

坡位梯级变化对杉木无性系生长的影响*

吕宇宙¹ 练伟春¹ 谭志嘉¹ 许汉坤¹
王润辉² 黄荣² 郑会全²

(1. 韶关市曲江区国有小坑林场, 广东 韶关 512162; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/
广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 为探究杉木 *Cunninghamia lanceolata* 无性系树高、胸径和单株材积等生长性状随坡位高度米级别变化的变异规律, 以杉木 8 a 生无性系试验林为研究对象, 测定不同坡位梯级杉木无性系的树高、胸径和单株材积, 分析坡位米级别微小变化对杉木无性系生长的影响。方差分析结果显示, 不同坡位梯级间杉木无性系 T-c07 和 T-c22 平均树高、胸径和单株材积等生长性状呈极显著差异 ($P < 0.01$), 说明坡位对杉木无性系的生长产生了显著影响。进一步开展多重比较分析发现, 位于中下坡位梯级的杉木无性系 T-c07 和 T-c22 的树高、胸径和单株材积显著高于中上坡位。相关性分析结果显示, 杉木无性系 T-c07 和 T-c22 的树高、胸径和单株材积与坡位高度呈现极显著负相关关系, Pearson 相关系数分别为 -0.917 ($P < 0.01$) 和 -0.886 ($P < 0.01$)、 -0.961 ($P < 0.01$) 和 -0.945 ($P < 0.01$)、 -0.939 ($P < 0.01$) 和 -0.949 ($P < 0.01$), 表明杉木无性系的树高、胸径和材积生长表现出随着坡位高度的升高而受抑制。研究揭示了米级别的微小坡位高度变化足以影响杉木无性系的生长, 建议在开展杉木培育工作中, 可根据杉木生长性状随坡位变化规律对坡面较长的立地分段设定不同培育目标和经营管理方式。

关键词 坡位; 生长性状; 杉木; 无性系; 相关性分析

中图分类号: S725 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0028-06

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502004

Effects of the Step-change of Slope Position on the Growth of *Cunninghamia lanceolata* Clones

LYU Yuzhou¹ LIAN Weichun¹ TAN Zhijia¹ XU Hankun¹
WANG Runhui² HUANG Rong² ZHENG Huiquan²

(1. Xiaokeng State Forest Farm in Qujiang District of Shaoguan, Shaoguan, Guangdong 512162, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract To reveal the effect of slight slope position changes on the growth of *Cunninghamia lanceolata* clones, an 8-year-old experimental stand of *C. lanceolata* clones was selected as the research object, and then, tree height (H), diameter at breast height (DBH) and stem volume (V) of *C. lanceolata* clone T-c07 and T-c22 at different step-changes of slope positions were measured and analyzed. Results of ANOVA showed that

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2024KJCX017), 广东省重点领域研发计划 (2020B020215001)。

第一作者: 吕宇宙 (1972—), 男, 工程师, 主要从事森林培育研究。E-mail: 2972913466@qq.com

通信作者: 黄荣 (1990—), 男, 副研究员, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: huangrong@sinogaf.cn

there were significant differences ($P < 0.01$) in H , DBH, and V of clone T-c07 and T-c22 among different step-changes of slope positions, indicating that step-change of slope position has a significant impact on the growth of *C. lanceolata*. Furthermore, multiple comparison analyses showed that H , DBH, and V of clone T-c07 and T-c22 located on medium to lower slope were significantly higher than those on medium to upper slope. Moreover, correlation analysis revealed that H , DBH, and V of clones T-c07 and T-c22 showed a highly significant negative correlation with slope height. The Pearson correlation coefficients were -0.917 ($P < 0.01$) and -0.886 ($P < 0.01$) for H , -0.961 ($P < 0.01$) and -0.945 ($P < 0.01$) for DBH, and -0.939 ($P < 0.01$) and -0.949 ($P < 0.01$) for V , respectively. In conclusion, our results indicate that slight slope position changes have a significant impact on the growth of *C. lanceolata*. Here, we suggest that different cultivation objectives and management methods can be set for slopes with longer lengths according to the growth characteristics of *C. lanceolata* that change with slope position in the process of cultivating and producing *C. lanceolata*.

