

修枝强度对樟树幼林生长和光合特性的影响¹⁴⁾

罗成麟^{1,2}, 刘新亮¹, 郑永杰¹, 符潮¹, 章挺^{1*}

(1. 江西省林业科学院/国家林业草原樟树工程技术研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 江苏 南京 210037;)

摘 要:【目的】探究樟树幼林生长和光合特性对修枝强度的响应, 为樟树人工林的定向培育提供技术支撑。【方法】以 5 年生樟树人工林为研究对象, 分别设置修除树高 1/4、1/3 和 1/2 以下枝条 (T1~T3) 3 个处理, 以不修枝为对照 (CK), 比较不同修枝强度对材用樟树生长、伤口愈合和光合特性的影响。【结果】修枝后第 1 年, 樟树的胸径和单株材积生长受到抑制, 表现出随着修枝强度的增大而降低的趋势; 修枝后第 2 年, 各处理胸径和单株材积增长量均有所提升, 且 T2 处理单株材积增长量显著高于 CK。修枝 2 a 后, 各处理间胸径总增长量差异不显著, 但树高总增长量均显著高于 CK; T2 处理的树高和单株材积总增长量最大, 且显著高于其他处理。修枝伤口愈合率随修枝强度和伤口离地高度的增大而升高, 伤口完全愈合率随伤口离地高度的增加而升高。T1、T2 处理可显著提高樟树叶片的净光合速率 (P_n) 和瞬时羧化效率 (C E)。【结论】修除树高 1/3 以下枝条 (T2 处理) 为樟树幼林适宜的修枝强度, 既不影响樟树正常生长, 又能促进优良树体建成。

关键词:樟树; 修枝强度; 生长; 伤口愈合; 光合作用

中图分类号: S792.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 () -0000-00

Effects of pruning height on growth and photosynthetic characteristics and of young plantations of *Camphora officinarum*

Luo Chenglin^{1,2}, Liu Xin-liang², Zheng Yongjie², FU Chao², Zhang Ting^{2*},

(1. A Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu, 210037; 2. Camphor Engineering and Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang Jiangxi, 330013, China;)

Abstract: 【Objective】The response of pruning heights to the growth and photosynthetic characteristics of young *Camphora officinarum* trees was investigated to provide technical support for targeted cultivation of *C. officinarum* plantations.. 【Method】A 5-year-old *C. officinarum* artificial forest was used as the research object, three pruning heights treatment groups with pruning branches below 1/4, 1/3, and 1/2 of tree height were established, and the non-pruning group was used as the control to analyze the effects of pruning height on the growth, wound healing, and photosynthetic characteristics of *C. officinarum* trees. 【Result】The results showed that the breast height (DB) and individual volume (V) growth of *C. officinarum* were inhibited in the first year after pruning, showing a trend of decreasing with the increase of pruning intensity. In the second year after pruning, the DB and V growth of each treatment were increased, and the V growth of T2 treatment was significantly higher than that of CK. There was no significant difference in the total increase in DB among the treatments. The total increase in H among the pruning treatments was significantly higher than that of CK. The maximum increase in H and V was observed at T2, which was significantly higher than other treatments ($P<0.05$). The healing rate of pruned wounds showed a gradually increasing trend with the increase of pruning height and wound height above ground, and the

1) 江西省林业科学院基础研究与人才科研专项“材用樟树第一代育种群体构建”(2024512701), 国家重点研发计划项目“樟树等高效培育技术研究”(2016YFD0600605)。

第一作者简介: 罗成麟, 1999 年生, 男, 在读硕士生。Email: L18359088807@163.com

通信作者: 章挺, 1981 年生, 男, 研究员, 博士, 主要从事珍贵树种定向培育与良种选育工作。Email: zhangtycx@163.com。

complete healing rate of pruned wounds showed a gradually increasing trend with the increase of wound height above ground. T1 and T2 could significantly improve the net photosynthetic rate (Pn) and instantaneous carboxylation efficiency (CE) of leaves ($P < 0.05$). 【Conclusion】 Taking all factors into consideration, 1/3 pruning height is the appropriate pruning height for young plantation of *C. officinarum*, which does not affect normal growth and can promote the good construction of young plantation.

Key words: *Camphora officinarum*; Pruning height; Growth; Wound healing; Photosynthesis.

樟树 (*Camphora officinarum*) 又名香樟、芳樟, 为樟科 (Lauraceae) 常绿阔叶大乔木, 是我国重要的经济、用材和园林绿化树种 (陈宇琳等, 2024; 刘新亮等, 2020)。樟树具有材质优良、适生范围广、生长速度快等特点, 其木材密度适中、耐腐蚀虫蛀、纹理结构美观, 具有特殊的芳香气味, 是造船、橱柜、建筑及室内装饰的良材, 已成为我国南方集林区重点发展的珍贵用材树种和战略储备林树种 (徐胜林等, 2019; 薛晓明等, 2016)。为达到快速成林的目的, 樟树人工林造林密度一般设置为 $1\ 666 \sim 2\ 500$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (刘新亮等, 2019)。樟树在幼林时就会郁闭, 郁闭后枯死枝条不易脱落, 主干内易形成死结, 不利于培养良好干形, 降低了木材的经济价值。因此, 如何提高材用樟树无节材的产出已成为当前樟树用材林生产中亟需解决的问题。

