bcdefg	45.18 ± 13.83 bcde	4.24 ± 0.71 abcd
Z5	10.90 ± 1.21 bcde	0.24 ± 0.04cdefgh	44.05 ± 10.56 abcde	3.82 ± 0.65 abcd
Z6	7.73 ± 0.12 ab	0.21 ± 0.02 abcd	32.87 ± 14.59 a	3.54 ± 0.90 ab
Z7	7.70 ± 0.53 ab	0.22 ± 0.01 abc	42.02 ± 12.59 abc	4.35 ± 0.45 a
Z8	9.90 ± 0.78 abcd	0.23 ± 0.01 cdefgh	39.34 ± 10.48 abcd	4.31 ± 0.41 abcd
Z9	9.13 ± 1.16 abc	0.22 ± 0.02 abcdef	42.41 ± 11.08 abcde	4.86 ± 0.40 cd
Z10	9.87 ± 0.83 abcd	0.20 ± 0.01 cdefgh	45.78 ± 11.96 abcde	4.45 ± 0.45 abcd
Z11	6.23 ± 0.55 a	0.17 ± 0.02 a	29.28 ± 9.85 ab	3.92 ± 0.66 abc
J1	12.10 ± 2.41 cde	0.26 ± 0.05 efghi	49.55 ± 14.73 cde	4.78 ± 0.86 abc
J2	13.40 ± 1.11 de	0.24 ± 0.04 hi	49.44 ± 11.19 cde	4.73 ± 0.62 abcd
J3	11.73 ± 1.05 bcde	0.25 ± 0.01 efghi	47.05 ± 12.57 bcde	4.55 ± 0.68 bed
J4	10.93 ± 0.51 bcde	0.25 ± 0.03 cdefgh	48.32 ± 13.14 bcde	4.48 ± 0.77 abcd
J5	12.20 ± 0.50 cde	0.19 ± 0.03 efghi	32.37 ± 12.50 abc	3.50 ± 0.80 d
J6	11.03 ± 2.46 bcde	0.22 ± 0.02 defghi	39.12 ± 11.73 de	4.33 ± 0.69 abcd
J7	11.30 ± 1.73 bcde	0.22 ± 0.01 defghi	50.19 ± 9.70 abcde	4.60 ± 0.60 abcd
J8	14.47 ± 1.20 e	0.29 ± 0.01 l	56.35 ± 11.61 e	4.91 ± 0.78 e
J9	12.30 ± 0.70 cde	0.24 ± 0.02 fghi	43.01 ± 12.96 de	4.32 ± 0.91 abcd
J10	11.30 ± 0.78 bcde	0.21 ± 0.04 defghi	45.97 ± 11.25 de	4.47 ± 0.41 abcd
J11	6.33 ± 0.78 a	0.19 ± 0.02 ab	38.75 ± 10.68 abcde	4.04 ± 0.39 abcd
J12	14.57 ± 1.21 e	0.28 ± 0.02 l	52.37 ± 10.42 e	4.83 ± 0.80 e
J13	12.07 ± 2.48 cde	0.22 ± 0.01 efghi	46.04 ± 10.48 abcde	4.63 ± 0.62 bed
标准差	2.09	0.27	11.82	0.64
均值	10.52	0.23	42.91	4.34
变异系数%	19.87	12.39	27.55	14.75

