

南方红豆杉修枝后生长与干形动态表现

欧建德¹, 吴志庄²

(1. 福建省明溪县林业局, 福建 三明 365200; 2. 国家林业局 竹子研究开发中心 浙江省竹子高效加工重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为高效培育优质南方红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *mairei* 干材, 提高修枝成效, 以福建省明溪县 11 年生南方红豆杉人工林为研究对象, 以未修枝的为对照, 进行修枝强度分别为 0.3, 0.4, 0.5 相对高和对照的修枝度试验, 系统分析了修枝对南方红豆杉生长及干形形质的影响, 揭示其修枝后的变化规律, 并优化修枝技术。结果表明: 修枝后 5 a 不同修枝强度间的生长及干形形质存在差异, 且随修枝后时间推移而发生变化。随修枝后时间推移, 修枝后的南方红豆杉生长性状较对照的表现越来越明显, 但不同修枝强度间的生长效应、动态变化规律、水平差异及出现显著差异的时间点不尽相同。修枝可明显地降低南方红豆杉的冠长率。随修枝后时间推移, 与对照相比, 修枝的胸高形数呈出先降后升的变化趋势。与对照比较, 修枝 0.3 和 4 a 间隔期的修枝组合的胸径、树高、单株材积与胸高形数分别增加了 4.25%, 4.76%, 15.94%, 2.04% ($P<0.05$), 冠长率降低了 14.54% ($P<0.05$)。因此, 南方红豆杉的优化修枝组合为 0.3 相对高的修枝强度、4 a 间隔期。图 1 表 5 参 18

关键词: 森林经营学; 南方红豆杉; 人工林; 修枝; 生长; 形质

中图分类号: S753.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)01-0104-08

Growth and stem form quality with pruning in *Taxus wallichiana* var. *mairei*

OU Jiande¹, WU Zhizhuang²

(1. Forest Enterprise of Mingxi County, Sanming 365200, Fujian, China; 2. China Bamboo Research Center/Key Laboratory of High Efficient Processing of Bamboo of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: For obtaining efficiency of high quality cultivated timber and to measure pruning influences on growth and stem form quality of *Taxus wallichiana* var. *mairei*, a pruning intensity test was established in Mingxi County, Fujian, China. An unpruned plantation was used as a control (ck) with three pruning intensity treatments of 0.3-relatively high, 0.4-relatively high, and 0.5-relatively high. The effect of annual dynamic change rules with the passage of time after pruning were revealed with an 11-year-old *T. wallichiana* var. *mairei* plantation, and then the pruning technology was optimized. Results showed that five years after pruning there were strong influences ($P<0.05$) on the growth and stem form traits with different pruning intensities; compared with the control, growth trait performance after pruning was more and more obvious over time. The function, dynamic change law and time that significant differences appeared for growth traits changed with different pruning intensities ($P<0.05$). Pruning reduced the crown length ratio of *T. wallichiana* var. *mairei*. After pruning and compared to the control, changes in breast height form factor for pruning appeared lower then higher over time. DBH (diameter at breast height), tree height, volume, and breast height form factor of the 0.3-relatively high pruning intensity at a four year interval were significantly greater ($P<0.05$) than the control;

收稿日期: 2016-01-22; 修回日期: 2016-03-25

基金项目: 中央财政林业科技推广示范资金项目(闽[2015]TG05 号)

作者简介: 欧建德, 教授级高级工程师, 从事林木育种、资源培育、森林经营、森林保护等研究。E-mail: sm-mxojd@163.com。通信作者: 吴志庄, 副研究员, 博士, 从事森林培育研究。E-mail: wzzcaf@126.com

whereas, the crown length ratio was significantly less ($P<0.05$). Thus, the optimal pruning combination for *T. wallichiana* var. *mairei* was 0.3, relatively high pruning intensity and a four-year interval period. [Ch, 1 fig. 5 tab. 18 ref.]

Key words: forest management; *Taxus wallichiana* var. *mairei*; plantation; pruning; growth; form quality

修枝通过去除下层枝条减少损耗^[1], 改变切口上下同化物质的运行速度及分配^[2], 影响着干、枝、叶之间的物质分配^[3-4], 减小了对高生长的抑制作用^[5], 进而影响树体生长和干材形质。对林木进行适度修枝, 可以提高树干的圆满度^[6-7], 培养良好的干形^[7-9]。南方红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *mairei* 是珍贵多用途树种^[7,10-12], 生长速度较慢, 自然整枝能力弱且侧枝发达, 存在着树干节多且干材欠圆满、尖削度大、出材率低等缺陷, 影响了木材品质和经济效益^[7]。促进生长与改良干材品质已成为珍贵用材林南方红豆杉研究的热点^[7,10-12]。需进行合理修枝, 并连续、充分发挥修枝促进效应, 其关键在于修枝强度与间隔期优化。当前有关修枝强度方面研究较多^[1-9,13-14], 肖祥希^[1]和刘盛等^[14]提出侧枝相对生长量法确定间隔期, 但在有关修枝后林木动态表现以及修枝强度与间隔期联合优化方面的研究未见报道。为此, 在福建省明溪县对 11 年生南方红豆杉人工林分进行修枝试验与连续观测, 试图通过分析修枝后的生长及干形形质表现掌握变化规律, 并基于材积增长最大化目标, 进行修枝强度与间隔期的优化, 以期南方红豆杉科学修枝提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及林分状况