人工修枝是指人为修除树冠中下部枯死或无功能枝条, 是森林抚育的重要措施之一。张甜等 (2017) 研究表明, 适度修枝可促进林木生长, 提高树干通直度, 但过度修枝则导致叶片数量大量减少、树体损伤严重, 从而影响林木生长速度。已有研究表明, 合理的修枝可减少木材结疤、增加出材率, 还能改善林木生长环境, 减少部分病虫害的发生 (沙子舟等, 2022; 唐庆兰等, 2017; 王春胜等, 2012)。因此, 修枝技术已成为人为调控林分树冠结构的重要手段, 是林分郁闭后改善林分结构和生长环境的重要措施, 也是培育树形优良林木、提高无节材产出的有效方法 (肖兴翠等, 2015)。目前, 有关樟树用材林定向培育技术的研究主要集中在种源选择 (姚小华等, 2002; 钟永达等, 2016)、立地条件 (廖德志等, 2018; 魏志恒等, 2018)、造林密度 (刘新亮等, 2019)、施肥 (刘新亮等, 2020)、混交林 (陈双双等, 2022; 李树忠等, 2004) 等方面, 关于樟树人工修枝技术的研究鲜有报道。因此, 本研究以赣北地区 5 年生樟树人工林为研究对象, 探讨了不同修枝强度对樟树生长、光合特性及节疤伤口愈合的影响, 以期对樟树用材林的定向培育提供理论依据。

1 研究区概况

试验地位于南昌市乐化镇 ($117^{\circ} 53' \text{ E}$, $28^{\circ} 51' \text{ N}$), 属亚热带湿润季风气候, 年均气温 17°C , 年均降雨量 $1\ 650 \text{ mm}$, 年均日照时数 $1\ 800 \text{ h}$, 无霜期约 260 d 。试验林海拔约 80 m , 土壤为黄红壤, pH 4.5 左右, 土层厚度 $> 2 \text{ m}$, 坡度 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$, 坡向西南, 土壤容重 $1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土壤 (0~60 cm 土层) 有机质含量 $12.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮、全磷、全钾含量分别为 0.89 、 0.27 和 $36.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 29.72 、 19.17 和 $120.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 研究方法

2.1 试验设计

2015 年春造林, 造林苗木为 2 年生樟树实生苗, 造林密度为 $1\ 666$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。分别设置修去 1/4、1/3 和 1/2 树高以下分枝 3 个处理 (T1~T3), 以未修枝为对照 (CK), 共 4 个修枝处理。每个处理重复 3 次, 共计 12 个标准样地, 每个样地面积为 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。修枝前调查各样地内樟树的胸径、树高、冠幅、通直度等指标 (表 1)。其中, 树干通直度参考肖德卿等 (2021) 的方法, 依次分为弯曲 (1 分)、一般 (2 分)、较通直 (3 分) 和通直 (4 分) 4 个等级。2020 年 2 月, 各样地分别选取 30 株长势一致的樟

树进行修枝试验。

表 1 各样地林木生长情况^①

Tab. 1 Basic growth data of trees in the experimental plot						
样地 Plot	重复号 Repetition	树高/m tree height/ m	胸径/cm DBH/m	冠幅/m crown diameter /m	通直度 Straightness	修枝高度/m Pruning height/m
1	1	4.69±0.38	5.60±0.44	2.09±0.21	3.25±0.43	0.54±0.59
2	2	4.94±0.39	5.97±1.03	2.27±0.41	3.10±0.21	0.44±0.16
3	3	4.55±0.53	6.32±0.69	2.22±0.32	3.05±0.16	0.47±0.16
4	1	4.09±0.19	5.71±0.65	2.17±0.37	3.15±0.24	1.02±0.05
5	2	3.84±0.45	5.78±1.37	2.02±0.49	3.05±0.16	0.96±0.11
6	3	4.40±0.22	5.94±1.07	1.97±0.41	3.50±0.47	1.10±0.06
7	1	4.30±0.28	5.27±1.07	2.18±0.36	3.05±0.16	1.43±0.09
8	2	4.22±0.32	5.84±0.82	2.34±0.26	3.15±0.34	1.41±0.11
9	3	4.35±0.30	5.79±0.64	2.20±0.44	3.10±0.21	1.45±0.10
10	1	4.54±0.19	6.40±0.88	2.19±0.27	3.20±0.35	2.27±0.10
11	2	4.64±0.24	6.06±0.66	2.42±0.21	3.10±0.21	2.32±0.09
12	3	4.61±0.38	6.56±0.95	2.39±0.24	3.05±0.16	2.31±0.19

①表中数值为“平均值±标准差。 The values in the table are Mean ± SD.

2.2 研究方法

2.2.1 生长指标 修枝后第 1 年、第 2 年（2020、2021 年）12 月调查各样地内樟树的树高、胸径等生长指标，并计算单株材积： $V=6.012\ 28\times10^{-5}\times D^{1.8755}\times H^{0.984\ 96}$ （张谦等，2014）。式中，V 为单株材积，D 为胸径，H 为树高。

2.2.2 伤口愈合情况 修枝后 3、6、12、16、20 个月，在每个样地内随机选取 5 株樟树，分别调查伤口愈合情况，其中伤口直径按上下和水平两个方向长度的平均值计算。根据伤口愈合数据计算伤口愈合率和完全伤口愈合率。其中，伤口愈合率=[（原修枝伤口直径-调查时伤口直径）/原修枝伤口直径]×100%；伤口完全愈合率=（完全愈合的伤口数量/修枝伤口总数量）×100%。

2.2.3 光合气体交换参数 修枝后第 1 年、第 2 年（2020、2021 年）6 月，各样地分别选取 5 株长势一致的樟树，选择每株樟树中部固定枝条生长正常向阳且均匀一致的 10 片叶片。运用 CIRAS-3 便携式光合作用测定系统（PP Systems，美国）测定净光合速率（ P_n ）、胞间 CO₂ 浓度（ C_i ）、气孔导度（ G_s ）和蒸腾速率（ T_r ）等光合气体交换参数，并计算叶片的瞬时羧化效率（ $CE=P_n/C_i$ ）和瞬时水分利用效率（ $WUE=P_n/T_r$ ）。光强设定为 1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹，CO₂ 浓度、温度与湿度均为自然环境水平。

