北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于树轮密度的早晚材划分方法比较

陈梦淇 向玮 刘太艳 徐德鹏 裴哲范

Comparison of earlywood-latewood demarcation methods based on tree-ring density

Chen Mengqi, Xiang Wei, Liu Taiyan, Xu Depeng, Pei Zhefan

引用本文:
陈梦淇, 向玮, 刘太艳, 徐德鹏, 裴哲范. 基于树轮密度的早晚材划分方法比较[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):169–179. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250269
Chen Mengqi, Xiang Wei, Liu Taiyan, Xu Depeng, Pei Zhefan. Comparison of earlywood–latewood demarcation methods based on tree–ring density[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):169–179. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250269

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250269

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候因子对云冷杉针叶混交林主要针叶树种径向生长的贡献率分析

Contribution rate of climate factors to radial growth of main coniferous species in spurce–fir conifer mixed forest of northeastern China

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 55–63. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220332

晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(5): 59–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240140

长白山云冷杉针阔混交林3种常见树种径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of three common tree species to climate change in a spruce–fir mixed stand in Changbai Mountain of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210479

庐山日本柳杉径向生长对气候响应的边际效应

Marginal effect of radial growth of *Cryptomeria japonica* to climate in Lushan Mountain of southwestern China

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 63–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200372

基于混合效应模型及生存分析方法的落叶松云冷杉林单木生存模型研究

Study on single tree survival model of mixed stands of *Larix olgensis*, *Abies nephrolepis* and *Picea jazoensis* based on mixed effect model and survival analysis method

北京林业大学学报, 2022, 44(1): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200112

等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制

Influence of micro–pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood

北京林业大学学报, 2026, 48(3): 203–210. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250300

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250269

基于树轮密度的早晚材划分方法比较

陈梦淇[1]　向　玮[1]　刘太艳[1]　徐德鹏[1]　裴哲范[2]
（1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；
2. 吉林长白山森工集团汪清林业分公司，吉林 延吉 133200）

摘要:【目的】早晚材划分方法直接影响树轮指标提取的准确性，本研究通过系统评估不同早晚材边界界定标准的适用性，以筛选出早晚材划分最优方法。**【方法】**以目视判别法为参照，比较动态阈值法（MMmean、MAX80%、MM2/3+）与最大导数法（D6）的划分结果。采用 Spearman 相关分析检验参数序列一致性，通过 Pearson 相关分析比较不同方法树轮指标年表与气候因子的关系。**【结果】**MAX80% 法和 MM2/3+ 法所得的密度阈值均约为 640 kg/m^3，而 MMmean 法和 D6 法所得密度阈值均约为 550 kg/m^3。不同方法所得年表与气候因子的相关性整体趋势一致，其中 D6 法与目视判别法的同步性最高。相比其他方法，D6 法早材宽度年表与上年 11 月 3 个温度指标的正相关性更显著（$P < 0.05$），且早、晚材密度年表对上年 9 月最高温的响应更敏感。**【结论】**D6 法通过捕捉树轮密度曲线拐点，能更准确地表征早晚材生理过渡；早材树轮参数比晚材树轮参数更易受划分方法的影响；建议以 550 kg/m^3 作为臭冷杉早晚材划分的参考密度阈值。

关键词：树轮密度；树轮宽度；早晚材划分；最大导数法；气候响应；臭冷杉
中图分类号：S758　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)05−0169−11
引文格式：陈梦淇，向玮，刘太艳，等. 基于树轮密度的早晚材划分方法比较［J］. 北京林业大学学报，2026，48(5)：169−179.
Chen Mengqi, Xiang Wei, Liu Taiyan, et al. Comparison of earlywood-latewood demarcation methods based on tree-ring density［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 169−179.

Comparison of earlywood-latewood demarcation methods based on tree-ring density

Chen Mengqi[1]　Xiang Wei[1]　Liu Taiyan[1]　Xu Depeng[1]　Pei Zhefan[2]
(1. State Key Laboratory for Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Wangqing Forestry Branch of Changbai Mountain Forest Industry Group, Yanji 133200, Jilin, China)

Abstract:［**Objective**］The early-latewood boundary delineation method directly affects the accuracy of tree-ring parameter extraction. By systematically evaluating the applicability of different boundary definition criteria, this study aims to identify the optimal delineation method.［**Method**］Using the visual inspection method (VIS) as a benchmark, this study compared the demarcation results of three dynamic threshold methods (MMmean, MAX80%, and MM2/3+) and the maximum derivative method (D6). Spearman correlation analysis was employed to test the consistency of the parameter series, while Pearson correlation analysis was utilized to examine the relationships between the tree-ring chronologies derived from different methods and climate factors.［**Result**］The density thresholds obtained by the MAX80% and MM2/3+ methods were approximately 640 kg/m^3, whereas those from the MMmean and D6 methods were approximately 550 kg/m^3. The overall trends of the correlations between the derived chronologies and

收稿日期: 2025−07−15　**修回日期:** 2026−05−07
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFD2200502-04），国家自然科学基金项目（32160366）。
第一作者: 陈梦淇。主要研究方向：林分生长模型研究。Email: 2901109973@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 向玮，教授。主要研究方向：林分生长模型研究。Email: wxiang@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

climate factors were consistent across the different methods, with the D6 method demonstrating the highest agreement with the visual inspection benchmark. Compared to the other methods, the D6-derived earlywood width chronology exhibited more significant positive correlations ($P < 0.05$) with three temperature indices from the previous November. Furthermore, the earlywood and latewood density chronologies based on the D6 method showed greater sensitivity to the maximum temperature of the previous September. [**Conclusion**] By capturing the inflection point of the tree-ring density curve, the D6 method more accurately characterizes the physiological transition between earlywood and latewood. Earlywood parameters are more susceptible to the choice of demarcation method than latewood parameters. We recommend 550 kg/m^3 as the reference density threshold for earlywood and latewood demarcation in *Abies nephrolepis*.

