

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230133

不同强度修枝对杉木生长和无节材形成的影响

王 娇^{1,2}, 关 欣^{1,3}, 黄 苛^{1,3}, 植可翔^{1,2}, 陈波翰^{1,2},
段 萱⁴, 杨佳敏^{1,2}, 张伟东^{1,3}, 陈龙池^{1,3}, 杨庆朋^{1,3*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 辽宁沈阳 110016; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 3. 湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站, 亚热带森林生态系统结构与服务功能湖南省重点实验室, 湖南会同 418307; 4. 山西师范大学地理科学学院, 山西太原 030000)

摘要: [目的] 针对杉木人工林生产力和木材质量降低的问题, 开展修枝试验, 分析修枝强度对林分生长和无节材形成的影响, 以期对杉木无节材培育提供理论依据。[方法] 以 8 年生杉木人工林为研究对象, 进行轻度修枝 (保留冠长的 75%, LP)、重度修枝 (保留冠长的 50%, HP) 和对照 (未修枝, CK) 3 种强度修枝处理, 10 年后比较不同强度修枝下杉木胸径、树高、材积、木材物理性质的差异, 利用旋切法测量节子数量与大小, 探讨修枝对林分生长和无节材形成的影响。[结果] 不同强度修枝对杉木胸径、树高、材积和饱满度均没有显著影响, 也未影响杉木活枝的枝下高和活枝数量。修枝节的直径、长度和体积均显著低于自疏节, 修枝处理也显著降低自疏节的数量。轻度修枝和重度修枝分别使单株节子总直径显著降低 27.6% 和 40.8%, 使单株节子总长度显著降低 26.4% 和 32.6%, 使单株节子总体积显著降低 27.8% 和 45.0%。与有节部分相比, 无节木材的密度显著降低, 抗压强度和抗弯强度显著增加。[结论] 对杉木人工林宜采用修枝措施, 在保持林分生长和材积不降低的前提下, 减少节子的数量和体积, 以提升杉木外观等级并促进杉木无节材的形成。

关键词: 杉木; 修枝; 生长; 节子; 物理力学性质

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)06-0040-08

修枝是促进木材生长、提高木材质量的主要人工林经营措施之一。下层枯枝、病枝、消耗枝等的修剪, 可以改变各器官营养物质运输分配过程, 从而影响林木的质量^[1]。之前已有关于修枝对林木生长影响的研究, 但研究结果并不一致。陈森锟等^[2]发现随修枝强度的增加, 短期内杨树胸径生长率降低, 也有研究认为, 修枝增加了林木的生长并降低了削尖度^[3-5]。修枝对林木生长的作用可能因林分类型、修枝强度以及修枝时间而有所差异^[6]。因此, 有必要探讨不同强度修枝对林木生长的长期影响, 以提高林木的生产价值。

修枝是减少活枝和死枝数量、改变节子状态的直接有效手段。枝条的生长与分布决定着节子的大小与分布, 而节子的存在会影响木材纹理的连续性和平整性^[7]。已有的研究发现, 人工修枝有助于杉木生产无节材, 减少节子对木材质量的影响^[8]。未经人为干扰培育的树木存在较多的节子, 木材质量相对较差, 对木材利用造成不利影响^[9]。通常, 节子在树干的 2~8 m 之间分布最多, 而该部分正是木材利用的核心部位^[10]。由于节子分布在树干内部, 很难直接观察测量, 目前主要是通过外部分支数据估计内部节的特征^[11], 这在一定程度上限制了

收稿日期: 2023-03-29 修回日期: 2023-05-10

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFD2201302, 2022YFF1303003); 国家自然科学基金项目 (41977092, U22A20612)

* 通讯作者: 杨庆朋, 博士, 副研究员。研究方向: 生态系统碳氮循环。E-mail: yqp226@iae.ac.cn

对节子大小和分布以及木材质量的准确评估。

木材材性是木材加工利用的关键指标。修枝措施会通过影响节子数量、大小以及分布等,对木材材性产生影响。目前修枝对木材材性影响的结果并不一致。Lee^[12]研究认为,减少枝条能够提高云杉的密度和抗压强度。沙子舟等^[13]研究发现,重度修枝可以收获高品质无节材,而轻度修枝可以增加木材产量。也有研究认为,一定强度的修枝对木材材性没有显著影响,而过度修枝会降低木材质量^[14-15]。因此,深入了解修枝、节子大小和分布、木材材性三者的关系是培育无节良材、提高林木利用价值的关键。

