

杉木优良无性系早期生长性状和侧枝发育特征的比较

周静^{1,2}, 于超^{1,2}, 程顺丹^{1,2}, 胥清利³, 马祥庆^{1,2}, 李明^{1,2}

1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林草局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002; 3. 福建省顺昌埔上国有林场, 顺昌 353200)

摘要: 【目的】为探究不同杉木无性系早期生长性状与侧枝发育特征差异, 早期筛选适合杉木大径材和无节材培育的优良无性系。【方法】选取福建省顺昌埔上林场的 12 个 3 年生洋系列无性系为研究对象, 并以埔上林场培育 2 代、3 代实生苗为对照, 连续两年进行树高、地径、侧枝节间距、侧枝长度、侧枝基径、侧枝角度、侧枝数、冠幅高度和冠幅面积等调查分析。【结果】不同杉木无性系生长性状与侧枝发育特征存在显著差异 ($p < 0.05$)。其中, 洋 058 和洋 064 的树高和地径均显著大于其它无性系, 洋 047 的树高和地径增长量显著高于其它无性系, 洋 053 的侧枝基径与枝条年轮宽度显著低于其它无性系, 洋 023 的侧枝节间距、侧枝长度、冠幅直径、冠幅面积、冠幅体积显著高于其它无性系, 且侧枝数显著低于其它无性系。不同杉木无性系生长指标与侧枝发育特征之间存在一定的相关性, 其中树高、地径与侧枝长度、侧枝基径和侧枝角度呈极显著正相关, 侧枝节间距、侧枝长度和侧枝基径之间两两极显著相关 ($p < 0.01$), 树高、地径与冠幅高度、冠幅面积和冠幅体积呈正相关。【结论】综合不同杉木无性系早期生长性状与侧枝发育特征, 洋 058 和洋 064 的生长性状优良, 可做为大径材选育无性系; 洋 023 的形态性状优良, 可作为无节材选育的优良亲本, 洋 054 可作为无节材选育优良无性系。

关键词: 杉木; 无性系; 生长性状; 侧枝发育; 树冠结构

Comparison analysis of early growth traits and lateral branch development characteristics of fine clones of Chinese fir

Abstract: 【Objective】In order to investigate the differences in early growth traits and lateral branch development characteristics of different Chinese fir clones, and to screen the good clone suitable for the cultivation of large diameter and non-knot wood of Chinese fir. 【Method】twelve 3-year-old Yang series clone from Pushang Forest Farm in Shunchang, Fujian Province were selected as the research subjects, and the second and third generation seedlings cultivated in Pushang Forest Farm were used as the control, and tree height, ground diameter, internode length of lateral branch, lateral branch length, lateral branch base diameter, lateral branch angle, number of branches, crown height and crown area were investigated and analyzed for two consecutive years. 【Result】The results showed that there were significant differences ($p < 0.05$) in the growth traits and lateral branch development characteristics of different Chinese fir clones. The growth characteristics of lateral branch base diameter and annual whorl width of Yang 053 were significantly lower than those of other clones, and internode length of lateral branch, lateral branch length, crown width diameter, crown area and crown volume of Yang 023 were significantly higher than those of other clones, and the number of branches was significantly lower than those of other clones. The number of branches was significantly lower than that of other clones. There were some correlations between growth indexes and lateral branch development characteristics of different Chinese fir clones, among which tree height and ground diameter were highly significantly and positively correlated with lateral branch length, lateral branch base diameter and lateral branch angle, and internode length of lateral branch, lateral branch length and lateral branch base diameter were highly and significantly correlated with each other ($p < 0.01$), and tree height and ground diameter were positively correlated with crown height, crown area and crown volume. 【Conclusion】The early growth traits and lateral branch development characteristics of different Chinese fir clones were synthesized, and Yang 058 and Yang 064 have excellent growth traits and can be used as asexual lines for large diameter timber selection; Yang 023 has excellent morphological traits and can be used as an excellent parent for non-knot timber selection, and Yang 054 can be used as an excellent asexual line for non-knot timber selection.

基金项目: 国家重点研发项目“杉木大径级无节良材培育技术”(2021YFD2201302), 福建省种业创新与产业化工程项目(2021-2025)

作者简介: 周静(1999.02-), 女, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究, E-mail: zj3023602668@163.com

通讯作者: 李明(1986.02-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事杉木高效培育研究, E-mail: limingly@126.com

Key words: Chinese fir ; Clones; Growth traits; Lateral branch development; Crown structure