Key words slope position; growth traits; *Cunninghamia lanceolata*; clone; correlation analysis

林木的生长不仅受到遗传因素的影响,还受到其所处环境(如气候、地形、土壤和坡位等)的影响。在众多因素中,立地条件是影响林木生长的最重要因素之一。坡位是微地形内重要的立地因子,在小尺度范围内通过影响光照、热量、水分、养分、土壤稳定性等的空间分布,从而影响林木的生长^[1-2]。已有研究表明,坡位对很多树种的生长产生显著影响,如福建柏 *Fokienia hodginsii*^[3]、樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongholica*^[4]、枫香 *Liquidambar formosana*^[5]、木荷 *Schima superba*^[5]、火力楠 *Michelia macclurei*^[6]、柠条 *Caragana korshinskii*^[7] 等树种的生长均表现为随着坡位下降,生长量增加,而桉树 *Eucalyptus robusta* 中坡的平均树高、平均胸径生长略小于上坡和下坡^[8],马尾松 *Pinus massoniana* 下坡位的胸径生长要显著小于上坡位和中坡位,不同坡位间的平均树高差异不显著^[5]。由此可见,研究坡位对林木生长的影响可为其培育和经营管理提供理论依据。

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为柏科杉木属乔木,其具有生长迅速、产量高、材质优良等特点,是华南地区重要的商品林与生态公益林造林树种^[9]。国内研究者对杉木的研究主要集中在遗传改良领域^[9-11],在其栽培立地条件方面也开展许多研究^[12-16]。已有研究表明,坡位是影响杉木生长的重要立地因子,然而这些研究的参试材料通常为种子园混合种或不同家系,使用同一无性系作为试验材料的研究相对较少^[12-16]。此外,米级别的坡位差异会对林木的生长产生显著影响^[17-18],但在以往杉木的研究中,坡位通常被简单地将划分为上、中、下3级^[12-16],当前尚未有关于在更

小尺度(米级差异)上探究坡位变化对杉木生长影响的报道。因此,米级别的坡位差异是否会影响杉木的生长尚不清楚。为此,本研究以杉木优异无性系 T-c07 和 T-c22 试验林为研究对象,研究其树高、胸径和单株材积等生长性状随坡位高度米级别微变化的变异规律,从而揭示坡位微小变化对杉木无性系生长的影响,研究结果可为杉木的培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省韶关市曲江区国有小坑林场,林场位于广东省北部(24°41'N, 113°51'E),属亚热带季风湿润带气候,全年平均气温为 20.2℃,年降雨量达 1 532 mm,土壤为红壤。试验地为杉木林采伐迹地。

1.2 试验材料及样地设置

本研究采用广东省林业科学研究院选育的 2 个杉木优良无性系 1 a 生组育苗(无性系编号: T-c07 和 T-c22),参照广东省地方标准 DB44/T 778《杉木丰产林培育技术规程》^[19]于 2014 年 2 月进行试验林营造。试验地坡度 20~40°,依山势进行机械整地,形成 19 条水平带,即 19 个坡位梯级,由坡底到坡顶依次为第 1 至 19 梯级,每梯级对应坡位高度见表 1。将坡位梯级沿山底至山顶均分为上、中、下 3 级坡位,其中第 1~6 梯级属于下坡位,第 7~13 梯级属于中坡位,第 14~19 梯级属于上坡位。参试无性系组育苗沿水平带行状种植,株行距 2.5 m×2.5 m。

表1 梯级对应坡位高度信息

Table 1 Slope height corresponding to different step-change of slope positions

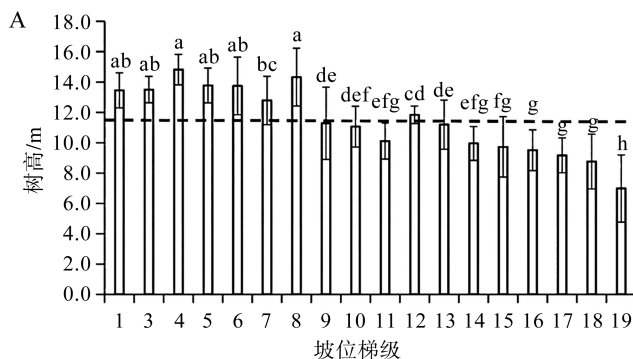
梯级	坡位高度/m	梯级	坡位高度/m
1	0.0	11	18.6
2	1.0	12	20.4
3	2.0	13	21.6
4	3.4	14	22.6
5	5.7	15	23.9
6	8.0	16	25.2
7	10.3	17	26.1
8	12.5	18	27.2
9	14.8	19	28.9
10	16.7		

