

“定向培育松树木材性质评价”专栏 (5) DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025054

**编者按:** 在我国木材资源结构调整与高效利用需求不断提升的背景下, 林木定向培育已成为保障结构材与纸浆材等特定用途木材供给的重要技术路径。然而, 从目标用途出发, 对定向培育林木材性进行系统评价与质量预测的方法体系仍有待完善。农业生物育种国家科技重大专项课题“纸浆材及结构材用松树木材性质与质量评价”围绕主要松树树种的定向培育需求, 构建以材性分布规律解析与快速评价技术为核心的研究框架。研究以落叶松和湿地松为主要对象, 针对结构用落叶松, 从木材主要化学成分、密度和生长轮结构特征差异入手, 系统揭示抗弯性能、拉伸性能等力学性能指标的径向变异规律, 及其与微观结构和化学组成之间的关系; 通过无损检测与力学试验相结合的方法, 建立抗弯性能、拉伸性能预测模型, 确定活立木应力波传播速率阈值, 创新微创评价指标和评估方法, 为结构用材的力学性能评估和预测提供依据。针对纸浆材用湿地松, 构建基于近红外光谱的木材基本密度及理化性质快速检测模型, 实现多性状参数的同步预测, 为纸浆材定向培育中关键性状的筛选与评价提供技术手段。本专栏系统呈现该重大专项在松树材性变异规律解析、性能评估和预测方法构建方面的研究进展。研究形成从材性基础特征分析到力学性能与理化性质快速预测的完整研究链条, 为松树定向培育由“种什么树、用什么材”向“用什么材、种什么树”的转变提供科学依据。

## 3个家系落叶松木材生长轮宽度与密度径向变异

向娥琳, 杨晨, 李珠, 蒋佳荔, 周永东

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



**摘要:** 以黑龙江省牡丹江市林口县青山林场1993年种植的落叶松 (*Larix* spp.) 子代测定林中的3个家系木材为试验对象: 日3×兴2 (*Larix kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2)、日5×长77-3 (*L. kaempferi* 5×*L. olgensis* 77-3) 和日5×兴9 (*L. kaempferi* 5×*L. gmelinii* 9), 采用软X射线成像技术分析生长轮宽度和密度分布特征。结果表明: 在生长周期内, 各家系生长轮宽度均呈现在生长轮龄前10年迅速降低, 10年后趋于稳定的阶段性特征; 日3×兴2的年均生长轮宽度最大, 生长速率最快。晚材率则表现生长轮龄前10年迅速升高、10年后波动式增加的趋势, 日5×长77-3的晚材率稳定性最佳。早材密度在生长初期小幅降低, 6~8年显著上升, 至15年后再度降低; 而晚材平均密度表现为前10年快速增加, 10年后保持稳定, 使生长轮平均密度呈现先升高后略微降低的动态变化, 日3×兴2的晚材密度最高, 日5×长77-3的早材密度和生长轮密度的变异系数最低, 表现出良好的生长轮间稳定性。研究结果为落叶松优良家系的筛选及定向培育提供理论依据与技术支撑。

**关键词:** 杂种落叶松; 家系; 生长轮; 密度; 径向变异

中图分类号: S781.7 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 01-0011-08

## Radial Variation of Growth Ring Width and Density of Larch Wood from Three Families

XIANG Elin, YANG Chen, LI Zhu, JIANG Jiali, ZHOU Yongdong

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2025-06-05; 修改日期: 2025-07-01