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 是我国南方特有的速生用材针叶树种, 具有生长快、产量高、材质优和用途广的特点, 其人工林面积和蓄积量分别占全国人工乔木林的 17.33% 和 22.30%^[1]。新形势下木材市场对传统杉木材种的需求发生较大变化, 传统杉木人工林高密度的培育模式往往产出较多中小径级的有节木材, 而价格更高的杉木大径材、无节材供应相对不足^[2-5]。枝条数量和发育特征是影响林木生长和木材质量的关键因素^[6]。杉木林具有枝条宿存的特性, 侧枝枯死后不易掉落, 导致杉木木材节子数量较多, 大量的节疤严重影响了杉木木材品质和美观, 降低木材价值^[7]。合理的人工修枝虽然可有效地优化杉木圆满度, 降低节子的形成, 提高木材材性, 但生产上较高的作业成本限制了人工修枝的广泛应用。筛选侧枝节间距离大、轮生枝数量少和枝条基部直径小的杉木良种, 可以减少修枝工作量或降低节子大小及数量。因此, 从遗传控制的角度出发, 在评估不同杉木家系或无性系良种的速生性的同时, 分析不同杉木良种的侧枝发育特征和树冠结构的差异, 筛选出适合大径材或无节材定向培育的杉木优良家系或无性系, 已成为杉木人工林定向培育和良种选育的重要方向。

目前, 基于杉木早期生长性状의良种筛选研究较多, 而针对不同良种侧枝发育特征的研究相对较少。叶代全^[8]通过对杉木家系生长性状测定, 筛选出耐瘠薄的杉木无性系; 王润辉等^[9]对杉木无性系生长和材性变异分析, 进行多性状筛选优良无性系; 黄小艳等^[10]通过研究不同径级杉木根系水力功能性状、解剖结构特征, 选育出细根生物量大、高水力效率等具体良好根构型的杉木。分枝方式、分枝个数和分枝角度等分枝性状差异对无节材的培育影响较大, 是决定树木分枝格局以及树冠形状的关键因素^[11, 12], 也影响着人工林的木材质量和经济价值^[5, 13, 14]。Trincado 等^[15]通过对侧枝角度的垂直分布规律的研究, 认为枝条着枝角度在树冠上部随着着枝深度的增加而迅速增加, 而在树冠中部和树冠下部趋于稳定。孙云等^[16]研究林分郁闭前幼树阶段的形态与生长特点以及其间关系时发现, 浓密型杉木的生长量更大, 在生长初期, 杉木的理想株型具有枝条浓密和冠幅宽大的特点。

鉴于此, 本研究以福建省顺昌县埔上国有林场的 12 个 3 年生洋系列无性系为研究对象, 并以埔上林场培育 2 代和 3 代杉木无性系种子园混系实生苗为对照, 连续两年进行树高、地径、侧枝节间距、侧枝长度、侧枝基径、侧枝角度、侧枝数、冠幅高度和冠幅面积等调查分析, 比较不同杉木无性系生长性状、侧枝发育特征和树冠结构的差异, 为适合杉木大径材和无节材定向培育的优良无性系早期筛选提供参考。

1 研究地概况

试验地位于福建省顺昌县埔上国有林场福介洋工区 (117°44'48"E, 26°54'42"N)。该区属亚热带海洋性季风气候, 年平均气温为 18.6℃, 年平均降水量 1300~2100 mm, 日照时数 1526 h, 无霜期可达 305 d, 平均相对湿度 81%, 平均海拔 150~225 m。研究区属低山丘陵地貌, 土壤为山地红壤, 土层深厚, 土壤肥沃、湿润。

2 研究方法

2.1 试验设计

该试验林于 2020 年 3 月造林, 栽植密度为 200 株/亩, 造林面积 128 亩。采用从山顶到山坡的条带状造林, 参试无性系有洋 061、洋 020、洋 023、洋 036、洋 047、洋 049、洋 053、洋 054、洋 058、洋 063、洋 064、洋 065, 并以埔上林场培育的杉木 2 代和 3 代无性系种子园良种实生苗为对照, 每个无性系和对照种植 5 列, 无性系间以 1 列闽楠为隔离带。试验重复 3 次。

2.2 林分生长、枝条和树冠结构调查

在 2022 年（3 年生）和 2023 年（4 年生）的 5 月份，每个无性系选取 15 株标准株进行调查。树高、冠幅采用铝合金测高杆测定，地径采用游标卡尺测量。从树干基部到顶部，依次测量每一轮的所有枝条。用卷尺测量相邻两轮盘侧枝间的距离（侧枝节间距）和枝条长度，用电子游标卡尺测量与树干交点处侧枝的直径（侧枝基径），目视法测量树干上每轮盘侧枝的数目（轮生枝数量），用电子量角器测量枝条的分枝角度。对每个无性系选取 5 株标准株进行枝条年轮调查，每株取 5 枝侧枝，将其基部做 2 cm 厚的圆盘，在 Lintab-6 树木年轮分析仪测量年轮宽度。

2023 年调查完成后，对样地的杉木树冠指标用无人机数据采集，仪器采用大疆 dji 经纬 m300 RTK 的激光雷达无人机，后期进行软件分割处理得出不同无性系的树冠指标数据。