1.3 不同坡位梯级杉木无性系生长性状测定

试验林8 a 生时进行每木检尺, 其中 T-c07 在第2行缺株, 而 T-c22 在第1、13、14、17-19行缺株。树高 (H) 使用塔尺进行测量, 精度为 0.1 m; 胸径 (DBH) 则使用胸径围尺进行测量, 精度 0.1 cm。杉木每木单株材积 (V) 根据下列公式计算^[20]:

$$V = 0.000\ 058\ 770\ 42 \times H^{0.896\ 461\ 57} \times D^{1.969\ 983\ 1}$$

式中 H 为树高, 单位为 m, D 为胸径, 单位为 cm。依据广东省地方标准 DB44/T 1143 《商品林经营管理规范》^[21] 对杉木速生丰产林的划分, 7~9 a 生属于中龄林, 本试验林已达半个轮伐期。



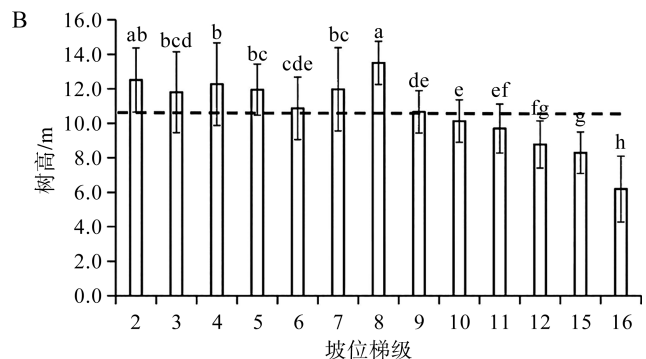
1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行初步整理, 使用 SPSS 22.0 统计软件进行坡位梯级间的生长性状 (树高、胸径和单株材积) 的方差分析、Duncan 多重比较分析以及 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 无性系高生长与坡位梯级的关系

对 2 个无性系每木树高调查和分析结果显示, 无性系 T-c07 整体平均树高为 11.8 m, 不同坡位梯级的平均树高介于 7.0 m~14.8 m, 其中第 1~8 梯级的平均树高均高于整体均值, 而第 9~19 梯级 (除第 12 梯级外) 平均树高均低于整体均值 (图 1A); 无性系 T-c22 整体平均树高为 11.3 m, 不同坡位梯级的平均树高介于 6.2 m~13.5 m 之间, 其中第 2~8 梯级 (除第 6 梯级外) 的平均树高均在整体均值之上, 而第 9~16 梯级的平均树高均低于整体均值 (图 1B)。对 T-c07 和 T-c22 不同坡位梯级的树高分别进行方差分析, 结果表明不同坡位梯级的杉木无性系平均树高生长呈极显著差异 ($P < 0.01$)。进一步分别对 T-c07 和 T-c22 不同坡位梯级的树高进行 Duncan 多重比较分析发现, T-c07 中的 1~8 梯级的平均树高显著高于第 9~19 梯级 (除第 12 梯级外) (图 1A); T-c22 中的第 2~8 梯级 (除第 3 和第 6 梯级外) 的平均树高显著高于第 9~16 梯级 (图 1B)。



注: 虚线表示整体均值, 不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图1 杉木无性系 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 不同坡位梯级的树高多重比较结果

Figure 1 Multiple comparisons of tree height of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B) at different step-change of slope positions

进一步对树高和坡位高度进行相关分析, 结果如图 2 所示。T-c07 和 T-c22 的树高与坡位高度间呈负相关关系, Pearson 相关性系数 r 分别为 -0.917 和 -0.886, 相关性达极显著水平 ($P <$

0.01) (图 2)。

2.2 无性系胸径生长与坡位梯级的关系

T-c07 整体平均胸径为 17.0 cm, 不同坡位梯级的平均胸径从 8.8 cm 到 22.8 cm 不等, 其中

第1~9梯级的平均胸径均大于整体均值，而第10~19梯级的平均胸径则小于整体均值；T-c22平均胸径为17.1 cm，不同坡位梯级的平均胸径则介于7.8~19.6 cm，其中第2~8梯级的平均胸径均在整体均值之上，而第9~16梯级的平均胸径均位于整体均值之下（图3）。方差分析结果表明，T-c07和T-c22不同坡位梯级间胸径生长差异极显著（ $P<0.01$ ）。由Duncan多重比较分析结果可

