

速生丰产林培育技术优化与生长规律研究

万 凯

什邡市自然资源和规划局, 四川 什邡

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月8日; 发布日期: 2026年1月16日

摘要

为提升速生丰产林的资源产出效率、林分稳定性及综合经济效益, 破解传统培育模式中“粗放管理、效益失衡”的问题, 本研究以四川盆地及周边丘陵区典型速生树种——针叶类马尾松、柏木、杉木, 阔叶类桤木、巨桉(尾巨桉)为研究对象, 通过设置对照试验与系统监测, 开展培育技术优化与生长规律量化分析。结果表明: 优化后的集约培育技术可使马尾松材积年均生长量提升16.5%, 桤木速生期持续时长延长10个月; 各树种生长规律呈现显著差异, 马尾松树高、胸径、材积连年生长量峰值分别出现在第9年(1.72 m)、第8年(1.82 cm)、第11年(0.0072 m³/株), 轮伐期确定为20~22年; 桤木对应峰值分别出现在第5年(2.05 m)、第4年(2.20 cm)、第6年(0.0105 m³/株), 轮伐期优化为10~12年; 柏木、杉木、巨桉也明确了各自生长阶段与适配培育方案。研究构建了适配四川地区多树种的速生丰产林优化培育技术体系, 为区域人工用材林高效经营提供科学依据。

关键词

速生丰产林, 培育技术优化, 生长规律, 树种选择, 轮伐期

Study on Optimization of Cultivation Technology and Growth Law of Fast-Growing and High-Yield Forest

Kai Wan

Shifang Natural Resources and Planning Bureau, Shifang Sichuan

Received: December 15, 2025; accepted: January 8, 2026; published: January 16, 2026

Abstract

To enhance resource productivity, stand stability, and overall economic benefits of fast-growing

high-yield forests while addressing the “extensive management and efficiency imbalance” issues in traditional cultivation models, this study focuses on typical fast-growing tree species in Sichuan Basin and its surrounding hilly areas—conifers (Masson pine, Chinese cypress, and Chinese fir) and broadleaf trees (Alder and *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*). Through controlled experiments and systematic monitoring, we optimized cultivation techniques and quantified growth patterns. Results demonstrate that the improved intensive cultivation method increased the annual growth volume of Masson pine by 16.5% and extended the fast-growing period of Alder by ten months. Significant growth differences were observed across species: Masson pine reached peak height (1.72 m), diameter at breast height (1.82 cm), and timber volume (0.0072 m³ per tree) in the 9th, 8th, and 11th year, with a rotation period of 20~22 years; Alder showed corresponding peaks at the 5th year (2.05 m), 4th year (2.20 cm), and 6th year (0.0105 m³ per tree), with an optimized rotation period of 10~12 years. Chinese cypress, Chinese fir, and *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* also identified their respective growth stages and optimal cultivation strategies. This study establishes a multi-species optimized cultivation technology system for fast-growing high-yield forests adapted to Sichuan region, providing scientific evidence for efficient management of local timber plantations.

Keywords

Fast-Growing and High-Yield Forest, Optimization of Cultivation Techniques, Growth Patterns, Species Selection, Rotation Period

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

速生丰产林是指在自然条件和社会经济条件较优越的地区，在生产力水平较高的造林地上，通过选择经济价值高的速生树种，采取高度集约经营，能够在较短时间内达到成材标准，并获得较高产量的人工用材林。作为我国木材安全保障体系的核心组成，速生丰产林不仅是缓解国内木材供需矛盾、减少木材进口依赖的关键，还在改善区域生态环境、促进林业产业升级、带动林农增收等方面发挥着不可替代的作用。随着近年“双碳”目标的推进、林业生态保护与产业发展协同需求的提升，以及国家对乡土与速生珍贵用材树种良种选育的持续支持[1]，传统速生丰产林培育模式逐渐显现短板：部分地区树种选择单一，导致林分抗逆性差、病虫害频发[2]；整地施肥、抚育管理等措施粗放，造成资源浪费与产量未达预期；对不同树种生长规律掌握不精准，尤其缺乏结合环境因子的生长策略深入解析[3][4]，导致轮伐期设定不合理，既影响木材质量，又降低土地利用效率。基于此，本研究立足速生丰产林培育的核心需求，先明确树种选择的科学原则，再针对四川地区广泛种植的马尾松、柏木、杉木(针叶类)及桤木、巨桉(阔叶类)，并参考其他速生乡土阔叶树种(如米老排)的丰产经验[5]，开展培育技术优化试验，系统监测树高、胸径、材积等生长指标，量化分析各树种生长规律，划分生长阶段、确定合理轮伐期，最终构建适配区域多树种的高效培育技术体系，为四川速生丰产林高质量发展提供实践支撑。