基金项目: 农业生物育种国家科技重大专项课题“纸浆材与结构材用松树木材性质与质量评价”(2023ZD0405905)。

作者简介: 向娥琳 (1992—), 女, 助理研究员。Email: xiangelin@caf.ac.cn

通讯作者: 周永东, 男, 研究员。Email: zhoyud@caf.ac.cn

**Abstract:** This study systematically analyzed the growth ring width and density profile of larch wood from three families (*Larix kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2, *L. kaempferi* 5×*L. olgensis* 77-3, *L. kaempferi* 5×*L. gmelinii* 9) from a progeny test plantation established in 1993 at Qingshan Forest Farm, Linkou County, using the soft X-ray imaging technique. During the growth cycle, all families showed rapid decrease in growth ring width during the first 10 years and then leveled off. *L. kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2 demonstrated the largest mean annual growth ring width, indicating the fastest growth rate. The latewood percentage exhibited an initial rapid increase in the first 10 years and then displayed a fluctuating upward trend. *L. kaempferi* 5×*L. olgensis* 77-3 showed the best stability in latewood percentage. The average earlywood density decreased slightly in the initial growth stage, increased significantly from the 6<sup>th</sup> to the 8<sup>th</sup> growth ring, and decreased again after the 15<sup>th</sup> growth ring. The average latewood density increased rapidly in the first 10 growth ring and remained stable thereafter, resulting in the average density of growth rings showing an initial increase followed by a slight decrease. *L. kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2 exhibited the highest latewood density, while *L. kaempferi* 5×*L. olgensis* 77-3 had the lowest variation coefficients for earlywood and growth ring density, indicating superior stability between growth rings. This research provided theoretical and technical supports for selecting superior families and targeted breeding of larch.

**Key words:** hybrid larch; families; growth ring; density; radial variation

落叶松(*Larix* spp.)属松科乔木,是我国东北、华北及南方亚高山区短周期工业用材的核心树种之一<sup>[1]</sup>。我国现有落叶松天然林面积767.22万hm<sup>2</sup>,人工林面积316.29万hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。该树种凭借广域生态适应性、优良力学性能、高纤维素含量、强耐腐蚀等优点,在工程木结构、轨道交通基材、船舶龙骨、高端家具制造及高得率化学机械浆等领域具有不可替代的产业化价值<sup>[3-4]</sup>。

在遗传改良领域,落叶松优良家系的筛选主要依据树高、胸径和材积等表型生长性状作为评价指标<sup>[5-6]</sup>。这些指标虽然便于观测且能直观反映树木的生长速度与产量潜力,但无法获取与木材加工利用密切相关的材质特性,如木材密度、强度等。并且,木材性质在不同家系、同一植株不同部位均存在变异性,深入解析其规律对于实现材质精准预测、指导轮伐期科学决策具有重要意义。现有研究已揭示地理种源、树龄、立地条件、生长势等外源因子对木材密度、生长轮宽度、晚材率的影响规律<sup>[11-13]</sup>,并对落叶松幼龄材与成熟材的材性差异开展了对比研究<sup>[14]</sup>。然而,针对不同家系间生长轮宽度与密度等性状径向变异的系统性

研究仍显不足。

木材密度是决定其强度和刚度的关键物理参数<sup>[7]</sup>。生长轮宽度和晚材率分别表示木材的径向生长速率和晚材占比<sup>[8-10]</sup>,也是评价木材品质和加工适用性的重要依据。因此,木材密度与生长轮精准检测对材性评价至关重要。传统检测方法如直接测量法、电阻法等虽然具有一定普适性,但存在明显局限:一是检测精度易受木材含水率梯度和机械损伤等因素干扰;二是仅能获取木材整体密度或若干生长轮的平均密度,难以解析早、晚材密度的微区波动<sup>[15]</sup>。相比之下,软X射线作为一种快速无损检测技术,不仅可实现生长轮宽度、晚材率等参数的精准量化,而且能构建完整的密度径向分布图谱。该技术已广泛应用于人造板、地板基材及木竹材厚度或密度分布研究<sup>[16-17]</sup>。

鉴于此,本研究以相同立地条件下的3个家系落叶松木材为对象,采用软X射线成像法,对生长轮宽度、晚材率、密度等进行测定分析,探究不同家系杂种落叶松木材生长轮宽度和密度径向分布特征的变异规律,旨在落叶松优良家系的筛选及定向培育提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省牡丹江市林口县青山林场,地理坐标在东经 $130^{\circ}20'$ ~ $130^{\circ}40'$ ,北纬 $45^{\circ}17'$ ~ $45^{\circ}30'$ 之间。属于中温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,无霜期120~130天。青山林场位于张广才岭与完达山脉交汇处,地形以浅山区丘陵地貌为主,平均海拔320 m。

### 1.2 试验材料

落叶松半同胞子代测定林,于1991年播种育苗,1992年换床,1993年春季采用完全随机区组设计营建试验林,株行距 $1.5\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ ,重复4次,小区40株,目前试验林保存状况良好。试验样木于2024年6月采集,来自于3个家系:日3×兴2 (*Larix kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2)、日5×长77-3 (*Larix kaempferi* 5×*L. olgensis* 77-3)和日5×兴9 (*Larix kaempferi* 5×*L. gmelinii* 9)。严格筛选生长态势正常、树干通直无畸形的优势木,排除边缘木及病害木,确保每株样木来自不同区组且能代表试验地环境梯度。每个家系各选取3株,共计9株,基本信息列于表1。样木伐倒后,于胸高处截取5 cm厚的无缺陷圆盘1个,标记南北向后转运回实验室保存。