知，在T-c07中，第1~8梯级（除第6梯级外）的平均胸径显著大于第9~19梯级（图3A）；T-c22第2~8梯级（除第6和7梯级外）的平均胸径显著大于第9~12及15、16梯级（图3B）。

由Pearson相关性分析结果（图4）可知，T-c07和T-c22胸径和坡位高度之间的相关性系数分别为-0.961和-0.945，均达到极显著负相关水平（ $P<0.01$ ）。

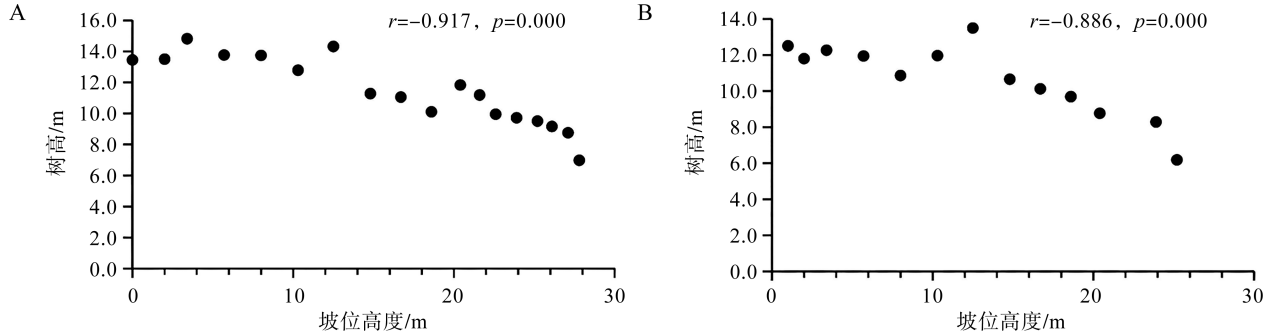
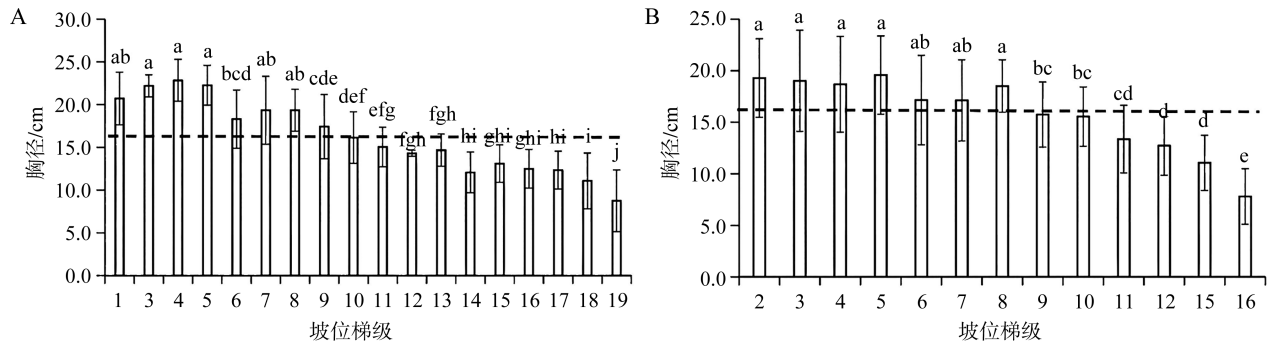


图2 坡位高度与杉木无性系 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 树高的相关性

Figure 2 The correlation between slope height and tree height of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B)



注：虚线表示整体均值，不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

图3 杉木无性系 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 不同坡位梯级的胸径多重比较结果

Figure 3 Multiple comparisons of DBH of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B) at different step-change of slope positions