2.2.4 数据处理 采用 Excel 2019 进行数据处理并汇总。采用 SPSS 26.0 进行方差分析和显著性检验，其中百分率数据采用反正弦平方根进行转换。

3 结果与分析

3.1 修枝强度对樟树幼林生长的影响

3.1.1 胸径 不同修枝强度处理下樟树幼林的胸径增长量见图 1。由图 1 可知，修枝后第 1 年，樟树胸径增长量随修枝强度的增大呈逐渐减小的趋势，但不同处理间差异均不显著（ $P>0.05$ ）。修枝后第 2 年，樟树胸径增长量随修枝强度的增大呈逐渐增大的趋势，T3 处理达到最大值。说明修枝初期樟树胸径的生长受到抑制，但待林分长势恢复后则会促进胸径的生长。修枝 2 a 后各处理林分胸径总增长量差异不显著。

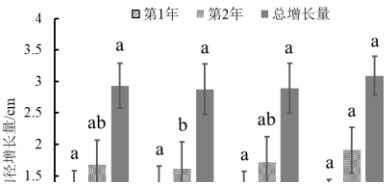


图1 修枝强度对樟树幼林胸径生长的影响

Fig. 1 Effect of pruning height on the growth of diameter at breast height of *C. officinarum*

T1~T3 分别表示修去 1/4、1/3 和 1/2 树高以下分枝。不同小写字母表示同一林型各月份间在 0.05 水平上差异显著, 下同。T1~T3 means to prune branches below 1/4, 1/3 and 1/2 tree height respectively. The different small letters indicate significant difference at 0.05 level among the different treatments in the same year, the same below.

3.1.2 树高 如图 2 所示, 修枝后第 1 年, 樟树树高增长量随修枝强度的增大呈先增大后减小的趋势, 在 T2 处理时最大, 达 1.37 m, 且显著高于其他处理 ($P<0.05$); CK 处理的树高增长量最小, 且显著低于各修枝处理。修枝后第 2 年, 樟树树高增长量随修枝强度的增大呈逐渐增大的趋势, 在 T3 处理时最大, 且显著高于 CK, 但与 T1、T2 处理差异不显著 ($P>0.05$)。修枝 2 a 后的树高总增长量随修枝强度的增大呈先增大后减小的趋势, 在 T2 处理时达到最大值, 且显著高于其他处理。以上说明修枝可以促进樟树树高的生长, 其中 T2 处理最有利于其生长。

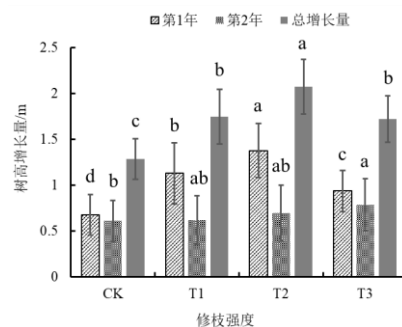


图2 修枝强度对樟树幼林树高生长的影响

Fig. 2 Effect of pruning height on the height growth of *C. officinarum*

T1~T3 分别表示修去 1/4、1/3 和 1/2 树高以下分枝。不同小写字母表示同一林型各月份间在 0.05 水平上差异显著, 下同。T1~T3 means to prune branches below 1/4, 1/3 and 1/2 tree height respectively. The different small letters indicate significant difference at 0.05 level among the three months in the same forest, the same below.

3.1.2 单株材积 不同修枝强度对樟树幼林单株材积生长的影响见图 3。修枝后第 1 年, 单株材积增长量随修枝强度的增大呈逐渐减小的趋势, 且各修枝处理单株材积增长量均低于 CK。其中, T3 处理单株材积增长量最小, 为 0.0051 m³, 与 CK 差异显著 ($P<0.05$), 但与其他 2 个修枝处理差异不显著 ($P>0.05$)。修枝后第 2 年, 单株材积增长量随修枝强度的增大呈先增大后减小的趋势, 且各修枝处理单株材积增长量均高于 CK。其中, T2 处理单株材积增长量最大, 且与 CK 差异显著, 但与 T1、T3 处理差异不显著; T1 和 T3 处理的单株材积增长量与 CK 间差异不显著。修枝 2 a 后, T2 处理单株材积总增长量显著高于其他处理。综合来看, 修枝初期樟树单株材积的生长受到抑制, 且抑制程度随着修枝强度的增大而升高; 修枝第 2 年林分长势恢复后, 修枝则会促进单株材积的生长, 以 T2 处理林分最为明显。

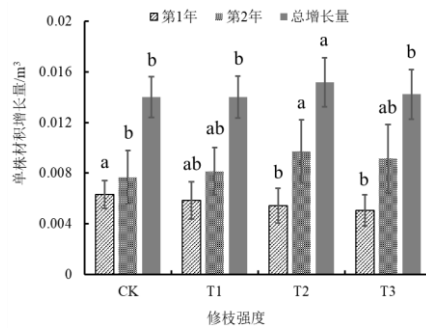


图3 修枝强度对樟树幼林单株材积生长的影响

Fig. 3 Effect of pruning height on the growth of individual volume of *C. officinarum*