Key words: tree-ring density; tree-ring width; earlywood and latewood demarcation; maximum derivative method; climate-growth response; *Abies nephrolepis*

树轮是维管形成层季节性活动的产物。与阔叶树相比，针叶树早晚材界限比阔叶树更清晰易辨，故当前早晚材相关研究多以针叶树为主要对象。针叶树的木材形成存在明确的停止阶段，随着生长季推进，形成层活动由旺盛趋于减弱，并在冬季来临前完全停止[1]。生长季前期，环境温度回升驱动形成层细胞快速分裂，产生直径较大、细胞壁较薄的早材细胞[2]。生长季后期，形成层分化出直径较小、细胞壁较厚的晚材细胞[3]。这种周期性变化使树轮密度从早材到晚材呈现渐进式递增，因此早晚材边界划分能够建立有效的界定准则[4]。由于形成时间不同，早材和晚材较全轮可保留更多树木生长信息和气候信号，是更优的气候替代指标[5]。因此，精确界定早晚材边界对提升树轮气候分析的准确性至关重要[4]。

早晚材转变具有渐进性，为获得早材和晚材的时间序列，需在两者之间明确划分标准。研究[6]表明，不同方法得到的树轮指标序列之间是相关的，但其与气候数据的关联程度存在差异，即保留的气候信号因方法而异。现有方法涵盖复杂的解剖学测定、便捷的目视判别及精确的密度测量等[7−8]。其中，Stahle 等[7]提出的目视判别标准应用广泛：对早晚材急变的年轮依照突变界限划分，对过渡渐变的年轮则以过渡段中线划分[9−10]。目视判别法操作简便，对早晚材边界清晰的针叶树种可获得基准真值，但长期目视测量工作繁琐，易产生视觉疲劳，导致测量误差[11]。

X 射线密度测定法可精准获取从髓心到树皮的密度连续数据，广泛应用于树轮早晚材宽度与密度的测量，其测量结果依赖于早材与晚材的划分方式[12]。为提高划分的客观性与效率，已有研究将公式与 X 射线密度技术结合，形成了多种自动化划分早晚材的方法，实现了客观、可重复和高效的测量[4]，主要包括固定阈值法、动态阈值法和最大导数法。固定阈值法以预设密度值（通常为 400 ~ 550 kg/m^3）作为划分依据[6]，便于嵌入 X 射线密度测定计算程序，但难以适应树轮间或单木尺度上的密度变异[13]。故有学者提出了动态阈值法来更好地适应不同树种的早晚材划分。Samusevich 等[4]系统比较多种动态阈值法后，推荐以树轮最大密度的 80% 或依据最大最小密度差值设定阈值进行划分。然而，此类动态阈值法虽具适应性，却因仅依赖个别极值，难以全面反映整个生长轮的密度分布变化。Koubaa 等[13]根据树木生长过程中的变化特征，采用高阶多项式拟合树轮密度曲线，并将曲线的拐点（即二阶导数为 0 的点）作为早材与晚材的分界点，认为最大导数法更加动态适应不同年轮的密度变化，可以提高划分的客观性和准确性。Antony 等[14]比较了最大导数法、固定阈值法及 Mork 指数在火炬松（*Pinus taeda*）中的适用性，研究表明固定阈值法在幼龄材中易高估早材比例，而最大导数法则表现出更好的适应性。目前，动态阈值法与最大导数法在划分准确性方面尚缺乏系统比较。

长白山地区是中国云冷杉天然针阔混交林分布集中且保存完好的核心地区之一，也是近年来气候变化敏感区。臭冷杉（*Abies nephrolepis*）作为该地区地带性的主要优势种和建群种，对环境变化具有较高的敏感性，且其树轮早晚材存在明显的渐变特征[15−16]，是探究早晚材划分方法的理想研究对象。本研究以长白山臭冷杉为研究对象，以目视判别法为参照基准，系统比较 4 种早晚材划分方法（动态阈值法：MMmean 法、MAX80% 法、MM2/3+ 法；最大导数法：D6 法）的划分差异，旨在确定最优划分方式，评估不同方法在边界判定中的一致性，并探究各方法所得早晚材参数与气候相关性的差异。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

本研究采样点位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清林业局金沟岭林场的中海拔区域（43°33′～43°36′N，130°14′～130°18′E），属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉。该区属于温带大陆性季风气候，年均气温 3.9 ℃，1 月份气温最低，平均气温约−32 ℃，7 月份气温最高，平均气温约 23 ℃；全年无霜期 138 d；年均降水量 600～700 mm，主要集中在 7 月。地貌以低山丘陵为主，坡度 5°～20°。土壤以暗棕壤为主，腐殖质丰富，土层厚度约 40 cm。植被属长白山植被区系的低山针阔混交林带，具有明显垂直分布格局。中海拔地区（600～800 m）的主要森林类型为红松（*Pinus koraiensis*）和云冷杉针阔混交林。

1.2　样芯的采集、处理及密度测定

本次树芯样本于 2024 年 7 月采集，因当年生长季尚未结束，所用树轮密度数据截至 2023 年。采样点位置、海拔相近，视为同一生长环境，以降低个体生长差异对气候信号的干扰。采用随机抽样法，在样地内选取生长旺盛的臭冷杉，使用直径 10 mm 生长锥于每棵树的阳面（南/西南）胸高处钻取 1 根样芯，以更多地保留气候信号。共钻取 58 根样芯，将样芯置入纸管并标注信息。将阴干后的样芯用白乳胶固定于定制木槽，确保样芯木纤维方向与木槽长轴平行，以便后续清晰观察年轮。

树轮密度测量前，样芯经切片、脱糖脱脂及控温控湿等预处理。首先使用双刃切片机切取 1 mm 厚切片；随后将切片置于 80 ℃ 蒸馏水中浸泡 24 h，去除树脂及可溶性化合物[17]；室温干燥后，再在 20 ℃、70% 相对湿度条件下放置 24 h[18]。之后，使用 Cox 分析系统的 Itrax MultiScanner 沿样芯髓心至树皮方向进行扫描，分辨率设为 20 μm。最后，借助 WinDENDRO v.2017b 软件分析图像，基于预定义校准曲线生成每根样芯的树轮宽度序列、平均密度序列、最大及最小密度序列[19]。试验过程中有 11 根样芯损毁，最终获得 47 根样芯的密度值及整体密度分布曲线。

采用 COFECHA 程序（版本 6.06P）对所有树轮宽度序列进行交叉定年质量检验，保留与主序列显著相关的树轮样芯。树轮宽度随年龄增长呈现明显的下降趋势，因此采用负指数函数去除早晚材宽度中与年龄相关的下降趋势并建立树轮宽度标准化年表；而密度序列通常不存在明显的下降趋势，且考虑到样本年龄跨度较大，采用平滑样条函数去趋势，并以有效序列长度的 2/3 为自适应步长，建立树轮密度标准化年表[20]。本研究样芯时间跨度为 1950—2023 年，有效序列长度介于 23～74 年之间，实际应用于各序列的平滑步长范围为 15～49 年。

1.3　气候数据

本研究所使用的 1950—2021 年月平均气温、月最高气温、月最低气温和降水量数据来源于 Climate AP 软件[21]。该软件基于研究区纬度、经度及海拔等地理信息，插值生成亚太地区月、季及年际时间尺度的常规气候变量。上述气候资料表征研究区 1950—2021 年 3 种温度指标均呈显著上升趋势（$P < 0.01$），而年降水量变化趋势不显著（图 1）。