试验地位于福建省明溪县沙溪, 地处亚热带, 海拔高度为 280 m, 年平均气温 15.7~18.6 °C, 年降水量 1 700~2 000 mm, ≥ 10 °C 的积温 4 525.8~5 472.9 °C, 年均无霜期 261.0 d, 坡向西北, 坡度 10°~15°; 土壤为砂岩发育的山地红壤, 土层厚度 100 cm, pH 4.5。

试验林分于 2000 年 2 月在生长良好的 17 年生杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林下(郁闭度 0.6), 采用 1 年生南方红豆杉裸根苗(苗高 25.00 cm, 地径 0.35 cm)套种, 连续抚育 4 a, 2 次·a⁻¹, 期间对上层木进行透光伐 1 次, 南方红豆杉保留密度 1 500 株·hm⁻²。2010 年 11 月对南方红豆杉进行修枝试验, 此后隔 1 a 对修枝和未修枝的南方红豆杉进行调查。调查时杉木保留密度为 600 株·hm⁻², 平均胸径 25.8 cm, 平均树高 18.0 m。杉木林分生长良好。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验采用 3 次重复 4 个处理的完全随机区组试验。沿等高线布设 4 个试验小区, 40 株·小区⁻¹。修枝处理设修枝 0.3, 修枝 0.4, 修枝 0.5(即去除 0.3, 0.4, 0.5 相对高以下的基部枝条)和未修枝的对照处理(ck)。

1.2.2 数据调查及分析 鉴于南方红豆杉珍贵用材培育目标, 本研究着重分析树高、胸径、单株材积以及冠长率、高径比、胸高形数等生长、干材形质性状指标。分别在修枝前与修枝后 5 a 间的 11 月进行生长及干材形质性状调查。测量每木树高、胸径和枝下高, 选择标准木 2~3 株·小区⁻¹, 按照 1 m 区分段方法实测单株材积, 并计算以下形质参数: 冠长=树高-枝下高, 冠长率=冠长/树高, 高径比=树高/胸径, 胸高形数($f_{1.3}$)= $V/(g_{1.3} \times h)$ 。其中: $f_{1.3}$ 为形数, V 为材积, $g_{1.3}$ 为胸高断面积, h 为树高^[7]。

1.3 南方红豆杉修枝技术优化

1.3.1 修枝强度优选 基于珍贵用材林培育目标, 本研究根据试验中修枝强度处理后的动态综合表现, 优选南方红豆杉修枝强度。

1.3.2 间隔期优化 基于修枝后材积增长最大化考虑, 取修枝后材积平均生长量最大化为优化间隔期。分别计算南方红豆杉单株材积修枝后各年限的连年生长量与平均生长量表现, 采用 Excel 2003 软件作生长量变化曲线图, 取曲线交叉点(时间点)作为优化后间隔期。单株材积连年生长量与平均生长量按式(1)和式(2)计算。

$$Z_n = V_n - V_{n-1}; \quad (1)$$

$$Q_n = (V_n - V_0)/n。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: Z_n 为修枝 n a 后单株材积连年生长量, Q_n 为修枝 n a 后单株材积平均生长量, V_n 为修枝 n a 后单株材积, V_{n-1} 为修枝 $(n-1)$ a 后单株材积, V_0 为修枝前的单株材积。

基于南方红豆杉修枝宜安排在休眠期的现实, 以及以上优化后间隔期往往不在年度节点的情况, 为方便实际操作进行优化后间隔期相邻年度选择显得十分必要。本研究通过综合修枝效应分析法进行选择, 综合修枝效应分析方法如下。①性状修枝效应指标转化。首先选择有显著修枝效应性状为修枝效应评价指标。性状修枝效应是修枝处理相对同一时期的对照(不修枝)某个性状的指标变化比例, 用 U_{ijk} 表示(i 表示第 i 个修枝强度处理, $i=0, 1, 2, 3$ 。 $i=0$ 表示对照处理; j 表示不同性状指标, $j=1, \dots, 7$; k 表示修枝后第 k 年, $k=1, 2, 3, 4$)。记南方红豆杉性状指标为 X_{ijk} , 胸径、树高、单株材积、高径比和胸高形数等性状指标都是愈大愈好, 呈递增关系。它们的效应指标按式(3)转化:

$$U_{ijk} = X_{ijk} / X_{0jk} - 1. \quad (3)$$

式(3)中: X_{0jk} 为对照的第 j 个性状修枝后第 k 年的指标值, U_{ijk} 单位为%。冠长率等指标都是愈小愈好, 呈递减关系。它们的效应指标按式(4)转化:

$$U_{ijk} = 1 - X_{ijk} / X_{0jk}. \quad (4)$$

②确定性状权重系数。胸径、树高、单株材积、高径比、胸高形数、冠长和冠长率均有着显著性修枝效应。依据南方红豆杉用材林培育目标, 依据专业知识, 经征询专家意见, 对上述性状评价指标分别给出相应权重系数, 权重系数总和为 1。③综合修枝效应计算。综合修枝效应是所有性状修枝效应综合后的表现, 为修枝促进生长、改良干材品质的综合指标, 用为 V_{ik} 表示(i 表示第 i 个修枝强度处理, $i=0, 1, 2, 3$; k 表示修枝后第 k 年, $k=1, 2, 3, 4$)。

$$V_{ik} = \sum U_{ijk} \times W_j. \quad (5)$$

式(5)中: W_j 为第 j 个性状的权重系数。④间隔期选择。分别计算相应间隔期(本研究修枝后年限视同间隔期)的综合修枝效应, 综合修枝效应最大的当选, 即假定 V_{ik} 值最大, 认定第 k 年间隔期合理。

1.4 数据分析

以试验小区平均值作为统计分析单元, 采用 Excel 2003 进行数据统计、方差分析与作图, 在方差分析差异显著性前提下, 采用 Duncan 氏新复极差法(SSR 法)进行多重检验。

2 结果与分析

2.1 修枝强度对林下南方红豆杉生长的影响

2.1.1 对南方红豆杉胸径生长的影响 结果显示(表 1 和表 2): 修枝前南方红豆杉胸径与对照均无显著性差异, 修枝后 1 a 未达到显著性差异水平; 修枝后 2 a 起, 修枝强度显著影响南方红豆杉胸径($P < 0.05$)。与对照比较, 不同修枝强度处理胸径变化不尽相同; 修枝 0.3 从修枝后 3 a 起, 显著高于对照($P < 0.05$); 修枝 0.4 在修枝 5 a 后, 显著优于对照; 修枝 0.5 自修枝 3 a 后起显著低于对照($P < 0.05$); 比较修枝后 5 a 间的处理的表现, 修枝 0.3 促进效应表现最好。为直观体现修枝效应随着修枝后时间推移的变化, 本研究提出与对照比概念(与对照比 = 修枝处理/对照处理 $\times 100\%$)。修枝后 1~5 a 修枝 0.3, 0.4, 0.5 的胸径与对照比分别为 100.55%~104.25%, 99.27%~101.20%, 96.61%~98.73%; 修枝 0.3 和修枝 0.4 的胸径与对照比极值点分别出现在修枝后 4 a 和 5 a, 表现为促进作用; 修枝 0.5 在修枝后 5 a 间均表现为抑制作用。研究认为, 修枝强度处理影响胸径生长, 对胸径影响效应随着时间推移逐渐显现。究其原因, 合理修枝强度能够形成理想树冠结构, 减少了损耗, 增加净同化能力, 促进胸径生长; 强度过大的修枝, 削弱了树体的光合作用和净同化能力, 从而抑制胸径生长。

2.1.2 对树高生长的影响 结果显示(表 1 和表 2): 修枝显著影响南方红豆杉树高($P < 0.05$)。修枝处理表现出显著促进高生长的时期不尽相同, 修枝 0.3 和修枝 0.4 高生长效应在修枝后 1~5 a 的观测期内持续存在; 修枝 0.5 仅出现在修枝后 1~4 a 期间, 并于修枝 5 a 后效应消失。修枝后 1~5 a 间, 修枝 0.3, 0.4, 0.5 的树高与对照比分别为 100.20%~104.93%, 101.83%~103.55%, 100.20%~101.58%, 均表现为促进效应; 不同处理的树高与对照比极值点不尽相同, 修枝 0.3, 0.4, 0.5 分别出现在修枝后 4 a, 3 a, 2 a; 修枝 0.4 和修枝 0.5 的促进效应到达极值点后下降甚至消失。究其原因, 修枝解除了树高生长的抑制作用^[2], 从而促进树高生长。修枝强度间显著性差异出现时间以及与对照比的变化, 是修枝后树

表 1 修枝后 1~5 a 南方红豆杉生长表现

Table 1 Growth of *Taxus wallichiana* var. *mairei* after pruning 1–5 years

<i>t/a</i>	胸径/cm			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	10.06 ± 1.02 a	10.09 ± 0.99 a	10.08 ± 0.71 a	10.06 ± 1.00 a
1	10.86 ± 1.09 a(98.73)	10.92 ± 1.07 a(99.27)	11.06 ± 0.98 a(100.55)	11.00 ± 1.14 a(100)
2	11.62 ± 1.15 bc(97.19)	11.76 ± 1.14 b(98.36)	12.10 ± 1.06 a(101.14)	11.96 ± 1.22 ab(100)
3	12.37 ± 1.23 c(96.61)	12.67 ± 1.24 b(98.96)	13.27 ± 1.17 a(103.67)	12.80 ± 1.31 b(100)
4	13.24 ± 1.31 c(97.12)	13.71 ± 1.33 b(100.51)	14.22 ± 1.26 a(104.25)	13.64 ± 1.39 b(100)
5	14.11 ± 1.35 d(97.72)	14.62 ± 1.37 b(101.20)	14.83 ± 1.47 a(102.65)	14.44 ± 1.43 c(100)