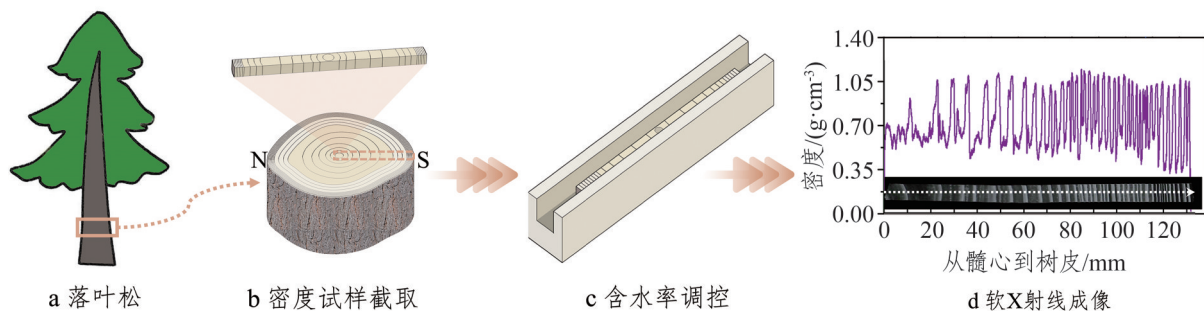


图1 软X射线成像获取生长轮和密度特征

Fig.1 Growth rings and density profile obtained by soft X-ray imaging

**1.4.2 密度数据采集** 软X射线成像获得的木材灰度图像,需通过已知密度的标准样块建立灰度-密度校准曲线进行标定,进而将各像素灰度值转换为绝对密度值,生成二维密度分布图,实现生长轮微区密度的精准定量分析。采用软X射线微密度分析系统沿试样径向对底片进行连续线性扫描,设置扫描步长为 $15\ \mu\text{m}$ ,每个试样重复扫描3次,取其平均值绘制剖面密度分布曲线。

表1 落叶松的胸径和树高

Tab.1 The breast height and tree height of the larch trees

家系	株数	胸径/cm		树高/m	
		平均值	变异系数	平均值	变异系数
日3×兴2	3	21.03±5.00	23.81%	22.30±1.65	7.38%
日5×长77-3	3	18.73±1.01	5.37%	21.17±2.92	13.79%
日5×兴9	3	17.87±2.93	16.38%	19.97±2.85	14.27%

### 1.3 试验设备

X射线胶片、软X射线拍摄装置、软X射线微密度分析系统等。

### 1.4 试验方法

**1.4.1 软X射线成像** 如图1所示,沿南向半径从树皮至髓心径向截取含髓心的完整木条试样,尺寸为 $5\text{ mm (L)}\times 5\text{ mm (T)}\times$ 直径,每株树各2条。为消除木材干燥变形对试验结果的干扰,采用自制夹具实施约束固定。将固定的试样在温度 $20\ ^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度65%条件下平衡处理,每日监测其质量变化,当质量变化率小于 $0.02\%/d$ 时判定达到平衡。将试样置于高分辨率工业胶片表面,确保试样径切面与胶片长度方向平行。采用软X射线拍摄装置对试样进行垂直照射,设置参数为:电压23 kV,电流15 mA,曝光时间30 s。曝光后立即使用显影液冲洗底片,定影后自然晾干。

**1.4.3 生长轮及密度分布特征参数统计** 基于剖面密度分布曲线,进一步对生长轮及密度分布特征参数进行统计分析。落叶松是典型的早晚材急变树种,在剖面密度分布曲线上,将密度值显著增加点和显著减少点分别设为晚材起始点和晚材终点,以此明确晚材的区间范围。

1) 生长轮宽度。沿髓心到韧皮部方向对剖面密度曲线进行统计分析,依次统计生长轮总宽度

及单个生长轮宽度,精确至0.01 mm,并记录测定范围内的生长轮总数。

2) 晚材率。在试样总宽度范围内,测量每个生长轮的晚材宽度,精确至0.01 mm。晚材率计算式见式(1)。

$$L_w = \frac{w_L}{w_q} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $L_w$  为试样的晚材率,%;  $w_L$  为当年晚材宽度,mm;  $w_q$  为当年生长轮宽度,mm。