1.4　早晚材划分方法

采用 4 种方法确定早材与晚材的密度分界值（表 1），并据此计算晚材率。动态阈值法通过树轮密度极值计算分界值，最大导数法通过识别密度分布曲线的拐点确定分界值。

采用六阶多项式拟合树轮密度的变化趋势[13]。

$$D = a_0 + a_1 S_{\mathrm{RWP}} + a_2 S_{\mathrm{RWP}}{}^2 + a_3 S_{\mathrm{RWP}}{}^3 + a_4 S_{\mathrm{RWP}}{}^4 + a_5 S_{\mathrm{RWP}}{}^5 + a_6 S_{\mathrm{RWP}}{}^6 \quad (1)$$

式中：D 为实测密度值，S_{RWP} 为密度值测量点所在位置占该年总轮宽的比例，a_i 为待估参数。

密度曲线的拐点对应六阶多项式二阶导数为 0 的点，以此来确定早材与晚材的分界点。

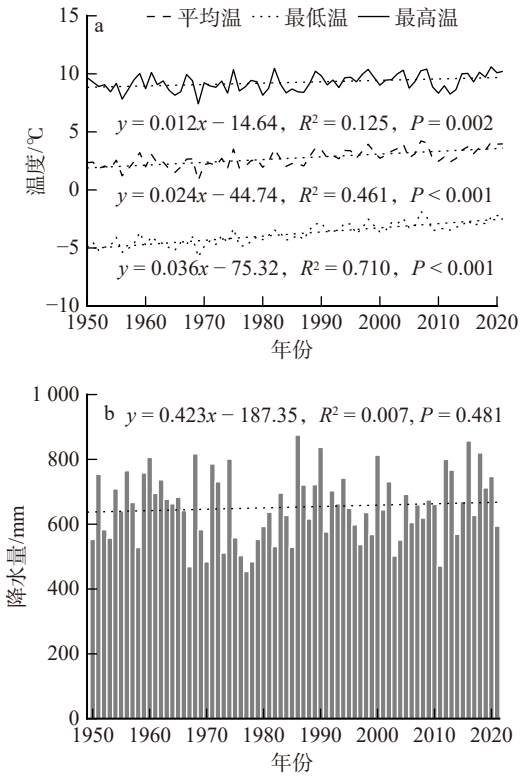


图 1　1950—2021 年气候因子变化趋势

Fig. 1　Changing trend of climate factors from 1950 to 2021

表 1 不同早晚材划分方法比较

Tab. 1 Comparison of different earlywood-latewood demarcation methods

划分方法类型	方法简称	定义	密度阈值计算公式
动态阈值法	MMmean	将树轮内最大密度和最小密度的平均值作为早晚材分界点[12]	$DT = (D_{max} + D_{min})/2$
动态阈值法	MM2/3+	基于树轮密度极差按比例确定早晚材分界点[22]	$DT = \frac{2}{3} \times (D_{max} - D_{min}) + D_{min}$
动态阈值法	MAX80%	将最大密度的80%作为早晚材分界点[4]	$DT = D_{max} \times 80\%$
最大导数法	D6	将密度变化速率最大的点(拐点)作为早晚材分界点[13]	分界点为六阶多项式二阶导数为0的点，详见公式1、2。

注：DT指密度阈值，D_{max}指树轮最大密度，D_{min}指树轮最小密度。

$$\frac{d^2D}{dS_{RWP}^2} = 2a_2 + 6a_3S_{RWP} + 12a_4S_{RWP}^2 + 20a_5S_{RWP}^3 + 30a_6S_{RWP}^4 \quad (2)$$

由于六阶多项式二阶导数为 0 可能存在多个解，需满足以下约束条件：(1)拐点处一阶导数大于 0(即晚材密度高于早材)；(2)$0.4 \leqslant S_{RWP} \leqslant 0.9$；(3)若存在多个满足条件的解，取$S_{RWP}$较大者作为分界点(若存在伪轮则归至早材)[13]。

1.5 统计分析

采用 Epson 扫描仪采集分辨率为 2 540 dpi 的 8 位灰度图与 24 位全彩图。图像采集前将样芯用砂纸打磨以确保年轮边界清晰，减少表面杂质的干扰。通过归一化后的灰度值曲线和全彩图辅助界定早晚材边界，作为评估 4 种划分方法的目视判别基准。

以目视判别法为基准，通过 Spearman 非参数检验方法评估不同方法的一致性[6]。该方法不要求数据符合正态分布，且不受极端值影响，适用于树轮指标的非正态分布特征。采用 Pearson 相关分析评估不同方法得出的树轮指标年表与气候因子之间的相关关系，通过相关系数的高低和显著性间接评估不同方法之间的优劣。

去趋势处理和年表建立借助 R 语言的 dplR 包进行[23]。所有统计分析均在 R 语言(版本 4.5.1)中完成。

2 结果与分析

2.1 交叉定年结果

筛选剔除 5 根与主序列相关性不显著的样芯，保留 42 根样芯用于后续分析，共计 1 787 个生长轮，具体统计量见表 2。交叉定年质量检验表明，42 个序列间平均相关系数为 0.342，信噪比 21.7，平均敏感度 0.197，样本总体代表性 0.935。其中，从 1971 年开始，样本总体代表性始终高于 0.85，1985 年后超过 0.935。整体数据集表现出良好的同步性，能够可靠捕捉共同气候信号，满足树轮气候学分析要求。

2.2 不同方法划分结果对比

除 D6 法外，其余 3 种方法在划分过程中均存在密度阈值超出该年轮实测密度范围的情况，导致部分树轮早晚材划分失败。具体而言，MMmean 法 1 个年轮、MM2/3+ 法 4 个年轮、MAX80% 法 9 个年轮无法划分，后续分析中已剔除这些异常数据。在 4 种方法中，MAX80% 法确定的密度阈值变异性最大，MM2/3+ 法和 D6 法次之，MMmean 法得出的密度阈值变异较小(图 2)。MAX80% 法和 MM2/3+ 法所得的密度阈值较为一致(约为 640 kg/m^3)，而 MMmean 法和 D6 法所得密度阈值较为一致(约为 550 kg/m^3)。

42 个树轮序列涵盖 1950—2023 年，样本量从 1966 年起不少于 5 个，2001 年后达到完整的 42 个，2023 年共 36 个(图 3)。各方法所得晚材率年际变化趋势基本一致，均能捕捉到极端低值年份(如 1996 年与 2006 年)。D6 法所得边界与目视判别基准最为接近。

2.3 最优划分方法确定

采用 Spearman 非参数检验方法评估 4 种方法所得 1950—2023 年树轮指标序列与目视判别结果的相关性。结果表明，各方法间早材宽度相关性最高($r > 0.99$)，晚材宽度受划分方法影响较大，但早材密度和晚材密度序列间相关性均高于 0.95。D6 法