<i>t/a</i>	树高/m			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	6.33 ± 0.40 a	6.31 ± 0.37 a	6.33 ± 0.33 a	6.32 ± 0.27 a
1	6.80 ± 0.68 ab(100.99)	6.85 ± 0.67 a(101.83)	6.74 ± 0.61 bc(100.20)	6.73 ± 0.64 c(100)
2	7.29 ± 0.72 b(101.58)	7.41 ± 0.72 a(103.30)	7.26 ± 0.66 b(101.21)	7.18 ± 0.68 c(100)
3	7.70 ± 0.77 b(101.32)	7.87 ± 0.76 a(103.55)	7.91 ± 0.73 a(104.12)	7.60 ± 0.72 c(100)
4	8.13 ± 0.82 c(100.87)	8.32 ± 0.80 b(103.18)	8.44 ± 0.79 a(104.76)	8.06 ± 0.78 d(100)
5	8.53 ± 0.88 c(100.20)	8.74 ± 0.84 b(102.66)	8.93 ± 0.84 a(104.93)	8.51 ± 0.81 c(100)

<i>t/a</i>	单株材积/m ³			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	0.030 5 ± 0.007 4 a	0.030 5 ± 0.007 3 a	0.030 4 ± 0.006 2 a	0.030 3 ± 0.007 0 a
1	0.036 0 ± 0.008 5 a(97.90)	0.036 9 ± 0.008 6 a(100.46)	0.037 0 ± 0.007 8 a(100.75)	0.036 8 ± 0.008 7 a(100)
2	0.041 8 ± 0.009 2 c(95.17)	0.043 8 ± 0.009 5 bc(99.65)	0.045 6 ± 0.008 7 a(103.73)	0.044 0 ± 0.009 9 b(100)
3	0.047 8 ± 0.010 1 d(94.26)	0.052 1 ± 0.010 9 b(102.69)	0.057 1 ± 0.010 6 a(112.62)	0.050 7 ± 0.011 0 c(100)
4	0.055 3 ± 0.011 5 d(95.38)	0.061 3 ± 0.012 0 b(105.64)	0.067 2 ± 0.012 2 a(115.94)	0.058 0 ± 0.012 2 c(100)
5	0.063 0 ± 0.012 5 d(96.27)	0.069 7 ± 0.012 5 b(106.45)	0.073 2 ± 0.014 6 a(111.82)	0.065 4 ± 0.012 7 c(100)

说明：括号()中数据为与对照相比的百分率(%)。各处理平均值右侧“±”后的值为标准差，不同英文小写字母代表差异显著($P<0.05$)，字母相同差异不显著($P>0.05$)。

表 2 方差分析表

Table 2 Variance analysis table

<i>t/a</i>	胸径变异来源			树高变异来源			单株材积变异来源		
	处理	区组	机误	处理	区组	机误	处理	区组	机误
修枝前	0.001 9	7.408 8**	0.038 2	0.000 9	2.724 1**	0.019 9	3.61E-08	0.000 387**	2.22E-06
1	0.064 1	9.151 6**	0.046 7	0.028 5*	3.382 1**	0.007 9	2.02E-06	0.000 564**	1.42E-06
2	0.394 1**	10.392 9**	0.043 1	0.086 1**	3.874 2**	0.006 8	2.13E-05**	0.000 696**	2.09E-06
3	1.272 4**	12.279 6**	0.034 7	0.193 0**	4.450 9**	0.005 0	0.000 136**	0.000 912**	1.26E-06
4	1.438 6**	13.972 5**	0.032 2	0.275 1**	5.116 6**	0.004 8	0.000 237**	0.001 145**	8.13E-07
5	0.819 1**	15.823 1**	0.022 0	0.354 2**	5.685 5**	0.009 8	0.000 183**	0.001 372**	7.34E-06

说明：处理、区组和机误的自由度分别为 3，2，6；* 表示差异显著($P<0.05$)，** 表示差异极显著($P<0.01$)。

冠结构差异造成的。修枝强度越大、树冠较短，主梢早期生长所需物质能量充足，促其迅速高生长，但因树冠短小削弱截获光与光合作用能力，造成后期生长速度放缓。

2.1.3 对单株材积生长的影响 结果显示(表 1 和表 2)：修枝前南方红豆杉单株材积与对照均无显著差异，修枝后 1 a 单株材积未达到显著差异水平；修枝 2 a 后起有着显著修枝效应($P<0.05$)。与对照比较，不同处理单株材积表现不尽相同；修枝 0.3 和修枝 0.4 分别从修枝后 2 a 和 3 a 起显著高于对照($P<0.05$)，表现为促进作用；修枝 0.5 自修枝 2 a 后起显著低于对照($P<0.05$)；综合修枝后 5 a 间处理表现，修枝 0.3 促进单株材积生长最好。研究结果还显示：试验期间南方红豆杉单株材积年增长率均达 12% 以上，表明南方红豆杉处在材积速生阶段。修枝后 1~5 a 间，修枝 0.3，0.4，0.5 的单株材积与对照比分别为 100.75%~115.94%，99.65%~106.45%，94.26%~97.90%。修枝 0.3 和修枝 0.4 单株材积与对照比极值点分别出现在修枝后 4 a 和 5 a，分别为 115.942% 和 106.45%，促进作用明显；修枝 0.5 在修枝后 5

a 间均表现为抑制作用。研究结果显示：修枝强度处理间的单株材积和与对照比间的差距，均随时间推移而扩大。这与修枝改变树冠结构，影响净同化能力、地上生物量及其分配等有关^[13]。合理的修枝强度，减少了损耗，增加树干生物量与分配，从而促进材积增长；反之，过度修枝，削弱树木的净同化能力，抑制了材积增长，从而造成修枝强度间材积差异。修枝强度间材积差距随时间推移而扩大现象，可能是修枝效应累积结果。