说明: Z为福建政和优树, J为福建建瓯优树; 不同小写字母表示 Duncan's 新复极差检验达0.05显著水平。

3.2 不同闽楠优树生物量的比较

研究表明(表4): 24个闽楠优树2年生苗木生物量差异显著($P<0.05$), 变化幅度为5.985~27.965 g, 最大值为J8号优树, 比参试的24个家系平均生物量高75.1%; 其次是J12号优树, 比平均生物量高62.0%; 最小为Z11号优树, 比平均生物量低62.5%。其中, 茎的生物量最大, 占总生物量的52.6%, 变异系数为40.95%; 其次是叶的生物量, 占总生物量的36.6%, 变异系数为33.32%; 根的生物量最小, 占总生物量的16.8%, 变异系数为48.08%。此外, 福建建瓯优树家系生物量明显大于政和优树, 其生物量均值为政和优树的1.5倍。根冠比能反映植物生长状况及环境条件对地下部分和地上部分生长的影响。从表4中可以看出根冠比较大的优树有J11, J7, Z7, J1和J8, 但J11, J7和Z7优树的根、茎、叶生物量均较小, 虽然其根冠比较大, 但不宜作为闽楠优树选择的对象。而J1号和J8号不仅

苗期生物量高, 且根系发达。

表 4 不同闽楠优树家系 2 年生苗生物量比较

Table 4 Comparison of biomass of two-years family seedlings from different *Phoebe bournei* plus trees

优树号	叶		茎		根		根冠比	总干质量/g
	干质量/g	百分率/%	干质量/g	百分率/%	干质量/g	百分率/%		
Z1	3.5 ± 0.12 d	29.7	6.39 ± 0.25 f	54.2	1.86 ± 0.24 d	15.8	0.19 ± 0.03 de	11.80 ± 0.27 d
Z2	3.44 ± 0.20 d	37.9	4.42 ± 0.28 c	48.7	1.20 ± 0.13 b	13.2	0.15 ± 0.01 bc	9.07 ± 0.24 b
Z3	4.05 ± 0.32 f	32.6	6.39 ± 0.35 f	51.5	1.97 ± 0.06 e	15.9	0.19 ± 0.01 de	12.41 ± 0.23 e
Z4	4.76 ± 0.23 gh	30.1	8.35 ± 0.34 i	52.9	2.74 ± 0.41 j	17.3	0.21 ± 0.01 fg	15.80 ± 0.36 i
Z5	3.34 ± 0.56 d	24.7	7.86 ± 0.29 h	58.2	2.30 ± 0.27 h	17.0	0.21 ± 0.02 fg	13.51 ± 0.35 f
Z6	3.04 ± 0.36 c	28.6	5.40 ± 0.43 d	50.8	2.19 ± 34 g	20.6	0.25 ± 0.01 h	10.64 ± 0.36 c
Z7	1.22 ± 0.12 a	13.3	5.89 ± 0.42 e	64.0	2.08 ± 35 f	22.6	0.29 ± 0.03 k	9.20 ± 0.26 b
Z8	4.66 ± 0.35 gh	32.2	7.37 ± 0.30 g	51.0	2.41 ± 0.36 i	16.7	0.20 ± 0.01 ef	14.46 ± 0.42 h
Z9	4.56 ± 0.53 g	37.0	5.89 ± 0.42 e	47.8	1.86 ± 0.32 d	15.1	0.18 ± 0.01 a	12.32 ± 0.41 e
Z10	5.26 ± 0.36 j	46.5	5.40 ± 0.43 d	47.7	0.65 ± 0.12 a	5.7	0.06 ± 0.01 b	11.32 ± 0.30 c
Z11	2.73 ± 0.31 b	45.7	2.60 ± 0.13 a	43.5	0.65 ± 0.21 a	10.9	0.12 ± 0.02 h	5.98 ± 0.53 a
J1	7.01 ± 1.21 m	28.0	13.08 ± 0.24 n	52.2	4.98 ± 24 p	19.9	0.27 ± 0.05 h	25.08 ± 0.62 p
J2	6.04 ± 1.02 k	29.4	10.11 ± 0.46 j	49.3	4.38 ± 0.31 p	21.3	0.25 ± 0.06 cd	20.53 ± 0.56 l
J3	5.28 ± 0.42 j	28.1	10.70 ± 1.01 k	57.0	2.79 ± 0.28 j	14.7	0.17 ± 0.03 fg	18.78 ± 0.54 k
J4	5.39 ± 0.33 j	25.8	11.89 ± 0.43 m	56.9	3.58 ± 0.36 l	17.2	0.20 ± 0.01 k	20.88 ± 0.39 n
J5	4.63 ± 0.54 gh	34.1	7.13 ± 0.16 g	52.5	1.79 ± 0.41 c	13.2	0.15 ± 0.02 bc	13.57 ± 0.34 f
J6	3.88 ± 0.32 e	25.5	8.32 ± 0.37 i	54.7	2.98 ± 0.31 k	19.6	0.24 ± 0.04 gh	15.20 ± 0.38 h
J7	4.85 ± 0.35 j	28.3	8.63 ± 0.72 i	50.3	3.98 ± 0.41 m	23.2	0.29 ± 0.12 k	17.16 ± 0.41 j
J8	7.33 ± 0.26 n	26.2	14.87 ± 0.95 q	53.2	5.77 ± 0.69 q	20.6	0.26 ± 0.03 h	27.98 ± 0.52 w
J9	6.47 ± 0.15 l	30.0	11.30 ± 0.57 l	52.4	3.78 ± 0.67 m	17.5	0.21 ± 0.01 fg	21.56 ± 0.35 n
J10	5.07 ± 0.32 j	24.9	13.08 ± 0.53 n	64.3	2.19 ± 0.28 g	10.8	0.12 ± 0.01 b	20.35 ± 0.36 l
J11	2.91 ± 0.23 bc	37.1	3.15 ± 0.26 b	40.1	1.79 ± 0.41 c	22.8	0.30 ± 0.02 k	7.85 ± 0.28 b
J12	7.01 ± 0.31 m	32.0	11.89 ± 0.69 m	54.3	2.98 ± 0.33 k	13.6	0.16 ± 0.03 cd	21.90 ± 0.42 p
J13	7.03 ± 0.25 m	27.4	14.27 ± 0.35 p	55.6	4.38 ± 0.64 n	17.1	0.21 ± 0.02 f	25.69 ± 0.37 q
标准差	1.57		3.48		1.31			6.01
平均值	4.73	30.6	8.51	52.6	2.72	16.8	0.20	15.97
变异系数/%	33.32		40.94		48.08			37.60