3) 早材、晚材密度与密度比。早材、晚材、整个生长轮对应区域的密度取平均值,并计算晚材与早材的密度比(式2)。

$$D_R = \frac{\rho_L}{\rho_E} \quad (2)$$

式中:  $D_R$  为晚材与早材密度比;  $\rho_L$  为晚材平均密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_E$  为早材平均密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**1.4.4 显著性分析** 采用SPSS 27.0统计软件对原始数据进行处理和方差分析。

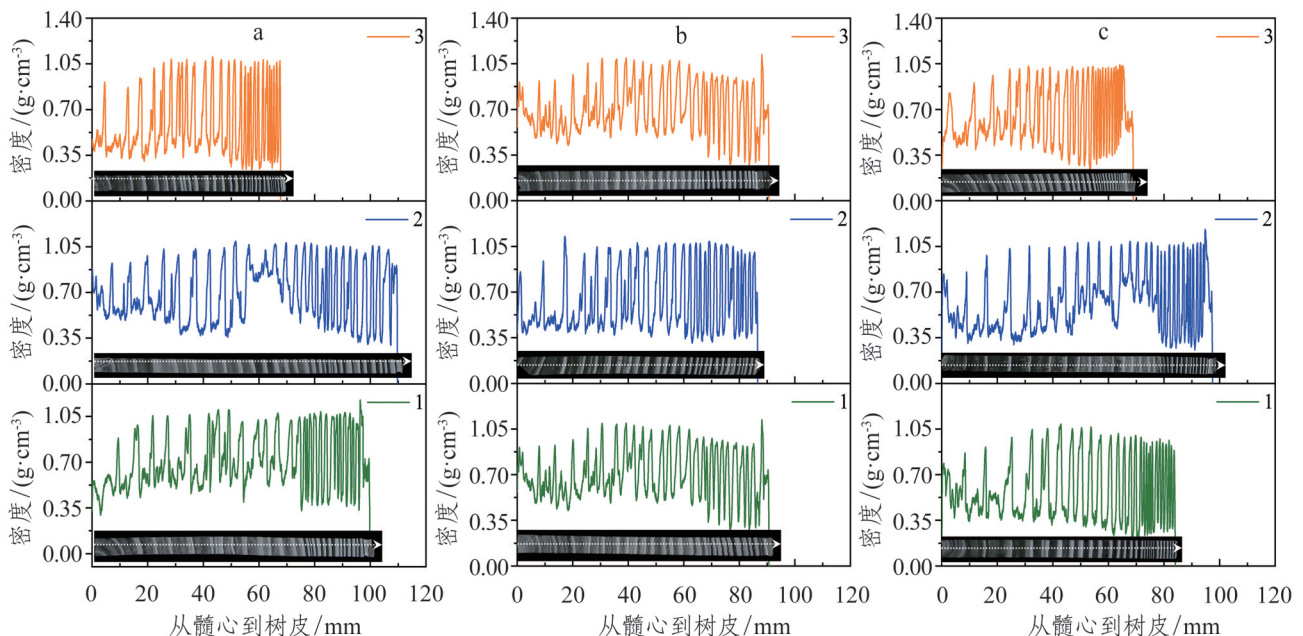
## 2 结果与讨论

### 2.1 木材密度径向分布曲线

图2为3个家系落叶松木材横截面的软X射线图像及其髓心到树皮方向的密度分布曲线。软X

射线图像为负像<sup>[8]</sup>,即亮度高的区域对应晚材带的高密度结构,黑灰色暗区则对应早材带的低密度结构。3个家系落叶松木材的剖面密度曲线沿髓心到树皮方向呈现出明显的周期性振荡,其相位与软X射线灰度图像中的暗明交替条带具有严格对应关系,这种明暗交替的条带特征清晰地揭示了早材与晚材的密度差异。落叶松属于早晚材急变树种<sup>[9]</sup>,早材密度范围(0.26~0.43  $\text{g}/\text{cm}^3$ )明显低于晚材密度(0.50~1.12  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。从图2中可以看出,其早材密度向晚材密度过渡呈现陡峭、急剧增加分布特征。

软X射线成像对应的剖面密度曲线能直观反映生长轮特征变化。日3×兴2、日5×长77-3和日5×兴9的生长轮总宽度分别为67.66~109.73、86.58~92.15和68.93~97.41 mm,日5×长77-3的生长轮总宽度变异范围明显低于日3×兴2和日5×兴9。3个家系在前15个生长轮的总长度大部分在60~70 mm,但后续生长发育出现明显的梯度差异:日5×兴9在靠近髓心区域形成高密度窄生长轮,生长轮间平均间距约1 mm,比日3×兴2和日5×长77-3紧密。基于上述密度曲线特征,进一步提取生长轮参数,对生长轮宽度、晚材率及平均密度进行统计分析。