2.2 对南方红豆杉干形形质的影响

2.2.1 对胸高形数的影响 结果显示(表 3 和表 4)：修枝前不同处理南方红豆杉胸高形数与对照均无显著差异，修枝后 1 a 胸高形数未达到显著差异水平。修枝 2 a，修枝显著影响胸高形数($P<0.05$)。修枝处理间呈现改良干形效应的时间不尽相同，修枝 0.3, 0.4, 0.5 分别出现在修枝后第 2 年、第 3 年和第 4 年。研究结果还显示，随着时间推移，南方红豆杉胸高形数不断降低，这可能与试验地立地条件良好，处在速生阶段南方红豆杉，树高与胸径生长迅速有关。修枝后 1~5 a 间，修枝 0.3, 0.4, 0.5 的胸高形数与对照比分别为 99.65%~102.04%，99.82%~101.49%，99.36%~100.57%；修枝 0.3 和修枝 0.4 的胸高形数与对照比极值点均为修枝 4 a 后，修枝 0.5 出现在修枝 5 a 后，均表现为促进作用。

2.2.2 对冠长率的影响 无节良材比例与冠长率负相关，冠长率越小，说明其无节材比例越高，材质越高，是衡量优质干材重要性状指标。结果显示(表 3 和表 4)：修枝前冠长率与对照均无显著差异。修枝显著影响南方红豆杉冠长率($P<0.05$)。修枝后 5 a 间，进行修枝的冠长率均显著小于对照($P<0.05$)，冠长率由高到低排序分别为对照>修枝 0.3>修枝 0.4>修枝 0.5，且处理间有着显著差异($P<0.05$)，以修枝 0.5 冠长率最小。修枝后 1~5 a 间，修枝 0.3, 0.4, 0.5 的冠长率分别是对照的 79.68%~86.35%，70.13%~78.05%，59.32%~69.01%；且在修枝后的 5 a 间，随时间推移修枝的冠长率不断增加，与对照的差距逐渐缩小，表明进行修枝能显著减少南方红豆杉冠长率，且这种影响在修枝后的 5 a 间持续

表 3 修枝后 1~5 a 南方红豆杉干形形质表现

Table 3 Stem form quality performance of *Taxus wallichiana* var. *mairei* after pruning 1–5 years

t/a	胸高形数			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	0.599 ± 0.030 a	0.598 ± 0.030 a	0.598 ± 0.030 a	0.598 ± 0.030 a
1	0.567 ± 0.034 a(99.36)	0.571 ± 0.032 a(99.99)	0.569 ± 0.029 a(99.65)	0.571 ± 0.034 a(100)
2	0.538 ± 0.037 d(99.26)	0.541 ± 0.037 bc(99.82)	0.545 ± 0.037 a(100.49)	0.542 ± 0.037 b(100)
3	0.515 ± 0.040 b(99.74)	0.523 ± 0.041 a(101.36)	0.521 ± 0.040 a(100.90)	0.516 ± 0.040 b(100)
4	0.493 ± 0.042 ab(100.27)	0.499 ± 0.044 a(101.49)	0.501 ± 0.042 a(102.04)	0.491 ± 0.042 b(100)
5	0.472 ± 0.043 c(100.57)	0.476 ± 0.047 a(101.42)	0.474 ± 0.041 b(101.00)	0.469 ± 0.044 d(100)
t/a	冠长率			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	0.896 ± 0.009 a	0.896 ± 0.002 a	0.891 ± 0.001 a	0.892 ± 0.003 a
1	0.533 ± 0.001 d(59.32)	0.630 ± 0.002 c(70.13)	0.716 ± 0.002 b(79.68)	0.899 ± 0.004 a(100)
2	0.565 ± 0.001 d(62.41)	0.658 ± 0.002 c(72.73)	0.736 ± 0.002 b(81.37)	0.905 ± 0.004 a(100)
3	0.588 ± 0.001 d(65.05)	0.678 ± 0.002 c(75.03)	0.758 ± 0.002 b(83.88)	0.904 ± 0.005 a(100)
4	0.610 ± 0.001 d(67.38)	0.695 ± 0.001 c(76.85)	0.773 ± 0.003 b(85.46)	0.905 ± 0.008 a(100)
5	0.628 ± 0.001 d(69.01)	0.710 ± 0.001 c(78.05)	0.786 ± 0.002 b(86.35)	0.910 ± 0.007 a(100)
t/a	高径比			
	修枝 0.5	修枝 0.4	修枝 0.3	对照
修枝前	62.95 ± 5.34 a	62.54 ± 3.99 a	62.76 ± 4.17 a	62.91 ± 3.41 a
1	62.58 ± 2.27 a(102.18)	62.76 ± 1.98 a(102.47)	61.01 ± 2.48 b(99.61)	61.25 ± 1.80 b(100)
2	62.74 ± 2.24 a(104.49)	63.04 ± 2.00 a(104.99)	60.06 ± 2.41 b(100.02)	60.04 ± 1.74 b(100)
3	62.28 ± 2.16 a(104.82)	62.15 ± 1.92 a(104.60)	59.64 ± 2.30 b(100.39)	59.41 ± 1.71 b(100)
4	61.39 ± 2.16 a(103.82)	60.69 ± 1.79 a(102.63)	59.39 ± 2.29 b(100.44)	59.14 ± 1.72 b(100)
5	60.43 ± 2.20 a(102.47)	59.79 ± 1.54 b(101.40)	60.28 ± 1.78 a(102.23)	58.97 ± 1.75 c(100)