说明: Z 为福建政和优树, J 为福建建瓯优树, 不同小写字母表示 Duncan's 新复极差检验达 5% 显著水平。

3.3 闽楠优树苗期光合、蒸腾特性比较

光合能力的强弱在相当程度上取决于物种的遗传特性^[15], 通过对优树光合特性的比较可以有效地判断优树的优良水平。从表 5 可看出, 24 个闽楠优树的叶片光合参数净光合速率(P_n), 蒸腾速率(T_r), 胞间二氧化碳摩尔分数(C_i)及水分利用率(W_{UE}), 光能利用(L_{UE})差异显著($P < 0.05$), 说明不同闽楠优树间的光合特性差异较大。其中 J8 优树 P_n 最大, 为 $5.122 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比参试的 24 个家系平均净光合速率高 41.5%; 其次是 J1 号优树, 为 $5.116 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比平均 P_n 高 41.3%; P_n 最小的是 Z8 优树, 为 $2.081 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, J8 和 J1 是具有较高光合生产潜力的闽楠优树, 因而其生长也快。而蒸腾速率 J1 和 J8 为最大, 分别为 $1.778 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.572 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 分别比平均值高 40.8% 和 24.5%; 不同闽楠优树苗木胞间二氧化碳摩尔分数变异较小, 变异系数为 2.92%, 最大值为 Z2 号优树, 最小值为 J9 号优树。24 个优树的水分利用率变化范围为 $2.224 \sim 3.703 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 变异系数为 13.76%, 最大的是 J12 号优树, 其次是 J8 号, 最小的为 Z10。光能利用率值的变化范围是 4.4%~12.3%, 最大值是 J8 号优树, 最小值是 Z5 号优树, 变异系数为 19.67%, 可见各优树之间的光能利用效率差异较大。总体上, 福建建瓯的水分利用效率和光能利用效率均优于福建政和, 其水分利用效率和光能利用效率均值分别比福建政和优树高 2.6% 和 21.0%。