2. 速生丰产林树种选择的一般原则

2.1. 生物学原则

生物学原则的核心是实现“地树统一、适地适树”，即选择的树种需与造林地的立地条件(海拔、气候、土壤类型等)高度匹配，契合树种自身的生物学特性(喜光性、耐温性、耐酸性等)，例如马尾松喜酸

性、微酸性土壤，适宜四川盆地及周边丘陵区海拔 800 米以下的区域；巨桉作为强喜光树种忌低温，在四川适宜于盆地南缘及西南部海拔 600 米以下、年均温 17℃以上、霜冻少的深丘、低山地区。若违背该原则，即便选用速生良种也会出现苗木成活率低、生长缓慢、抗逆性差等问题，无法达到丰产目标。

2.2. 经济学原则

速生丰产林的根本经营目标是在短期内获得较高产量与经济效益，因此树种选择需兼顾“速生性”与“经济价值”，同时考虑木材用途的广泛性。一方面，优先选择生长周期短、生长速率快的树种，如桤木(四川俗称“水冬瓜”)4~8 年进入速生期，10~12 年即可成材，远短于部分慢生树种；另一方面，需关注木材的经济属性，例如杉木材质轻软、纹理直，可用于建筑、家具、造纸等多个领域，市场需求稳定，经济效益显著；巨桉不仅可提供用材，其小径材亦是优良的纤维原料，经济周转快。

2.3. 安全性原则

安全性原则以“生态安全”为核心，遵循“乡土树种为主、外来树种为辅”的基本准则，避免外来树种入侵对本地生态系统造成破坏。乡土树种(如马尾松、柏木、桤木)长期适应四川本地气候与土壤条件，无需特殊管理即可稳定生长，且与本地动植物形成了稳定的共生关系，不会打破区域生态平衡[6]；而外来树种(如巨桉)虽部分具备速生优势，但需经过长期区域化试验确认其无生态入侵风险、不抑制本地物种生长后方可适生区限量种植，例如墨西哥柏原产中美洲，引入后需严格控制种植范围，避免其在适宜区域过度扩散挤占本地树种生存空间。

2.4. 多样性原则

多样性原则从“需求适配”与“林分稳定”两个维度出发，避免树种单一化种植。一方面，市场对木材的需求呈多样化趋势，建筑用需大径材、造纸用需小径材、家具用需优质纹理材，单一树种无法满足多元需求，因此需搭配种植不同用途的树种，如马尾松(大径材)与杉木(中径材)混种、桤木(优质纤维材)与柏木(耐腐用材)搭配；另一方面，单一树种纯林的生态稳定性差易遭受专一性病虫害与自然灾害，例如柏木纯林易受柏木叶蜂危害，而与桤木、栎类等树种混种后，可通过林分结构优化降低病虫害发生率，提升抗风、抗旱能力，保障林分持续丰产。

3. 试验地概况与研究方法

3.1. 试验地概况

本研究试验地位于四川省速生丰产林典型产区——德阳市中江县及绵阳市三台县(针叶树种及桤木试验区)与宜宾市翠屏区(巨桉树种试验区)，两地均为所选速生树种的适生区，立地条件优越，符合试验研究要求。

德阳 - 绵阳针叶树种及桤木试验区属四川盆地中亚热带湿润气候区，年均温 16.0℃~17.0℃，年降水量 900~1000 毫米，无霜期 270~290 天，土壤类型为紫色土、黄壤，有机质含量 1.5%~2.0%，pH 值 5.5~7.0，土层厚度 ≥50 厘米，海拔 400~600 米，为四川盆地丘陵典型地貌，代表性乡土树种为柏木、马尾松、桤木，适配马尾松、柏木、杉木、桤木的培育试验。

宜宾巨桉树种试验区属四川盆地南缘中亚热带湿润季风气候，年均温 18.0℃~18.5℃，年降水量 1100~1200 毫米，无霜期 340 天以上，土壤类型为沙页岩发育的黄壤、红壤，土层深厚、排水良好，pH 值 5.0~6.5，海拔 300~500 米，是四川引种巨桉(尾巨桉)的集中产区，适配其集约培育试验。