说明：括号()中数据为与对照比(%)。各数值为平均值±标准差。不同英文小写字母代表差异显著($P<0.05$)，字母相同则差异不显著($P>0.05$)。

表 4 方差分析表

Table 4 Variance analysis table

<i>t/a</i>	胸高形数来源			冠长率变异来源			单株材积变异来源		
	处理	区组	机误	处理	区组	机误	处理	区组	机误
修枝前	2.00E-06	0.007 15**	2.50E-06	6.28E-05	7.59E-05	9.42E-05	0.319 56	31.416 78	2.395 532
1	2.83E-05	0.008 34**	6.40E-05	0.216 99**	2.36E-05	2.75E-05	7.276 98**	35.810 91**	1.158 841
2	6.83E-05**	0.011 07**	1.50E-06	0.187 05**	1.91E-05	3.19E-05	24.289 31**	34.679 82**	1.000 889
3	1.38E-4	0.013 10**	7.17E-06	0.161 53**	2.47E-05	3.79E-05	21.733 91**	32.217 47**	0.927 282
4	2.05E-4	0.014 43**	2.02E-05	0.141 32**	5.92E-05	7.81E-05	10.326 89**	31.216 93**	0.910 449
5	7.30E-05	0.015 29**	6.05E-05	0.129 14*	5.80E-05	6.16E-05	3.896 81*	25.643 73**	1.243 953

说明：处理、区组和机误的自由度分别为 3，2，6；* 表示差异显著($P<0.05$)，** 表示差异极显著($P<0.01$)。

存在。

2.2.3 对高径比的影响 结果显示(表 3 和表 4)：修枝前高径比与对照均无显著性差异，修枝显著影响南方红豆杉高径比($P<0.05$)。修枝后的 5 a 间，修枝 0.3，0.4，0.5 的高径比分别是对照的 99.61%~102.23%，102.47%~104.99%，102.18%~104.82%。修枝 0.3 高径比显著高于对照($P<0.05$)，与对照比最大值均在修枝后 5 a；修枝后的 5 a 间，修枝 0.4 和修枝 0.5 的高径比均显著大于对照($P<0.05$)，与对照比最大值分别出现在修枝后第 2 年和第 3 年。结果表明：合理强度的修枝显著提高南方红豆杉的高径比，减少树干尖削度。

2.3 间隔期优化

综合 2.1 和 2.2 结果，修枝显著影响南方红豆杉生长与干材品质，且出现促进生长、改良干材品质效应的时间点与影响规律不尽相同，合理修枝间隔期显得十分必要。结果显示：修枝 0.3 促进生长与改良干材品质总体效应最好。

基于实现材积增长最大化的目标，一般认为理想间隔期为修枝后材积平均生长量最高时，即平均生长量与连年生长量两曲线相交。为此，本研究对修枝 0.3 的修枝后 1~5 a 间的材积平均生长量与连年生长量计算并绘图(图 1)。结果显示：材积连年生长量最大值出现在修枝后第 3 年，为 $0.011 5 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ，以后明显下降；材积平均生长量最大值出现在修枝后第 4 年，为 $0.010 1 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ，而后下降。材积连年生长量与平均生长量曲线交叉点出现在修枝后 4.3 a，表明修枝理想间隔期为 4.3 a。进行间隔期 4 a 和 5 a 的综合修枝效应评价，经征询专家意见，树高、胸径、单株材积、胸高形数、冠长率、高径比的权重分别为 0.15，0.15，0.30，0.20，0.10，0.10。计算结果列表 5。

结果显示(表 5)：间隔期 4 a 的综合修枝效应为 8.04%>间隔期 5 a 的 6.47%当选；修枝 0.3 相对高修枝强度和 4 a 间隔期的修枝组合的树高、胸径、单株材积等生长性状较对照分别增加了 4.76%，4.25%，15.94%，胸高形数、高径比等干形形质较对照分别提高了 2.04%和 0.44%，冠长率下降了 14.54%，促进生长与干材品质改良。