杉木是一种常绿速生针叶树种,居我国人工林面积首位,具有生长迅速、产量高的特点,具有重要的生态和经济价值^[16]。然而,近年来,部分地区杉木人工纯林出现生产力低下、质量偏低等问题^[17]。因此,本研究以中国科学院会同森林生态实验站2004年种植的杉木人工林为研究对象,于2012年随机进行轻度修枝(保留冠长的75%)和重度修枝(保留冠长的50%)处理,并以未修枝作为对照,分析不同强度修枝对林木生长状况和木材材性的影响,从而为杉木人工林无节材的生产及其可持续经营提供理论指导。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

本研究样地位于湖南省会同森林生态实验站杉木人工林(26°50'N, 109°36'E),海拔300~500 m。该地区属于中亚热带季风性湿润气候,年均温度为16.4℃,年均降水量为1200 mm。样地土壤类型为典型的山地红黄壤,质地粘重^[18]。

1.2 实验设计

2004年选择生长良好,基径、树高一一致的1年生杉木幼苗,以2 m×2 m的间隔种植。2012年采用完全随机试验设计,在杉木人工林设置3个处理,分别为对照(未修枝,CK)、轻度修枝(保留冠长的75%,LP)和重度修枝(保留冠长的50%,HP),每个处理6个重复。共设置18个小区,每个小区面积10 m×10 m。杉木人工林0~10 cm土层的基本理化性质分别为:土壤有机碳含量为19.08 g·kg⁻¹,全氮含量为1.83 g·kg⁻¹,土壤pH(H₂O)值为4.32,无机氮含量为19.11 mg·kg⁻¹,有效磷含量为2.24 mg·kg⁻¹^[19]。

1.3 指标测定

1.3.1 样品采集 2022年7月在18个小区内各选取1株可以代表林分状态的标准木,测量其胸径并在树干上标明南北方向。伐倒后测量并记录每株标准木的树高和根部至树干上每个枝条的高度、状态(死枝或活枝),统计活枝和死枝的数量。随后将树干枝丫打掉,在全树上标明南北方向。自树干基部向上截取4个1 m长的木段并做好标记,分别为0.2~1.2、2.0~3.0、4.0~5.0和6.0~7.0 m。在每株标准木的0.2、1.3、3.6、5.6、7.6、9.6、11.6和13.6 m处分别收集5 cm厚的圆盘并在非工作面(上方)标记北方位、断面高度以及树号。

1.3.2 标准木树干解析 待收集的所有圆盘稍加阴干,将圆盘工作面(下方)抛光后通过髓心画出东西、南北两条直径线,测量年轮宽度,获取胸径、树高、材积连年生长量以及饱满度等相关数据。其中,分段饱满度(T_r)为树木一定长度的某段主干上端直径与下端直径的比值^[20],计算公式如下:

$$T_r = (D_T/D_B) \times 100\%$$

式中, D_T 为某段主干上端直径, D_B 为该段下端直径。

1.3.3 节子数量及分布特征 采用旋切法进行节子特征研究^[21]。将每株标准木上截取的4个1 m长的木段用无卡轴旋切机旋切,将旋切好的木板按顺序铺开并对每张单板中的同一节子进行标记。由内而外记录每个节子的状态、数量、相对高度和直径,计算每个节子的长度和体积。通过节子直径变化等特征确定修枝年份,定义从修枝年开始愈合的节子为修枝节,剩余不定期开始愈合的节子为自疏节。

1.3.4 木材密度测定 测定木材的气干密度和绝干密度。在每个标准木有节子和无节子处分别切取20 mm×20 mm×20 mm的木材试样,测定弦向、径向和顺纹方向尺寸,得出试样体积 V_1 ,并称量试样质量 M_1 ,随后将试样烘干至恒质量,立即测量3个方向的尺寸并称量此时的质量 M_2 ,得出体积 V_2 。

气干密度计算公式如下:

$$\rho_w = M_1/V_1$$

绝干密度计算公式如下:

$$\rho = M_2/V_2$$

1.3.5 木材力学性质测定 在每个标准木有节子

和无节子处分别切取 300 mm × 20 mm × 20 mm 和 20 mm × 20 mm × 20 mm 的试样, 依据 B/T 1928—2009《木材物理力学试样方法》测定木段抗弯强度和抗压强度^[22]。

1.4 数据分析

采用重复测量方差分析和单因素方差分析检验修枝强度对胸径、树高和材积连年生长量影响的差异, 采用单因素方差分析和多重比较 (LSD) 检验修枝对胸径、树高、材积、枝下高、枝条数量、节子数量、体积与长度影响的差异显著性。采用双因素方差分析和多重比较检验修枝和节子有无对木材密度、抗压强度和抗弯强度影响的差异显著性。检验的显著性水平设置为 $p < 0.05$ 。所有数据分析使用 SPSS 软件, 绘图使用 Origin 2021 软件。