2.3 数据分析

用 Excel 2010 软件进行数据整理，SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析、Duncan 多重比较和相关性分析，Origin 2022 软件绘制图表，ArcGIS 10.7 软件进行不同无性系的分割处理，点云催化剂·云祥（Point Cloud Catalyst Toolbox, PCCT）软件进行树冠分析。

3 结果与分析

3.1 不同杉木无性系的生长特征

在杉木生长的幼树阶段，树高和地径更能反映树木的生长量变化。对 12 个杉木无性系的树高和地径进行分析，结果表明（图 1），洋 058 和洋 064 的地径在 3 年生和 4 年生均显著高于其它无性系，在 3 年生时洋 063 与洋 064 的地径之间存在显著差异，且洋 064 地径均高于两个对照实生苗；4 年生时洋 023、洋 063 与洋 036、洋 058 的地径之间存在显著差异，地径从大到小为 3 代实生苗>洋 036、洋 058>2 代实生苗>洋 023、洋 063；洋 036、洋 047、洋 058 的地径增长量显著高于其它无性系和对照实生苗。洋 054、洋 058 和洋 064 的树高在 3 年生均显著高于其它无性系，洋 047、洋 058、洋 036 和洋 064 树高在 4 年生显著高于其他无性系，洋 049、洋 063 与洋 054、洋 064 的树高之间存在显著差异，洋 054 和洋 064 的树高均高于对照实生苗，4 年生洋 047、洋 049、洋 023 和洋 058 的树高增长量显著高于其它无性系，树高从大到小为洋 047、洋 058>3 代实生苗>2 代实生苗>洋 063，洋 047、洋 049、洋 023 和洋 058 的树高增长量显著高于其它无性系。不同无性系间的生长表现存在较大的差异，选择生长表现较好的优良无性系造林可提高杉木人工林的早期生长表现。从生长指标来看，洋 058 和洋 064 可为杉木大径材优良无性系的选育提供参考；从生长增量来看，洋 047 可为杉木速生大径材优良无性系的选育提供参考。

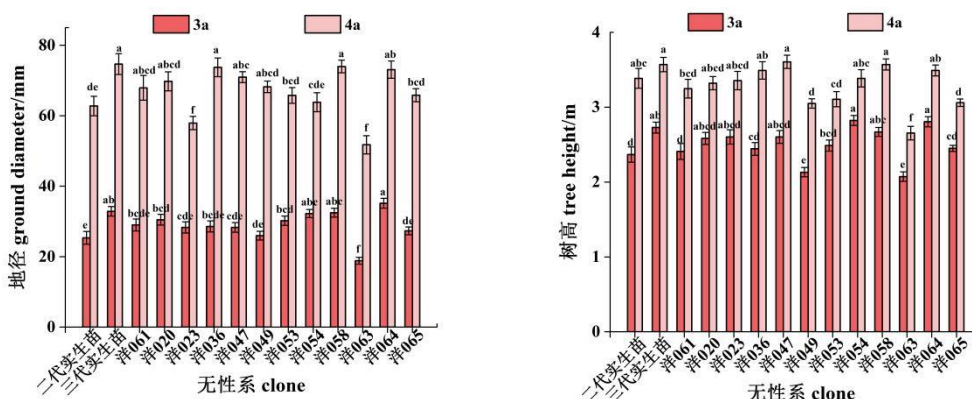
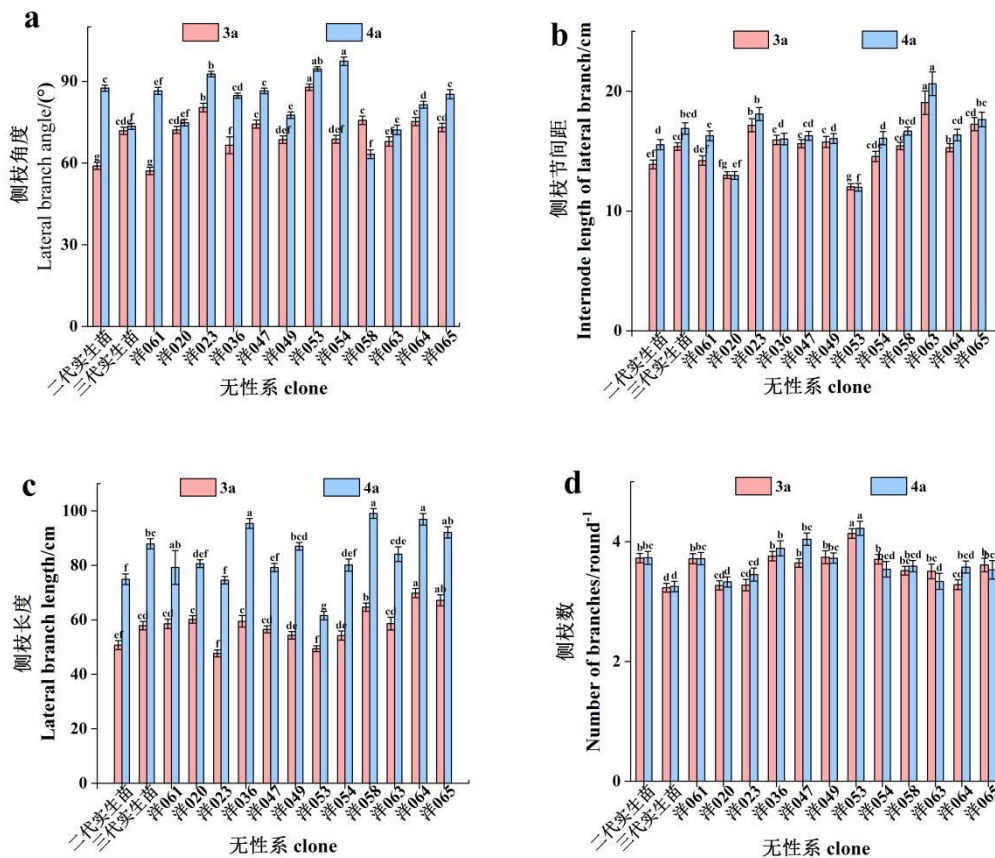