注:a 日3×兴2;b 日5×长77-3;c 日5×兴9。白色箭头为扫描方向(从髓心到树皮);1、2、3代表重复样木。

图2 落叶松木材的剖面密度曲线  
Fig. 2 Density profiles of larch wood

## 2.2 生长轮宽度和晚材率

不同家系落叶松的生长轮宽度和晚材率径向变化如图3所示。3个家系的生长轮宽度变化曲线基本一致。在生长轮龄1~10年阶段,生长轮宽度由髓心附近的7.00 mm,降低至10年时的3.50 mm左右;此后胸径生长速度放缓,在生长轮龄16~29年时,生长轮宽度基本保持稳定,维持在1.00~2.00 mm。表明3个家系木材的速生期主要集中在前10年。方差分析显示,不同生长轮间生长轮宽度的差异极显著( $P < 0.001$ )。

依据树木的生长速度和胸径情况,分为幼龄林、中龄林、近熟林及成熟林。生长轮宽度的变异规律与树木生长周期密切相关,幼龄期生长迅速、生长轮较宽,中龄期生长速率逐渐减缓,成熟期则生长缓慢且生长轮宽度进一步变窄<sup>[20]</sup>。3个家系落叶松的生长轮宽度差异极显著( $P < 0.001$ )。日3×兴2、日5×长77-3和日5×兴9的生长轮宽度年变化量分别在1.47~6.98 mm、1.51~7.29 mm、1.02~7.62 mm,年均生长轮宽度分别为3.29 mm、3.12 mm和2.79 mm。由此可见,在3个家系落叶松中,日3×兴2的生长速率最快,在径向生长方面具有明显优势。

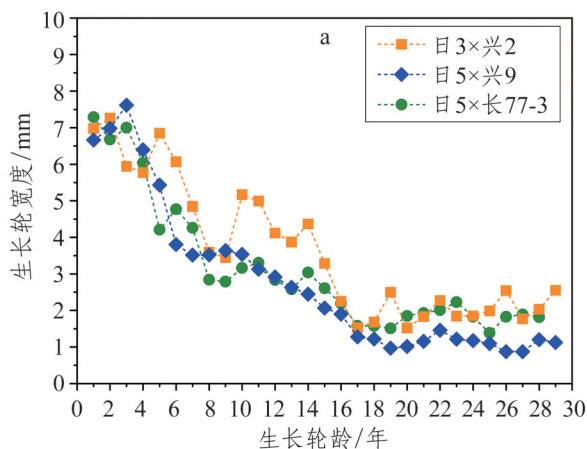


图3b为不同家系落叶松晚材率的径向变异曲线。由髓心到树皮,3种家系的晚材率均在近髓心区域最低(约20%)。方差分析结果显示,不同生长轮间晚材率差异极显著( $P < 0.001$ )。日5×长77-3的晚材率在生长轮龄前10年迅速升高至50%以上,此后随着生长轮龄增加呈波动式略微上升的趋势;而日3×兴2和日5×兴9的晚材率在生长轮龄前7年升高迅速,第7年出现暂时反弹,之后亦呈波动上升并逐渐趋于稳定。虽然方差分析表明3个家系间的晚材率差异不显著( $P > 0.05$ ),但日5×长77-3的晚材率稳定性明显优于其他两种家系。过渡材是树木生长过程中,木材解剖特征从幼龄材向成熟材转变的过渡区域。晚材率连续两年超过50%被视为判断过渡材树龄的重要标志<sup>[21]</sup>。日5×长77-3在生长轮龄第10年后出现晚材率连续两年高于50%的现象,这与生长轮宽度数据完全吻合,说明该杂种落叶松在生长轮龄10年时已经进入过渡树龄阶段。上述差异对落叶松定向选育具有指导作用,若以快速获得木材为目标,可优先选择生长速率最快的日3×兴2家系;若追求力学性能的稳定与优异,则晚材率高且稳定的日5×长77-3更为理想。

