

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230161

# 尾巨桉林分生长对间伐和修枝响应的分析与预测

张士韬<sup>1,2</sup>, 欧阳林男<sup>1</sup>, 陈少雄<sup>1\*</sup>, 杨嘉麒<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院速生树木研究所, 广东 湛江 524022; 2. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** [目的] 探究不同强度的间伐与修枝对尾巨桉林分生长的影响, 建立 BP 神经网络模型并验证模型对间伐和修枝处理下尾巨桉林分生长的预测作用, 为尾巨桉的高效经营技术提供理论指导。[方法] 以南方国家级种苗示范基地 20%、40% 和 60% 间伐与 38.18%、42.39% 和 48.18% 修枝强度的尾巨桉为对象, 在处理后的连续 7 a 调查林分生长指标, 计算累积增量, 分析不同间伐和修枝处理对林分生长增量的影响, 并运用 BP 神经网络建立了 5 种林分生长累积增量对间伐和修枝响应的预测模型, 以均方根误差、Kappa 值和 Pearson 相关系数对模型预测效果进行对比, 判断最优模型。[结果] 间伐促使尾巨桉林胸径、冠幅和单株材积的增长, 但不促进树高增长和出材量增加, 60% 间伐的样地尾巨桉胸径和单株材积增量最高, 20% 间伐的冠幅增量最大, 不间伐的树高增量最高。修枝促进尾巨桉胸径增长, 对树高和蓄积量增长无影响, 38.18% 修枝的胸径增量最高, 60% 间伐 + 48.18% 修枝是处理中有助于尾巨桉林分生长的组合。间伐和修枝均能促进尾巨桉林分径阶分布右偏, 但修枝的效果不如间伐显著。综合来看, 隐含层节点数为 4 的尾巨桉 BP 神经网络模型预测结果的均方根误差最低, Kappa 系数和  $r$  值最高, 可预测 7 a 内的间伐和修枝效果。[结论] 间伐和修枝均显著促进尾巨桉林分生长和径阶分布右偏。高强度间伐和修枝相结合更有助于尾巨桉人工林生长和大径材培育。合理的 BP 神经网络模型能准确地预测间伐和修枝对林分生长的促进效果, 是林分生长预测的优异模型。

**关键词:** 间伐; 修枝; 尾巨桉; BP 神经网络模型; 林分生长

中图分类号: S792.39

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)02-0048-12

人工林是世界森林资源的重要组成部分。它在木材生产、改善环境和景观建设和减缓气候变化等方面发挥着重要作用。随着世界整体对自然森林的保护越来越强, 人工林所承担的经济和生态压力越来越重<sup>[1]</sup>。我国是全球第二大木材消耗国, 人工林的大规模建立支撑了我国现代林业的发展, 其覆盖面积居世界第一, 达 7 954 万  $\text{hm}^2$ , 2022 年人工造林 120.1 万  $\text{hm}^2$ , 占全年总造林面积的 31.4%<sup>[2]</sup>。但由于营林技术不规范, 我国人工林仍然面临着结构混乱、质量低下、生态稳定性差和生态功能较弱等问题, 不合理采伐和幼龄林超强度采伐现象依然

普遍<sup>[3]</sup>。我国木材进口量仍是全球第一<sup>[4]</sup>, 人工林发展的一系列问题导致其无法满足木材刚性需求。人工林抚育是保障幼林成活、成林、成材的关键措施<sup>[5]</sup>。间伐与修枝是人工林抚育的重要手段, 两项手段及其变化, 如方式、强度、时机和地点等都直接作用到树冠结构<sup>[6]</sup>, 而树冠结构、大小等都通过影响林木光合作用和各器官生物量的分配从而改变林分生长<sup>[7]</sup>。合理的间伐和修枝通过调整林分和枝条间的密度, 能优化林分结构, 降低林木竞争压力, 促进保留木和枝条的生长发育, 缩短林木培育时间<sup>[8]</sup>。

桉树是桃金娘科 (Myrtaceae) 桉属

收稿日期: 2023-04-21 修回日期: 2024-01-17

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2023YFD2201001)

\* 通讯作者: 陈少雄, 博士, 研究员, 主要从事桉树人工林培育研究, E-mail: sxchen01@163.com

(*Eucalyptus*)、伞房属 (*Corymbia*) 和杯果木属 (*Angophora*) 植物的统称, 是国际上主要的速生人工林树种, 其覆盖面积超过 2 500 万  $\text{hm}^2$ 。到 2019 年, 我国桉树人工林已覆盖 546.74 万  $\text{hm}^2$  的面积, 在我国人工林总面积中居第三位<sup>[9]</sup>。它对维护我国国家战略木材安全、促进经济发展和维持生态平衡等方面作出了巨大贡献。尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) 是尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake) 和巨桉 (*Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden) 杂交种, 有着干形好、生长发育迅速、抗逆性强的优点<sup>[10]</sup>, 在 20 世纪 80 年代在我国成功杂交获得尾巨桉后, 其逐渐作为华南地区最主要的速生桉树杂交种之一<sup>[11]</sup>。现有不少研究表明, 不同强度的间伐和修枝对尾巨桉人工林林分生长的影响有差异<sup>[12-13]</sup>。但这些研究多是单独研究间伐或修枝的效果, 少有考虑间伐和修枝一并进行而产生的综合效应, 对尾巨桉人工林培育的指导作用略显不足。鉴于此, 本研究以尾巨桉无性系为研究对象, 以 4 种不同强度的间伐和修枝组成 16 种处理, 分析不同处理对尾巨桉人工林林分生长的影响, 并对不同间伐和修枝及其交互效应进行综合评价, 构建并充分验证尾巨桉林分生长增量指标对间伐和修枝响应的 BP 神经网络预测模型, 为尾巨桉人工林的大径材培育提供科学合理的理论依据和实践参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地位于广东省遂溪县岭北镇南方国家林木种苗示范基地 (21°26' N, 110°09' E), 属于北热带湿润大区雷琼区北缘, 海洋性季风气候, 年平均气温 23.1℃, 全年降雨量约为 1 567 mm, 雨季是 5 月—9 月, 年相对湿度为 80.4%, 海拔 101.56~136.47 m, 土壤类型主要是浅海沉积物砖红壤、玄武岩砖红壤、砂页岩红壤, pH 值 4.5~5.3, 有机质含量大于 10  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验林地共计 3.34  $\text{hm}^2$ , 处于低山丘陵地带, 样地坡度在 5°~10°。2016 年 4 月造林, 造林密度 1 250 株· $\text{hm}^{-2}$ , 挖机挖穴 (70 cm × 70 cm × 60 cm), 基肥 1 次 (500  $\text{g}\cdot\text{穴}^{-1}$ ), 第 2 年开始追肥 2 次, 每年追肥 1 次 (500  $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )。在试验林地中布设 48 块样地, 每块样地面积 400  $\text{m}^2$ , 相邻样地间设置保护行。幼林

最初 3 a 每年除草 2 次, 3 a 后每年除草 1 次。

### 1.2 试验设计与指标测定

2018 年 8 月, 选样地内 28 月龄的尾巨桉为研究对象, 采用双因素试验设计, 以间伐株数占样地初始株数的百分比确立 4 种间伐强度, 分别是 60% (强度间伐)、40% (中度间伐)、20% (弱度间伐) 和 0% (不间伐对照), 对应样地保留林分密度为 400、600、800 和 1 250 株· $\text{hm}^{-2}$ 。以修枝后无枝条树干高占平均树高的百分比为标准确立 4 种修枝强度, 分别是 38.18% (5 m)、42.39% (6 m)、48.18% (7 m) 和 0% (不修枝对照), 两者共组成 16 种处理, 每种处理 3 块样地依据设计进行间伐和修枝处理。在处理后立即对标准地进行林分生长调查, 对样地内每株尾巨桉进行每木检尺, 测量胸径 (DBH)、树高 (H)、枝下高 ( $H_e$ ) 和两个方向的冠幅, 计算平均冠幅 (C)、用广西林科院研制的材积公式计算单株材积 (V)<sup>[14]</sup>:

$$V=0.017\ 745\ 97-0.004\ 292\ 55\times DBH+0.000\ 200\ 813\ 6\times DBH^2+0.000\ 494\ 599\times DBH^2\times H-0.001\ 782\ 894\times H。$$