图 1 不同杉木无性系的生长性状图
Figure 1. Growth traits of different Chinese fir clones

3.2 不同杉木无性系的侧枝特征

不同杉木无性系侧枝节间距、侧枝长度、侧枝基径、侧枝角度、侧枝数均存在显著差异，这为基于杉木侧枝发育特征进行良种选择提供了可能。洋 053 的 3 年生侧枝角度显著大于其它无性系和对照实生苗，高于群体均值的 22.65%，洋 054 的 4 年生侧枝角度大于其它无性系和对照实生苗，高于群体均值的 19.23%（图 2 a，表 1）；洋 023、洋 063、洋 065 的侧枝节间距在 3、4 年生显著大于其它无性系和对照实生苗，洋 063 的 3 年生、4 年生的侧枝节间距最大，分别为 19.04 cm 和 20.63 cm，高于群体均值的 25.59%和 29.18%（图 2 b，表 1）；洋 023、洋 053 的侧枝长度在 3、4 年生显著小于其它无性系和对照实生苗，洋 023 的 3 年生、洋 053 的 4 年生最小，为 47.7 cm 和 61.59 cm，低于群体均值的 16.82%和 27.04%（图 2 c，表 1）；洋 020、洋 023 的侧枝数在 3、4 年生均显著低于其它无性系，侧枝数从小到大为 3 代实生苗>洋 020、洋 023>2 代实生苗（图 2 d）；洋 053 的 3 年生侧枝基径均显著低于其它无性系，洋 023、洋 053 的 4 年生侧枝基径均显著低于其它无性系，侧枝基径从小到大为 2 代实生苗>洋 053、洋 023>3 代实生苗（图 2 e）；洋 061 的侧枝角度、侧枝节间距增长量显著大于其它无性系，洋 054 的侧枝基径和侧枝数增长量显著低于其它无性系，洋 036 的侧枝长度增长量显著大于其它无性系。洋 023 具有侧枝节间距长、侧枝数少和侧枝基径短的特点，适合做杉木无节材育种的优良亲本。