表 2 样芯统计量

Tab. 2 Statistics of increment cores

变量	平均值	最小值	最大值	标准差
胸径/cm	26.37	6.20	47.90	12.30
形成层年龄/a	46.10	26.00	83.00	13.11
树轮宽度/mm	2.30	0.17	6.99	1.17
树轮平均密度/(kg·m^{-3})	447.00	264.82	772.25	75.26

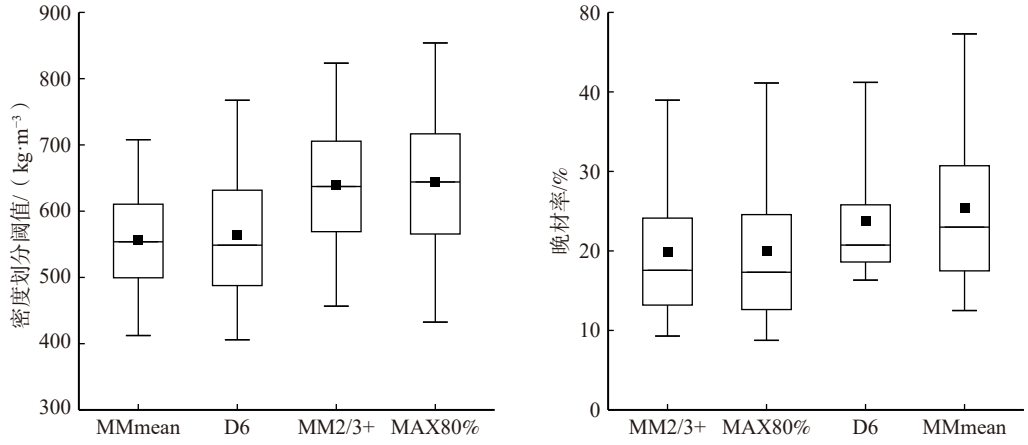


图 2　4 种不同方法确定的密度阈值和晚材率

Fig. 2　Density thresholds and latewood percentages determined by four different methods

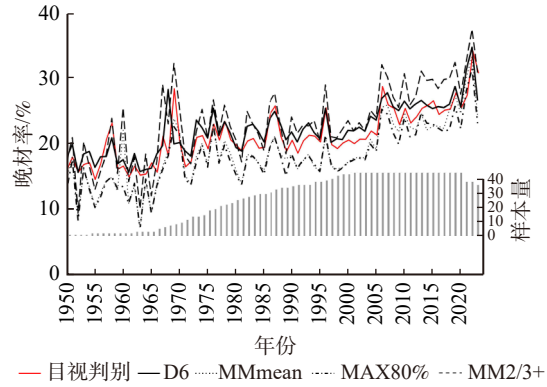
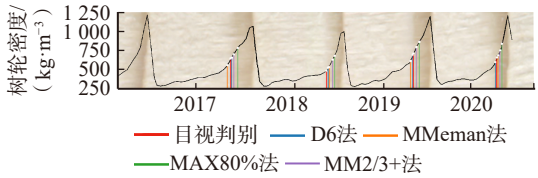


图 3　不同方法确定的晚材率比较（1950—2023）

Fig. 3　Comparison of latewood percentages derived from four demarcation methods (1950−2023)



以 NO.91 样芯 2017—2020 年数据为例。

图 4　结合目视判别的不同早晚材划分方法所得早晚材边界对比

Fig. 4　Comparison of earlywood-latewood boundaries derived from different earlywood-latewood demarcation methods combined with visual inspection

与目视判别结果的相关性系数在所有指标中均为最高，表明其与目视判别标准的一致性最佳。

结合树轮密度曲线分析，D6 法能精准地捕捉密度值急剧上升的拐点，尤其在晚材形成初期的过渡区域，最贴近实际分布特征（图 4）。相比之下，MAX80% 法和 MM2/3+ 法所得边界低估了晚材率，而 MMmean 法则高估了晚材率，这与图 2b 中不同方法晚材率中位数分布一致。

统计检验显示，各方法所得序列间差异均未达到显著水平（$P > 0.05$），表明数据集间具有同质性（图 5）。综上，D6 法在早晚材边界划分中与目视判别结果一致性最高，是 4 种方法中最适用于树轮早晚材自动化划分的方法。

2.4　不同划分方法下树轮参数与气候因子相关性

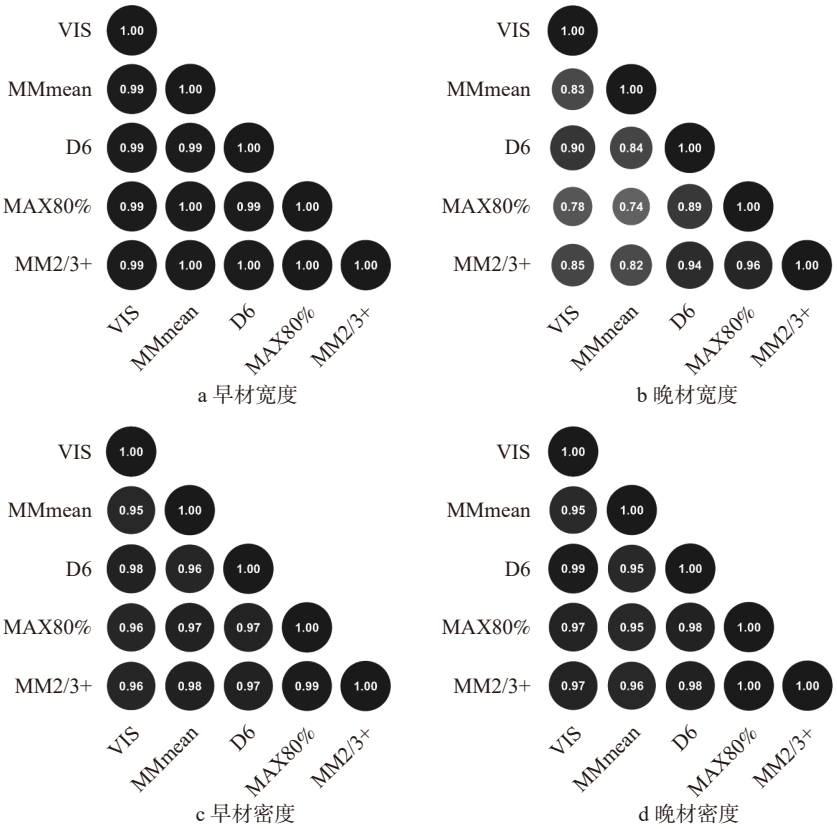
4 种方法所得树轮指标年表与气候因子的相关性整体一致，但敏感度和显著性存在差异（图 6～9）。早材宽度与晚材密度是反映气候变化的敏感指标，与动态阈值法相比，D6 法在多数指标上表现出更优的气候相关性。