依据单株材积计算每块样地的蓄积量 ( $S_V$ ), 作为样地林分基础生长数据, 依据胸径统计情况划分样地尾巨桉径阶分布。由于林分基础生长数据中基础胸径大于 8 cm 的尾巨桉占据 99% 以上, 满足小径材的出材标准<sup>[15]</sup>, 故将当次测量的蓄积量与间伐材的材积量之和作为当次测量样地出材量。

在之后的第 12、24、44 和 56 个月 (对应林龄分别为 3.3、4.3、6.0、7.0 a) 进行相同调查组成 4 个时期的生长指标, 与林分基础生长对应指标的差值作为林分生长累积增量指标, 包括树高累积增量 ( $H_i$ )、平均冠幅累积增量 ( $C_i$ )、胸径累积增量 ( $DBH_i$ )、单株材积累积增量 ( $V_i$ )。因此该双因素试验的方差分析数学模型为:

$$y_{TPk} = \mu_i + \alpha_T + \beta_P + \gamma_{TP} + e_{TPk} \quad (1)$$

其中  $y_{TPk}$  是 4 种增量因子在不同效应影响下的观测值,  $\mu_i$  是样本均值,  $\alpha_T$  和  $\beta_P$  分别是间伐和修枝的主效应值,  $\gamma_{TP}$  是间伐和修枝各自水平的交互效应,  $e_{TPk}$  是随机误差。

依据模型 (1), 分别对前 3 个时期不同增量因子受间伐和修枝的主体效应和交互效应进行显著性检验和多重比较。由于第 56 个月的指标数据量远小于前 3 个时期, 故第 4 个时期指标仅用于

BPNN 模型预测性能的验证。

### 1.3 数据分析

1.3.1 基本数据分析 数据采用 WPS Office 2019 进行整理, Matlab R2019b 用于 BP 神经网络 (BPNN) 的构建和内部测试, R-4.2.2 用于双因素方差分析 (two-way ANOVA)、Duncan 多重比较和 BPNN 的验证, Origin 2021 用于制作矢量图。

1.3.2 BPNN 的构建 首先是选择模型输入与输出因子, 输入因子包括: 间伐强度 ( $T$ )、修枝强度 ( $P$ )、林龄 ( $A$ )。输出因子为林分生长增量因子, 包括胸径、树高、冠幅和单株材积增量。选择的各个林分生长因子的意义不同, 并且在数值上相差较大, 为了消除数值量级差异对模型建立和预测的影响, 需用公式 (2) 对数据进行归一化处理, 转化为无量纲数据, 该步骤将在 Matlab 中自动完成。再将样本分为训练集和测试集, 训练集占数据的 80%, 用于模型构建训练, 测试集占 20%, 用于模型训练性能评估。

$$X_s = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中:  $X_s$  为归一化后的值;  $X$  为归一化前的值;  $X_{\min}$  为变量值下限;  $X_{\max}$  为变量值上限。

对训练好的 BP 神经网络模型输入测试集的输入参数矩阵, 将网络输出的林分生长增量训练值矩阵与测试集的实际值矩阵进行比较检验, 结合检验结果, 判断所建 BPNN 预测林分生长增量的可行性。矩阵检验的方法包括均方根误差 ( $R_{MSE}$ ), Kappa 一致性检验和 Pearson 相关性分析。

$R_{MSE}$  是将 BP 神经网络的训练值  $K$  和实际值  $O$  的均方差开根号,  $R_{MSE}$  的定义见公式 (3), 体现的 BP 神经网络训练的准确程度, 值越小, 训练值越接近于实际值, 模型越有效, 反之越差。Kappa 检验是一致性检验的指标, 也可以检验模型训练结果和实际结果是否一致。Kappa 系数的大小决定了一致性的程度 (见公式 (4)), 当 Kappa 系数在 0~0.2 时, 一致性程度较差, 0.2~0.4 代表一致性程度一般, 0.4~0.6 代表程度中等, 0.6~0.8 代表程度较强, 0.8~1 代表有很强的一致性。Pearson 相关性分析的  $r$  值反映两个变量间的线性相关程度 (见公式 (5)),  $r$  越大相关性越高, 反之越差。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K - O)^2} \quad (3)$$

$$Kappa = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \times b_i}{n^2}}{1 - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \times b_i}{n^2}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (K - m_K)(O - m_O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K - m_K)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O - m_O)^2}} \quad (5)$$

式中:  $T_i$  是用于检验结果的每个实际数据,  $N$  是用于检验结果的数据个数;  $n$  是所有实际数据和训练数据之和;  $a$  和  $b$  分别代表的是训练数据和实际数据;  $m_K$ 、 $m_O$  是实际值  $K$  和训练值  $O$  的平均值

本研究的数据关系为非线性, 因此 BP 神经网络采用单隐含层结构。隐含层神经元节点数的确定目前没有标准, 本研究以比较法确定, 鉴于确立原则之一是其数量小于输入因子数的 2 倍<sup>[16]</sup>, 分别建立隐含层神经元节点数为 1、2、3、4、5 的 BPNN, 在建立过程中对相同神经元节点数的 BPNN 进行 10 次重复训练, 对训练完成的 BPNN 输入测试集进行性能评估, 具体方法为: (1) 完成训练并求得不同模型不同因变量的  $R_{MSE}$ 、Kappa 系数和相关系数  $r$  值; (2) 取 10 次训练性能平均值作为评测值; (3) 以  $R_{MSE}$  最低、Kappa 值和  $r$  值最高的节点数为标准, 确定训练效果最好的 BPNN 模型。