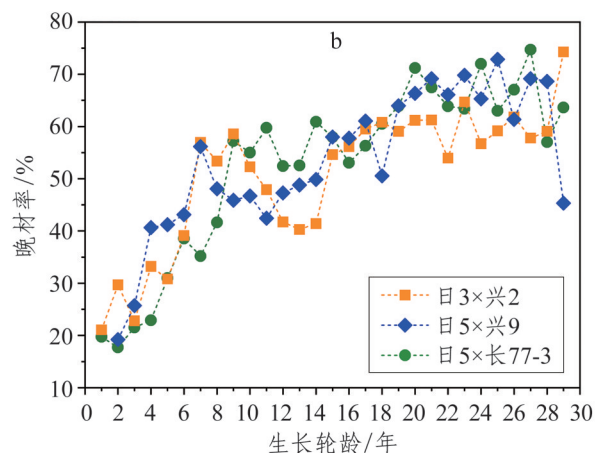


图3 落叶松木材生长轮宽度和晚材率径向变化

Fig. 3 Radial variation of growth ring width and latewood percentage of larch wood

## 2.3 平均密度变化

落叶松早材与晚材在生长过程中呈急变特征,早材区域在密度曲线上表现为低密度平缓段,而晚材区域则呈现高密度陡升段,其密度曲线的切线斜率突变点被用作早材与晚材的分界点(图4)。

软X射线微密度分析系统扫描步长为15 μm,即为每间隔15 μm获得一次密度数值。分别对早材、晚材及生长轮位置对应区域的密度统计,取平均值计算,更清晰揭示杂种落叶松木材在生长过程中的密度动态变化规律。

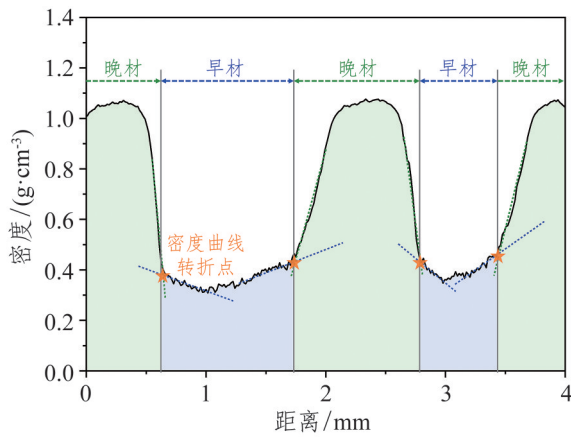


图4 落叶松早晚材密度划分图解

Fig. 4 Schematic of classification of the earlywood and latewood density of larch wood

落叶松早材和晚材平均密度随生长轮龄呈现显著的动态演化特征(图5)。在树木生长的初始阶段(生长轮龄6~8年时),早材平均密度呈现轻微降低趋势,最大降幅为34.00%;随后进入快速累积期,密度由 $0.42 \text{ g/cm}^3$ 显著提升至 $0.68 \text{ g/cm}^3$ ;

当生长轮龄超过15年后,早材密度再次出现降低趋势,最小值为 $0.35 \text{ g/cm}^3$ 。与早材相比,晚材密度呈现显著的双阶段特征:在生长轮龄前10年阶段,其密度值由 $0.70 \text{ g/cm}^3$ 快速攀升至 $0.91 \text{ g/cm}^3$ ;当生长轮龄大于10年后,晚材密度进入稳态平台期,密度趋于 $0.85 \text{ g/cm}^3$ 。这种早材与晚材密度的差异演化模式导致生长轮整体密度呈现先增大、后略微降低的趋势。可见,生长轮整体密度演变受到早材与晚材密度差及晚材率的共同调控,对落叶松人工林轮伐期的精准确定及高密度晚材定向培育有参考价值。方差分析表明,3个家系落叶松不同生长轮间早材密度、晚材密度及生长轮平均密度的差异均极显著( $P < 0.001$ )。

晚材和早材密度比,是影响木材品质的重要性状<sup>[22]</sup>。3个家系落叶松晚材与早材密度比均随着生长轮龄增加而逐渐增大。晚材密度在生长轮龄约10年时趋于稳定,因此可在树木生长早期基于晚材密度进行优良家系筛选,缩短育种周期。