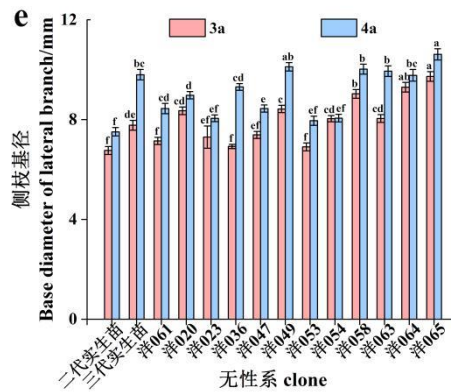


图 2 3 年生不同杉木无性系侧枝特征

Figure 2. Lateral branch characteristics of different cultivars at 3 years old

表 1 不同杉木无性系侧枝特征^①

Table 1 Characteristics of lateral branches of different Chinese fir clones

无性系 clone	枝龄 Branch age	侧枝节间距 Internode length of lateral branch/cm	侧枝长度 Lateral branch length/cm	侧枝基径 lateral branch base diameter/mm	侧枝角度 Lateral branch angle/°	侧枝数 number of branches/round-1
2 代实生苗	3 年生	13.89±0.37ef	50.73±1.62ef	6.76±0.16f	58.96±1.29g	3.73±0.08b
	4 年生	15.54±0.43d	74.91±1.95f	7.51±0.17f	87.52±1.12c	3.73±0.11bc
3 代实生苗	3 年生	15.38±0.32cd	57.86±1.54cd	7.77±0.2de	71.83±1.36cde	3.23±0.07d
	4 年生	16.89±0.47bcd	87.9±1.87bc	9.8±0.21bc	73.5±1.13f	3.25±0.09d
洋 061	3 年生	14.21±0.4def	58.54±1.75cd	7.15±0.14f	57.09±1.34g	3.71±0.08b
	4 年生	16.28±0.41e	79.25±6.19ab	8.44±0.2cd	86.48±1.3ef	3.72±0.1bc
洋 020	3 年生	12.99±0.29fg	60.15±1.34c	8.36±0.15cd	72.17±1.31cde	3.27±0.08cd
	4 年生	12.97±0.32ef	80.63±1.44def	8.98±0.15d	74.82±1.2ef	3.33±0.09d
洋 023	3 年生	17.16±0.55b	47.7±1.26f	7.3±0.44ef	80.4±1.62b	3.28±0.09cd
	4 年生	18.09±0.55b	74.57±1.37f	8.05±0.13ef	92.67±1.02b	3.45±0.11cd
洋 036	3 年生	15.93±0.39c	59.47±2.1c	6.92±0.09f	66.54±3.08f	3.76±0.08b
	4 年生	16.01±0.48d	95.41±1.81a	9.31±0.14cd	84.76±0.96cd	3.89±0.13b
洋 047	3 年生	15.62±0.34c	56.53±1.3cd	7.39±0.14ef	74.32±1.5c	3.65±0.07b
	4 年生	16.28±0.37cd	79.25±1.51ef	8.44±0.14e	86.48±1.03c	4.04±0.1bc
洋 049	3 年生	15.77±0.46c	54.35±1.37de	8.43±0.15c	68.59±1.38def	3.74±0.11b
	4 年生	16.05±0.41d	87.02±1.4bcd	10.12±0.17ab	77.59±1.2e	3.73±0.09bc
洋 053	3 年生	12.02±0.26g	49.44±1.08f	6.91±0.16f	87.85±1.19a	4.14±0.08a
	4 年生	11.98±0.32f	61.59±1.57g	7.95±0.18ef	94.56±0.79ab	4.22±0.12a
洋 054	3 年生	14.56±0.43cde	54.21±1.68de	8.04±0.13cd	68.76±1.46def	3.71±0.08b
	4 年生	16.08±0.55d	80.11±2.24def	8.06±0.15ef	97.39±1.54a	3.54±0.13bcd
洋 058	3 年生	15.43±0.3cd	64.66±1.51b	9.03±0.18b	75.68±1.56c	3.52±0.07bc
	4 年生	16.67±0.34bcd	99.08±1.8a	10.02±0.2b	63.22±1.61f	3.59±0.09bcd
洋 063	3 年生	19.04±0.98a	58.62±2.34cd	8.04±0.16cd	67.92±1.72ef	3.5±0.12bc

洋 064	4 年生	20.63±0.99a	84.13±2.67cde	9.94±0.21b	72.18±1.74e	3.34±0.13d
	3 年生	15.28±0.35b	69.85±1.65a	9.3±0.19ab	75.24±1.51c	3.28±0.08cd
洋 065	4 年生	16.35±0.49cd	96.92±2.13a	9.77±0.24bc	81.41±1.24d	3.58±0.1bcd
	3 年生	17.25±0.55cd	67.18±2.05ab	9.73±0.19a	73.07±1.56cd	3.61±0.11b
群体均值	4 年生	17.64±0.6bc	92.13±2.06ab	10.61±0.23a	85.27±1.69c	3.53±0.16bcd
	3 年生	15.16±0.12	57.35±0.44	7.89±0.06	71.64±0.45	3.58±0.02
F 值	4 年生	15.97±0.14	84.42±0.68	9.11±0.05	81.68±0.40	3.61±0.03
	3 年生	16.947**	16.916**	20.412**	26.981**	9.484**
	4 年生	18.625**	18.380**	28.239**	57.548**	5.668**

□*表示在 0.05 水平上显著相关(P<0.05), **表示在 0.01 水平上极显著相关(P<0.01)。Note: * means significant correlation at 0.05 level (P<0.05), ** means extremely significant correlation at 0.01 level (P<0.01)

研究分析枝条不同生长时期年轮宽度，掌握枝条的动态化生长过程，有益于杉木无节材的优良无性系的选育。对杉木 12 个不同无性系的枝条年轮进行分析，结果表明，不同无性系的枝条年轮宽度存在显著差异，洋 053、洋 054 的枝条年轮宽度显著低于洋 058、洋 063（图 3）。洋 061、洋 053、洋 065 的枝条年轮宽度增长量较为缓慢，洋 063、洋 064 的枝条年轮宽度呈现降低趋势。洋 053、洋 054 的年轮宽度均显著低于其它无性系，适合做杉木无节材定向培育的优良无性系。