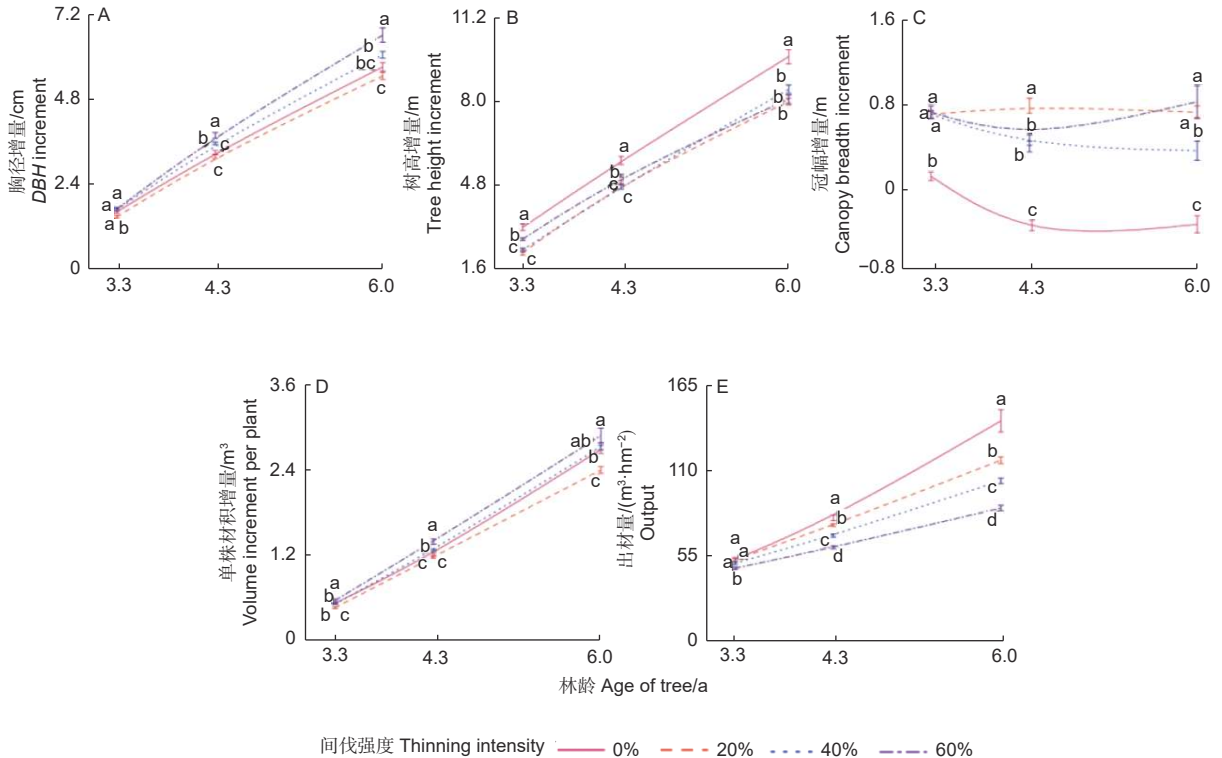
## 2 结果与分析

### 2.1 间伐和修枝及交互效应对尾巨桉人工林林分生长的影响

2.1.1 间伐对尾巨桉林分生长的影响 图 1 展示了 3 种林龄下林分生长增量随间伐强度增加的变化趋势。样地胸径增量随着间伐强度的增大, 呈先减少后增加的趋势, 且此趋势随着林龄的增加变得越明显 (图 1A)。样地单株材积增量和树高增量的变化趋势与胸径增量变化趋势类似, 不同的是不间伐的样地树高增量显著最高 (图 1B、D)。60% 间伐在 3.3、4.3 和 6 a 这 3 个林龄阶段均有着显著最高的胸径增量 (1.72、3.78 和 6.59 cm) 和最高的单株材积增量 (0.56、1.36 和 2.8 m<sup>3</sup>)。间伐均显著提高样地的冠幅增量, 其中 20% 和 60% 间伐的提升效果比 40% 间伐更明显 (图 1C)。尾巨桉林分的出材量随着间伐强度的增大而减少, 且出材量的减少程度随着林龄增加而显著增大。综上, 间

伐促进冠幅增长; 随着间伐强度增大, 胸径增量、树高增量和单株材积增量均有着先减小后增大的趋势, 且这种趋势会随着林龄增加而变得更明显, 说

明 40% 及以上强度的间伐更有助于胸径和单株材积的增长, 但至少要在 6.0 a 内会显著降低出材量。



注: 每次比较的是同一时期(林龄)的不同强度处理下指标差异显著性, 多重比较结果用字母标记法表示,  $p < 0.05$ 。下同

Notes: Each time, the difference significance of indexes under different intensity treatments in the same period (age of tree) was compared. The results of multiple comparisons were expressed by letter labeling,  $p < 0.05$ . The same below

图 1 3 种林龄时期不同间伐强度下林分生长增量结果

Fig. 1 Results of stand growth increment under different thinning intensities at three stand ages

2.1.2 修枝对尾巨桉林分生长的影响 图 2 展示了修枝对林分生长增量的影响趋势。胸径、树高和单株材积增量随修枝强度的增大, 均呈现先增大再减小, 之后再增大的趋势 (图 2A、B、D)。38.18% 修枝在林龄为 3.3、4.3 和 6.0 a 阶段均有着最高的胸径增量 (1.76、3.67 和 6.25 cm)、树高增量 (3.14、5.39 和 8.93 m) 和单株材积增量 (0.58、1.30 和 2.72 m<sup>3</sup>)。修枝显著降低了林分冠幅增量 (图 2C)。综合 5 张图来看, 图 2B、C 的曲线比图 2A、D、E 波动更大, 说明修枝对尾巨桉林分生长的影响主要体现在树高和冠幅上。38.18% 修枝能促进尾巨桉胸径和树高生长, 是最适宜尾巨桉 6.0 a 内林分生长的修枝强度, 与不修枝相比, 修枝对尾巨桉出材量没有影响, 但显著降低了冠幅增量。

2.1.3 交互效应对尾巨桉林分生长的影响 通过

双因素方差分析中交互效应的显著性检验得出, 间伐和修枝的交互效应对胸径有显著影响, 对树高、冠幅和单株材积的影响极显著 (表 1)。交互效应的结果, 以颜色色系冷暖程度来表示不同间伐和修枝处理后的尾巨桉人工林胸径、树高、冠幅和单株材积增量平均值, 不同处理颜色具有差异则代表相应的处理差异明显 (图 3)。结果表明, 60% 间伐 + 48.18% 修枝处理最能促进胸径 (3.00 cm) 和单株材积 (1.16 m<sup>3</sup>) 的增长, 且显著优于其他所有处理 (图 3A、D)。就树高生长而言, 不间伐情况下修枝的促进效果显著优于不修枝处理, 其中不间伐 + 38.18% 修枝最优 (图 3B)。间伐比修枝更有助于冠幅生长 (图 3C), 其中增量最大的是 20% 间伐 + 不修枝。综合来看, 60% 间伐 + 48.18% 修枝处理最能促进尾巨桉胸径和单株材积

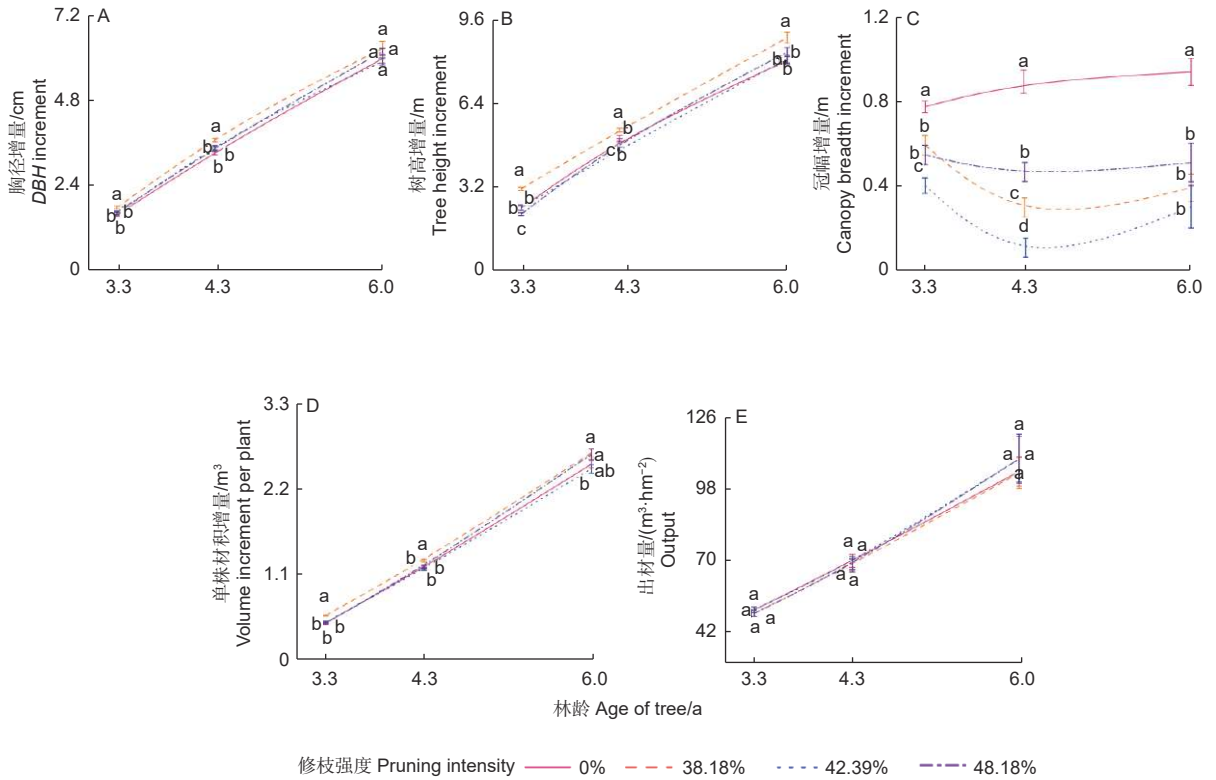


图 2 3 种林龄时期不同修枝强度下林分生长增量结果

Fig. 2 Results of stand growth increment under different pruning intensities at three stand ages