早材宽度与上年 11 月至当年 5 月的温度总体呈正相关，尤其与上年 12 月 3 种温度指标、当年 4 月最高温和平均温相关性显著（$P < 0.05$；图 6）。降水方面，4 种方法所得年表均与当年 5 月降水呈显著负相关。相较于动态阈值法，D6 法所得年表还与上年 11 月 3 种温度指标呈显著正相关、当年 8 月降水呈显著负相关，而其他方法未达显著水平，表明 D6 法对上一年温度滞后效应和生长季后期水分胁迫的捕捉更为敏感。相比其他参数，早材宽度受月最高温影响范围最广。

晚材宽度与气候因子关联较弱，除 MMmean 法外，其他 3 种方法所得年表与当年 8 月最高温呈显著负相关（$P < 0.05$；图 7）。MMmean 法所得结果与上年 8 月最高温和平均温呈显著负相关（$P < 0.05$）。

早材密度与温度因子总体呈正相关，其中主要与当年 5 月最高温和平均温呈显著正相关（$P < 0.05$；图 8）。D6 法还捕捉到与上年 9 月最高温的显著正相关（$P < 0.05$）及与同期降水的显著负相关（$P < 0.05$）。

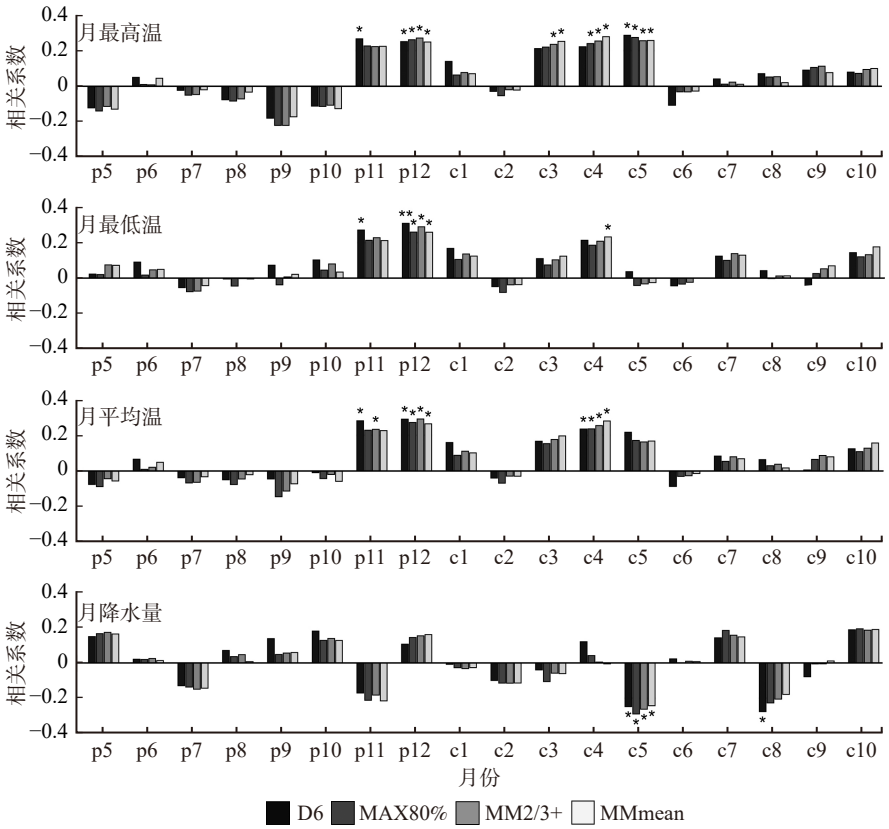
晚材密度是气候敏感性最高的指标。温度响应上，4 种方法均显示晚材密度与当年生长季前期（4—6 月）的月最低温显著正相关（$P < 0.05$；图 9）。除 D6 法部分月份未达显著水平外，其余方法均与 2—4 月平均温显著正相关（$P < 0.05$）。降水响应上，除 MMmean 法，其余 3 种方法与上一年 9 月降水呈



VIS. 目视判别法

图 5 不同方法所得早材宽度、晚材宽度、早材密度和晚材密度的相关性

Fig. 5 Correlations of earlywood width, latewood width, earlywood density and latewood density obtained by different methods



p. 上年，c. 当年，*表示 $P < 0.05$。下同。

图 6 不同划分方法所得早材宽度年表与气候要素相关性

Fig. 6 Correlations between earlywood width chronologies derived from different demarcation methods and climate factors

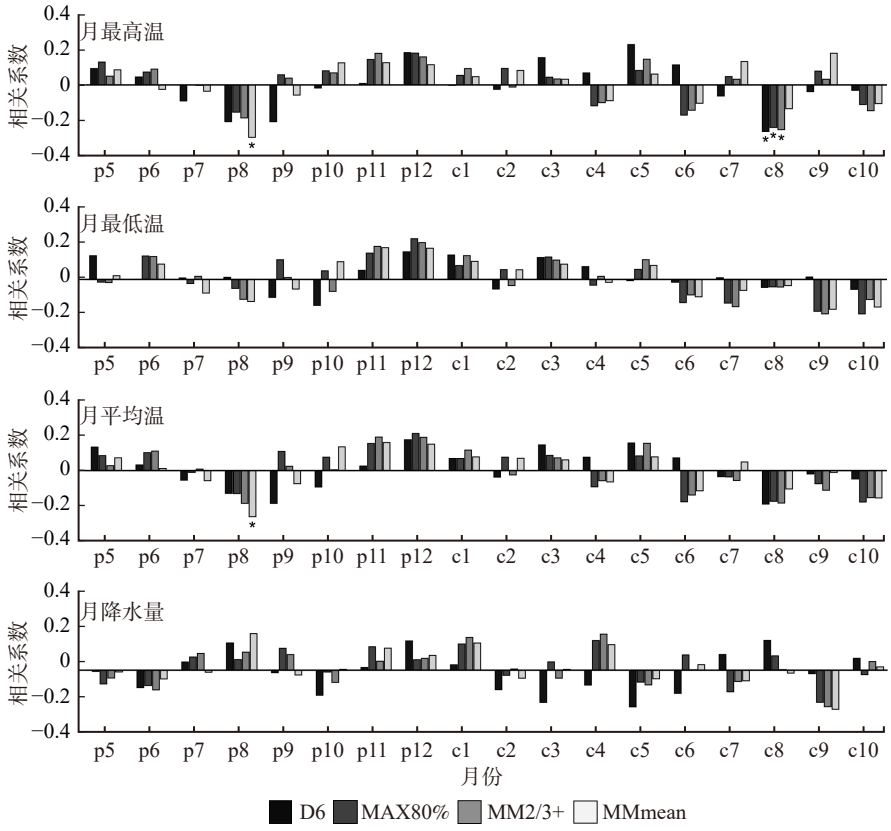


图 7　不同划分方法所得晚材宽度年表与气候要素相关性

Fig. 7　Correlations between latewood width chronologies derived from different demarcation methods and climate factors