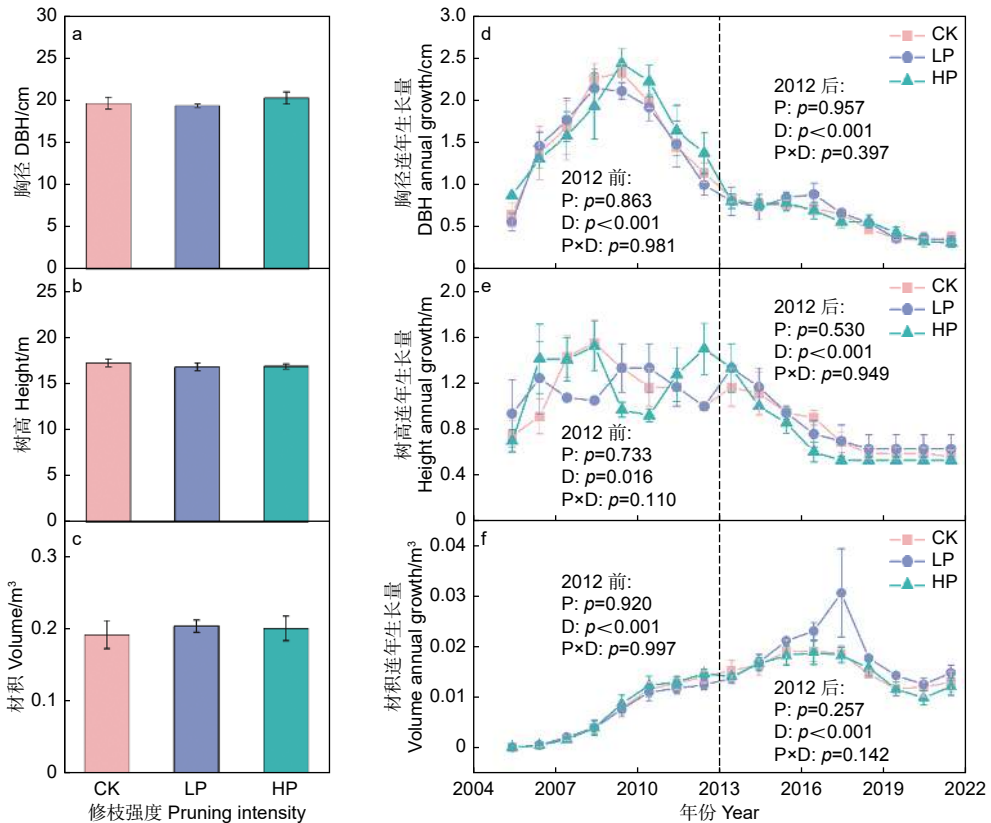
2 结果与分析

2.1 修枝对杉木生长的影响

胸径、树高和材积的变化范围分别为 19~

20.5 cm、16.5~17.5 m 和 0.19~0.21 cm³, 而不同强度的修枝并未显著影响杉木的胸径、树高和材积 (图 1a, b, c)。杉木的胸径连年生长量初期逐年增加, 到 2010 年达到最大, 之后随树龄的增长缓慢下降且趋于平稳 (图 1d)。杉木树高连年生长量初期较高, 在 0.8~1.6 m 范围内波动, 从 2014 年开始逐渐降低, 最终维持在 0.5 m 左右 (图 1e)。材积连年生长量初期逐年上升, 在 2018 年左右达到最大, 随后材积连年生长量开始降低 (图 1f)。2012 年修枝后, 胸径、树高和材积连年生长量仅随林龄有显著的改变 ($p < 0.05$), 而不同强度修枝对胸径、树高和材积连年生长量均没有显著影响 ($p > 0.05$)。单因素方差分析结果也显示, 不同林龄杉木的胸径、树高和材积连年生长量在不同强度修枝处理下没有显著差异。

随修枝强度增加, 树干第一个死枝的高度也显著增高。对照、轻度和重度修枝的死枝枝下高分别为 1.96 ± 0.23 m、 2.74 ± 0.26 m 和 5.28 ± 0.26 m