表 1 基于间伐与修枝交互效应的方差分析

Table 1 Variance analysis table based on the interaction effect of thinning and pruning

方差分析项 Variance analysis factor	自由度 Df	均方误差 MSE	F值 F-value	显著性 Sig.
胸径累积增量 DBH/cm	9	8.90	2.075	0.031*
树高累积增量 H/m	9	56.31	6.432	0.006**
平均冠幅累积增量 C/m	9	2.450	5.244	0.000**
单株材积累积增量 $V_i/m^3$	9	1.903	2.540	0.000**

注/Notes: “\*”,  $p < 0.05$ ; “\*\*”,  $p < 0.01$

生长, 对冠幅生长也有显著促进作用, 是促进尾巨桉林分生长的最佳抚育方式。

## 2.2 间伐和修枝及交互效应对尾巨桉人工林径阶分布的影响

### 2.2.1 间伐对尾巨桉径阶分布的影响

图 4A 展示了不同时期 4 种间伐强度下尾巨桉各径阶株数占总株数的百分比。间伐前, 各林分的尾巨桉株数高峰均位于径阶 12 cm, 不同的是与准备间伐的样地相比, 对照林分有更多尾巨桉位于径阶 10 cm (占 32.37%)。3.3 a 林龄时, 尾巨桉径阶高峰均是 14 cm, 该径阶株数占比分别是 44.53% (不间伐)、58.74% (20% 间伐)、66.55% (40% 间伐) 和 76.92% (60% 间伐), 所有林分的第二高峰均是 12 cm, 说明尾巨桉本身胸径早期生长发育迅速, 间伐在短期内不足以对径阶分布产生影响。4.3 a 林龄时, 不同间伐强度的径阶分布高峰出现差异, 不间伐和 20% 强度间伐径阶高峰均为 14 cm, 分别占 37.41% 和 51.89%, 第二高峰是 16 cm, 分别占 35.25% 和 43.08%; 40% 和 60% 强度间伐分布结果则恰好相反, 径阶高峰位于 16 cm 的分别占 57.54% 和 70.36%, 径阶位于 14 cm 的分别占 36.49% 和 17.79%, 依据图 4A 的初始径阶分布和表 1 的胸径增量多重比较, 40% 和 60% 间伐的径阶分布随林龄增加逐渐向右偏移, 中径材占比有增多的趋势, 并且 60% 高强度间伐下这种趋势更加明显。6 a 林龄时, 不间伐林分的径阶高峰为 16 cm (占 42.11%), 间伐林分的径阶高峰都在 18 cm, 不同的是 40% 和 60% 间伐的第二高峰是 20 cm, 分别占 15.08% 和 28.28%, 20% 间伐的第二高峰则是 16 cm (占 40.52%)。由此表明, 间伐从长期来看均利于林分径阶分布右偏, 高强度的间伐更有助于优化尾巨桉林分结构, 促进林木胸径生长, 60% 强度间伐的效果最为明显。

伐) 和 76.92% (60% 间伐), 所有林分的第二高峰均是 12 cm, 说明尾巨桉本身胸径早期生长发育迅速, 间伐在短期内不足以对径阶分布产生影响。4.3 a 林龄时, 不同间伐强度的径阶分布高峰出现差异, 不间伐和 20% 强度间伐径阶高峰均为 14 cm, 分别占 37.41% 和 51.89%, 第二高峰是 16 cm, 分别占 35.25% 和 43.08%; 40% 和 60% 强度间伐分布结果则恰好相反, 径阶高峰位于 16 cm 的分别占 57.54% 和 70.36%, 径阶位于 14 cm 的分别占 36.49% 和 17.79%, 依据图 4A 的初始径阶分布和表 1 的胸径增量多重比较, 40% 和 60% 间伐的径阶分布随林龄增加逐渐向右偏移, 中径材占比有增多的趋势, 并且 60% 高强度间伐下这种趋势更加明显。6 a 林龄时, 不间伐林分的径阶高峰为 16 cm (占 42.11%), 间伐林分的径阶高峰都在 18 cm, 不同的是 40% 和 60% 间伐的第二高峰是 20 cm, 分别占 15.08% 和 28.28%, 20% 间伐的第二高峰则是 16 cm (占 40.52%)。由此表明, 间伐从长期来看均利于林分径阶分布右偏, 高强度的间伐更有助于优化尾巨桉林分结构, 促进林木胸径生长, 60% 强度间伐的效果最为明显。