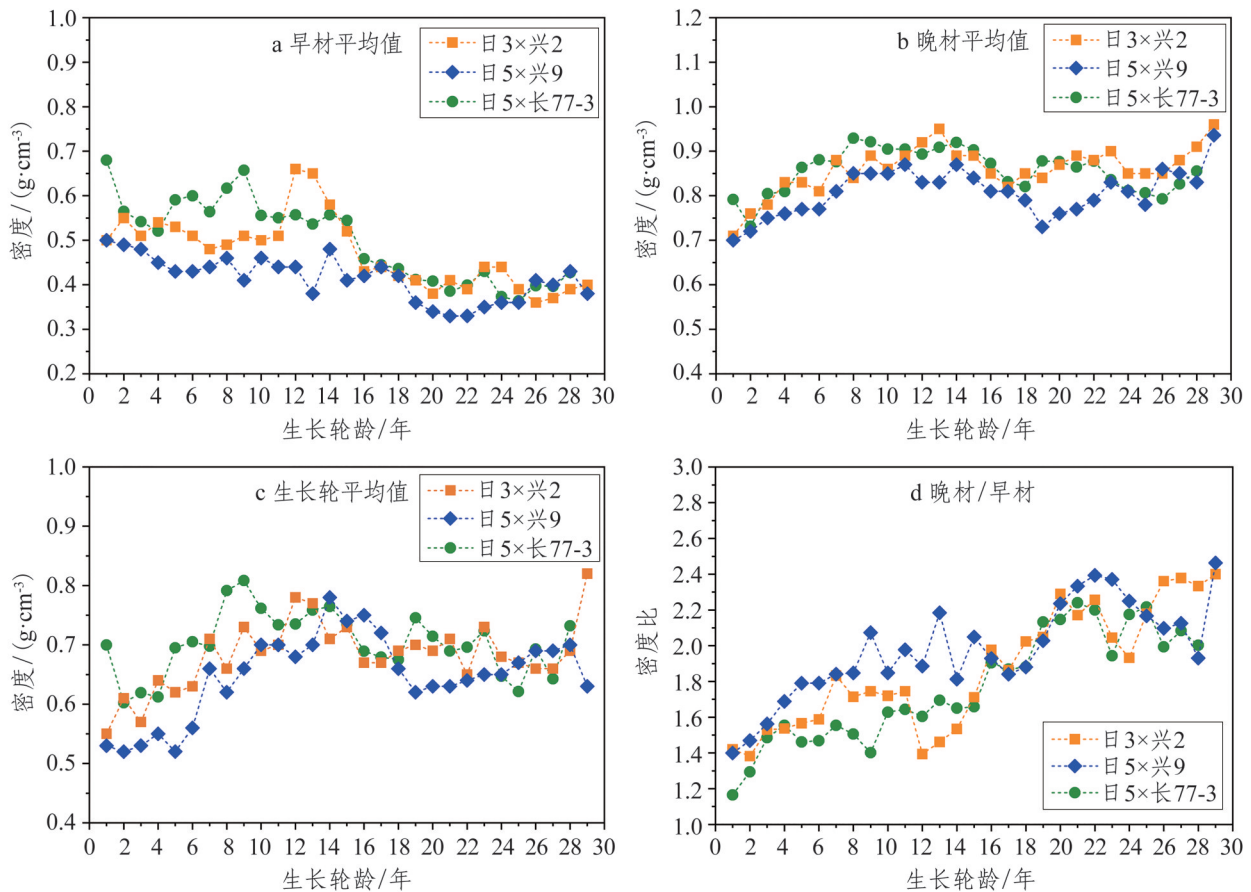


图5 落叶松木材密度径向变化

Fig. 5 Radial variation of larch wood density

不同家系落叶松木材密度存在差异。早材密度以日5×长77-3的最大,其次为日3×兴2,日5×长9最小;且日5×兴9的早材密度变异系数最低,表明其早材密度的稳定性更优。在晚材密度上,日3×兴2和日5×长77-3明显高于日5×兴9。生长轮整体密度排序为:日5×长77-3>日3×兴2>日5×兴9。日5×兴9的晚材与早材密度比明显高于日3×兴2和日5×长77-3。方差分析表明,同家系间早材密度和晚材密度在 $\alpha=0.001$ 水平上达到极显著差异,而年轮密度、早晚材密度比在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著。

### 3 结论

1) 研究采用软X射线成像法,对3个家系落叶松木材生长轮和密度分布特征进行分析,随着生长轮龄增加,各家系生长轮宽度在生长轮龄前10年迅速降低,此后降低趋势放缓并逐渐趋于稳定;晚材率呈现前10年迅速升高、10年后波动式增加趋势。日3×兴2的平均生长轮宽度最大,生长速率最快;日5×长77-3的晚材率稳定性最佳;日5×兴9在各项指标上均处于中间水平。