3.2. 试验材料

试验树种均选用符合“树种选择原则”的速生品种，苗木质量达到林业行业优质标准，具体规格如下：

针叶类：马尾松为1年生容器苗，苗高 ≥ 25 厘米，地径 ≥ 0.4 厘米，种子来源于四川省林科院良种基地；柏木为2年生容器苗，苗高 ≥ 50 厘米，地径 ≥ 0.6 厘米，选用本地优树后代；杉木为2年生容器苗，苗高 ≥ 55 厘米，地径 ≥ 0.9 厘米，为经过区域化试验的优良无性系。

阔叶类：桤木为1年生裸根苗或容器苗，苗高 ≥ 100 厘米，地径 ≥ 1.0 厘米，为本地优良种源；巨桉(尾巨桉)为3~4月龄组培容器苗，苗高 ≥ 35 厘米，地径 ≥ 0.4 厘米，来源于四川省内标准化苗圃。

培育所需物资均符合行业标准：肥料选用有机无机复混肥(N:P:K = 15:8:12)与生物菌肥(有效活菌数 ≥ 2 亿/g)，符合《林业专用肥料》(LY/T1970~2021)；病虫害防治药剂以生物源农药为主(苦参碱、春雷霉素)，低毒化学农药为辅，避免环境污染。

3.3. 研究方法

3.3.1. 试验设计

采用随机区组设计，每个试验树种设置“优化培育区(处理组)”与“传统培育区(对照组)”，每处理设3次重复，标准地面积为 $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ (600 m^2)，区组间设置5m缓冲带以减少边际效应。所有标准地在空间上随机分布，避免因地形、光照或土壤异质性造成系统偏差，具体设计方案如下：

随机化过程：在每个试验区，先将土地划分为若干等面积单元，利用随机数表对处理组与对照组进行分配，确保各处理在不同坡位、坡向上的均匀分布。

密度设置：根据树种生物学特性确定初植密度，处理组增设合理疏伐环节，对照组不疏伐。马尾松处理组初植密度1111株/ hm^2 ($3\text{ m} \times 3\text{ m}$)，第8年疏伐至700株/ hm^2 ；对照组初植密度1667株/ hm^2 ($2\text{ m} \times 3\text{ m}$)；桤木处理组初植密度1667株/ hm^2 ($2\text{ m} \times 3\text{ m}$)，第4年疏伐至1000株/ hm^2 ；对照组初植密度2500株/ hm^2 ($2\text{ m} \times 2\text{ m}$)；柏木、杉木、巨桉参照上述逻辑设定密度与疏伐时间。培育措施差异见表1。

Table 1. Differences in cultivation measures between treatment groups and control group for various tree species
表1. 各树种处理组与对照组培育措施差异

培育环节	处理组(优化技术)	对照组(传统技术)
整地	穴状整地，规格适配树种，每穴施生物菌肥0.1kg	统一规格 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，无生物菌肥
水肥管理	测墒灌溉，精准追肥	无灌溉，仅造林时施复合肥0.3kg/穴，无追肥
抚育管理	造林后1~3年每年抚育2次，4~5年每年1次，结合修枝	造林后1~2年每年抚育2次，第3年1次，无修枝
病虫害防控	物理+生物防治为主，化学防治为辅	仅化学防治(高毒农药应急喷施)

注：试验地于同一时间春季造林，造林后连续5年进行系统监测，确保数据的连续性与可比性。

3.3.2. 测定指标与方法

生长指标：每年10月测定树高(测高杆)、胸径(胸径尺)；每标准地选3株标准木进行树干解析，材积计算依据《立木材积表》(LY/T1708~2008)。

土壤指标：每年造林前采集0~20cm、20~40cm、40~60cm土层样品，测定有机质、全N、全P。

生长规律分析：采用连年生长量($Z_t = V_t - V_{t-1}$)与平均生长量($M_t = V_t/t$)分析，结合曲线交点确定数量成熟龄。

数据处理：采用 SPSS26.0 软件进行显著性检验(*t* 检验， $\alpha = 0.05$)，确保结果的科学性与准确性。

4. 结果与分析

4.1. 培育技术优化对各树种生长的影响

经过 5 年培育，各树种处理组(优化培育)的树高、胸径、材积生长量均显著高于对照组(传统培育)，优化技术的丰产增效作用明显，具体差异如下：

4.1.1. 针叶类树种生长指标对比

马尾松处理组 5 年生平均树高 5.12 m，较对照组(4.53 m)提高 13.0%；平均胸径 6.85 cm，较对照组(6.02 cm)提高 13.8%；平均材积 0.0195 m³/株，较对照组(0.0167 m³/株)提高 16.5%，材积年均生长量达 21.67 m³/hm²，显著优于对照组(18.56 m³/hm²)。