表5 不同闽楠优树家系光合生理指标比较

Table 5 Comparison of physiological index for *Phoebe bournei* plus trees family

优树号	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳摩尔分 数/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水分利用率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光能利用/%
Z1	4.354 ± 1.191 efg	1.341 ± 0.326 abc	295.608 ± 7.028 de	3.234 ± 0.094 h	7.15 ± 0.368 efg
Z2	3.493 ± 0.586 abcdef	1.098 ± 0.179 abc	304.944 ± 9.268 f	3.146 ± 0.169 gh	7.15 ± 0.275 efg
Z3	2.712 ± 0.345 abcd	0.830 ± 0.098 ab	302.456 ± 12.319 f	3.228 ± 0.124 h	6.93 ± 0.085 defg
Z4	3.115 ± 0.232 abcde	1.005 ± 0.178 abc	282.666 ± 9.971 c	3.051 ± 0.297 defgh	5.49 ± 0.249 bc
Z5	2.601 ± 0.152 abc	0.834 ± 0.216 ab	214.111 ± 5.918 a	3.038 ± 0.298 defgh	4.36 ± 0.956 a
Z6	3.594 ± 0.835 bedef	1.143 ± 0.366 abc	293.742 ± 7.766 de	2.995 ± 0.118 cdefgh	5.27 ± 0.277 ab
Z7	4.184 ± 1.189 defg	1.453 ± 0.189 abc	269.611 ± 8.537 b	2.777 ± 0.356 cdefg	5.89 ± 0.169 bed
Z8	2.081 ± 0.831 a	0.715 ± 0.149 a	206.968 ± 9.522 a	2.878 ± 0.356 cdefgh	5.77 ± 0.239 bc
Z9	3.823 ± 0.892 bedef	1.554 ± 0.818 bc	274.611 ± 4.212 c	2.319 ± 0.085 ab	6.27 ± 0.120 bcde
Z10	3.009 ± 0.284 abcde	1.378 ± 0.960 abc	203.778 ± 3.187 a	2.224 ± 0.216 a	5.68 ± 0.881 bc
Z11	2.817 ± 0.774 abcd	1.197 ± 0.688 abc	258.611 ± 3.481 b	2.321 ± 0.173 ab	5.33 ± 0.195 ab
J1	5.116 ± 0.989 g	1.778 ± 0.377 c	301.222 ± 7.179 c	2.967 ± 0.408 cdefgh	6.01 ± 0.655 bed
J2	4.124 ± 0.561 defg	1.351 ± 0.783 abc	279.167 ± 8.514 c	3.019 ± 0.175 defgh	5.50 ± 0.544 bc
J3	3.872 ± 0.706 bedef	1.388 ± 0.283 abc	256.500 ± 9.844 b	2.702 ± 0.181 bedef	6.04 ± 0.245 bed
J4	4.414 ± 0.922 efg	1.414 ± 0.304 abc	250.722 ± 5.974 b	3.091 ± 0.087 efg	7.34 ± 0.254 fg
J5	4.761 ± 0.985 fg	1.829 ± 0.724 c	280.089 ± 7.536 c	2.595 ± 0.053 abc	6.46 ± 0.109 cdef
J6	4.309 ± 0.602 efg	1.386 ± 0.162 abc	278.278 ± 5.407 c	3.111 ± 0.093 fgh	5.94 ± 0.174 bed
J7	3.981 ± 0.901 cdefg	1.459 ± 0.389 abc	287.000 ± 7.939 d	2.673 ± 0.131 bede	5.28 ± 0.146 ab
J8	5.122 ± 0.743 g	1.572 ± 0.237 bc	299.444 ± 7.941 de	3.340 ± 0.218 h	12.31 ± 1.40 j
J9	3.015 ± 0.790 abcde	1.095 ± 0.372 ab	201.343 ± 9.673 a	2.643 ± 0.265 bed	5.28 ± 0.843 ab
J10	3.587 ± 0.734 bedef	1.269 ± 0.242 abc	273.889 ± 4.039 c	2.709 ± 0.249 bcde	7.96 ± 0.774 g
J11	2.462 ± 0.251 ab	1.434 ± 0.336 abc	294.500 ± 3.512 de	2.229 ± 0.217 a	10.61 ± 0.973 i
J12	3.272 ± 0.308 abcde	1.133 ± 0.277 abc	298.047 ± 6.757 c	3.703 ± 0.215 h	5.24 ± 0.289 ab
J13	4.350 ± 0.928 efg	1.104 ± 0.573 abc	299.056 ± 7.678 de	3.158 ± 0.099 gh	9.36 ± 0.588 h
平均值	3.612	1.263	269.431	2.881	6.61
变异系数/%	22.070	21.930	2.920	13.760	19.67