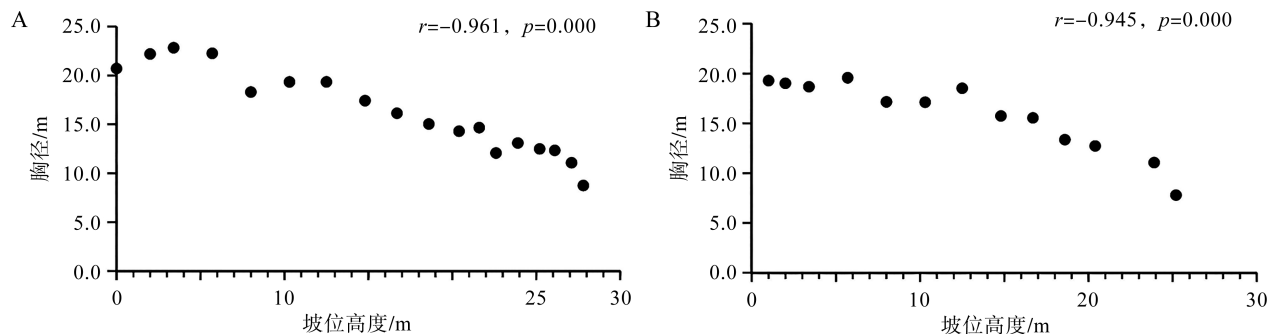


图4 坡位高度与杉木无性系 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 胸径的相关性

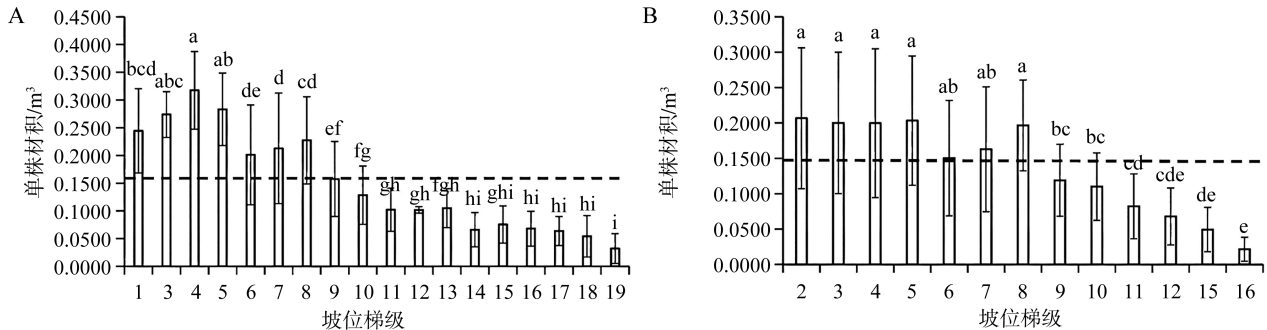
Figure 4 The correlation between slope height and DBH of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B)

2.3 无性系材积生长与坡位梯级的关系

T-c07和T-c22整体平均单株材积分别为

0.165 8 m³和0.158 5 m³，不同坡位梯级的平均单株材积分别为0.032 2~0.317 4 m³和0.021 5~

0.206 7 m³ (图5)。T-c07 中第1~8 梯级的平均单株材积均大于整体均值, 而第9~19 梯级的平均单株材积均小于整体均值 (图5A), T-c22 也表现出类似的规律, 第2~8 梯级 (除第6 梯级外) 的平均单株材积均大于整体均值, 而第9~16 梯级的平均单株材积均小于整体均值 (图5B)。由方差分析结果可见, T-c07 和 T-c22 不同坡位梯级的平均单株材积呈极显著差异 ($P < 0.01$)。



注: 虚线表示整体均值, 不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图5 杉木无性系 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 不同坡位梯级的单株材积多重比较结果

Figure 5 Multiple comparisons of volume of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B) at different step-change of slope positions