3.2 樟树幼林修枝伤口愈合情况分析

3.2.1 修枝强度对樟树幼林伤口愈合的影响 不同修枝强度对樟树幼林伤口愈合的影响见图4。修枝伤口愈合率随着樟树的生长逐渐提高，且不同修枝处理间总体上差异显著 ($P<0.05$)。不同调查时期修枝伤口愈合率均随修枝强度的增大而升高，修枝后6、12、16和20个月，T3处理伤口愈合率显著高于其他2个处理；修枝后12、16和20个月，T2处理伤口愈合率显著高于T1处理。修枝后20个月，T3处理的伤口基本愈合，伤口愈合率达99.00%。

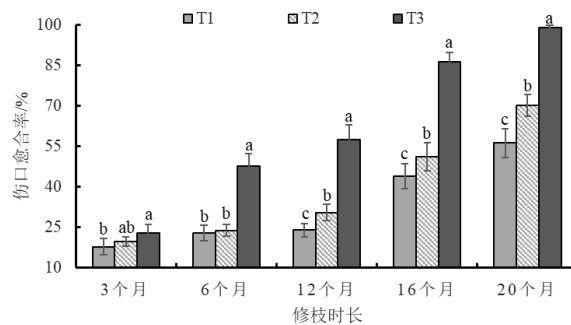
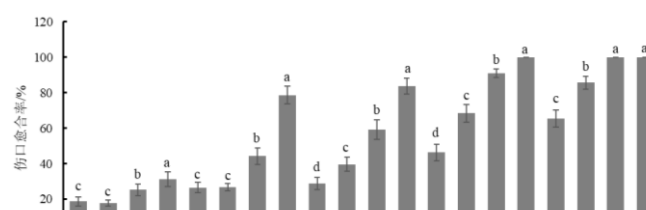


图4 不同修枝强度下樟树幼林的伤口愈合情况

Fig. 4 Effect of pruning height on the wound healing of *C. officinarum*

3.2.2 修枝伤口离地高度对樟树幼林伤口愈合的影响 如图5所示，樟树修枝伤口愈合率和伤口完全愈合率均随修枝伤口离地高度的增加而升高，且不同伤口离地高度间总体上差异显著 ($P<0.05$)。修枝后3、6个月，0~0.6 m伤口离地高度下樟树伤口愈合率与0.7~1.2 m高度差异不显著，但与1.3~1.8 m、1.9~2.4 m高度差异显著。修枝后12、16和20个月，0~0.6 m伤口离地高度下樟树伤口愈合率显著低于其他高度。除修枝后20个月外，各调查时期1.9~2.4 m伤口离地高度下樟树的伤口愈合率均显著高于其他高度。由图5还可知，修枝后6个月，1.3 m以上伤口离地高度樟树的伤口开始出现完全愈合现象，其中1.9~2.4 m高度伤口完全愈合率达62.50%；修枝后16个月，1.9~2.4 m高度樟树的修枝伤口全部愈合；修枝后20个月，1.3 m以上高度樟树的修枝伤口全部愈合。以上说明修枝伤口离地高度越高，樟树的修枝伤口越容易愈合。



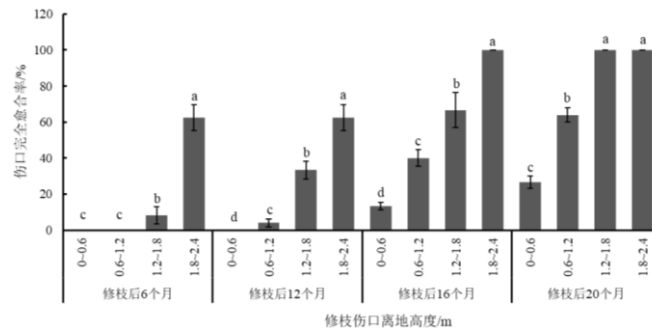


图5 不同修枝伤口离地高度下樟树幼林的伤口愈合情况

Fig. 5 Effect of pruning wound height on the wound healing of *C. officinarum*

3.2.3 修枝伤口直径对樟树幼林伤口愈合的影响 不同修枝伤口直径的伤口愈合率和伤口完全愈合率随樟树生长的变化趋势见图6。0~1.5 cm 直径范围内樟树的伤口愈合率在不同调查时期内均处于最高水平,在修枝后 16 个月内显著高于其他伤口直径范围 ($P<0.05$)。修枝后 3、6 个月, 3.0~4.5 cm 直径范围樟树伤口愈合率显著高于 4.5~6.0 cm 直径范围。修枝后 16、20 个月, 3.0~6.0 cm 直径范围樟树伤口愈合率随伤口直径的增大而升高,且各伤口直径范围间差异显著,这种反常现象与 3.0~6.0 cm 直径范围内修枝伤口高度多分布在中上部有关。由图 6 还可知,不同调查时期修枝伤口完全愈合率总体上随伤口直径的增大呈降低趋势。修枝后 6 个月, 0~3.0 cm 直径范围的修枝伤口开始愈合, 3.0~6.0 cm 直径范围的伤口未出现完全愈合现象。修枝后 20 个月, 0~1.5 cm 和 4.5~6.0 cm 直径范围的伤口完全愈合率均显著高于 1.5~3.0 cm 和 3.0~4.5 cm 直径范围。