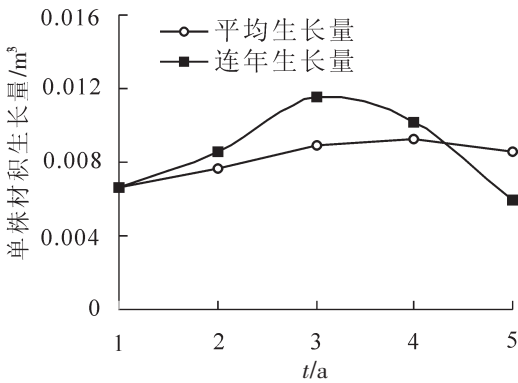


图 1 单株材积连年生长量与平均生长量曲线图

Figure 1 Individual annual volume growth and average growth graph

表 5 综合修枝效应表

Table 5 Comprehensive effect of pruning table

修枝处理	<i>t/a</i>	性状修枝效应/%						综合修枝效应/%
		树高	胸径	单株材积	胸高形数	冠长率	高径比	
修枝 0.3	4	4.76	4.25	15.94	2.04	14.54	0.44	8.04
修枝 0.3	5	4.93	2.65	11.82	1.00	13.65	2.23	6.47

3 结论与讨论

本研究系统分析了修枝对南方红豆杉生长及干形形质影响,揭示修枝后生长及干形形质性状的动态变化规律,为优化修枝技术等提供理论依据。研究认为,修枝显著影响南方红豆杉生长及干形形质,修枝强度间的生长及干形形质存在差异,且这种差异随修枝时间推移而发生变化。修枝强度间的生长与干形效应、动态变化规律、水平差异和出现显著差异的时间不尽相同,表明了合理修枝强度的重要性。随修枝后时间推移,南方红豆杉的生长与干形效应总体有着出现、上升、下降甚至消失的发展过程,表明持续修枝和合理间隔期的必要性。不同修枝强度的性状间修枝效应出现与持续的时间、程度也有所不同,说明合理修枝强度与间隔期组合是获得理想修枝促进效应的基础。持续合理修枝是珍贵用材林培育重要措施。这可能是与前人林木修枝效应结论相悖的原因^[15-16]。

本研究基于材积增长最大化目标,通过确定修枝后材积平均生长量最高年限,并根据生产实际需要,应用综合修枝效应评价方法进行年限选择,实现间隔期优化。研究筛选出0.3相对高修枝强度、4 a间隔期的修枝组合。该修枝组合的南方红豆杉胸径、树高、单株材积、胸高形数较对照分别增长4.25%, 4.76%, 15.94%, 2.04%, 冠长率下降了14.54%,促进生长与改良干材品质效果显著。

研究结论认为:修枝强度间南方红豆杉生长及干形形质效应有明显差异,合理修枝强度是促进林木生长、改良干材质量的有效措施,这与前人的研究结论相一致^[1-2,7-9,14,17-19]。研究结果显示,修枝0.3的胸径、树高、单株材积呈现促进效应时间分别为修枝后3~5 a, 2~5 a, 2~5 a,修枝0.4相应性状分别为修枝后5 a, 1~5 a, 3~5 a,而修枝0.5的树高促进效应时间为修枝后1~4 a,其胸径、单株材积更多地表现为抑制效应,并在修枝后3~5 a, 2~5 a持续存在。说明修枝0.3的树高、单株材积出现促进效应时间较胸径有所提前,修枝0.4出现促进效应时间前后的性状排序依次为树高、单株材积、胸径,2种修枝强度处理。以上结果表明,同一修枝强度其胸径、树高、单株材积修枝效应不尽相同,且出现与持续效应时间有着明显差异,同时处理间性状出现效应的作用与时间有所差异。研究结果还显示,在胸高形数方面,修枝0.3和修枝0.4出现且持续存在促进效应的时间分别为修枝后2~5 a, 3~5 a,但修枝0.5更多地表现为抑制效应,并与修枝后2~5 a达到显著性水平;在冠长率指标,修枝强度间均表现为抑制效应,且出现与持续效应时间均为修枝后1~5 a,但处理间差异显著,呈现随着修枝强度增加而减少的变化趋势;在高径比指标,除修枝0.3与对照间无显著差异外,修枝0.4和修枝0.5修枝后1~5 a间均显著性大于对照,2种处理差异水平仅于修枝后5 a达到显著,以修枝0.5表现最好。修枝强度间的南方红豆杉生长及干形形质效应,以及修枝后的变化规律不尽相同,这与前人研究结论相一致^[17]。有鉴于修枝强度间生长及干形形质效应差异以及修枝后的变化不一致性,认为进行修枝后性状连续观测,并科学优化修枝强度与间隔期,对充分持续发挥修枝促进树干生长与改良干材品质效应,尤其是慢生珍贵用材树种的培育显得十分重要和必要。