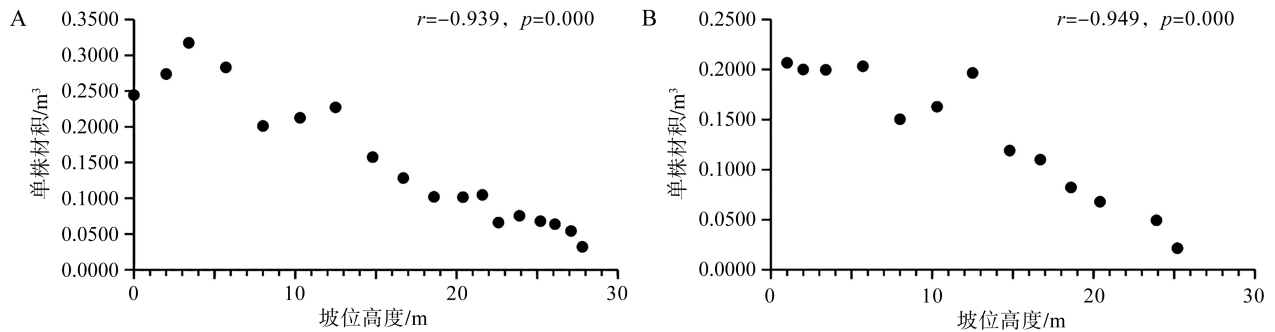


图6 坡位高度与无性系杉木 T-c07 (A) 和 T-c22 (B) 单株材积的相关性

Figure 6 The correlation between slope height and volume of *Cunninghamia lanceolata* clones T-c07 (A) and T-c22 (B)

3 结论与讨论

坡位作为重要的立地因子, 是林业生产关注的重要立地条件之一^[22]。以往关于坡位对林木生长影响的研究中, 目的树种通常由多种基因型个体组成^[3-7, 12-16], 因此在分析林木生长随坡位的变化规律时无法排除自身遗传差异带来的影响。本研究以杉木无性系 T-c07 和 T-c22 为研究对象, 比较其不同梯级的树高、胸径和单株材积, 可以最大程度上排除遗传因素对其生长的影响, 有助于更深入理解坡位对林木生长的影响。

本研究发现, 同一无性系不同坡位梯级的树高、胸径和单株材积表现出极显著差异 ($P < 0.01$), 表明坡位是影响杉木生长的重要地形因子。不同树种

Duncan 多重比较分析结果显示, T-c07 中的第1~5 梯级平均单株材积显著大于第9~19 梯级 (图5A); T-c22 出现类似规律, 第2~5 梯级的平均单株材积显著大于第9~16 梯级 (图5B)。

由单株材积和坡位高度间相关性分析结果可知, T-c07 和 T-c22 的单株材积与坡位高度间的相关性达极显著负相关水平 ($P < 0.01$), Pearson 相关系数分别为-0.939 和-0.949 (图6)。

由于其自身生物学特性不同, 生长随坡位变化的规律存在差别, 大部分树种的生长表现为随着坡位下降, 生长量增加^[3-7]。Duncan 多重比较分析结果显示位于下坡位梯级的杉木无性系树高、胸径和单株材积显著高于上坡位梯级, 这一研究结果与已有的研究结果一致, 如林源华^[14] 和李文芳^[15] 在不同坡位对杉木3 代实生苗早期生长影响的研究中均发现, 下坡位和中坡位的生长显著优于上坡位; 黄丽娜等^[16] 在不同坡位对5 个杉木良种生长比较研究中同样发现, 不同杉木良种林分下坡位和中坡位的平均胸径、树高、单株材积表现均优于上坡。与上述研究将坡位简单分为上、中和下坡位不同, 本研究在更小尺度上揭示出坡位微小变化对杉木无性系树高、胸径和单株材积的影响。相关性分析结果显

示, 树高、胸径和单株材积与坡位高度之间呈极显著负相关性 ($r = -0.886 \sim -0.961$, $P < 0.01$), 表明微小的坡位变化对杉木的树高、胸径和单株材积产生显著的影响。坡位土壤的水分及理化性质主要通过水土流失和坡面侵蚀进行重新分配, 从而影响林木的生长^[3,23-24]。由于重力作用和雨水侵蚀, 上坡面大量地表养分和水分随着坡面径流往下汇集, 造成坡面水分和养分的空间分布异质, 即在同一坡面, 随着坡位的升高, 土壤的含水量及养分通常逐渐降低^[24-28]。已有研究表明, 土壤中的水分、有机质、大量营养元素等含量在米级别的变化中也会发生显著改变, 与坡位高度呈显著负相关关系^[17-18,23]。由此推测, 坡位高度米级别微小变化通过影响土壤水分及养分的含量从而影响杉木生长。

综合以上研究结果表明, 坡位米级别的微小变化对杉木无性系生长产生了显著的影响。整体而言, 树高、胸径和单株材积表现出随坡位升高呈下降的趋势。本研究建议在开展杉木培育工作中, 可根据其生长性状随坡位变化规律对坡面较长的立地分段设定培育目标和经营管理方式。