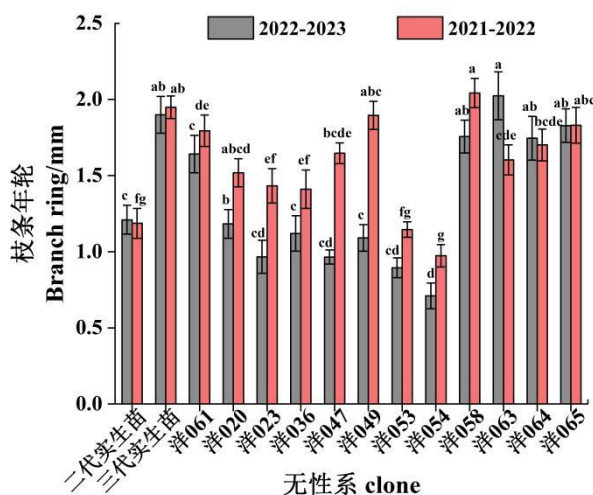


图 3 不同杉木无性系 3 年生枝条年轮

Figure. 3 Annual growth rings of branches of different Chinese fir clones

3.3 不同杉木无性系树冠结构特征

不同杉木无性系之间的树冠指标存在显著差异，洋 023 的冠幅直径、冠幅面积和冠幅体积均显著大于其它无性系，分别大于均值的 87.56%、174.77%和 134.93%，洋 053 的冠幅直径与冠幅面积显著小于其它无性系，分别小于均值的 10.01%和 22.26%，洋 064 的冠幅体积显著小于其它无性系，低于均值的 27.06%，洋 036 的冠幅高度显著大于其它无性系，大于均值的 15.36%。不同杉木无性系表现出不同的树冠结构特征，洋 023 属于冠型较宽大型，洋 053 和洋 064 属于冠型较窄型。

表 2 不同杉木无性系冠幅指标特征

Table 2 Crown index characteristics of different Chinese fir clones

3.4 杉木无性系生长性状与形态性状相关性

杉木无性系侧征指标	无性系 clone	冠幅直径	冠幅面积	冠幅高度	冠幅体积	木无枝特之间定的性,地径与侧度、径、度呈正相
		Crown width diameter/m	Crown area/m ²	Crown height/m	Crown volume/m ³	
存在一	2 代实生苗	2.36±0.03c	3.36±0.09c	3.2±0.11bc	3.71±0.2c	
相 关	3 代实生苗	3.11±0.12b	4.73±0.28b	3.02±0.11bcd	4.96±0.38b	
其中,	洋 020	2.38±0.03c	3.35±0.11c	3.36±0.13abc	3.88±0.22c	
和树高	洋 023	4.92±0.25a	11.04±1.08a	2.7±0.14d	10.2±1.36a	
枝 长	洋 036	2.33±0.05c	3.19±0.14c	3.71±0.21a	4.1±0.34bc	
侧枝基	洋 047	2.38±0.03c	3.44±0.08c	3.33±0.1abc	3.89±0.16c	
侧枝角	洋 049	2.38±0.04c	3.41±0.12c	3.45±0.13ab	4.04±0.24bc	
极显著	洋 053	2.36±0.08c	3.12±0.24c	3.04±0.26bcd	3.41±0.45c	
关	洋 054	2.44±0.04c	3.56±0.14c	3.45±0.18ab	4.2±0.31bc	
	洋 058	2.43±0.03c	3.42±0.12c	3.33±0.13abc	3.89±0.23c	
	洋 061	2.39±0.03c	3.27±0.1c	3.35±0.13abc	3.79±0.21c	
	洋 063	2.45±0.04c	3.73±0.15c	3.21±0.15bc	4.06±0.27bc	
	洋 064	2.38±0.03c	3.22±0.12c	2.89±0.14cd	3.17±0.22c	
	洋 065	2.41±0.03c	3.41±0.12c	3±0.11bcd	3.46±0.18c	
	均值	2.62	4.02	3.22	4.34	

($p<0.01$), 侧枝节间距、侧枝长度、侧枝基径两两之间均为极显著正相关($p<0.01$), 侧枝数与树高、侧枝长度、侧枝基径均为负相关。这表明随着杉木地径和树高的生长, 会促进侧枝长度、侧枝基径和侧枝角度的发育, 而侧枝数量的增加会导致更多的光合同化产物向枝条发育分配, 从而会抑制杉木树高生长。

表 3 不同杉木无性系生长性状与侧枝特征相关性分析^①

Table 3 Correlation analysis between growth traits and lateral branches of different three-year-old Chinese fir clones

性状	地径 ground diameter	树高 tree height	侧枝节间距 internode length of lateral branch/cm	侧枝数 number of branches	侧枝长度 branch length	侧枝基径 lateral branch base diameter
树高 tree height	0.464**					
侧枝节间距 internode length of lateral branch/cm	0.047	0.097*				
侧枝数 number of branches	0.05	-0.024	0.044			
侧枝长度 branch length	0.820**	0.385**	0.249**	-0.065		
侧枝基径 lateral branch base diameter	0.568**	0.282**	0.260**	-0.139**	0.757**	

侧枝角度 branch angle	0.394**	0.251**	0.001	0.077	0.208**	0.028
----------------------	---------	---------	-------	-------	---------	-------