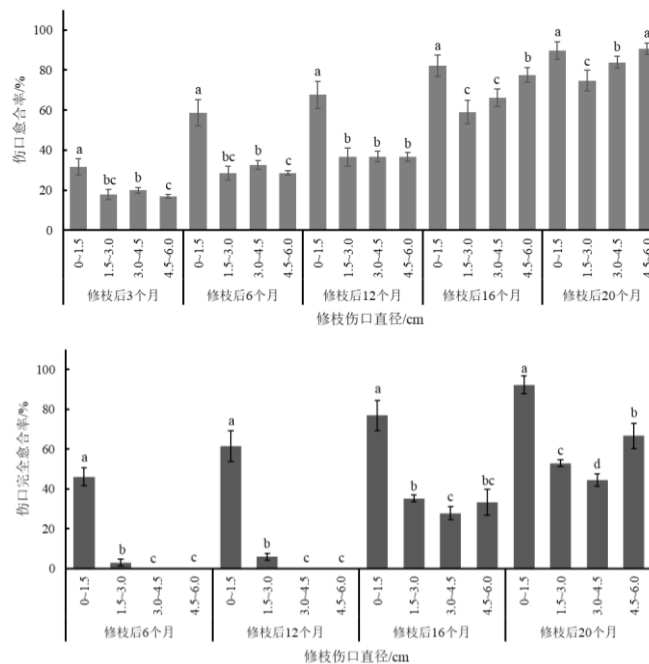


图6 不同修枝伤口直径下樟树幼林的伤口愈合情况

Fig. 6 Wound healing of *C. officinarum* with different pruning wound diameters

3.3 修枝强度对樟树幼林光合特性的影响

修枝强度对樟树幼林光合特性的影响见表 2。修枝后第 1 年，不同修枝处理下樟树叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 、WUE 和 CE 整体上差异显著 ($P<0.05$)，各处理间 C_i 差异不显著 ($P>0.05$)。随着修枝强度的增大，叶片 P_n 、WUE 和 CE 总体上表现出先升高后降低的趋势，其中 T2 处理 P_n 与 T1 处理差异不显著，但显著高于 T3 和 CK 处理。修枝后第 2 年，各修枝处理间 P_n 、 G_s 变化规律与第 1 年相似，各修枝处理 T_r 均显著高于 CK，而 WUE 则显著低于 CK；T1 和 T2 处理的 P_n 和 CE 均显著高于其他处理。以上表明，轻度 (T1) 和中度 (T2) 修枝能显著提高樟树幼林的光合作用。

表 2 修枝强度对樟树幼林光合特性的影响 (均值±标准误) ①

Tab. 2 Effects of pruning height on the photosynthetic characteristics of *C. officinarum* (Mean ± SE)

年份	处理	P_n / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	G_s / $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	C_i / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}$ ol^{-1}	T_r / $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	WUE	CE
第 1 年	CK	11.79±2.13b	424.97±55.95a	341.93±12.26a	2.21±0.17ab	5.59±0.99b	0.035±0.0076c
	T ₁	14.74±1.76a	385.60±16.94b	339.87±29.82a	2.11±0.63ab	7.04±1.92a	0.044±0.0068a
	T ₂	13.87±2.05a	423.57±53.74a	348.07±13.30a	2.33±0.66a	6.19±1.23b	0.040±0.0060b
	T ₃	11.79±2.43b	363.83±55.11b	342.07±15.24a	2.02±0.46b	6.22±1.10b	0.035±0.0078c
第 2 年	CK	11.75±2.36b	450.33±47.31a	312.84±30.85a	2.02±0.64b	6.81±1.44a	0.037±0.0070b
	T ₁	15.05±2.38a	399.31±48.44b	348.26±17.24a	3.64±0.53a	4.19±0.49b	0.043±0.0074a
	T ₂	14.55±1.58a	419.64±33.18a	340.28±22.22a	3.89±0.72a	4.01±0.48b	0.043±0.0056a
	T ₃	12.66±3.14b	422.00±44.42a	333.00±20.38a	3.47±0.80a	3.82±0.66b	0.038±0.010b

① T1~T3 分别表示修去 1/4、1/3 和 1/2 树高以下分枝。表中数值为“平均值±标准差”。同列数值后附不同小写字母者表示同一年份不同处理间差异达 0.05 显著水平。T1~T3 means to prune branches below 1/4, 1/3 and 1/2 tree height respectively. The values in the table are Mean ± SD. The different small letters indicate significant difference at 0.05 level among the different treatments in the same year, the same below.

4 讨论和结论

适度修枝可调节林木树干、枝条和叶片之间营养物质的合理分配，是培育无节良材的重要措施之一(王春胜等，2012；杨锐铄等，2015)。由于枝条发育特性、自然整枝及伤口愈合情况的差异，使得修枝对不同树种及树龄的生长、干形和圆满度的影响不同(刘球等，2010；王保平等，2003；Sprengel *et al.*, 2018)。本研究表明，T1 和 T2 修枝处理能显著提高樟树幼林树高的生长，但对胸径生长的影响不显著，而重度修枝 (T3 处理) 则会抑制林木正常生长。这与人对柚木 (*Tectona grandis*) (Viquez *et al.*, 2005)、西南桦 (*Betula alnoides*) (王春胜等，2012)、云南松 (*Pinus yunnanensis*) (李杨涛等，2015) 的修枝研究结果一致。修枝对樟树树高和胸径影响不同的结果符合林木修枝的补偿机制，即修枝后林木营养物质的运输速度和分配方式发生了改变，植物生长类激素被均衡运输到整个树干，增加了修枝切口上部的生长量，从而促进了树高的生长 (Hevia *et al.*, 2016；苏芳莉等，2008)。这种现象有利于樟树重建树冠光合能力的同时保持其生长优势。