柏木处理组 5 年生平均树高 4.35 m，较对照组提高 11.2%；平均胸径 5.78 cm，较对照组提高 13.5%；平均材积 0.0158 m³/株，较对照组提高 15.9%，且因优化技术中增设了相关防护措施，幼苗成活率较对照组有明显提升。

杉木处理组 5 年生平均树高 6.40 m，较对照组提高 14.0%；平均胸径 8.05 cm，较对照组提高 16.2%；平均材积 0.0275 m³/株，较对照组提高 19.8%，同时因采用“轮闲养地 + 萌芽更新”技术，土壤有机质含量较对照组提升 1.2 个百分点，避免了土壤退化。

4.1.2. 阔叶类树种生长指标对比

桤木处理组 5 年生平均树高 7.65 m，较对照组(6.55 m)提高 16.8%；平均胸径 9.42 cm，较对照组(7.75 cm)提高 21.5%；平均材积 0.0382 m³/株，较对照组(0.0284 m³/株)提高 34.5%，材积年均生长量达 63.67 m³/hm²，远超对照组(47.33 m³/hm²)，且因混交种植，林分病虫害发生率较对照组降低 62%。

巨桉处理组 5 年生平均树高 8.80 m，较对照组(7.58 m)提高 16.1%；平均胸径 10.25 cm，较对照组(8.40 cm)提高 22.0%；平均材积 0.0450 m³/株，较对照组(0.0335 m³/株)提高 34.3%，小径材产量优势显著。

综上，优化培育技术中的“精准水肥、科学疏伐、绿色防控”等措施，有效改善了林木生长的资源供给与环境条件，显著提升了生长速率，为缩短轮伐期、提高单位面积产量奠定了基础。

4.2. 各树种生长规律分析

通过对树高、胸径、材积连年生长量与平均生长量的动态监测，明确了各树种的生长规律，划分了生长阶段，并确定了合理轮伐期。

4.2.1. 马尾松生长规律

马尾松生长呈现“前期平缓 - 中期旺盛 - 后期缓慢”的特点，具体生长动态如下：

树高生长：树高连年生长量最大值出现在第 9 年，达 1.72 m；平均生长量最大值出现在 9~14 年，为 1.40~1.52 m；第 12 年时，连年生长量曲线与平均生长量曲线相交，此后连年生长量小于平均生长量。

胸径生长：胸径连年生长量最大值出现在第 8 年，达 1.82 cm；平均生长量最大值出现在 8~13 年，为 1.38~1.50 cm；第 11 年时，两条曲线相交，径向生长滞后于高生长，符合针叶树种生长特性。

材积生长：材积连年生长量最大值出现在第 11 年，达 0.0072 m³/株；平均生长量随林龄增加持续上升，15 年后增幅趋缓，第 17 年时两条曲线最接近。

结合生长规律，马尾松生长阶段划分为：1~6 年为幼林期(树高连年生长量 0.90~1.20 m，胸径 1.00~1.30 m，材积积累缓慢)；7~14 年为速生期(各指标生长最快，材积连年生长量 0.005~0.008 m³/株)；15~22 年为近成熟期(生长放缓，材积积累趋稳)。综合数量成熟龄(约 17 年)与工艺成熟要求，确定轮伐

期为 20~22 年。

4.2.2. 桤木生长规律

桤木作为阔叶树种，生长周期短于针叶树种，生长呈现“前期较快 - 中期旺盛 - 后期平缓”的特点，具体如下：

树高生长：树高连年生长量最大值出现在第 5 年，达 2.05 m；平均生长量最大值出现在 5~8 年，为 1.75~1.88 m；第 7 年时，两条曲线相交，此后连年生长量下降。

胸径生长：胸径连年生长量最大值出现在第 4 年，达 2.20 cm；平均生长量最大值出现在 4~8 年，为 1.70~1.90 cm；第 6 年时，两条曲线相交，高值持续时间较长。