注: P: 修枝; D: 时间; P × D: 修枝与时间的交互作用; CK: 对照; LP: 轻度修枝; HP: 重度修枝。下同

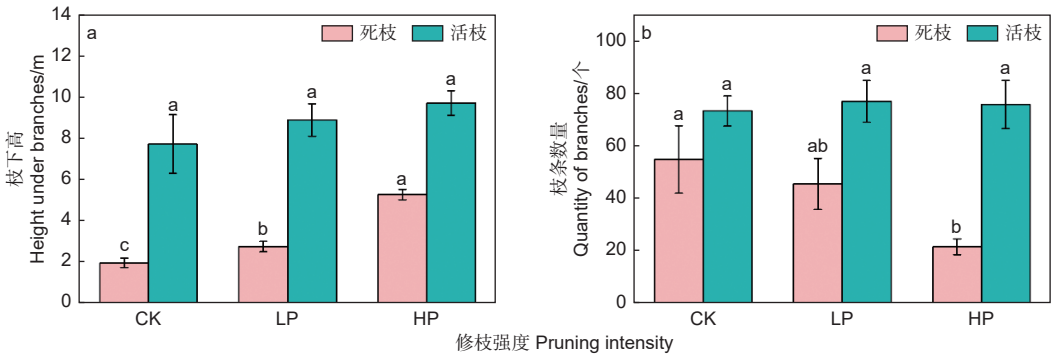
Note: P: Pruning; D: Date; P × D: Interactive effect between pruning and date; CK: Control; LP: Light intensity pruning; HP: Height intensity pruning. The same below

图 1 修枝对杉木胸径、树高、材积及其连年生长量的影响

Fig. 1 Effects of pruning on DBH, height and volume and annual growth of *Cunninghamia lanceolata*

(图 2a)。死枝条数量也随修枝强度增加而显著降低 ($p < 0.05$), 轻度和重度修枝分别使死枝数量显著降低 17.02% 和 60.80% (图 2b)。不同处理下活枝的枝下高在 7.7~9.7 m 范围内, 修枝

措施对第一活枝枝下高和活枝数量没有显著影响。修枝措施对杉木树干饱满度无显著影响 (图 3), 然而树干 1.3~3.6 m 和 3.6~5.6 m 段的树干饱满度显著高于胸径以下部分。

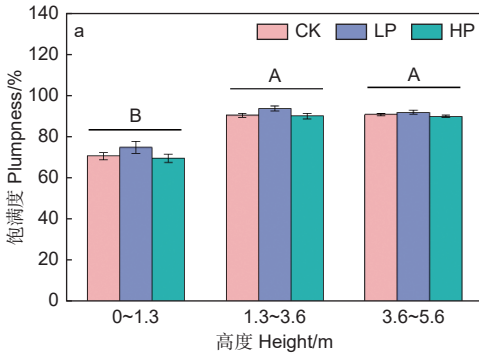


注: 不同小写字母代表同一枝条状态下不同修枝处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different pruning treatments in the same branch state ($p < 0.05$).

图 2 修枝对杉木枝下高和枝条数量的影响

Fig. 2 Effects of pruning on height under branches and quantity of branches of *Cunninghamia lanceolata*

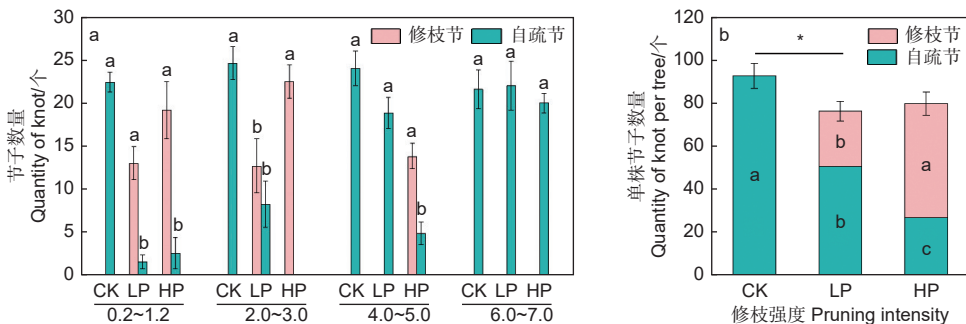


注: 不同大写字母代表不同高度之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different capital letters represent significant differences between different heights ($p < 0.05$).

图 3 修枝对杉木树干饱满度的影响

Fig. 3 Effects of pruning on plumpness of *Cunninghamia lanceolata*



注: 不同小写字母代表同一树段同一节子种类中不同处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments in the same knot types and height ($p < 0.05$).