修枝后第 1 年不同修枝处理对樟树胸径生长的影响差异不大，且 T2、T3 处理单株材积增长量显著低于 CK ($P<0.05$)，但修枝后第 2 年胸径和单株材积增长量较 CK 开始明显升高。这是由于樟树树干下部部分透光率较低的枝叶难以进行光合作用，多为无功能枝叶，而修枝主要剔除了这部分无功能枝叶，使得树体同化物质积累和消耗达到新的平衡，加之树体应对修枝的补偿机制，降低了修枝带来的不利影响(刘可欣等，2019)。修枝后第 1 年和第 2 年，T1 和 T2 处理下的 P_n 均显著高于 CK 和 T3 处理的结果也证实了这一结论。这种现象在水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) (刘可欣等，2019)、三倍体毛白杨 (*Populus tomentosa*) (任天梦等，2023)、坡垒 (*Hopea hainanensis*) (桂慧颖等，2022) 等树种的研究中也有发现。修枝后第 2 年各修枝处理的胸径增长量均明显高于第 1 年，这可能与第 1 年响应修枝伤害有关，根据光合作用同化物质就近分配原则，修枝去除部分下部枝条减少了树干基部营养物质来源，对树干胸径生长产生影响；这种抑制效应会随树冠逐渐恢复而逐渐解除，而修枝处理下 P_n 的明显提高也在一定程度上补偿了因修枝导致下部枝叶缺失引起的不利影响。虽然樟树在各修枝处理下第 1 年单株材积增长量较 CK 有所下降，

但在第 2 年明显高于 CK, 而 T2 处理的单株材积总增长量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。综合考虑樟木的生长情况及出材率, 修去 1/3 树高以下分枝 (T2 处理) 为樟树幼林合理的修枝强度。

修枝伤口愈合情况是评价修枝效果的重要指标 (O'Hara *et al.*, 2007; Hein *et al.*, 2008)。本研究发现, 不同修枝处理间伤口愈合差异显著 ($P<0.05$), 修枝伤口愈合率随樟树的生长及修枝强度的增大表现出逐渐升高的趋势。这可能与重度修枝增加了树干透光率, 改变了树冠同化物质与激素的分配规律有关, 修去部分无意义枝条, 增加了树干的物质分配, 促进了其韧皮部的生长, 从而提高伤口愈合率 (关追追等, 2021; 王志海等, 2019)。修枝伤口愈合率和伤口完全愈合率均随修枝伤口离地高度的增加呈升高的趋势, 这与托里按 (*Eucalyptus torelliana*) (刘球等, 2010) 的修枝伤口愈合研究结果一致。这是由于修枝伤口距离树冠越近, 周边韧皮部分生能力越强, 加上光合作用产生的同化物质运输距离较近, 从而导致伤口愈合的速度较快。伤口直径对修枝伤口完全愈合率及伤口愈合率影响显著, 同一修枝高度的伤口愈合快慢与伤口直径成反比关系。这与前人对红锥 (*Castanopsis hystrix*) (徐放等, 2022)、水曲柳 (关追追等, 2021)、连香树 (*Cercidiphyllum japonicum*) (李莉等, 2022) 的研究结果一致。

综上所述, 修枝对樟树幼林早期生长具有显著影响, 合理的修枝强度 (T2 处理) 可显著提高 P_n , 促进樟树幼林的树高与单株材积生长。林木自然整枝过程中, 枝条枯死脱落后树干伤口处常见霉菌滋生, 导致伤口愈合后容易形成死节 (关追追等, 2021)。本研究中, 人工修枝的伤口处未见霉菌生长, 故而降低了愈合后死节的发生, 提高无节材的产出。樟树幼林修枝后还应视实际情况对林分进行追肥, 以促进修枝伤口愈合和林分生长。本研究调查了樟树修枝后 2 a 林分的生长情况和叶片光合特性, 观测时间短, 仅从生长、光合和节疤伤口愈合角度探讨修枝对樟树幼林的影响, 而有关修枝对树体建成、生长动态、林下土壤理化性质等的影响有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 陈双双, 党 鹏, 朱宁华, 等. 2022. 两种石漠化等级下樟树-马尾松混交林林分结构及物种多样性. 中南林业科技大学学报, 42(4): 117-128.
- (Chen S S, Dang P Y, Zhu N H, *et al.* 2022. Stand structure and species diversity of the camphor - masson pine mixed forest under two rocky desertification grades. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 42(4): 117-128. [in Chinese])
- 陈宇琳, 吴凤英, 张伟婷, 等. 2024. 不同类型生物炭对芳香樟生长及光合特性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), (2): 1-11.
- (Chen Y L, Wu F Y, Zhang W T, *et al.* 2024. Effects of different biochar on growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora*. Journal of North west A & F University(Nat. Sci. Ed.), (2): 1-11. [in Chinese])
- 关追追, 冯晨辛, 张彦东. 2021. 水曲柳人工林节子愈合与变色特征. 东北林业大学学报, 49(1): 69-73.
- (Guan Z Z, Feng C L, Zhang Y D, *et al.* 2021. Knot occlusion and discoloration of *Fraxinus mandshurica* plantation. Journal of Northeast Forestry University, 49(1): 69-73. [in Chinese])
- 桂慧颖, 方发之, 麦有专, 等. 2022. 修枝强度对坡垒幼树生长和生理特性的影响及综合评价. 西部林业科学, 51(6): 79-85+100.
- (Gui H Y, Fang F Z, Mai Y Z, *et al.* 2022. Effects of pruning intensity on growth and physiological characteristics of *Hopea hainanensis* seedlings and comprehensive evaluation. Technical Research, (9): 62-64. [in Chinese])
- 李莉, 戴秀芳, 沙红, 等. 2022. 连香树修枝创口愈合观测. 林业科技通讯, (9): 62-64.
- (Li L, Dai X F, Sha H, *et al.* 2022. Observation on the healing of pruning wound of *Cercidiphyllum japonicum*. Technical Research, (9): 62-64. [in Chinese])
- 李树忠. 2004. 混交福建柏对樟树干材培育的影响. 林业科技开发, (5): 32-34.
- (Li S Z. 2004. Effects of mixed *Fokienia hodginsii* on dry wood cultivation of *Cinnamomum camphora*. Journal of Forestry Engineering, (5): 32-34. [in Chinese])
- 李杨涛, 李莲芳, 杨文君, 等. 2018. 修枝对云南松林分结构及生长影响的分析. 西南林业大学学报, 38(3): 44-50.
- (Li Y T, Li L F, Yang W J, *et al.* 2018. Analysis of pruning effecting on stand structure and growth of *Pinus yunnanensis*. Journal

of Southwest Forestry Engineering, 38(3): 44-50. [in Chinese])

廖德志, 魏志恒, 程 勇, 等. 2018. 坡位对 15 年生樟树纯林和樟杉混交林分生长的影响. 中南林业科技大学学报, 38(8): 14-18.