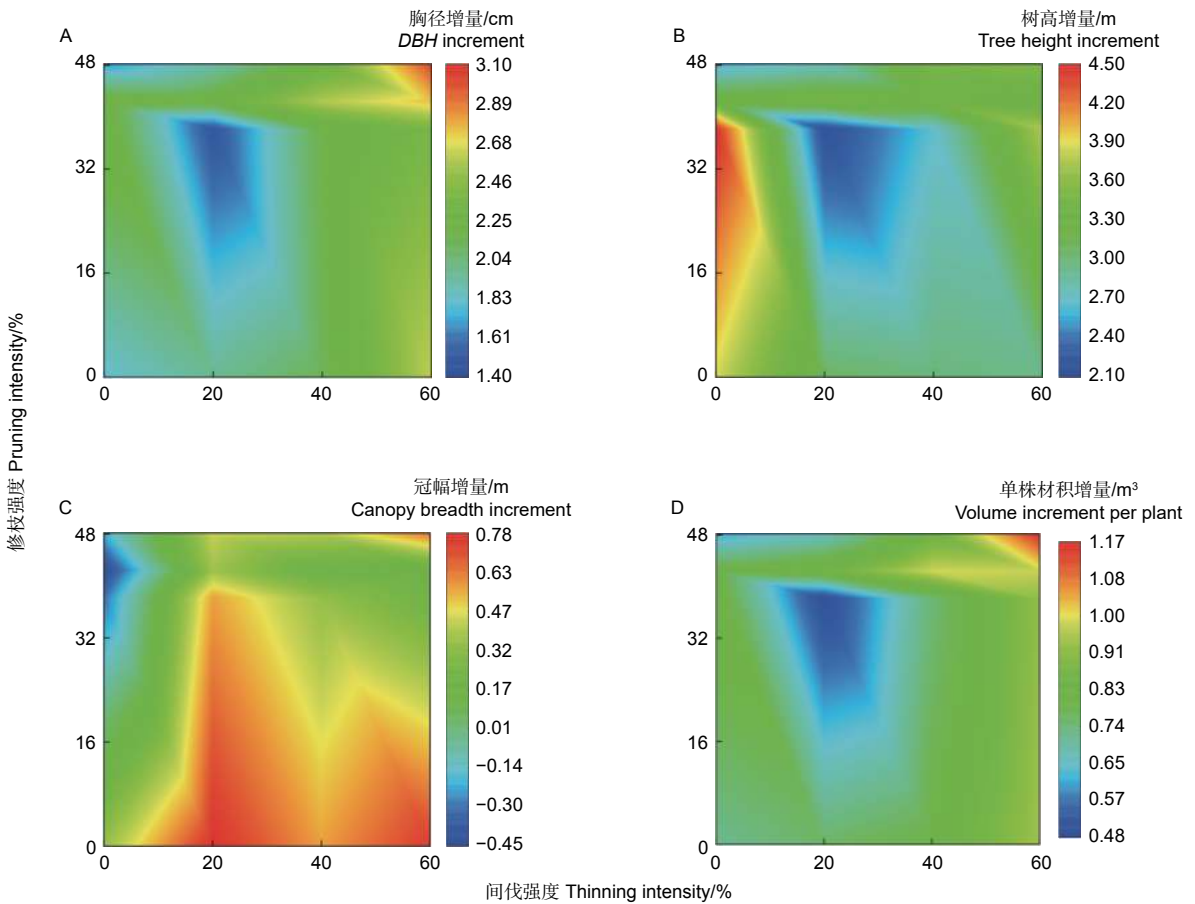


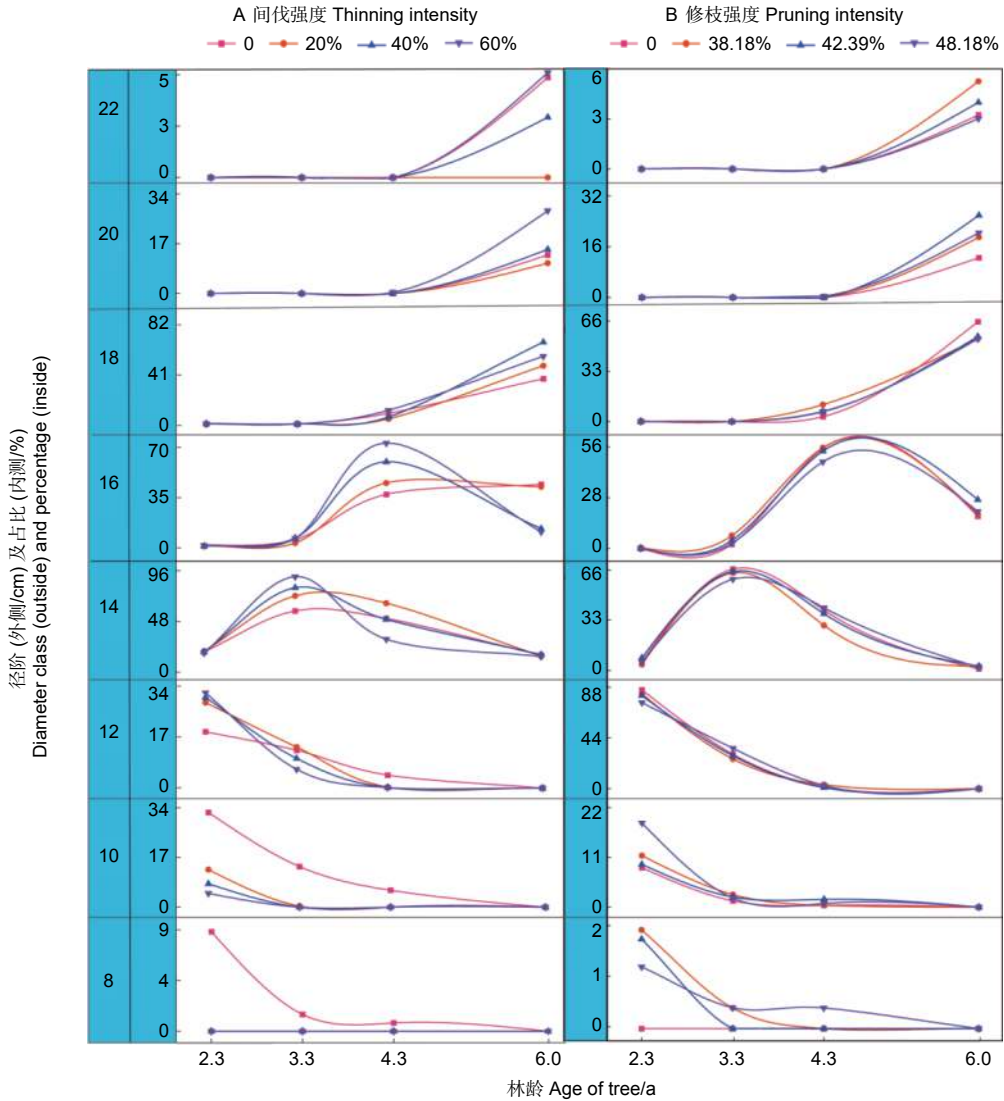
图 3 交互效应对林分生长增量影响的热力图

Fig. 3 Thermal map of the interaction effect on stand growth increment

**2.2.2 修枝对尾巨桉径阶分布的影响** 图 4B 展示了修枝对尾巨桉径阶分布的影响。林分初始径阶分布高峰均位于 12 cm, 不修枝林分占比最高 (85.77%)。4 个时期不同修枝下尾巨桉径阶分布的高峰、第二高峰情况基本一致, 说明修枝对尾巨桉径阶分布的影响程度远不如间伐强。差异出现在林龄 6 a 时, 4 种修枝强度林地径阶分布高峰均是 18 cm, 但不修枝的林地在该径阶占比最高 (65.63%), 比修枝林地高了约 10%, 而修枝林地尾巨桉位于 20 cm 和 22 cm 的径阶占比之和恰好比不修枝林地多出约 10%, 表明修枝从长期来看促进尾巨桉径阶分布右偏。综上, 修枝利于尾巨桉胸径生长, 效果不如间伐, 不同强度的修枝对尾巨桉林分径阶分布的影响没有显著差异。

**2.2.3 交互效应对尾巨桉径阶分布的影响** 通过计算不同处理在同一径阶下分布比例的方差, 以该径阶占比在不同处理下的离散程度来衡量受交互效应的影响程度<sup>[17]</sup>, 方差越大交互效应的影响程度越

高。本研究中, 8 cm 和 22 cm 径阶在 4 个林龄下的方差很小, 受交互效应影响程度很低, 其他径阶受交互效应的影响均有不同程度的变异, 因此有必要分析 10 cm 到 20 cm 共 6 个径阶受交互效应的影响 (表 2)。间伐前 2.3 a 林龄时, 林木大多数径阶均位于 12 cm (图 5B)。3.3 a 林龄时, 林木径阶在 10、12 和 14 cm 均有分布, 间伐强度越高, 径阶位于 14 cm 的林木越多 (图 5A~C), 60% 间伐 + 48.18% 修枝的样地林木位于 14 cm 的径阶占比最高 (89.58%)。4.3 a 林龄时, 40% 及以上的间伐样地林木径阶更多位于 16 cm, 40% 以下的间伐样地则多数位于径阶 14 cm, 不间伐的样地林木仍有部分径阶位于 10 cm 和 12 cm, 而 60% 间伐 + 48.18% 修枝的样地有 47.06% 的林木径阶位于 20 cm (图 5)。6 a 林龄时, 少数不间伐和 20% 间伐的样地径阶位于 16 cm (图 5D), 40% 间伐和 60% 间伐的样地林木多数径阶位于 18 cm (图 5E), 在径阶 20 cm 的分



注：(A) 间伐强度，(B) 修枝强度

Notes: (A) thinning intensity, (B) pruning intensity

图 4 不同时期 4 种间伐和 4 种修枝强度下林分径阶分布

Fig. 4 Distribution of stand diameters and steps under 4 thinning and 4 pruning intensities at different periods