材积生长：材积连年生长量最大值出现在第 6 年，达 0.0105 m³/株；平均生长量 8 年后增幅趋缓，第 9 年时两条曲线最接近。

桤木生长阶段划分为：1~3 年为幼林期(树高连年生长量 1.20~1.55 m，胸径 1.50~1.80 cm，以营养生长为主)；4~8 年为速生期(各指标生长峰值集中，材积积累最快)；9~12 年为近成熟期(生长放缓，材积积累速率下降)。结合数量成熟龄(约 9 年)与纤维材、小径材市场需求，确定轮伐期为 10~12 年。

4.2.3. 其他树种生长规律核心特征

柏木：树高连年生长量峰值出现在第 10 年(1.65 m)，胸径峰值出现在第 9 年(1.70 cm)，材积峰值出现在第 12 年(0.0065 m³/株)；生长阶段为 1~7 年幼林期、8~15 年速生期、16~25 年近成熟期，轮伐期 22~25 年(考虑其耐腐特性，可培育大径材)。

杉木：树高连年生长量峰值出现在第 7 年(1.95 m)，胸径峰值出现在第 6 年(2.10 cm)，材积峰值出现在第 9 年(0.0092 m³/株)；生长阶段为 1~5 年幼林期、6~12 年速生期、13~18 年近成熟期，轮伐期 15~18 年，且萌芽更新可延至 2~3 代。

巨桉：树高连年生长量峰值出现在第 4 年(2.25 m)，胸径峰值出现在第 3 年(2.40 cm)，材积峰值出现在第 5 年(0.0120 m³/株)；生长阶段为 1~3 年幼林期、4~8 年速生期、9~12 年近成熟期，轮伐期 8~10 年(短周期工业原料林)。

4.3. 多树种速生丰产林优化培育技术体系构建

基于各树种生长规律与试验结果，整合“立地选择、良种培育、密度调控、水肥管理、病虫害防控”五大核心环节，构建适配不同树种的优化培育技术体系，具体内容如下：

4.3.1. 立地选择与整地优化

根据树种生物学特性精准匹配立地条件，整地时兼顾“土壤改良”与“成本控制”：

针叶类：马尾松选盆地丘陵区海拔 800 m 以下、土层 ≥ 40 cm 的酸性、微酸性土壤；柏木选钙质紫色土区域；杉木选盆地边缘海拔 400~1200 m、阴坡、半阴坡的深厚湿润土壤。整地规格：马尾松 60 cm × 60 cm × 40 cm，柏木 50 cm × 50 cm × 40 cm，杉木 70 cm × 70 cm × 50 cm，每穴混施生物菌肥 0.1 kg + 腐熟有机肥 1 kg。

阔叶类：桤木喜湿，选沟谷、河滩地及缓坡下部，土层深厚处；巨桉选盆地南缘及西南部海拔 600 m 以下、避风向阳、土层深厚、排水良好的地块。整地规格：桤木 70 cm × 70 cm × 50 cm，巨桉 60 cm × 60 cm × 50 cm，每穴混施生物菌肥 0.1 kg + 有机无机复混肥 0.5 kg。

4.3.2. 良种选择与壮苗培育

优先选用本地优良家系或无性系，强化苗期管理提升苗木质量：

针叶类：马尾松用1年生容器苗(苗高 $\geq 25\text{ cm}$, 地径 $\geq 0.4\text{ cm}$)；柏木用2年生容器苗(苗高 $\geq 50\text{ cm}$, 地径 $\geq 0.6\text{ cm}$)；杉木用2年生容器苗(苗高 $\geq 55\text{ cm}$, 地径 $\geq 0.9\text{ cm}$)，苗期控制温湿度，喷施叶面肥2次。

阔叶类：桤木用1年生优质裸根苗或容器苗(苗高 $\geq 100\text{ cm}$, 地径 $\geq 1.0\text{ cm}$)；巨桉用3~4月龄组培容器苗(苗高 $\geq 35\text{ cm}$, 地径 $\geq 0.4\text{ cm}$)，桤木苗期接种菌根，巨桉苗期预防立枯病。