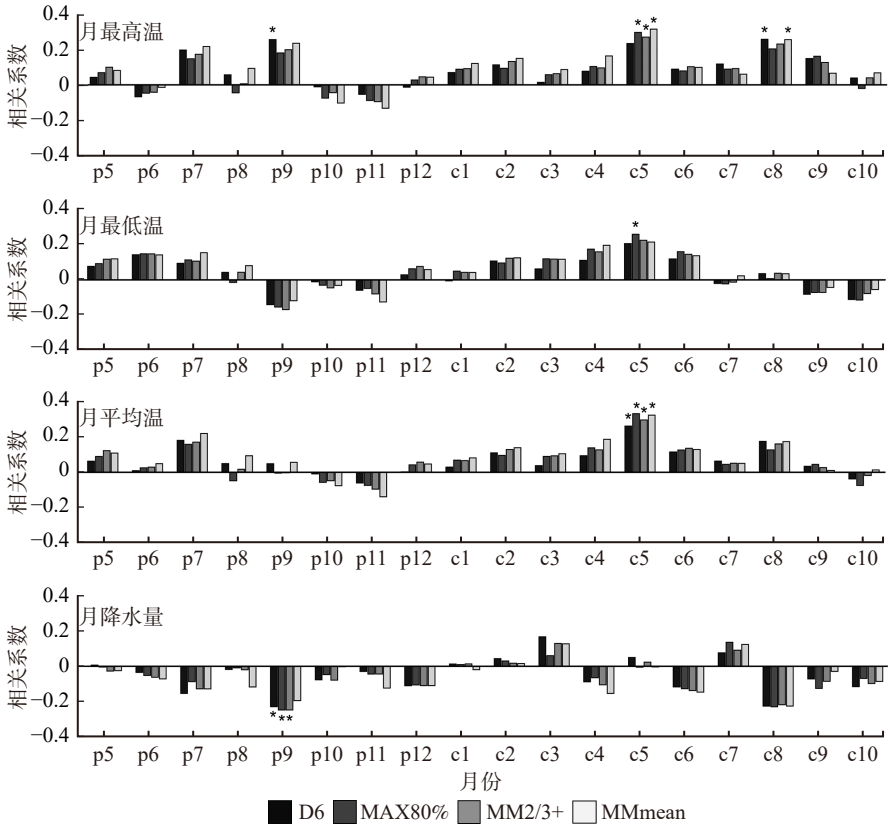


图 8　不同划分方法所得早材密度年表与气候要素相关性

Fig. 8　Correlations between earlywood density chronologies derived from different demarcation methods and climate factors

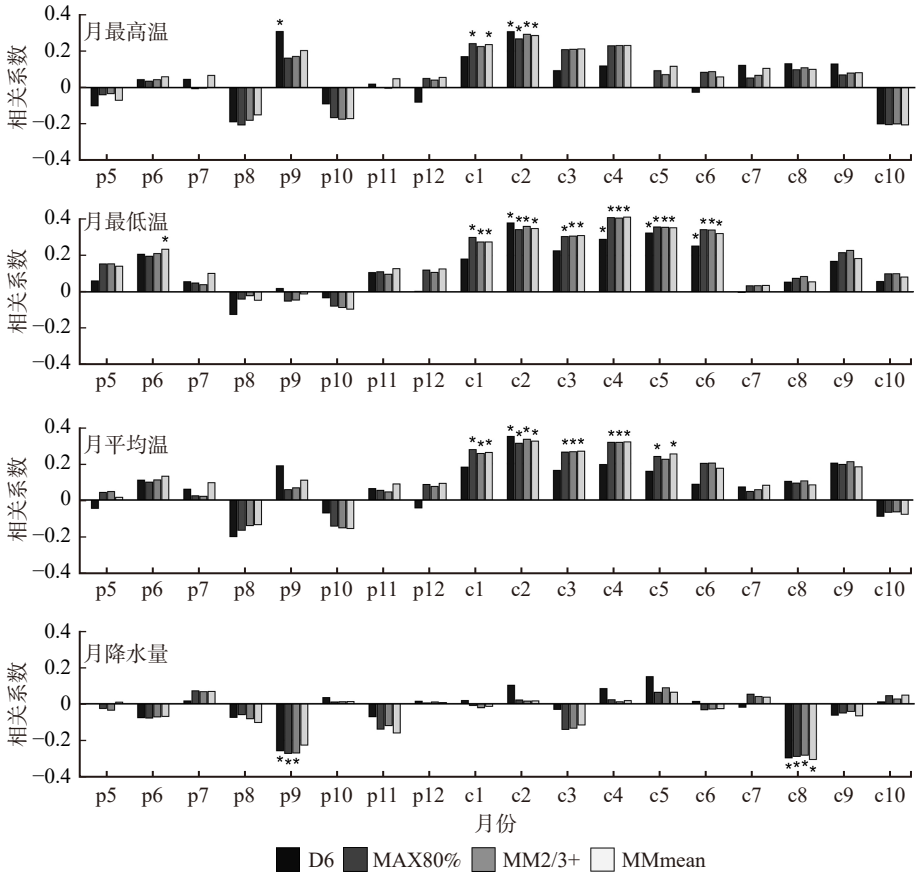


图 9 不同划分方法所得晚材密度年表与气候要素相关性

Fig. 9 Correlations between latewood density chronologies derived from different demarcation methods and climate factors

显著负相关($P < 0.05$)；4 种方法均显示晚材密度与当年 8 月降水显著负相关($P < 0.05$)。综上，不同划分方法会影响气候响应的显著性。

3 讨 论

3.1 从早晚材过渡机理探讨不同划分方法优劣

树轮密度变异显著，同一树种不同年轮甚至同一树株的不同部位的早晚材密度阈值均可能存在差异。动态阈值法虽考虑了此变异，但因其依赖个别极值点(最大/最小密度)，未能反映整个生长轮的密度分布特征[13]，故存在局限。如当遇到窄轮或密度变化平缓的年轮时，MMmean 法和 MM2/3+ 法计算的密度阈值可能高于实测最大密度，导致整轮被归为早材；而 MAX80% 法密度阈值可能低于实测最小密度，导致整轮被归为晚材。更重要的是，动态阈值法本质上是人为经验设定，缺乏树木生理学依据。早晚材的过渡本质是细胞尺寸连续渐变，而这一渐变是由细胞扩大持续时间的季节性减少所驱动的[24]，而非由某一固定细胞尺度决定。