(Liao D Z, Wei Z H, Cheng Y, *et al.* 2018. The influence of slope position to the growth traits of 15 years old camphor pure forest and camphor & fir mix forest stands. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 38(8): 14-18. [in Chinese])

刘可欣, 赵宏波, 张新洁, 等. 2019. 修枝强度对水曲柳光合作用及细根非结构性碳的影响. 东北林业大学学报, 47(11): 42-46.

(Liu K X, Zhao H B, Zhang X J, *et al.* 2019. Effects of Pruning Intensity on Photosynthesis and Fine Root Non-structural Carbohydrates of *Fraxinus mandshurica*. Journal of Northeast Forestry University, 47(11): 42-46. [in Chinese])

刘 球, 李志辉, 陈少雄, 等. 2010. 托里桉修枝伤口愈合研究. 西北林学院学报, 25(4): 92-95.

(Liu Q, Li Z H, Chen S X, *et al.* 2010. Wound occlusion of pruning of *Corymbia torelliana*. Journal of Northwest Forestry Engineering, 25(4): 92-95. [in Chinese])

刘 球, 李志辉, 陈少雄. 2010. 不同修枝强度对托里桉幼林生长的影响. 桉树科技, 27(1): 32-36.

(Liu Q, Li Z H, Chen S X, *et al.* 2010. Growth response of young *Corymbia torelliana* plantation to different pruning intensities. Eucalypt Science & Technology, 27(1): 32-36. [in Chinese])

刘新亮, 刘 蕾, 何小三, 等. 2020. 施肥和修枝对材用樟树幼林生长的影响. 中南林业科技大学学报, 40(12): 54-59.

(Liu X L, Liu L, He X S, *et al.* 2020. Effects of fertilization and pruning on growth of *Cinnamomum camphora* plantations. 40(12): 54-59, (5): 32-34. [in Chinese])

刘新亮, 章 挺, 邱凤英, 等. 2019. 造林密度对材用樟树幼林生长和蓄积量的影响. 中南林业科技大学学报, 39(3): 23-27+60.

(Liu X L, Zhang T, Qiu F Y. 2019. Effects of planting density on the growth and stand volume of *Cinnamomum camphora* plantations. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 39(3): 23-27+60. [in Chinese])

任天梦, 鲍 雨, 苏亚勋, 等. 2023. 不同修枝处理对 10 年生三倍体毛白杨生长和光合特性的影响. 植物研究, 43(6): 846-856.

Ren T M, Bao Y, Su Y X, *et al.* 2023. Effects of different pruning treatments on growth and photosynthetic characteristics of 10-year-old triploid *Populus tomentosa*. Bulletin of Botanical Research, 43(6): 846-856. [in Chinese])

沙子舟, 范少辉, 冯随起, 等. 2022. 不同强度修枝对杉木人工林生长的影响. 西北林学院学报, 37(1): 131-136.

(Sha Z Z, Fan S H, Feng S Q, *et al.* 2022. Effects of different pruning intensities on the growth of *Cunninghamia lanceolata* plantations. Journal of Northwest Forestry Engineering, 37(1): 131-136. [in Chinese])

苏芳莉, 刘明国, 迟德霞, 等. 2008. 天然次生林抚育间伐效果. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), (2): 305-308.

(Su F L, Liu M G, Chi D X, *et al.* 2008. Thinning effect on growth status of natural secondary forest. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), (2): 305-308. [in Chinese])

唐庆兰, 任世奇, 郭东强, 等. 2017. 修枝对大花序桉生长和光合特性的影响. 热带作物学报, 38 (2): 264-268.

(Tang Q L, Ren S Q, Guo D Q. 2017. Effects of mixed *Fokienia hodginsii* on dry wood cultivation of *Cinnamomum camphora*. Chinese Journal of Tropical Crops, 38 (2): 264-268. [in Chinese])

王保平, 李宗然, 文瑞钧, 等. 2003. 泡桐修枝促接干技术及其效应的研究. 林业科学研究, (2): 183-188.

(Wang B P, Li Z R, Wen R J, *et al.* 2003. Pruning technique and its effects on *paulownia* trunk extension. Forestry Research, (2): 183-188. [in Chinese])

王春胜, 吴龙敦, 赵志刚, 等. 2012. 修枝高度对西南桦人工幼林生长的影响. 中南林业科技大学学报, 32(9): 51-54+101.

(Wang C S, Wu L D, Zhao Z G, *et al.* 2012. Effects of pruning height on growth performance of young plantations of *Betula alnoides*. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 32(9): 51-54+101. [in Chinese])

王春胜, 赵志刚, 吴龙敦, 等. 2012. 修枝高度对西南桦拟木蠹蛾为害的影响. 西北林学院学报, 27(6): 120-123.

(Wang C S, Zhao Z G, Wu L D, *et al.* 2012. Effects of pruning height on trunk boer (*Arbela* spp.) damage to *Betula alnoides*. Journal of Northwest Forestry Engineering, 27(6): 120-123. [in Chinese])

王志海, 尹光天, 杨锦昌, 等. 2019. 不同造林密度对米老排人工林枝条发育的影响. 林业科学研究, 32(2): 78-86.