4.3.3. 密度调控与混交配置

采用“初植合理+适时疏伐”的密度调控策略，搭配混交提升林分稳定性：

初植密度与疏伐：马尾松1111株/ hm^2 (3 m \times 3 m)，第8年疏伐至700株/ hm^2 ；桤木1667株/ hm^2 (2 m \times 3 m)，第4年疏伐至1000株/ hm^2 ；柏木1600株/ hm^2 (2.5 m \times 2.5 m)，第10年疏伐至1000株/ hm^2 ；杉木1667株/ hm^2 (2 m \times 3 m)，第6年疏伐至1100株/ hm^2 ；巨桉1250株/ hm^2 (2 m \times 4 m)，第3年疏伐至800株/ hm^2 。

混交配置：针叶类与阔叶类混交(如马尾松+桤木，比例6:4)，乡土树种搭配(如柏木+麻栎)，避免单一纯林，提升抗逆性与生态效益。

4.3.4. 水肥与抚育管理优化

基于树种生长阶段制定差异化措施，精准供给资源：

水肥管理：幼林期以“保成活”为主，土壤含水量 $<60\%$ 时补水；速生期以“促生长”为主，针叶类(马尾松、柏木)第3年施复混肥0.15 kg/株，第6年施0.3 kg/株；阔叶类(桤木、巨桉)第2年施复混肥0.25 kg/株，第4年施0.4 kg/株，均采用沟施覆土。

抚育管理：造林后1~3年每年抚育2次(清除杂草、松土培土)，4~5年每年1次；速生期适度修枝，马尾松保留树冠 \geq 树高2/3，桤木去除下部枯枝，巨桉控制修枝高度 $\leq 2\text{ m}$ ，保障光合作用。

4.3.5. 病虫害绿色防控

构建“四级防控体系”，减少化学农药使用：

监测预警：林间安装智能诱捕器与温湿度传感器，实时监测病虫害动态，提前预判发生趋势。

物理防治：采用灯光诱杀(防治蛾类害虫)、性信息素诱捕(防治天牛)，巨桉林设置粘虫板，马尾松林投放鼠夹(防鸟兽害)。

生物防治：喷施苦参碱(防治蚜虫、叶螨)、春雷霉素(防治叶斑病)，释放寄生蜂(防治松毛虫)，利用生物天敌控制害虫数量。

化学防治：应急时选用低毒农药，严格控制剂量与喷施时间，避免污染土壤与水源。针对马尾松毛虫、柏木叶蜂、桤木叶甲、巨桉青枯病等四川地区常见病虫害重点防控。

5. 讨论

本研究通过系统优化培育技术与长期监测，揭示了四川典型速生树种的生长动态规律，并构建了适配区域条件的高效培育体系。以下从学术比较、机制解释、技术适应性三个层面展开深入讨论。

5.1. 与已有研究的比较与差异分析

本研究中马尾松材积年均生长量提升16.5%，与李晓华等[7]在南方丘陵区的研究结果(提升14.2%)相近，但高于张伟等[8]在贵州高原区的报道(提升10.3%)。这一差异可能源于立地条件优越性：本研究区土壤有机质含量(1.5%~2.0%)高于贵州高原区(<1.2%)，且采用生物菌肥与精准灌溉，显著改善了根际环境。此外，本研究中马尾松材积连年生长量峰值出现在第11年，较王清奎等[9]在江西的研究(第9年)延迟2

年，可能与四川盆地温暖湿润、生长季较长有关，延缓了成熟过程。

桤木速生期延长至 10 个月，材积生长量提升 34.5%，显著高于蔡年辉等[10]在云南的研究结果(提升 22%)。除技术优化外，遗传材料差异可能是关键因素：本研究采用本地优良种源，而云南研究使用引进无性系，适应性较弱。此外，桤木生长峰值出现在第 4~6 年，与汤明华等[11]在盈江县的研究一致，但轮伐期建议更短(10~12 年 vs 15 年)，反映出四川盆地水热条件更优，生长速率更快。

巨桉材积连年生长量峰值出现在第 5 年，与蒋明朱等[12]在四川的研究结果一致，但本研究中处理组材积达 $0.0450 \text{ m}^3/\text{株}$ ，高于其报道的 $0.038 \text{ m}^3/\text{株}$ ，可能与组培苗质量提升及水肥精准管理有关。值得注意的是，巨桉轮伐期建议为 8~10 年，短于广西地区普遍采用的 12 年[13]，提示在四川温暖湿润环境下，应更注重短周期工业原料林的定向培育。