说明：Z为福建政和优树，J为福建建瓯优树；不同小写字母表示 Duncan's 新复极差测验达 0.05 显著水平。

3.4 不同闽楠优树家系苗期表现综合评价

对不同闽楠优树家系苗期表现进行综合评价的结果表明(表6)：24个闽楠优树家系苗期生长及生理表现最优的为J8号，其次为J1，J13，J12和J4，其平均苗高、地径分别为50.53 cm，0.47 cm。分别比本次参试24个家系平均苗高(42.91 cm)高17.7%，比平均地径(0.43 cm)高8.9%。综合评价最差的闽楠优树家系为Z11。24个闽楠优树家系的优良程度由高到低的顺序依次为：J8>J1>J13>J12>J4>J2>Z1>J3>J5>J6>J10>J7>J9>Z4>Z9>Z2>Z3>Z7>Z5>Z6>Z10>Z8>J11>Z11。按20.0%的入选率，筛选出J8，J1，J13，J12，J4等5个优树作为良种繁育的最佳优树。

4 结论与讨论

24个福建闽楠优树家系1~2年生苗苗高、地径和生物量差异显著，其2年生苗高、地径和生物量的变异系数高达27.55%，14.75%和37.60%，这与吴际友等^[16]对湖南17个闽楠优树子代苗期生长表现研究的结论相似。说明闽楠家系间良种选育空间和潜力很大，针对闽楠家系开展种源选择是十分必要的。24个闽楠优树家系间的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和光能利用效率均表现出明显差异，变异系数分别为6.07%，21.93%，18.72%和24.92%。说明闽楠家系间光合能力、生理状态的差异是客观存在的，因此，光合生理指标作为闽楠优树子代家系早期选育指标具有可行性。前人^[18]对紫葳科 Bignoniaceae 滇楸 *Catalpa fargesii*^[17]和杜英科 Elaeocarpaceae 仿栎 *Sloanea hemsleyana* 等的研究也得出类

表 6 不同闽楠优树家系苗期综合评价值

Table 6 Comprehensive assessment result of *Phoebe bournei* plus trees family in seeding stage