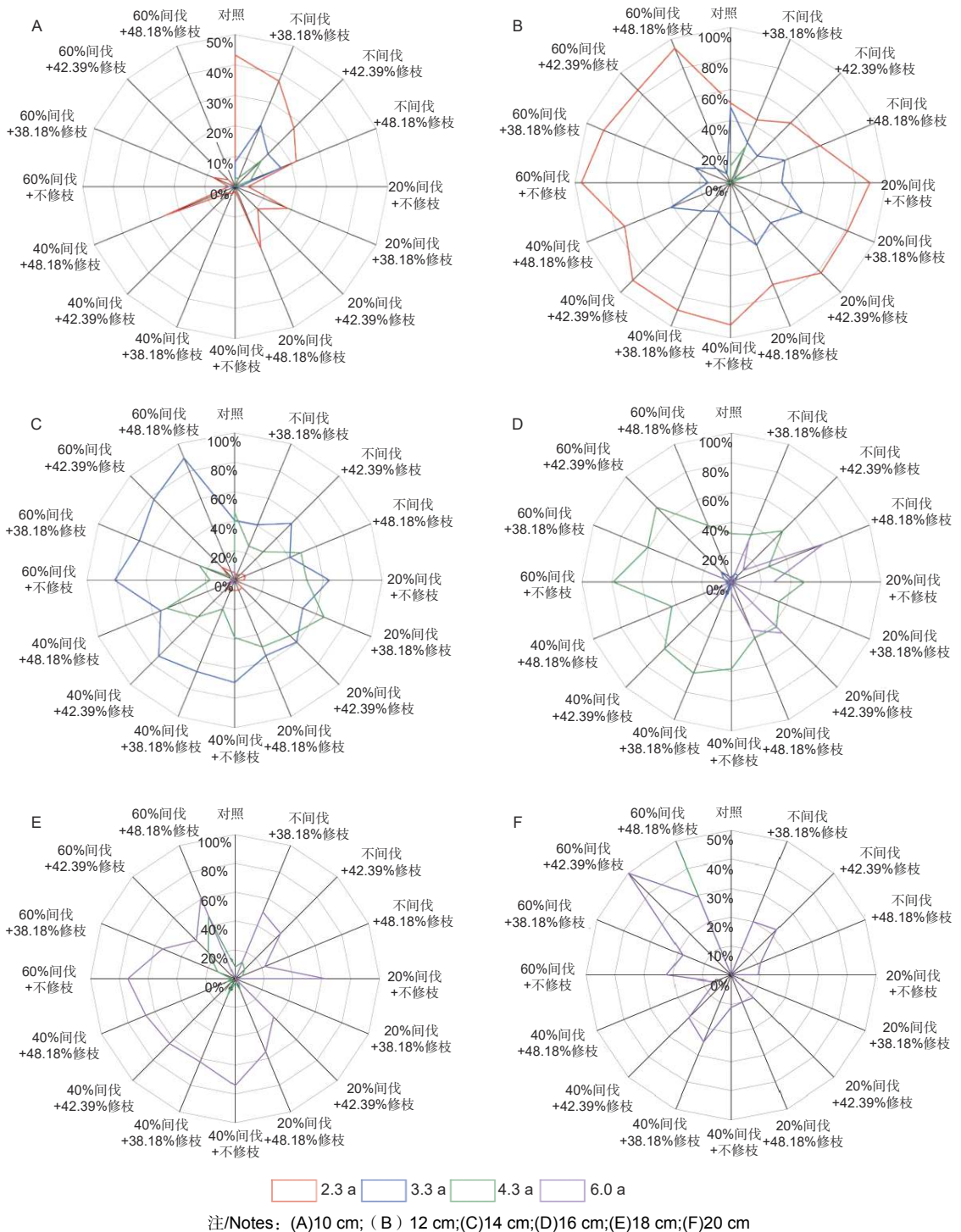
表 2 8 个径阶在不同处理下占比的方差

Table 2 The variance of the proportions of the same diameter grade under different treatments

林龄/a Age of tree	8 个径阶在不同处理下占比的方差							
	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm	22 cm
2.3	0.000	0.019	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.3	0.000	0.005	0.016	0.022	0.001	0.000	0.000	0.000
4.3	0.000	0.001	0.004	0.034	0.023	0.014	0.014	0.000
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.054	0.015	0.000

布中，60% 间伐 + 42.39% 修枝处理的占比最高（50.00%，图 5F）。综合图 5 来看，在林龄高于 2.3 a 时，间伐强度越大，样地林木位于更高径

阶的占比越高，即与修枝相比，间伐更有助于尾巨桉林分径阶分布右偏。42.39% 及以上的修枝强度与 60% 强度间伐相结合的样地林木胸径生长迅



注/Notes: (A)10 cm; (B) 12 cm;(C)14 cm;(D)16 cm;(E)18 cm;(F)20 cm

图 5 4 个时期不同处理的同一径阶占比

Fig. 5 The proportion of the same diameter grade in different treatments in 4 periods

速, 是优秀的人工林抚育措施。

### 2.3 BPNN 的构建与性能分析

2.3.1 BPNN 的构建 基于 Matlab R2019b 平台构建输入因子与林分生长增量因子的 BP 神经网络模型, 模型参数设置如下: 激活函数采用“tansig” (输入层) 和“purelin”(输出层); 训练函数为

“trainbr”; 网络学习速率 net.trainParam.lr=0.05; 允许训练最大步数为 1 500; 期望误差为 0.000 1。训练集内部设置训练数据占 80%, 验证数据和测试数据占 10%, 对 5 种模型的训练性能评估结果见表 3。

2.3.2 BPNN 的选择 如表 3 所示, 除了胸径增



表 3 不同隐含层节点数的 BPNN 的训练性能结果

Table 3 Trained performance results of BPNN with different number of hidden neurons

节点数 Number of neuron	模型训练检验结果 Test results of BPNN trained											
	胸径增量 DBH increment			树高增量 Tree height increment			冠幅增量 canopy breadth increment			单株材积增量 Volume increment per plant		
	$R_{MSE}$	$Kappa$	$r$	$R_{MSE}$	$Kappa$	$r$	$R_{MSE}$	$Kappa$	$r$	$R_{MSE}$	$Kappa$	$r$
1	0.754	0.735	0.927	1.276	0.648	0.903	0.706	0.205	0.167	0.321	0.753	0.926
2	0.762	0.732	0.926	1.243	0.701	0.908	0.684	0.258	0.265	0.321	0.756	0.927
3	0.757	0.745	0.927	1.223	0.707	0.911	0.649	0.322	0.398	0.318	0.759	0.928
4	0.749	0.748	0.928	1.203	0.711	0.914	0.606	0.386	0.518	0.305	0.786	0.932
5	0.742	0.755	0.929	1.217	0.707	0.912	0.589	0.416	0.555	0.309	0.779	0.931

量训练效果最优的是隐含层节点数为 5 的 BPNN, 次优的节点数为 4 以外, 其余增量因子最优的均是节点数为 4 的 BPNN。BPNN 训练冠幅增量的  $Kappa$  系数和相关系数小于其它因子, 其中冠幅一致性等级明显低于其他因子。综上, BPNN 对冠幅增量的训练效果不如其它林分生长增量因子。隐含层节点数为 4 的 BPNN 训练效果最佳, 设最佳预测模型的隐含层神经元分别为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$ , 训练在第 430 次时终止, 此时根据权值矩阵和阈值矩阵结果确定传递函数。

输入层到隐含层的传递函数表达式为:

$$M_1 = \text{tansig}(0.0401X_T + 0.4575X_P - 2.3404X_A + 1.3315);$$

$$M_2 = \text{tansig}(-0.1148X_T + 0.0093X_P - 1.0332X_A + 0.6961);$$

$$M_3 = \text{tansig}(2.5831X_T + 0.1645X_P - 0.9734X_A + 2.4899);$$

$$M_4 = \text{tansig}(-X_T + 0.0067X_P - 1.8036X_A - 1.1525);$$

隐含层到输出层的传递函数表达式为:

$$DBH_i = \text{purelin}(0.2107M_1 - 0.8898M_2 - 0.0259M_3 - 0.2365M_4 - 0.2165);$$

$$H_i = \text{purelin}(0.0682M_1 - 0.5411M_2 - 0.1672M_3 - 0.2801M_4 - 0.2409);$$

$$C_i = \text{purelin}(-0.2887M_1 + 0.4609M_2 + 0.1531M_3 - 0.1546M_4 - 0.7943);$$

$$V_i = \text{purelin}(0.1379M_1 - 0.8944M_2 - 0.0575M_3 - 0.1275M_4 - 0.1722);$$