图 4 修枝对杉木节子数量的影响

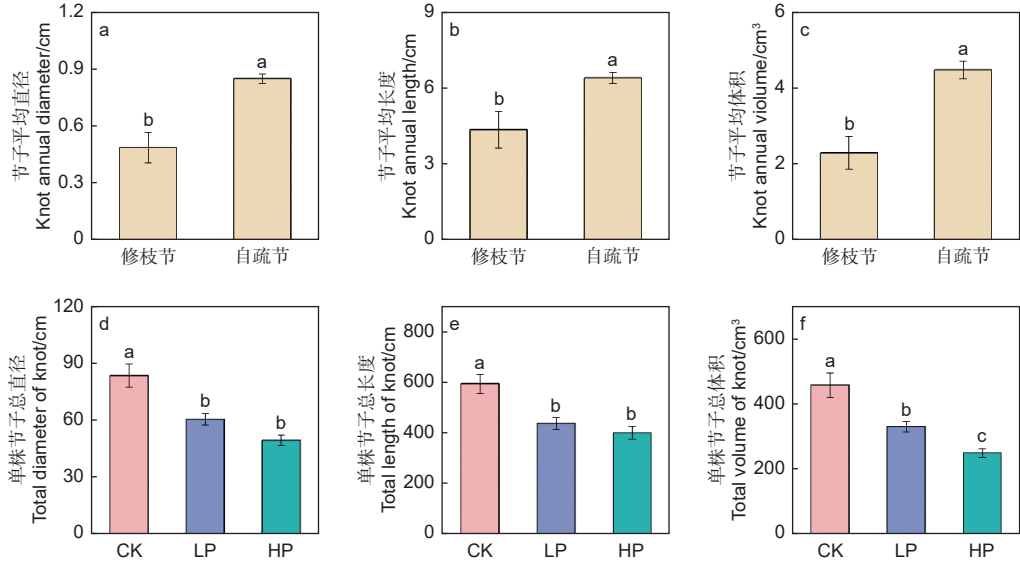
Fig. 4 Effects of pruning on quantity of knot of *Cunninghamia lanceolata*

2.2 修枝对杉木节子的影响

在杉木人工林中, 树干存在大量自疏后产生的节子, 0.2~1.2 m 和 2.0~3.0 m 段对照处理的自疏节数量显著高于修枝处理, 且 2.0~3.0 m 树段重度修枝的修枝节数量显著高于轻度修枝, 而 4.0~5.0 m 段对照的自疏节数量仅显著高于重度修枝处理 (图 4a)。在未修枝的 6.0~7.0 m 树段, 对照、轻度修枝和重度修枝处理下的自疏节数量无显著差异。轻度和重度修枝形成的修枝节分别占单株节子总数的 33.7% 和 66.7%。轻度和重度修枝分别使自疏节数量显著降低 45.5% 和 71.4% ($p < 0.05$), 且重度修枝的修枝节数量也显著高于轻度修枝 (图 4b)。

与自疏节相比, 修枝节的平均直径显著降低 42.6% ($p < 0.05$, 图 5a), 平均长度显著降低 32.0% ($p < 0.05$, 图 5b), 平均体积显著降低 48.8% ($p < 0.05$, 图 5c)。与对照相比, 轻度修枝使单株节子总直径和总长度分别降低 27.6% 和

26.4%, 而重度修枝分别使其减少了 40.8% 和 32.6% ($p < 0.05$, 图 5d, e)。同时, 轻度和重度修枝的单株节子总体积存在显著差异, 相比对照分别降低 27.79% 和 44.96% ($p < 0.05$, 图 5f)。



注: 不同小写字母代表不同节子类型或不同处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different knot species or different treatments ($p < 0.05$).

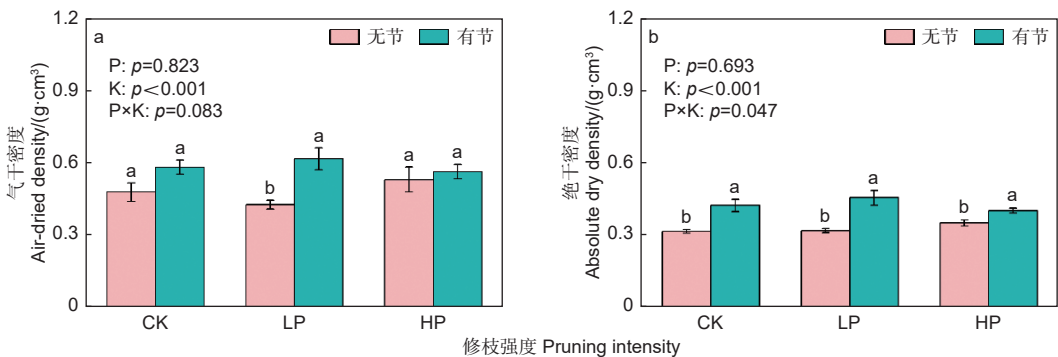
图 5 修枝对节子直径、长度和体积的影响

Fig. 5 Effects of pruning on diameter, length and volume of knot of *Cunninghamia lanceolata*

2.3 修枝对杉木材性的影响

相比有节木材, 轻度修枝处理下无节处木材气干密度显著降低 31.4% (图 6a), 而重度修枝木材密度没有显著降低。无节木材的绝干密度相比有节部分显著降低, 在对照、轻度修枝和重度修枝处理下分别降低 25.6%、30.3% 和 12.9% (图 6b,

$p < 0.05$)。修枝处理并没有显著改变木材的抗压强度和抗弯强度。无节木材的抗压强度和抗弯强度均显著高于有节木材 (图 7, $p < 0.05$)。与有节子部分相比, 对照、轻度修枝和重度修枝处理下无节木材的抗压强度分别增加 25.0%、10.6% 和 30.1%, 抗弯强度增加 31.89%、23.52% 和 19.86%。