参考文献

- [1] 刘雅静, 张书源, 李静, 等. 坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(4): 48-55.
- [2] LONG S, ZENG S, LIU F, et al. Influence of slope, aspect and competition index on the height-diameter relationship of *Cyclobalanopsis glauca* trees for improving prediction of height in mixed forests[J]. *Silva Fennica*, 2020, 54(1): 10242.
- [3] 刘帅成, 李志辉, 李艳, 等. 不同坡位对福建柏生长影响的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 52-55.
- [4] 邓婷, 籍翠莹, 钱甲龙, 等. 塞罕坝不同坡度, 坡位土壤特征及其对樟子松幼树的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 75-85.
- [5] 李肇守. 闽中山地不同坡位多树种混交造林效果比较[J]. 防护林科技, 2023, 2: 22-24, 85.
- [6] 谢善文, 李苏春, 柳元松. 坡位对人工混交林生长研究[J]. 花卉, 2021, 18: 253-254.
- [7] 王子婷, 杨磊, 蔡国军, 等. 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7872-7881.
- [8] 林建, 韦柳端, 蓝柳风, 等. 不同坡向坡位对桉树造林成活率的影响及生长效应分析[J]. 林业调查规划, 2024, 49(3): 29-34.
- [9] 王润辉, 郑会全, 韦如萍, 等. 不同遗传控制和经营措施对杉木人工林早期生长的效应分析[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(3): 1-9.
- [10] 伍观娣, 伍观娣, 伍观娣, 等. 间伐追肥对杉木中龄林材种变化的早期效应[J]. 林业与环境科学, 2024, 40(6): 10-17.
- [11] HUANG R, WANG R, WEI R, et al. Selection for both growth and wood properties in Chinese fir breeding parents based on a 6-year grafted clone test[J]. *Forests*, 2023, 14: 1774.
- [12] 陆继策. 闽东高海拔山地地形因子对杉木人工林生长的影响[J]. 福建林业科技, 2006, 33(2): 120-122, 128.
- [13] 林锦华. 苗木类型, 坡向和坡位对早期杉木林的影响[J]. 防护林科技, 2015, (7): 41-43, 91.
- [14] 林源华. 不同坡位对杉木早期生长的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(17): 82-83, 130.
- [15] 李文芳. 不同坡位杉木第三代和洋 020 组培苗早期生长性状对比[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(11): 90-93.
- [16] 黄丽娜, 吴鹏飞, 马祥庆, 等. 不同杉木良种林分生长比较[J]. 福建林业科技, 2021, 48(1): 8-11, 17.
- [17] HAWTHORNE S, MINIAT C F. Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient[J]. *Ecohydrology*, 2017: e1825.
- [18] APPELS W M, GRAHAM C B, Freer J E, et al. Factors affecting the spatial pattern of bedrock groundwater recharge at the hillslope scale[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(21): 4594-4610.
- [19] 广东省质量技术监督局. 杉木丰产林培育技术规程: DB44/T778-2010[S]. 广州: 南方医科大学广州广卫印刷厂, 2021.
- [20] 胡德活, 郝玉宝, 梁机, 等. 广东乐昌杉木种质资源库无性系生长与材质性状变异分析[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(6): 1-5.
- [21] 广东省质量技术监督局. 商品林经营管理规范: DB44/T1143-2013[S]. 广州: 南方医科大学广州广卫印刷厂, 2013.
- [22] 尹瑞萍, 鲁定伟, 黄佳聪, 等. 昌宁秃杉人工林培育技术研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(6): 70-74.
- [23] 郭文福, 郝建, 韦菊玲. 坡位梯级微变化对红椎林木生长的影响[J]. 林业资源管理, 2019, 1: 52-56, 77.
- [24] 刘元玺, 杜官本, 赵志娟, 等. 不同坡位轻木人工林土壤养分含量及其化学计量特征[J]. 山东农业科学, 2024, 56(5): 116-125.
- [25] 卢佳毅. 不同坡位马占相思人工林生长量, 生物量及生长过程分析[J]. 亚热带农业研究, 2016, 12(2): 79-85.
- [26] 魏峥, 王晓, 宋维峰, 等. 坡位对浑善达克沙地小叶锦鸡儿空间分布影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 102-107, 115.
- [27] 田迅, 高凯, 张丽娟, 等. 坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 12-16.
- [28] 刘航江, 宗人旭, 刘金平, 等. 坡位对乳白香青种群特征及雌雄株形态可塑性的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(9): 2105-2114.