□*表示在 0.05 水平上显著相关($P<0.05$), **表示在 0.01 水平上极显著相关($P<0.01$)。Note: * means significant correlation at 0.05 level ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation at 0.01 level ($P<0.01$)

由表 4 可知, 杉木无性系的树高、胸径与冠幅高度和冠幅体积呈极显著正相关($p<0.01$), 胸径与冠幅面积极呈显著正相关($p<0.01$), 树高与冠幅直径呈显著负相关($p<0.05$), 冠幅指标之间均为呈正相关关系, 尤其是冠幅直径、冠幅面积和冠幅体积之间呈极显著正相关($p<0.01$)。杉木的生长指标与树冠指标均表现出不同程度的相关性, 这说明树冠结构与生长关联密切, 树冠的大小和体积会影响树木的光合能力和空间生态位, 其大小可能会直接影响树木的生产力。

表 4 不同杉木无性系 3 年生的生长与冠幅指标相关性分析^①

Table 4 Correlation analysis of three-year growth and crown width indexes of different Chinese fir clones

性状	树高 Tree height	地径 ground diameter	冠幅直径 Crown width diameter	冠幅面积 Crown area	冠幅高度 Crown height
地径 ground diameter	0.922**				
冠幅直径 Crown width diameter	-0.080*	0.078			
冠幅面积 Crown area	0.002	0.154**	0.902**		
冠幅高度 Crown height	0.674**	0.663**	0.044	0.131**	
冠幅体积 Crown volume	0.324**	0.442**	0.720**	0.851**	0.590**

□*表示在 0.05 水平上显著相关($P<0.05$), **表示在 0.01 水平上极显著相关($P<0.01$)。Note: * means significant correlation at 0.05 level ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation at 0.01 level ($P<0.01$)

4 讨论

在杉木的育种过程中, 早期选择是一个重要的内容, 是指在树木成熟期到来之前进行优良无性系、种源或品种等选择, 可以缩短育种周期^[5]。于海洋等^[17]通过分析不同无性系苗期生长性状和木材性状, 筛选出生长较快且材性较好的优良无性系; 许兴华等分析不同无性系的胸径、树高、树高形率、树干圆满度、枝下高等性状, 选出具有速生、胸高形率较大、树干圆满、枝下高较高和冠表面积大等特性的优良无性系。现有研究表明, 在油松和华北落叶松生长期达 1/4 至 1/2 轮伐期的林分即可进行早期选择, 由此良种选育可达到较高水平^[18]。

本研究发现不同无性系之间的性状存在显著差异, 洋 036、洋 047、洋 058、洋 064 具有树高与地径高、侧枝长度长、侧枝基径大、侧枝角度大的特征; 洋 023、洋 053 具有树高与地径低、侧枝长度短、侧枝基径小、侧枝角度小、年轮宽度小、冠幅高度高的特征; 洋 063、洋 065 具有树高与地径低、侧枝节间距大、侧枝基径大的特征; 洋 020、洋 061 的树高与地径均不高、侧枝节间距较小、侧枝长度较长、侧枝基径较大、冠幅面积较小。不同无性系基因型存在差异, 这可能导致侧枝发育相关内源激素的变化, 内源激素的种类和浓度存在差异^[19], 从而影响不同无性系侧枝发育特征的变化。研究发现, 内源激素会影响植物侧枝的生长, CTK 会促进杉木侧枝的生长, 而 IAA 则对杉木侧枝的生长表现出抑制作用, 二者在杉木侧枝生长过程中具有明显的拮抗作用^[7]。袁莲珍等^[20]发现外源植物激素吲哚丁酸 (IBA)、赤霉素 (GA3)、6-苄基腺嘌呤 (6-BA) 对杉木种子萌发及苗高、地径起促进作用。

无节材可以提高木材美观性, 高值化无节木材的定向培育是近年来人工林培育的热点问题^[5, 21]。侧枝是影响无节材培育的关键指标, 由于杉木侧枝较多且有宿存特征, 侧枝产生的节子对木材质量和无节材

培育都产生不利影响^[22]。无节材定向培育过程中,在4-6年生时对杉木进行修枝是其中的关键环节。因此,在4年生的早期阶段,对杉木侧枝数量、枝条节间距和枝条基径的分析,可以得出杉木枝条的生长发育规律,为选育修枝作业量较少的无节材优良无性系提供参考。树冠作为树木光合作用的主要场所,其不仅能提供树木生长所需能量,还影响森林的生产力和生态功能^[23]。同时,树冠的大小和体积也与不同品系的栽植密度、自然整枝能力密切相关,且有效冠的确定也是明确林木合理修枝强度的重要环节。因此,权衡杉木早期树高、地径、冠幅等生长特征和侧枝数量、节间距、基径等枝条发育特征,来进行优良无性系的早期筛选,是杉木大径材、无节材定向培育的遗传控制的重要内容。本研究初步得出洋058、洋064的生长性状较好,可作为杉木大径材的优良无性系;洋054的树高与地径生长较高、侧枝节间距较长、侧枝基径小、侧枝数少,可作为杉木无节材的优良无性系;洋023的树高与地径生长较小,侧枝节间距长、侧枝基径小、侧枝长度短、冠幅面积和冠幅体积大,可作为杉木无节材育种的优良亲本。本研究只对杉木无性系3年生、4年生的生长和枝条发育指标进行了观测,试验林后期的表现有待继续观测分析,并且通过开展区域化试验,为杉木无性系稳定性分析等提供科学依据。