注: P: 修枝; K: 节子; P × K: 修枝和节子的交互作用。不同小写字母代表同一修枝处理中节子有无之间差异显著 ($p < 0.05$)。下同

Note: P: Pruning; K: Knot; P × K: Interactive effect between pruning and knot. Different lowercase letters represent significant differences between the presence and absence of knot in the same pruning treatments ($p < 0.05$). The same below

图 6 修枝对杉木气干密度和绝干密度的影响

Fig. 6 Effects of pruning on air-dried wood density and absolute dry density of *Cunninghamia lanceolata*

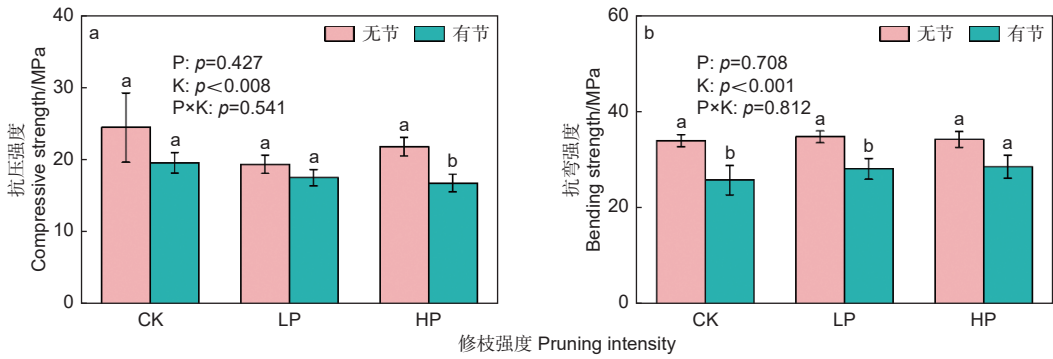


图7 修枝对杉木材物理力学性质的影响

Fig. 7 Effects of pruning on physical and mechanical properties of *Cunninghamia lanceolata*

3 讨论

不同强度修枝对杉木人工林的生长状况没有显著影响。通常, 修枝后叶片大量损失导致冠层碳固定减少, 从而降低树木生长^[23-24]。然而, 本研究中修枝并未显著影响杉木的胸径、树高和材积(图1), 这可能是因为修枝后剩余叶片的气孔导度、CO₂固定酶等增加, 使植物光合作用增强从而获得最佳的碳收益^[25], 这与徐清乾等^[26]报道修枝后杉木的树高、胸径和材积没有显著差异的结果是一致的。同时, 修枝前后不同处理的胸径、树高和材积连年生长量没有显著差异, 也表明修枝后杉木通过提高剩余冠层的光合作用来诱导树木的补偿性生长。一般而言, 随树高增加, 侧枝对主干的抑制作用越大, 树干的削尖度也越大^[27], 因此合理的修枝可以增加树干圆满度, 提高木材出材率^[28]。然而本研究发现, 杉木树干的饱满度受修枝强度的影响较小(图3)。这可能是因为本研究中杉木林分密度(2 m × 2 m)相对较高, 而修枝处理对树干饱满度的影响受林分密度调控。马咏春等^[29]也发现修枝可以增加低密度(6 m × 6 m)林分的树干饱满度, 而对高密度(3 m × 6 m)林分无显著影响。

节子的数量和大小与修枝强度密切相关。通常, 杉木生长和树冠郁闭造成下层枝条养分缺乏且不能进行光合作用而逐渐脱落, 具有一定的自疏能力, 可以通过自身调节减少节子数量^[1]。Wang等^[30]的研究也表明, 主干生长有利于修枝伤口的愈合, 减少节子生成。本研究采用旋切法, 发现自疏节的直径和体积均显著高于修枝产生的节子(图5), 表明修枝后节子随着杉木生长发育逐渐被包裹起来, 阻止了节子的持续生长, 提高了培育无节材的效率。同时, 自疏节的长度也显著高于修枝节的长

度, 这可能是因为自疏过程会导致快速生长的杉木形成死结并在内部形成弯曲绕行的树脂道, 表明在枝条具有活力的情况下修剪效果更好^[1]。本研究的结果也发现, 随修枝强度增加, 单株自疏节数量显著减少, 修枝节数量显著增加(图4)。此外, 轻度和重度修枝均显著降低单株节子总直径、总长度和总体积, 表明修枝处理下节子直径更细、长度更短、体积更小, 有效提升了杉木的木材质量。相比轻度修枝, 重度修枝显著降低节子体积, 表明重度修枝在不影响杉木生长的前提下, 培育无节材的效果更好。