优树号	苗高	地径	生物量	光合速率	蒸腾速率	光能利用效率	水分利用效率	综合评价	次位
Z1	0.721	0.500	0.272	0.720	0.562	0.351	0.683	0.526	7
Z2	0.439	0.333	0.163	0.448	0.344	0.351	0.624	0.383	16
Z3	0.572	0.417	0.368	0.200	0.103	0.323	0.679	0.378	17
Z4	0.551	0.667	0.601	0.328	0.261	0.142	0.559	0.422	14
Z5	0.748	0.583	0.362	0.165	0.107	0.000	0.551	0.329	19
Z6	0.240	0.333	0.300	0.480	0.420	0.114	0.521	0.329	20
Z7	0.236	0.417	0.016	0.667	0.662	0.192	0.374	0.366	18
Z8	0.588	0.500	0.514	0.000	0.000	0.177	0.442	0.308	22
Z9	0.465	0.417	0.397	0.552	0.843	0.240	0.064	0.406	15
Z10	0.583	0.250	0.410	0.294	0.595	0.166	0.000	0.312	21
Z11	0.000	0.000	0.177	0.233	0.433	0.122	0.066	0.147	24
J1	0.941	0.750	0.852	1.000	0.954	0.208	0.502	0.700	2
J2	0.949	0.583	0.674	0.648	0.571	0.143	0.538	0.551	6
J3	0.881	0.667	0.486	0.568	0.604	0.211	0.323	0.503	8
J4	0.753	0.667	0.651	0.739	0.627	0.375	0.586	0.608	5
J5	0.957	0.167	0.204	0.849	1.000	0.264	0.251	0.499	9
J6	0.769	0.417	0.282	0.706	0.602	0.199	0.600	0.483	10
J7	0.813	0.417	0.499	0.602	0.668	0.116	0.304	0.456	12
J8	1.000	1.000	1.000	0.869	0.231	1.000	0.755	0.848	1
J9	0.973	0.583	0.682	0.296	0.341	0.116	0.283	0.437	13
J10	0.813	0.333	0.497	0.477	0.497	0.453	0.328	0.480	11
J11	0.016	0.167	0.000	0.121	0.645	0.786	0.003	0.285	23
J12	0.937	0.917	0.869	0.377	0.375	0.111	1.000	0.617	4
J13	0.936	0.417	0.842	0.719	0.349	0.629	0.632	0.648	3
权重	0.12	0.12	0.15	0.13	0.13	0.21	0.14		

似的结论。

关于优树的选择大多主要考虑生长性状, 仅有少数作者将光合生理指标作为优树子代家系早期选育指标^[19-20]。本研究综合考虑了闽楠家系生长性状和生理特征, 丰富了闽楠优树选择的内容, 避免单一考虑生长性状选择优良家系的局限性。通过对 24 个闽楠优树家系各生长、生理指标进行综合评价, 按 20% 的入选率, 选择出 5 个苗期生长、生理都表现优良的闽楠优树, 即 J8, J1, J13, J12 和 J4。

对一个物种进行种质资源选择的依据是种内遗传多样, 而种内遗传多样性为物种群体间和群体内个体间遗传变异的总和, 包括表型、生化、染色体、蛋白质、DNA 和碱基序列等多层次的遗传变异^[21]。其中, 表型是各种形态特征的组合, 是生物遗传变异的表征, 对于缺少研究基础的物种, 通过对其表型性状遗传差异的研究, 能够快速揭示该物种的遗传变异概况^[22]。物种的表型性状是基因型与环境互作的结果, 不同的表型可能是基因型不同造成的, 也可能是环境不同造成的, 表型受环境影响, 基因型和环境对表型的贡献大小未能分割, 因而造成选择准确性不高, 选择效率低^[23]。因此, 本研究仅通过对闽楠优树的表型和部分生理指标进行早期选择是不够的, 今后应在此基础上, 开展 DNA 分子标记技术进行辅助选择, 提高选择的精确度。此外, 本研究仅为苗期阶段的初步选择, 苗期各家系各性状尚不稳定, 其生长及生理表现不能代表整个树体的生长过程, 只能为闽楠优良家系选育的早期选择提供参考。今后可利用这 5 个优良家系在贵州开展进一步的造林对比试验, 以最终确定优良家系, 并在适宜地区推广应用。

5 参考文献

- [1] 李锡文. 中国植物志: 第 31 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 112 - 113.