若无环境胁迫干扰，形成层活动和木质部径向生长速率通常在夏至(光周期最长时)达到峰值，这一时期通常标志着早材向晚材的过渡[25]。这表明早晚材的过渡是由生长速率的峰值(即径向生长最大变化率)决定，而非由固定密度阈值界定。这种生理学本质与最大导数法的核心逻辑一致，即利用生长速率的极值点划分早晚材。最大导数法不依赖单一值，而是通过数学拐点捕捉细胞壁增厚速率的突变点，即使密度曲线平缓，二阶导数仍存在 0 点，避免阈值缺失的问题。

本文研究结果与 Koubaa 等[13]、Kharrat 等[26]一致，均证实最大导数法划分早晚材的准确性。本研究的创新点在于首次系统比较了动态阈值法和最大导数法在臭冷杉早晚材划分准确性上的表现。具体而言，依托高分辨率连续树轮密度数据，定量、定性地评估两类方法划分早晚材边界的准确性；并揭示最大导数法在数据连续且分辨率足够时，能够更精准地捕捉密度突变点，具有更高的划分准确性和更广的样本适应性。

3.2 基于相关分析的树轮–气候关系

本研究中，臭冷杉早材宽度与密度均与生长季早期的月平均温呈显著正相关，与前人的研究[27−28]一致。这是因为春季温度升高是树木打破休眠、启动形成层活动的关键限制因子，当温度超过阈值温度(5 ~ 8 ℃)时，木质部开始形成早材[29]。温度升高可上调细胞周期相关酶的表达[30]，并提升叶片光合速率，为早材生长提供碳水化合物[31]，进而协同促进

早材生长。此外，生长季前期温度升高可缩短早材细胞扩张期，导致管胞直径减小、细胞壁相对增厚，从而提高早材密度。D6 法揭示出早材密度与上年 9 月的月最高温呈显著正相关，这与前人的研究一致[32−33]。前一年较高的温度提高了树木的光合效率和碳固定能力，使更多的非结构性碳水化合物被储存下来，从而正向促进了次年早材密度的增加[34]。

晚材的主要功能是提供机械支撑[35]，这种结构特征使晚材受树木内部生理节律的影响更大。与晚材宽度直接相关的细胞数量在生长季中期已基本固定，故温度主要通过影响晚材细胞壁的增厚过程进而影响晚材密度[36]。本研究中，晚材宽度与气候因子几乎无显著相关，是所有指标中气候敏感性最低的。臭冷杉树轮晚材密度主要受当年生长季初期（4—5 月）温度调控，与其他学者研究结论[28,37]一致。其中，晚材密度与月最低气温的正相关性尤为显著，表明晚材密度可有效指示生长季月最低气温变化。生长季温度可能影响晚材细胞的发育。较高的生长季温度主要通过影响细胞壁增厚过程，进而促进晚材细胞壁增厚、密度增加[38]。晚材密度与降水量相关性较弱，这是因为长白山 6 月起进入雨季，土壤和空气湿度趋于饱和，降水量不再是限制因子[39]。但当土壤和空气中水分过多时，会促进树木年轮的细胞分裂，使细胞体积增大，进而造成细胞壁变薄，导致晚材密度减小，所以晚材密度在 8 月与降水量显著负相关。

3.3　早晚材参数对不同划分方法的敏感性机制

本研究表明，早材参数对划分方法更敏感，不同方法所得早材宽度和早材密度与气候的相关性存在一定差异；而晚材宽度只与个别气候因子显著相关，各方法的晚材密度与气候因子显著相关且一致性较高。这一差异源于木材形成的生理机制[40]。早材细胞直径与壁厚的连续渐变特征使划分界限的微小变动都可能显著改变统计值；而晚材细胞腔小、壁厚的均匀特征使其统计结果受划分方法影响较小。大量研究证实晚材最大密度是重建历史温度的可靠指标[41]，其可靠性恰恰源于其对划分方式的低敏感性。因此，在使用早材参数进行气候相关性分析时需确保划分准确；若缺乏目视判别基准或高分辨率密度数据，建议优先选用晚材密度。

4　结　　论

本研究采用 4 种早晚材划分方法（动态阈值法：MMmean 法、MAX80% 法和 MM2/3+ 法；最大导数法：D6 法），以目视判别法为基准，结合相关性分析比较了不同方法的适用性。

在具备树轮密度分析条件下，D6 法显著优于动态阈值法，能精准自动识别任意树轮的早晚材界限。D6 法确定臭冷杉早晚材分界密度阈值约为 550 kg/m^3，但该阈值在其他树种及地区的适用性尚需验证。D6 法基于树木生理学原理，具有潜在普适性，可辅助研究人员校准早晚材划分。未来研究可拓展至阔叶树种，验证其全树种适用性，并结合机器学习图像分割技术进一步优化算法。

参　考　文　献

[1] 王悦桐, 张军周, 刘俊俊, 等. 针叶树形成层活动及径向生长监测研究进展 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1223−1232.
Wang Y T, Zhang J Z, Liu J J, et al. Research progress on cambium activity and radial growth dynamics monitoring of coniferous species [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(5): 1223−1232.

[2] Rahman M H, Begum S, Nakaba S, et al. Relationship between the earlywood-to-latewood transition and changes in levels of stored starch around the cambium in locally heated stems of the evergreen conifer *Chamaecyparis pisifera* [J]. Trees, 2016, 30(5): 1619−1631.

[3] Begum S, Kudo K, Matsuoka Y, et al. Localized cooling of stems induces latewood formation and cambial dormancy during seasons of active cambium in conifers [J]. Annals of Botany, 2016, 117(3): 465−477.

[4] Samusevich A, Lexa M, Vejpustková M, et al. Comparison of methods for the demarcation between earlywood and latewood in tree rings of Norway spruce [J]. Dendrochronologia, 2020, 60: 125686.

[5] 史倩, 同小娟, 许玲玲, 等. 油松早晚材径向生长对气候因子的响应 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(8): 988−1000.
Shi Q, Tong X J, Xu L L, et al. Response of radial growth of early and late wood of planted *Pinus tabuliformis* to climate variables [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(8): 988−1000.

[6] Frank T, Nicolussi K. Testing different earlywood/latewood delimitations for the establishment of blue intensity data: a case study based on alpine *Picea abies* samples [J]. Dendrochronologia, 2020, 64: 125775.

[7] Stahle D W, Cleaveland M K, Grissino-Mayer H D, et al. Cool- and warm-season precipitation reconstructions over western New Mexico [J]. Journal of Climate, 2009, 22(13): 3729−3750.

[8] Denne M P. Definition of latewood according to Mork (1928) [J]. IAWA Journal, 1989, 10(1): 59−62.