最佳 BPNN 结构见图 6:  $Lm_1$  为输入层到隐含层的偏移量,  $Lm_2$  为隐含层到输出层的偏移量。

将训练集中的 20% 用于模型仿真测试数据, 上述模型的网络输出仿真值与训练集的实际值进行

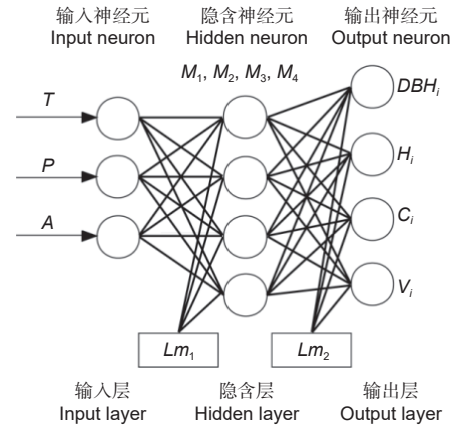


图 6 BP 神经网络模型结构

Fig. 6 Structure diagram of BP neural network model

仿真比较, 决定系数  $R^2$  反映 BP 神经网络的仿真值对实际值的决定程度, 其值越大说明内部仿真结果越准确。比较结果如图 7 所示。

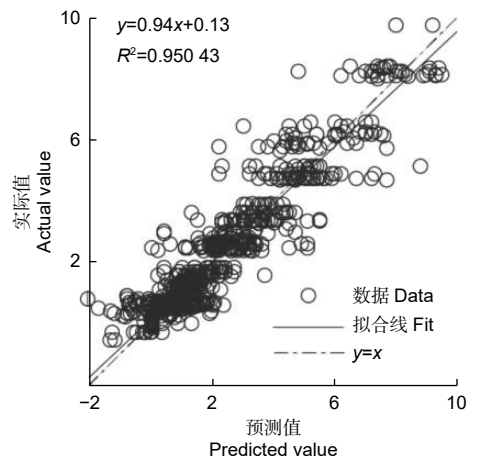


图 7 基于贝叶斯正则化算法的林分生长增量因子预测理论值与实际值回归分析

Fig. 7 Regression line of predicted and actual values of stand growth increment factor based on Bayesian regularization algorithm

从图 7 可以看出, 观测值和训练值贝叶斯正则化算法线性方程拟合  $R^2$  为 0.950 4, 说明该模型在拟合程度较高, 可以解释 95.04% 的训练值增量因子变异。将 7 a 林龄的数据用于模型预测性能验证数据, 以模型的网络输出预测值与不同间伐和修枝处理的数据平均值进行比较, 以模型训练评估参数用于模型预测性能检验, 结果如表 4 所示。

表 4 模型预测检验结果  
Table 4 Test results of BPNN predicted

检验指标	$R_{MSE}$	Kappa	$r$
胸径增量 DBH increment	0.553	0.714	0.735
树高增量 Tree height increment	0.581	0.387	0.829
单株材积增量 Volume increment per plant	0.632	-0.063	0.120
综合评价 Comprehensive assessment	0.591	0.782	0.979

注: 综合评价指将三种调查数据整合到一起进行检验

Note: Comprehensive evaluation refers to the integration of three kinds of survey data for testing

由表 4 又得知, BPNN 模型对胸径和综合评价的预测结果很好, 而对树高和单株材积的预测结果较差, 可能因为第 84 个月仅调查少部分尾巨桉的树高, 而调查了林地绝大多数尾巨桉的胸径, 导致树高数据量远小于胸径数据量, 低于大样本统计的要求, 由此可得, 该模型至少可以对超过训练样本林龄 12 个月内的尾巨桉胸径增长进行有效预测。综上, 具有 4 个隐含层神经元节点数的 BPNN 模型是较为理想的尾巨桉林分生长增量对间伐和修枝的响应模型, 可有效预测 7 年内的尾巨桉林分生长。

### 3 讨论

抚育间伐和修枝是改善人工林林分生长与结构的重要措施<sup>[18]</sup>。持续 4 a 的抚育结果表明, 不同间伐和修枝处理对尾巨桉林分生长的影响不同。综合来看, 更高强度的间伐更有助于尾巨桉胸径、树高和单株材积的生长, 这与其他大多数树种的间伐结果基本一致, 主要因为间伐减少了林木对土壤养分和水分的争夺, 将资源集中在更少的林木和枝叶上, 从而促进了林木生长, 促进效果因树种、地域、间伐方式和间隔时间等而存在差异<sup>[16,19-20]</sup>。在本研究中, 不同强度修枝对尾巨桉林分生长同样有不同程度影响, 这与 Pelkki 等人<sup>[21-22]</sup>的研究结论不一致, 可能因为尾巨桉属于典型的速生树种, 具

有更发达的根系, 在结合间伐抚育下, 它对环境(气候、土壤条件、光照)的敏感性更高, 在相同观察时长下, 更优越的环境条件对桉树生长的促进作用更明显<sup>[23]</sup>。6 a 林龄时, 38.18% 修枝后林分胸径、树高、冠幅和单株材积增量均高于 42.39% 修枝林分, 说明对尾巨桉林分生长的促进效果并非随着修枝强度增大而增大, 38.18% 修枝是较适宜的修枝强度。以上考虑的都是单独使用一种抚育措施时的情况, 交互效应结果表明, 若两种措施同时进行抚育, 最好的方式仍是较高强度间伐与较高强度修枝相结合, 其促进林分生长的效果最佳。但无论哪种强度的间伐都会显著降低林分样地的出材量, 因为从短期来看间伐样地蓄积量与间伐材积量之和远小于不间伐样地蓄积量, 而有研究表明, 随着间伐林单株材积增长的更加迅速, 它们之间的差值会随林龄增加逐渐减小, 并在某一年变为负数<sup>[24]</sup>, 因而间伐更有助于长期时间大径材的培育。

间伐能对尾巨桉径阶分布产生明显的影响, 间伐后随着林龄的增加分布逐渐右偏, 且间伐强度越大, 右偏的程度越大, 早期出现更大胸径的林木数量越多, 说明随着时间推移, 高强度间伐下可能出现尾巨桉大径材的概率越高, 数量越多, 修枝也能促使径阶分布右偏, 但效果不如间伐, 上述结论与 Fontan 等<sup>[25]</sup>和 Medeiros 等<sup>[26]</sup>的结果不同, 因为间伐和修枝后的生长响应还受到树冠结构、光合作用、地上地下养分循环等的综合影响。因此, 要培育大径材应该较高强度的间伐与适当修枝相结合进行抚育。

BP 神经网络模型是一种较为新颖的多元非线性模型, 比传统模型的拟合优度更高, 近年来多用于林分生长预测中<sup>[27-28]</sup>, 但多是基于自然因子对林木某一特征进行预测。鉴于间伐和修枝对林分生长的影响是非线性的, 本研究建立林分生长因子对人为抚育措施响应的 BP 神经网络模型, 该模型具有精度高、避免选型等优点, 但由于硬件条件不足, 研究的输入因子未包含立地因子和气候因子, 这些因子也会对林分生长产生影响, 因此该模型有待进一步完善, 同时 BP 神经网络的整体训练过程属于科技黑箱, 尚无法从模型得知间伐和修枝如何具体影响林分生长, 其机理性研究有待探讨。