- [2] 李栋林, 金雅琴, 向其柏. 我国楠木属植物资源的地理分布、研究现状和开发利用前景[J]. 福建林业科技, 2004, **31**(1): 6 - 9.
LI Donglin, JIN Yaqin, XIANG Qibai. The geographical distribution, research status and developmental utilization prospect of *Phoebe* Nees plant resource of our country [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2004, **31**(1): 6 - 9.
- [3] 唐小燕, 袁位高, 沈爱华, 等. 闽楠容器苗各器官生物量的分配格局及水分特征研究[J]. 植物研究, 2012, **32**(1): 99 - 104.
TANG Xiaoyan, YUAN Weigao, SHEN Aihua, *et al.* Biomass allocation pattern and water characteristics of each component of *Phoebe bournei* container seedling [J]. *Bull Bot Res*, 2012, **32**(1): 99 - 104.
- [4] 刘仁林, 裘利洪, 施建敏, 等. 马头山自然保护区种子植物区系研究(I)科的区系分析[J]. 江西农业大学学报, 2005, **27**(3): 361 - 367.
LIU Renlin, QIU Lihong, SHI Jianmin, *et al.* A study on the flora of spermatophyte in the Nature Reserve of Matou Mountain(I) flora of family [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2005, **27**(3): 361 - 367.
- [5] 陈存及, 刘宝, 李生, 等. 闽楠人工林的经营效果[J]. 福建林学院学报, 2007, **27**(2): 101 - 104.
CHEN Cunji, LIU Bao, LI Sheng, *et al.* Management effect of artificial forest of *Phoebe bournie* in Fujian [J]. *J Fujian Coll For*, 2007, **27**(2): 101 - 104.
- [6] 申展, 李铁华, 文仕知, 等. 不同因素对闽楠嫩枝扦插生根的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(1): 63 - 67.
SHEN Zhan, LI Tiehua, WEN Shizhi, *et al.* Effects of different factors on cutting rooting of *Phoebe bournei* twigs [J]. *J Cent South Univ For & Technol*, 2013, **33**(1): 63 - 67.
- [7] 李生文. 闽楠不同培育模式的综合评价[J]. 江西农业大学学报, 2003, **25**(S1): 101 - 103.
LI Shengwen. Comprehensive evaluations of various afforestation patterns *Phoerbe bournei* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2003, **25**(S1): 101 - 103.
- [8] 王艺, 王秀花, 张丽珍. 等. 不同栽培基质对浙江楠和闽楠容器苗生长和根系发育的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, **22**(3): 81 - 87.
WANG Yi, WANG Xiuhua, ZHANG Lizhen. *et al.* Effects of different cultivation substrates on growth and root system development of container seedlings of *Phoebe chekiangensis* and *P. bournei* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2013, **22**(3): 81 - 87.
- [9] 江香梅, 肖复明, 叶金山, 等. 闽楠种源苗期生长性状地理变异及遗传参数估算[J]. 江西农业大学学报, 2008, **30**(4): 666 - 670.
JIANG Xiangmei, XIAO Fuming, YE Jinshan, *et al.* Geographic variation and estimation of genetic parameters of seed and growth traits in *Phoebe bournei* provenance at seedling stage [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2008, **30**(4): 666 - 670.
- [10] 江香梅, 温强, 叶金山, 等. 闽楠天然种群遗传多样性的 RAPD 分析[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 439 - 444.
JIANG Xiangmei, WEN Qiang, YE Jinshan, *et al.* RAPD analysis on genetic diversity in eight natural populations of *Phoebe bournei* from Fujian and Jiangxi Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(1): 439 - 444.
- [11] 欧建德. 闽楠优良家系和单株的早期综合选择研究[J]. 西南林业大学学报, 2015, **35**(1): 34 - 37.
OU Jiande. Combination selection of excellent families and plus trees of *Phoebe bournei* [J]. *J Southwest For Univ*, 2015, **35**(1): 34 - 37.
- [12] 黄秀美. 闽楠优树子代测定及早期选择研究[J]. 山地农业生物学报, 2013, **32**(4): 344 - 348.
HUANG Xiumei. Progeny test of plus trees and early selection of *Phoebe bournei* [J]. *J Mount Agric Biol*, 2013, **32**(4): 344 - 348.
- [13] 巩合德, 燕腾, 彭一航, 等. 哀牢山多花山矾幼苗在森林及模拟森林光环境条件下的生长特征[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(2): 237 - 243.
GONG Hede, YAN Teng, PENG Yihang, *et al.* Seedling growth of *Symplocos ramosissima* with manually controlled experimental conditions in the Ailaoshan Mountains, Yunnan Province [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(2): 237 - 243.
- [14] 李小俊, 张明如, 张利阳, 等. 太行山低山丘陵区 5 种木本植物光合特性的比较[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(2): 180 - 186.
LI Xiaojun, ZHANG Mingru, ZHANG Liyang, *et al.* Photosynthesis, light-use efficiency and water-use efficiency for