修枝通过减少节子从而改变木材物质性质并提高木材质量。本研究发现, 相比有节材, 无节材气干密度和绝干密度均显著降低(图6), 这可能是因为节子部位的木质素含量和木质化程度较无节部位更高, 且节子作为枝条的基部易受环境影响, 其密度稳定性优于干材^[31-32]。这表明节子会导致木材密度分布不均, 致使木材在干燥时易开裂, 从而影响木材材质的稳定性, 降低木材性质的均一性和美观性^[33]。此外, 节子通常被认为是规格材等级的主要降等缺陷之一, 对结构材构件的连接、稳定性、承载力等都有显著影响^[34]。刘松龄等^[35]研究发现, 杉木节子对构件的抗弯强度影响较大, 节子的尺寸与抗弯强度成反比。郭宇航等^[36]也报道节子一定程度上降低木柱轴心的稳定承载力。一致的是, 本研究的结果也发现相比于有节木材, 无节木材的抗压强度和抗弯强度均显著增加(图7)。考虑到节子尺寸与木材抗压、抗弯强度成反比, 本研究中修枝降低节子直径、长度和体积, 尤其是重度修枝处理的节子体积显著小于轻度修枝, 这表明修枝不仅从生长方面影响木材产量, 也通过改变树干

内部细胞结构提高木材的抗性从而在木材外观质量等级方面提升木材质量^[1,37]。因此,可以通过合理的修枝,减小木材的形变,提高木材的刚度和品质,延长木制产品的使用时效。

4 结论

本研究发现修枝措施有利于杉木无节材的培育。轻度和重度修枝均未影响杉木人工林的胸径、树高和材积及其连年生长期,也未影响树干的饱满度和活枝数量。此外,与有节木材相比,无节部位的密度较低,抗弯强度和抗压强度更高,表明节子的存在降低了杉木木材的质量。轻度和重度修枝均显著降低杉木单株节子总直径和总长度,但与轻度修枝相比,重度修枝显著降低杉木单株节子总体积,表明2种强度修枝均可以在不影响杉木生长的情况下提升木材质量,但重度修枝在木材外观等级的提升方面效果更好。

参考文献:

- [1] 刘 球,李志辉,陈少雄.桉树无节材修枝技术研究进展与展望[J].桉树科技,2009,26(2):14-17.
- [2] 陈森锟,尹伟伦,刘晓东,等.修枝对欧美107杨木材生长量的短期影响[J].林业科学,2008,44(7):130-135.
- [3] 陈孝丑.不同强度修枝对杉木干形的影响[J].林业科技开发,2008,21(3):87-88.
- [4] 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.
- [5] 林国刘.修枝抚育对杉木生长量的影响研究[J].林业调查规划,2021,46(2):137-142.
- [6] 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.
- [7] Shigo A L. How tree branches are attached to trunks[J]. Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique, 1985, 63(8): 1391-1401.
- [8] Qin G M, Hao J, Yang J C, et al. Branch occlusion and discoloration under the natural pruning of mytilaria laosensis[J]. Forests, 2019, 10(10): 892.
- [9] O'Hara K L. Pruning wounds and occlusion: A long-standing conundrum in forestry[J]. Journal of Forestry, 2007, 105(3): 131-138.
- [10] 郝 建,蒙明君,黄德卫,等.格木人工林节子的分布特征及预测模型[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(3):100-104.
- [11] Torkaman J, Vaziri M, Sandberg D, et al. Relationship between branch-scar parameters and knot features of oriental beech (*Fagus orientalis* Libsky)[J]. Wood Material Science & Engineering, 2018, 13(2): 117-120.
- [12] Lee S J. Improving the timber quality of Sitka spruce through selection and breeding[J]. Forestry, 1999, 72(2): 123-133.
- [13] 沙子舟,范少辉,冯随起,等.不同强度修枝对杉木人工林生长的影响[J].西北林学院学报,2022,37(1):131-136.
- [14] 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.
- [15] 叶忠华.修枝、施肥处理影响福建柏木材材性研究[J].山地农业生物学报,2012,31(5):393-398.
- [16] Wang J, Yang Q P, Zhang W D, et al. Response of soil respiration to simulated acid rain with different ratios of SO_4^{2-} to NO_3^- in *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. and *Michelia macclurei* Dandy plantations[J]. Forests, 2022, 13(11): 1915.
- [17] 程朝阳.杉木人工林无节材培育技术研究[J].林业科学研究,2005,18(5):530-534.
- [18] 王 娇,关 欣,张伟东,等.杉木幼苗生物量分配格局对氮添加的响应[J].植物生态学报,2021,45(11):1231-1240.
- [19] 王 娇,关 欣,黄 苛,等.酸雨和根系去除对杉木和火力楠人工林土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2023,34(4):937-945.
- [20] 马永春,余诚棋,方升佐.不同修枝方法对杨树人工林生长、光合叶面积和主干饱满度的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):137-142.
- [21] 赵 辉.燕山山地华北落叶松人工林修枝高度研究[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [22] 中华人民共和国国家标准.木材物理力学试验方法[M].北京:中国林业出版社,2009.
- [23] 段爱国,赵世荣,章允清,等.杉木中密度幼林光环境与生长修枝效应[J].福建林学院学报,2009,29(4):340-344.
- [24] Maurin V, DesRochers A. Physiological and growth responses to pruning season and intensity of hybrid poplar[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 304: 399-406.
- [25] Li R S, Han J M, Guan X, et al. Crown pruning and understory removal did not change the tree growth rate in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 464: 118056.
- [26] 徐清乾,张 颢,黄 帆,等.修枝强度对杉木生长的影响[J].湖南林业科技,2019,46(3):66-70.
- [27] 邱贵福,张旭明,王树凯,等.毛白杨侧枝与主干关系的研究[J].内蒙古林业科技,2005(4):9-11.
- [28] 马丙尧,邢尚军,井大炜,等.不同修枝强度对杨树生长的短期影响[J].山东林业科技,2014,44(4):26-28.
- [29] 马永春,方升佐.欧美杨107不同冠层光合特性的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(4):39-42.
- [30] Wang S Y, Lin C J, Chin C M. Effects of thinning and pruning on knots and lumber recovery of *Taiwania (Taiwania cryptomerioides)* planted in the Lu-Kuei area[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(5): 444-449.