4 参考文献

- [1] 肖祥希. 修枝对福建柏林分生长及无节材形成的影响[J]. 林业科学研究, 2005, 18(1): 22 - 26.
XIAO Xiangxi. Effect of stem pruning on growth and knot free timber production of *Fokienia hodginsii* plantation [J]. *For Res*, 2005, 18(1): 22 - 26.
- [2] 李荣岐, 姜秀志. 红松人工林修枝效果的调查[J]. 林业科技, 2001, 26(5): 11 - 12.
LI Rongqi, JIANG Xiuzhi. Effect of pruning for *Pinus koraiensis* man-made stand [J]. *For Sci Technol*, 2001, 26(5): 11 - 12.
- [3] 黄枢, 沈国舫. 中国造林技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 1 - 635.
- [4] PINKARD E A, BATTAGLIA M, BEADIE C L, *et al.* Modeling the effect of physiological responses to green pruning on net biomass production of *Eucalyptus nitens* [J]. *Tree Physiol*, 1999, 19(1): 1 - 12.
- [5] REID D M, BURROWS W J. Cytokinin and gibberellin-like activity in the spring sap of trees [J]. *Experientia*, 1968, 24(2): 189 - 190.
- [6] 王保平, 李宗然, 文瑞钧, 等. 泡桐修枝促接干技术及其效应的研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 183 - 188.
WANG Baoping, LI Zongran, WEN Ruijun, *et al.* Pruning technique and its effects on paulownia trunk extension [J].

- For Res*, 2003, **16**(2): 183 – 188.
- [7] 欧建德. 基于多元统计分析的南方红豆杉幼林修枝技术[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, **40**(3): 183 – 187.
- OU Jiande. Pruning techniques of *Taxus chinensis* var. *mairei* young plantations based on multivariate statistical analysis [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2016, **40**(3): 183 – 187.
- [8] 盛伟彤. 国外工业人工林培育的目标及技术途径[J]. 世界林业研究, 1992(4): 75 – 83.
- SHENG Weitong. Objectives and cultivation techniques of industrial plantation [J]. *World For Res*, 1992(4): 75 – 83.
- [9] 方升佐, 徐锡增, 严相进, 等. 修枝强度和季节对杨树人工林生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2000, **24**(6): 6 – 10.
- FANG Shengzuo, XU Xizeng, YAN Xiangjin, *et al.* Effects of pruning intensities and pruning seasons on the growth dynamics of the poplar plantation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2000, **24**(6): 6 – 10.
- [10] 欧建德, 吴志庄. 南方红豆杉盆栽轻型基质配方优化[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(9): 52 – 55, 89.
- OU Jiande, WU Zhizhuang. Optimized medium ingredient with a light medium for *Taxus chinensis* var. *mairei* potted plants [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(9): 52 – 55, 89.
- [11] 欧建德, 吴志庄. 南方红豆杉幼龄期家系生长与观赏性状遗传变异[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(12): 7 – 11.
- OU Jiande, WU Zhizhuang. Genetic variation on the growth and ornamental characters of *Taxus chinensis* var. *mairei* plus tree families at young stage [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(12): 7 – 11.
- [12] 欧建德, 吴志庄. 景观型南方红豆杉家系和单株选择[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(1): 102 – 108.
- OU Jiande, WU Zhizhuang. Excellent families and plus trees of *Taxus wallichiana* var. *mairei* for landscaping [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2016, **33**(1): 102 – 108.
- [13] 欧建德, 张卫明, 刘森勋, 等. 林下观赏型南方红豆杉培育技术研究[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(4): 1585 – 1587.
- OU Jiande, ZHANG Weiming, LIU Senxun, *et al.* Research on understory cultivation technology of landscape type *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, **41**(4): 1585 – 1587.
- [14] 刘盛, 倪成才. 红松人工林修枝技术对林木生长和干形的影响[J]. 吉林林学院学报, 1997, **13**(2): 80 – 84.
- LIU Sheng, NI Chengcai. The influence of stem pruning on the growth and stem form of korean pine plantation forest [J]. *J Jilin For Univ*, 1997, **13**(2): 80 – 84.
- [15] PINKARD E A, BEADLE C L. Effects of green pruning on growth and stem shape of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden [J]. *New For*, 1998, **15**(2): 107 – 126.
- [16] 刘球, 李志辉, 陈少雄. 不同修枝强度对托里桉幼林生长的影响[J]. 桉树科技, 2010, **27**(1): 32 – 36.
- LIU Qiu, LI Zhihui, CHEN Shaoxiong. Growth response of young *Corymbia torelliana* plantation to different pruning intensities [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2010, **27**(1): 32 – 36.
- [17] 王春胜, 吴龙敦, 赵志刚, 等. 修枝高度对西南桦人工幼林生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(9): 51 – 54, 101.
- WANG Chunsheng, WU Longdun, ZHAO Zhigang, *et al.* Effects of pruning height on growth performance of young plantations of *Betula alnoides* [J]. *J Cen South Univ For Technol*, 2012, **32**(9): 51 – 54, 101.
- [18] 赵阳, 朱景乐, 马志刚, 等. 杨树溃疡病和杨树生长对修枝的响应[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(7): 112 – 116.
- ZHAO Yang, ZHU Jingle, MA Zhigang, *et al.* Responses of poplar canker and growth to pruning [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(7): 112 – 116.