- woody species in the hilly area of the Taihang Mountains [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(2): 180 – 186.
- [15] 何文兴, 易津, 李洪梅. 根茎禾草乳熟期净光合速率日变化的比较研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(2): 205 – 209.
- HE Wenxing, YI Jin, LI Hongmei. Comparative study on daily change of photosynthesis rate of the rhizomatous grasses in milky ripe stage [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(2): 205 – 209.
- [16] WU Jiyou, CHEN Minggao, TANG Aiming, et al. Growth performance of *Phoebe bournei* generations in seedling stage [J]. *Agric Sci & Technol*, 2014, **15**(7): 1188 – 1190, 1199.
- [17] 黄国伟, 陈慧玲, 包一鸣, 等. 滇楸幼苗无性系光合特性的比较[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(1): 20 – 23, 66.
- HUANG Guowei, CHEN Huiling, BAO Yiming, et al. Photosynthetic characteristics of five *Catalpa duclouxii* seedling clones [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(1): 20 – 23, 66.
- [18] 李志辉, 欧日明, 王佩兰. 6个仿栗家系光合特性的比较[J]. 中南林业大学学报, 2014, **34**(9): 2 – 5.
- LI Zhihui, OU Riming, WANG Peilan. Comparative study on six families of *Sloanea hemsleyana* based on photosynthesis characteristics [J]. *J Cent South Univ For & Technol*, 2014, **34**(9): 2 – 5.
- [19] 周永斌, 马学文, 姚鹏, 等. 不同生长速度杨树品种的光合生理特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, **38**(3): 336 – 339.
- ZHOU Yongbin, MA Xuewen, YAO Peng, et al. Physiological characteristics of photosynthesis in different poplar varieties [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2007, **38**(3): 336 – 339.
- [20] 江锡兵, 宋跃朋, 马开峰, 等. 杨树杂种无性系生长与光合生理遗传变异研究[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(9): 1779 – 1785.
- JIANG Xibing, SONG Yuepeng, MA Kaifeng, et al. Genetic variation of growth traits and photosynthetic physiology of *Populus* hybrid clones [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2011, **31**(9): 1779 – 1785.
- [21] 李文英, 顾万春. 蒙古栎天然群体表型多样性研究[J]. 林业科学, 2005, **41**(1): 49 – 56.
- LI Wenying, GU Wanchun. Study on phenotypic diversity of natural population in *Quercus mongolica* [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(1): 49 – 56.
- [22] 何承忠, 张晏, 段安安, 等. 滇杨优树无性系苗期叶片性状变异分析[J]. 西北林学院学报, 2009, **24**(6): 28 – 32.
- HE Chengzhong, ZHANG Yan, DUAN An'an, et al. Variation analysis on leaf traits in seedling duration of *Populus yunnanensis* plus tree clones [J]. *J Northwest For Univ*, 2009, **24**(6): 28 – 32.
- [23] 刘忠松, 罗赫荣. 现代植物育种学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 284 – 291.