[9] 马晓琦, 史江峰, 史逝远, 等. 江西三清山黄山松树轮早晚材宽度所指示的气候意义 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1825−1834.
Ma X Q, Shi J F, Shi S Y, et al. Climatic significance of the earlywood and latewood width of *Pinus taiwanesis* in Sangingshan, Jiangxi Province of China [J]. Resources and

Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1825−1834.

[10] 靳雨婷. 大兴安岭北部落叶松早晚材的分配特征及气候敏感性 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
Jin Y T. Distribution characteristics of earlywood and latewood and climatic sensitivity of *Larix gmelinii* in the northern of great Xing'an Mountains[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.

[11] 史景宁, 于健, 周华, 等. 基于 R 软件的树木年轮宽度测量方法 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 2052−2059.
Shi J N, Yu J, Zhou H, et al. Application of R software on tree ring width measurement [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(7): 2052−2059.

[12] Kumar S. Earlywood-latewood demarcation criteria and their effect on genetic parameters of growth ring density components and efficiency of selection for end-of-rotation density of Radiata pine [J]. Silvae Genetica, 2002, 51: 241−246.

[13] Koubaa A, Zhang S Y T, Makni S. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry[J]. Annals of Forest Science, 2002, 59(5−6): 511−518.

[14] Antony F, Schimleck L R, Daniels R F. A comparison of earlywood–latewood demarcation methods: a case study in loblolly pine [J]. IAWA Journal, 2012, 33(2): 187−195.

[15] 滕毅, 张青, 亢新刚, 等. 长白山臭冷杉种群结构与动态 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 49−56.
Teng Y, Zhang Q, Kang X G, et al. Population structures and dynamics of *Abies nephrolepis* in the Changbai Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(3): 49−56.

[16] 赵鑫宇, 闫晨光, 王开许, 等. 热改性与植物油蜡涂饰对臭冷杉早晚材色差的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(6): 111−116.
Zhao X Y, Yan C G, Wang K X, et al. Chromatic variability of thermal modified and oil-wax coated *Abies nephrolepis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(6): 111−116.

[17] Xing P, Zhang Q B, Lv L X. Absence of late-summer warming trend over the past two and half centuries on the eastern Tibetan Plateau [J]. Global and Planetary Change, 2014, 123: 27−35.

[18] Gurskaya M A, Lange J, Kukarskih V V, et al. Stationarity of climate-growth response is only marginally influenced by the soil moisture regime in western Siberia [J]. Dendrochronologia, 2021, 69: 125873.

[19] Kaczka R J, Spyt B, Janecka K, et al. Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results [J]. Dendrochronologia, 2018, 49: 94−101.

[20] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization [D]. Tucson: The University of Arizona, 1985.

[21] Wang T, Wang G, Innes J L, et al. Climate AP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(4): 448−458.

[22] Hylen G. Age trends in genetic parameters of wood density in young Norway spruce [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29(1): 135−143.

[23] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR) [J]. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 115−124.

[24] Cuny H E, Rathgeber C B K, Frank D, et al. Kinetics of tracheid development explain conifer tree-ring structure [J]. New Phytologist, 2014, 203(4): 1231−1241.

[25] Rathgeber C B K, Cuny H E, Fonti P. Biological basis of tree-ring formation: a crash course [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 734.

[26] Kharrat W, Koubaa A, Khlif M, et al. Intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles for black spruce and jack pine from X-ray densitometry and ultrasonic wave velocity measurement [J]. Forests, 2019, 10(7): 569.

[27] 贡晓清, 谢榕, 杨华. 长白山云冷杉针阔混交林 3 种常见树种径向生长对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(4): 1−10.
Gong X Q, Xie R, Yang H. Responses of radial growth of three common tree species to climate change in spruce-fir mixed forest of Changbai Mountains, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 1−10.

[28] 如先古丽·阿不都热合曼, 张同文, 喻树龙, 等. 长白山红松和臭冷杉树轮密度变化特征及其气候响应 [J]. 地球环境学报, 2023, 14(5): 573−587.
Abudoureheman R, Zhang T W, Yu S L, et al. Variation in characteristics and climate response of tree ring wood density between *Pinus koraiensis* and *Abies nephrolepis* in Changbai Mountain [J]. Journal of Earth Environment, 2023, 14(5): 573−587.

[29] Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, et al. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes [J]. Oecologia, 2007, 152(1): 1−12.

[30] Li W F, Ding Q, Chen J J, et al. Induction of *PtoCDKB* and *PtoCYCB* transcription by temperature during cambium reactivation in *Populus tomentosa* Carr. [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2621−2630.

[31] Way D A, Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data [J]. Tree Physiology, 2010, 30(6): 669−688.

[32] Lebourgeois F, Rathgeber C B K, Ulrich E. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba, Picea abies* and *Pinus sylvestris*) [J]. Journal of Vegetation Science, 2010, 21(2): 364−376.

[33] 徐金梅, 吕建雄, 鲍甫成, 等. 祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 115−121.

Xu J M, Lü J X, Bao F C, et al. Response of wood density of *Picea crassifolia* to climate change in Qilian Mountains of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 115−121.

[34] Rathgeber C B K. Conifer tree-ring density inter-annual variability – anatomical, physiological and environmental determinants [J]. New Phytologist, 2017, 216(3): 621−625.

[35] Jagels R, Visscher G E. A synchronous increase in hydraulic conductive capacity and mechanical support in conifers with relatively uniform xylem structure [J]. American Journal of Botany, 2006, 93(2): 179−187.

[36] Cuny H E, Fonti P, Rathgeber C B K, et al. Couplings in cell differentiation kinetics mitigate air temperature influence on conifer wood anatomy[J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(4): 1222−1232.

[37] 李名勇, 段建平, 王丽丽. 川西高原四川红杉树轮宽度和密度对气候的响应分异性 [J]. 第四纪研究, 2024, 44(4): 963−975.
Li M Y, Duan J P, Wang L L. Differences in responses of tree-ring width and density of *Larix mastersiana* to climatic factors in the west Sichuan plateau [J]. Quaternary Sciences, 2024, 44(4): 963−975.

[38] Friend A D, Eckes-Shephard A H, Tupker Q. Wood structure explained by complex spatial source-sink interactions [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7824.

[39] 杨银科, 黄强, 刘禹, 等. 云杉树轮生长密度对气候要素的响应分析 [J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 432−438.
Yang Y K, Huang Q, Liu Y, et al. Response analysis between climate factors and the density of wood growth of *Picea crassifolia* [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(4): 432−438.

[40] Björklund J, Seftigen K, Schweingruber F, et al. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers [J]. New Phytologist, 2017, 216(3): 728−740.

[41] Björklund J, von Arx G, Nievergelt D, et al. Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry [J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(4): 1224−1264.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）