- [31] 朱 莉, 石江涛. 红松应力木木材形成组织的化学组成特征分析[J]. 植物研究, 2012, 32(2): 232-236.
- [32] Kebbi-Benkeder Z, Colin F, Dumarcay S, et al. Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species[J]. Annals of Forest Science, 2015, 72(2): 277-284.
- [33] 李明月, 陈东升, 王雪玉, 等. 节子的性质及其对木材材性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 197-204.
- [34] 龚迎春, 王朝辉, 江京辉, 等. 杉木目测等级规格材足尺抗压和拉伸强度的设计值研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 22-27.
- [35] 刘松龄, 方文彬, 李飞云. 杉木木节对受弯构件承载能力影响的研究[J]. 中南林学院学报, 1981(1): 22-38.
- [36] 郭宇航, 周淑容, 崔 佳, 等. 木节对轴心受压胶合木柱稳定承载力的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 44-49.
- [37] Thomas D S, Montagu K D, Conroy J P. Effects of leaf and branch removal on carbon assimilation and stem wood density of *Eucalyptus grandis* seedlings[J]. Trees-Structure and Function, 2006, 20(6): 725-733.

Effect of Pruning on Growth and Knot Free Timber Production of *Cunninghamia lanceolata*

WANG Jiao^{1,2}, GUAN Xin^{1,3}, HUANG Ke^{1,3}, ZHI Ke-xiang^{1,2}, CHEN Bo-han^{1,2},
DUAN Xuan⁴, YANG Jia-min^{1,2}, ZHANG Wei-dong^{1,3}, CHEN Long-chi^{1,3}, YANG Qing-peng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Hunan Key Laboratory for Structure and Ecosystem Service of Subtropical Forest, Huitong 418307, Hunan, China; 4. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] In order to improve the productivity and timber quality of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), a pruning experiment was carried out in a Chinese fir plantation. The impacts of pruning intensity on stem growth and knot free timber production were analyzed, which aims to provide guidance for cultivation of knot free timber. [Method] In this study, we performed different pruning intensities in 8-year-old Chinese fir plantation, including light intensity pruning (retaining 75% of crown height, LP), heavy intensity pruning (retaining 50% of crown height, HP) and the control (unpruned, CK). The quantity and size of knots were measured by rotary cutting method. The differences of DBH, height, volume and the quantity or size of knot among different treatments were compared after 10 years of pruning. [Results] Results showed that pruning had no significant effect on DBH, tree height, volume, plumpness, height of the first living branch and quantity of living branches of Chinese fir. Pruning substantially decreased the quantity of knot of self-pruning, so the diameter, length and volume of knot after pruning were lower than self-pruning knots. LP and HP remarkably reduced total diameter of knot per tree by 27.6% and 40.8%, and total length of knot per tree by 26.4% and 32.6%, and total volume of knot per tree by 27.8% and 45.0%, respectively. Moreover, compared with the knotted wood, the density of knot free timber was significantly decreased, and the compressive strength and bending strength were increased significantly. [Conclusion] It is appropriate to take pruning measures in Chinese fir silviculture plantations, which can not only effectively reduce quantity and volume of knot, and improve the appearance grade and knot free timber, but also maintain the tree growth and stand volume.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; pruning; growth; knot; physical and mechanical properties