5 结论

不同杉木无性系生长性状与形态性状存在显著差异,其树高和地径两个生长指标之间存在极显著正相关,侧枝节间距、侧枝基径、侧枝长度之间两两显著正相关,树高、地径与侧枝长度、侧枝基径、冠幅高度、冠幅面积有不同程度的正相关。不同无性系之间侧枝节间距的变异系数最大,说明不同无性系的差异较大,该指标可作为无节材选育的主要指标。洋058和洋064的生长性状优良,可作为大径材选育无性系;洋023的形态性状优良,洋054可为无节材选育提供参考。

参 考 文 献

- 赵林峰,高建亮. 2022.杉木无性系不同林龄生长变异与选择效应. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 50(01): 43-51.
- 蔡年辉,李根前. 2009.人工林大径材定向培育研究现状. 安徽农业科学, 37(31): 15518-15519.
- James A L, Andrew J L, Mark E S, et al. 2018. Ecological importance of large-diameter trees in a temperate mixed-conifer forest. PLoS ONE, 7(5).
- 王年荣,原荣立. 2007.全国速生丰产林大径材培育项目工作会议在太原召开. 山西林业, (03): 47.
- 马天舒. 2021.杉木无节材培育技术体系初步研究. 中南林业科技大学.
- 曾 杰. 2023.中国林科院热林所珍贵树种无节材培育研究取得新进展. 林业科技通讯, (01): 45.
- 黄丽娜,江 宇,范福金,等. 2022.杉木侧枝发育特征及其与内源激素的相关性. 森林与环境学报, 42(06): 561-568.
- 叶代全. 2023.杉木早期生长性状多点遗传测定及耐瘠薄家系选择. 福建林业科技, 50(01): 40-43.
- 王润辉,郑会全,韦如萍,等. 2022.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. 林业与环境科学, 38(03): 1-9.
- 黄小艳,邹志广,周丽丽,等. 2023.杉木不同径级根系木质部的水力功能性状及其与解剖结构的关联性. 应用与环境生物学报, 1-12.
- 卢康宁. 2012.基于生理生态模型的杉木形态结构变化可视化模拟研究. 中国林业科学研究院.
- 孙麟钧,黄丽娜,江 宇,等. 2023.外源激素对杉木苗木生长及侧枝发育的影响. 森林与环境学报, 43(03): 240-249.

- (Wang Z H, Yu N, Li R S, et al. 2020.Branch development of eight-year-old *Mytilaria laosensis* plantations in response to planting density[J]. AUSTRIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE, 137(4): 247-266. [in Chinese])
- (Chen H, Tan J H, Liang X X, et al. 2021.Molecular mechanism of lateral bud differentiation of *Pinus massoniana* based on high-throughput sequencing[J]. SCIENTIFIC REPORTS, 11(1). [in Chinese])
- Trincado G, Burkhart H E. 2009.A framework for modeling the dynamics of first-order branches and spatial distribution of knots in loblolly pine trees[J]. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 39(3): 566-579.
- 孙 云, 李 鑫, 李 勇, 等. 2019.幼树阶段杉木不同无性系生长与形态性状分析. 中南林业科技大学学报, 39(03): 34-39.
- 于海洋, 庞忠义, 殷春红, 等. 2023.100 个杨树无性系生长及材性变异研究. 西北林学院学报, (04): 1-10.
- 欧阳磊. 2023.柳杉种子园半同胞子代两点测定与选择. 中南林业科技大学学报, 43(03): 21-31.
- 胡 倩, 赵天宇, 张新叶, 等. 2021.三个楸树优良无性系的组培快繁技术研究. 湖北民族大学学报(自然科学版), 39(04): 361-366.
- 袁莲珍, 杨 斌, 刘际梅, 等. 2020.外源植物激素对杉木种子萌发及苗木生长的影响. 四川林业科技, 41(06): 75-79.
- 莫康克. 桉树大径材和无节材培育技术探究. 2021. 绿色科技, 23(01): 159-160.
- 李明月, 陈东升, 王雪玉, 等. 2020.节子的性质及其对木材材性的影响. 西北林学院学报, 35(04): 197-204.
- 刘 勇, 朱子卉, 卢 佳, 等. 2022.基于激光雷达点云数据的单木树冠体积测量方法. 林业勘查设计, 51(06): 18-22.