2) 3个家系落叶松早材密度在生长初期略有降低,随后显著提升,在生长轮龄15年后再次降低;晚材平均密度呈现先快速增加后稳定的趋势,导致生长轮密度呈现先增加后略微降低的趋势。不同家系落叶松在早材密度、晚材密度及生长轮整体密度上存在显著差异。日3×兴2的晚材密度最高,日5×长77-3的早材密度和生长轮平均密度的变异系数最低,表现出良好的稳定性。若以生长速度为主要目标,可优先选用日3×兴2;若追求材质均匀性与稳定性,则日5×长77-3更适宜。这些差异为落叶松优良家系的筛选及定向培育提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 孙晓梅, 楚秀丽, 张守攻, 等. 落叶松种间及其杂种木材物理力学性质评价[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 153-159.  
SUN X M, CHU X L, ZHANG S G, et al. Timber evaluation on physical and mechanical properties of species and hybrids of *Larix*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(12): 153-159.
- [2] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [3] 龚迎春, 任海青, 丁青锋. 国产落叶松正交胶合木胶层剪切强度评

- 价[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 49-53.  
GONG Y C, REN H Q, DING Q F. Evaluation of bonding shear strength of cross-laminated timber fabricated with domestic larch[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2021, 35(2): 49-53.
- [4] 王绪, 张含国, 张磊, 等. 杂种落叶松纸浆材优良家系选择[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(4): 1-4.  
WANG X, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Superior family selection of hybrid larch for pulp material[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 1-4.
- [5] 李祺, 贾庆彬, 杨伟财, 等. 杂种落叶松家系生长性状变异分析与优良家系选择[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(2): 37-42.  
LI Q, JIA Q B, YANG W C, et al. Variation analysis of growth traits and superior families selection of hybrid *Larix gmelini* families[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2018, 38(2): 37-42.
- [6] 苗清丽, 李雪峰, 张含国, 等. 杂种落叶松家系不同年龄变异及早期选择[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(4): 1-7.  
MIAO Q L, LI X F, ZHANG H G, et al. Variation and early selection of hybrid larch families in different ages[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(4): 1-7.
- [7] 李坚. 木材科学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] 吕瑶, 刘智, 郭梦杰. 不同树龄107杨次生木质部解剖特征及径向变化[J]. 林业与生态科学, 2023, 38(4): 399-410.  
LYU Y, LIU Z, GUO M J. Radial variation and anatomical structures in secondary xylem for different tree ages of *Populus × euramericana* cv. "74/76" [J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2023, 38(4): 399-410.
- [9] 郝晓峰, 俞昌铭, 蒋佳荔, 等. 木材快速生长期早材与晚材密度分布的数学描述初探[J]. 林业科学, 2013, 49(10): 118-126.  
HAO X F, YU C M, JIANG J L, et al. A preliminary study on modeling of earlywood and latewood density distribution during the fast growth period[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(10): 118-126.
- [10] 张雨, 方克艳, 周非飞, 等. 福州马尾松年内晚材生长动态观测研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(1): 59-64.  
ZHANG Y, FANG K Y, ZHOU F F, et al. A study on the inter-annual latewood growth of *Pinus massoniana* in Fuzhou[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(1): 59-64.
- [11] 王绪. 杂种落叶松材性分析与高固碳家系选择研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [12] 李艳霞, 张含国, 邓继峰, 等. 长白落叶松木芯基本密度与材性指标相关及建筑材优良家系选择研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(5): 6-14.  
LI Y X, ZHANG H G, DENG J F, et al. Correlations among wood density, wood physical mechanics index and growth trait, and selection of elite families for production of building products in *Larix olgensis*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(5): 6-14.
- [13] 王斯栋, 褚江依, 陈东升, 等. 日本落叶松人工林不同生长势林木的木材物理力学性质[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(1): 106-110.  
WANG S D, CHU J Y, CHEN D S, et al. Physical and mechanical properties of dominant-average-oppressed wood of Japanese larch[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(1): 106-110.
- [14] 鲍甫成, 江泽慧, 姜笑梅, 等. 中国主要人工林树种幼龄材与成熟材及人工林与天然林木材性比较研究[J]. 林业科学, 1998, 34(2): 63-76.  
BAO F C, JIANG Z H, JIANG X M, et al. Comparative studies on wood properties of juvenile vs. mature wood and plantation vs. natural forest of main plantation tree species in china[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(2): 63-76.
- [15] 黎小谊, 陈卫国. 湿地松和加勒比松木材年轮特征和基本密度的比较研究[J]. 西南林业大学学报, 2021, 41(5): 178-183.  
LI X Y, CHEN W G. Comparison study on ring characteristics and