### 4 结论

尾巨桉林分生长受间伐、修枝强度和林龄的影

响。间伐有助于林分生长和径阶分布右偏,且效果随着间伐强度的增大而增大,60%的间伐是本研究中最优间伐强度。修枝对林分生长和径阶分布的有一定的促进效果,但不如间伐,通常与间伐相结合来抚育,38.18%修枝是相对更优的修枝强度。本研究建立了林分生长因子对间伐和修枝响应的BP神经网络模型,并经过性能测试证明其可用于7年内尾巨桉林分生长的整体反应预测,依据模型能更科学地选择促进尾巨桉林分生长的最适间伐强度和修枝强度。本研究方法及结果之后尾巨桉营林提供参考,同时还可以为其他树种的间伐和修枝提供理论和实践依据。

### 参考文献:

- [1] 刘世荣,杨予静,王 晖. 中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [2] 自然资源部. 2022年中国自然资源统计公报[EB/OL]. <https://m.mnr.gov.cn/sj/zrzyzygb/202304/P020230412557301980490.pdf>, 2023-04-12/2023-7-14.
- [3] 陈幸良,巨 茜,林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策[J]. 世界林业研究, 2014, 27(6): 54-59.
- [4] 刘 涛,谢耀坚. 中国桉树人工林快速发展动因分析与展望[J]. 桉树科技, 2020, 37(4): 38-47.
- [5] 黄香兰,杨振意,薛 立. 抚育间伐对人工林影响的研究进展[J]. 林业资源管理, 2013(1): 62-67 + 75.
- [6] 张 甜,朱玉杰,董希斌. 抚育间伐和修枝对落叶松用材林生长和冠层的影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(12): 8-11.
- [7] MONTAGU K D, KEARNEY D E, SMITH R G B. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 179(1-3): 1-13.
- [8] BULINSKI J, MATTHIESSEN J N, ALEXANDER R. Development of a cost-effective, pesticide-free approach to managing African black beetle (*Heteronychus arator*) in Australian eucalyptus plantations[J]. Crop Protection, 2006, 25(11): 1161-1166.
- [9] FAROOQ T H, SHAKOOR A, WU X H, et al. Perspectives of plantation forests in the sustainable forest development of China[J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2021, 14(2): 166-174.
- [10] SILVA D E M D, AZEVEDO L A S D, POLTRONIERI T P D S. Avaliação da resistência de espécies de eucalipto à ferrugem (*Puccinia psidii* Winter)[J]. Summa Phytopathologica, 2014, 40(1): 54-62.
- [11] TURNBULL J W. Development of sustainable forestry plantations in China: a review[C]. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2007: 37.
- [12] 李书玲,莫康克,刘勇等. 尾巨桉DH32-28间伐效应分析[J]. 桉树科技, 2021, 38(2): 38-40.
- [13] 许晓东. 尾巨桉人工林抚育间伐调控技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019: 25-29.
- [14] 陈少雄,杨建林,周国福. 不同栽培措施对尾巨桉生长的影响及经济效益分析[J]. 林业科学研究, 1999, 12(4): 357-362.
- [15] 国家林业局桉树研究开发中心. 桉树大径材培育技术规程: LY/T 2909-2017[S]. 北京: 国家林业局, 2017: 3.
- [16] VUJICIC T, MATIJEVIC T, LJUCOVIC J, et al. Comparative analysis of methods for determining number of hidden neurons in artificial neural network: central european conference on information and intelligent systems (CECIIS 2016)[Z]. HUNJAK T, KIRINIC V, KONECKI M. 27th central european conference on information and intelligent systems (CECIIS): 2016: 219-223.
- [17] 倪艳林,杨丽丽,彭 君,等. 指数施磷后闽楠幼苗诊断施肥综合法营养诊断研究[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 121-131.
- [18] 赵匡记,纪福利,刘延文,等. 华北落叶松林分生长对间伐和修枝的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 581-588.
- [19] 管惠文,董希斌. 间伐强度对落叶松次生林冠层结构和林内光环境的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(10): 13-23.
- [20] 王翰琛,张雄清,张建国,等. 杉木人工林不同密度间伐林分生长优势的变化规律分析[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 32-38.
- [21] PELKKI M H, COLVIN R J. Effects of thinning in a cherrybark oak plantation[J]. Southern Journal of Applied Forestry, 2004, 28(1): 55-58.
- [22] de MONTIGNY L, NIGH G. Growth, mortality, and damage in fast growing douglas-fir stands in coastal british columbia twenty years after heavy juvenile thinning and moderate pruning at age nine[J]. Northwest Science, 2014, 88(3): 206-218.
- [23] FORRESTER D I, BAKER T G. Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, and *Eucalyptus grandis* plantations in southeastern Australia[J]. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere, 2012, 42(1): 75-87.
- [24] 欧阳林男,兰 俊,陈少雄,等. 一次间伐对速生桉树大径材增长影响及经济效益分析[J]. 桉树科技, 2021, 38(3): 1-10.
- [25] FONTAN I, REIS G G, REIS M, et al. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil[J]. Agroforestry Systems, 2011, 83(2): 121-131.
- [26] MEDEIROS R A, de PAIVA H N, SOARES A, et al. Thinning from below: effects on height of dominant trees and diameter distribution in eucalyptus stands[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2017, 29(2): 238-247.
- [27] 卯光宪,谭 伟,柴宗政,等. 基于BP神经网络的马尾松人工林胸径-树高模型预测[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 752-760.
- [28] 孙 翊,姜树海,陈至灵. 神经网络在林业上的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2019, 32(3): 7-12.

# Analysis and Prediction of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* in Response to Thinning and Pruning

ZHANG Shi-tao<sup>1,2</sup>, OUYANG Lin-nan<sup>1</sup>, CHEN Shao-xiong<sup>1</sup>, YANG Jia-qi<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Fast-growing Trees, Chinese Academy of Forestry, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of thinning and pruning with different intensities on the growth of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, the BP neural network model was developed to predict the growth of *E. urophylla* × *E. grandis* under thinning and pruning treatment, for providing theoretical guidance for efficient management technology of *E. urophylla* × *E. grandis*. [Method] Taking 20%, 40% and 60% thinning and 38.18%, 42.39% and 48.18% Based on the *E. urophylla* × *E. grandis* in the Southern National Forest Seedling Demonstration Base with treatments of 20%, 40% and 60% thinning and 38.18%, 42.39% and 48.18% pruning, the stand growth indexes were investigated for 7 years after treatment, and the effects of different thinning and pruning treatments on the growth increment of the stands were analyzed. Furthermore, BP neural network was used to predict the response of cumulative increment to thinning and pruning. Root-mean-square error, Kappa and Pearson correlation coefficient were used to compare the prediction effect of models, and the optimal model was determined. [Results] Thinning treatment promoted the growth of DBH, crown width and tree volume, but did not promote the growth of height and wood production. The increment of DBH and tree volume was the highest in the stands with 60% thinning intensity, the increment of crown width was the highest in the stands with 20% thinning intensity, and the increment of height was the highest in the control stands. Pruning promoted the growth of DBH, but did not promote the growth of height and wood production. DBH increase was the highest in the stands with 38.18% pruning intensity. The treatment with 60% thinning and 48.18% pruning was conducive to the growth of *E. urophylla* × *E. grandis*. Both thinning and pruning could promote the right-sided distribution of diameter class, but the effect of pruning was not significant. In summary, the BP neural network model with 4 nodes in the hidden layer had the lowest root-mean-square error and the highest Kappa value and r value. [Conclusion] Thinning and pruning can significantly promote the growth of *E. urophylla* × *E. grandis* and the right-sided distribution of diameter class. The combination of high-intensity thinning and pruning is more beneficial to the growth of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation and the cultivation of large diameter wood. The reasonable BP neural network model can accurately predict the promotion effect of thinning and pruning on stand growth and is an excellent model for predicting stand growth.

**Keywords:** thinning; pruning; *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; BP neural network model; stand growth

(责任编辑: 张 研)