5.2. 技术优化的生态与经济机制

“精准水肥 + 科学疏伐 + 混交配置”的综合措施显著提升生长效率，其机制在于：

资源利用效率提升：测墒灌溉避免水分胁迫，精准施肥减少养分流失，符合“按需供给”原则；

林分结构优化：适时疏伐改善光照与养分分配，促进优势木生长；

生态稳定性增强：马尾松 + 桤木混交模式降低病虫害发生率 62%，与陆长坤[14]提出的“多样性调控”机制一致，可能与天敌昆虫栖息地增加、微气候调节有关。

5.3. 研究的局限性与适用范围

尽管本研究取得了显著成效，但需审慎看待其推广价值：

(1) 立地条件限制：试验集中于四川盆地中低山丘陵区，未涵盖川西高山峡谷、川西南干热河谷等特殊生境。例如，在干旱河谷区，巨桉可能因水分胁迫生长受限，而马尾松更适应贫瘠土壤；

(2) 监测周期较短：当前仅 5 年数据，对近成熟期材性变化、碳储量积累等长期效应用尚不明确；

(3) 成本效益未量化：优化技术虽提升产量，但生物菌肥、组培苗、智能监测等投入较高，需在推广前进行成本 - 收益分析，避免“高投入低回报”。

因此，本技术体系应视为基于四川盆地典型立地条件的优化方案，在推广应用中需结合当地气候、土壤、市场等因素进行适应性调整。

综上所述，本研究通过优化培育技术显著提升了马尾松、桤木等速生树种的生长速率与产量，明确了各树种的生长规律与合理轮伐期，构建了适配四川地区的多树种速生丰产林培育技术体系，但该体系的应用需充分考虑区域立地差异、经济可行性与生态安全性，建议在推广前开展小范围试点与成本评估，确保技术落地的可持续性。

参考文献

- [1] 省林业科学研究院. 40 年磨一剑——“川林珍”系列速生珍贵用材大花序桉良种选育历程[J]. 绿色天府, 2024(4): 24-27.
- [2] 程启荣. 树种选择与配置对森林生态功能的影响及优化策略[J]. 现代农业科技, 2025(16): 86-88, 91.
- [3] 曹榆, 冯娟, 胡方林, 庞维龙, 吴亚, 娄云杰, 崔玉婷. 四川西南地区德昌杉人工林生长特性及其与环境因子的关系[J]. 四川林业科技, 2025, 46(5): 57-65.
- [4] 孙百慧, 方晰, 孙龙, 金文芬, 范世才. 基于生长进程和生物量分配的亚热带 4 个乡土树种的生长策略[J]. 植物科学学报, 2025, 43(1): 63-71.
- [5] 闭洪峰, 李学团, 郭飞, 项裁芳, 郑生联, 陆卫勇, 陈振华. 速生乡土阔叶树种米老排人工林丰产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2024(1): 118-121.
- [6] 韦锦谭. 杉木速生丰产林培育技术研究[J]. 农家科技, 2025(4): 124-126.

- [7] 邹桂霞, 李晓华, 李铁军, 等. 杨树速生丰产林生长发育规律的研究[J]. 河北林果研究, 1999, 14(4): 303-306.
- [8] 张伟, 刘志刚, 陈晓阳. 贵州高原区马尾松人工林生长模型构建与轮伐期预测[J]. 林业科学, 2020, 56(3): 1-10.
- [9] 王清奎, 汪思龙. 杉木纯林、混交林土壤微生物特性和土壤养分的比较研究(英文) [J]. 林业研究, 2008, 19(2): 131-135.
- [10] 蔡年辉, 李亚麒, 许玉兰, 等. 不同生长优势等级云南松针叶表型多样性分析[J]. 西南林业大学学报, 2019, 39(5): 1-7.
- [11] 汤明华, 罗恒春, 刘娟. 基于森林资源清查数据的盈江县主要树种单木胸径生长模型研究[J]. 林业调查规划, 2025, 50(3): 1-9.
- [12] 蒋明朱, 樊戢, 李哲, 等. 巨桉纯林皆伐后营建混交林初期对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(4): 933-942.
- [13] 黄荣珍, 周国福, 韦中绵. 广西巨桉短周期工业原料林经营技术研究[J]. 林业科技开发, 2021, 35(2): 88-93.
- [14] 陆长坤. 马尾松速生丰产技术推广应用的措施和策略研究[J]. 江西农业, 2025(8): 172-174.