(Wang Z H, Yin G T, Yang J C, *et al.* 2019. Effects of Planting Density on Branch Development of *Mytilaria laosensis* Plantations. Forestry Research, 32(2): 78-86. [in Chinese])

魏志恒, 潘军球, 吴际友, 等. 2018. 坡向及土层厚度对 15 年生樟树林分生长的影响. 中南林业科技大学学报, 38(7): 32-36+44.

(Wei Z H, Pan J Q, Wu J Y, *et al.* 2018. The influence of slope and soil thickness to 15-year-old *Cinnamomum camphora* growth

- traits. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 38(7): 32-36+44. [in Chinese]
- 肖德卿, 邓章文, 罗芊芊, 等. 2021. 幼龄红豆树生长和形质性状家系变异分析. 林业科学研究, 34(3): 152-157.
- (Xiao D H, Den Z W, Luo Q Q, *et al.* 2021. Growth and form-quality traits diversity analysis of young *Ormosia hosiei* Family. Forestry Research, 34(3): 152-157.. [in Chinese])
- 肖兴翠, 张志兰, 李志辉, 等. 2015. 不同强度修枝对湿地松中龄林干形的影响. 中南林业科技大学学报, 35(9): 22-29.
- (Xiao X C, Zhang Z L, Li Z H, *et al.* 2015. Effects of different intensities of pruning on stem form of middle-aged *Pinus elliottii* plantation. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 35(9): 22-29. [in Chinese])
- 徐放, 杨晓慧, 潘文, 等. 2022. 红锥树干节疤分布及修枝对生长的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 46(5): 121-126.
- (Xu F, Yang X H, Pan W, *et al.* 2022. Distributions of knots in trunks and pruning effects on growth in *Castanopsis hystrix*. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 46(5): 121-126. [in Chinese])
- 徐胜林, 何潇, 曹磊, 等. 2019. 广东省3个乡土树种树干密度和木材密度影响因子分析. 北京林业大学学报, 41(6): 44-54.
- (Xu S L, He X, Cao L, *et al.* 2019. Analysis of the factors affecting trunk density and wood density of three native tree species in Guangdong Province of southern China. Journal of Beijing Forestry Engineering, 41(6): 44-54. [in Chinese])
- 薛晓明, 谢春平, 孙小苗, 等. 2016. 樟和楠木的木材解剖结构特征和红外光谱比较研究. 四川农业大学学报, 34(2): 178-184.
- (Xue X M, Xie C P, Sun X M, *et al.* 2016. Comparason on anatomical structure and FTIR spectra between *Cinnamomum camphora* and *Phoebe zhennan* woods. Journal of Sichuan Agricultural University, 34(2): 178-184. [in Chinese])
- 杨锐铄, 陈强, 苏俊武, 等. 2015. 秃杉幼林生长对修枝强度的效应. 西部林业科学, 44(6): 66-71.
- (Yang R X, Chen Q, Su J W, *et al.* 2015. Effects of pruning intensity on the growth of young-age *Taiwania flousiana* plantations. Journal of Forestry Engineering, 44(6): 66-71. [in Chinese])
- 姚小华, 任华东, 孙银祥, 等. 2002. 樟树种源/家系早期性状变异及选择研究. 江西农业大学学报(自然科学), (3): 330-335.
- (Yao X H, Ren H D, Sun Y X, *et al.* 2002. A Study on juvenile *Cinnamomum camphora*'s genetic variance & dominant selection for provenance / families. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, (3): 330-335. [in Chinese])
- 张甜, 朱玉杰, 董希斌. 2017. 抚育间伐和修枝对落叶松用材林生长和冠层的影响. 东北林业大学学报, 45 (12): 8-11+21.
- (Zhang T, Zhu Y J, Dong X B, *et al.* 2017. Effects of thinning and pruning on the growth and canopy of larch forest. Journal of Northeast Forestry Engineering, 45 (12): 8-11+21. [in Chinese])
- 张谦, 曾令海, 蔡燕灵, 等. 2014. 樟树自由授粉家系生长与形质性状的遗传分析. 中南林业科技大学学报, 34(1): 1-6.
- (Zhang Q, Zhen L H, Cai Y L, *et al.* 2014. Genetic analyses on growth and form traits of open-pollinated families of *Cinnamomum camphora*. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 34(1): 1-6. [in Chinese])
- 钟永达, 袁凡, 孟伟伟, 等. 2016. 材用樟树遗传变异与苗期选择. 南昌大学学报(理科版), 40(2): 197-204.
- (Zhong Y D, Yuan F, Meng W W, *et al.* 2016. The genetic variation juvenile selection in *Cinnamomum camphora* using for timber. Journal of Nanchang University(Natural Science), 40(2): 197-204. [in Chinese])
- Hein S, Spiecker H. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.). Agroforestry Systems, 2008, 73(3): 205-218.
- Hevia A, Álvarez-González G, Majada J. Comparison of pruning effects on tree growth, productivity and dominance of two major timber conifer species. Forest Ecology and Management, 2016, 374: 82-92.
- O'Hara K L. Pruning wounds and occlusion: A long-standing conundrum in forestry. Journal of Forestry, 2007, 105(3): 131-138.
- Sprenkel L, Stangler D F, Sheppard J P, *et al.* Comparative analysis of the effects of stem height and artificial pruning on seasonal radial growth dynamics of wild cherry (*Prunus avium* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) in a widely spaced system. Forests, 2018, 9: 174.
- Viquez E, Viquez D P. Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. Silva Fennica, 2005, 39(3): 381-390.