doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 01. 008

长白落叶松人工林年轮宽度对气候变化的响应

郭新月[1],王文彬[2],董灵波[1*]
(1. 东北林业大学 林学院 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室,哈尔滨 150040;
2. 日照市农业科学研究院,山东 日照 276800)

摘 要:为揭示长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林早材、晚材和全材年轮宽度对气候的响应程度,以东北林业大学帽儿山实验林场 27 块样地的 135 株样木树芯为数据源,在建立树木年轮年表的基础上,采用相关性分析量化其早材、晚材和全材年轮宽度与气候要素的关系。结果表明,长白落叶松年轮宽度在时间尺度上可划分为 2 个明显不同的时间段,其中 1974—1985 年树木生长主要受春秋两季的温度影响,而 1986—2019 年则主要受夏季温度的影响。在 1974—1985 年,冬春季的最高温度和最低温度,特别是上一年和当年的 1 月和 2 月以及 4 月和 5 月与早材和全材年轮宽度的影响呈负相关的($P<0.05$),与晚材年轮宽度的影响呈正相关($P<0.05$);上一年和当年春季 4、5 月的无霜期与早材年轮宽度的影响呈负相关($P<0.05$)。在 1986—2019 年,夏季尤其是上一年和当年 6、7 月的最高温度以及最低温度与晚材年轮宽度有显著的正相关性($P<0.05$);夏季上一年和当年 7 月的平均温度与晚材年轮宽度的生长有显著的正相关性($P<0.05$),但与早材和全材年轮宽度有显著的负相关性($P<0.05$)。整体来看,生长季的温度尤其是最低温度和平均温度是限制长白落叶松人工林早材和晚材生长的主要因素,而降水对早材和晚材生长的影响则不显著。

关键词:早材; 晚材; 全材; 气候; 年轮宽度; 长白落叶松
中图分类号:S757 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-8023(2024)01-0064-10

Response of Ring Width of *Larix olgensis* Plantation to Climate Change

GUO Xinyue[1], WANG Wenbin[2], DONG Lingbo[1*]
(1. College of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem and Management, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Rizhao Academy of Agricultural Sciences, Rizhao 276800, China)

Abstract:To reveal the response degree of ring width for earlywood, latewood, and ringwood of *Larix olgensis* plantation to climate change, 135 sample trees from 27 sample plots in Maoershan Experimental Forest Farm of Northeast Forestry University were taken as data sources, based on the establishment of tree ring chronology, the correlation analysis was used to quantify the relationship between ring width earlywood, latewood, and ringwood and climate factors. Results showed that the ring width of *L. olgensis* can be divided into two distinct time periods on the time scale. During 1974-1985, the tree growth was mainly affected by the temperature in spring and autumn, while from 1986 to 2019, it was mainly affected by the temperature in summer. During 1974-1985, the highest and lowest temperaturesin winter and spring, especially in January, February, April and May of the previous year and that year, had a negative correlation ($P<0.05$) with the growth of earlywood and ringwood, but a positive correlation with the growth of latewood ($P<0.05$). The period in April and May of the previous year and the spring of that year had a negative correlation with the growth of ring width of earlywood ($P<0.05$). From 1986 to 2019, the highest and lowest temperatures in summer, especially in June and July of the previous year and that year, had a significant positive correlation with the ring width of latewood ($P<0.05$). The average temperature in summer, especially in July of the previous year and that year, had a significant positive correlation with the growth of latewood ($P<0.05$), but a significant negative correlation with the growth of ring width of earlywood and ringwood ($P<0.05$). On the whole, the temperature in the growing season, especially the minimum temperature and average temperature, are the main factors limiting the growth of earlywood and latewood of *L. olgensis* plantation, the effect of precipitation on the growth ofearlywood and latewood is not significant.

Keywords:Earlywood; latewood; ringwood; climate; ring width; *Larix olgensis*

收稿日期:2023-05-09
基金项目:国家自然科学基金(32171778)。
第一作者简介:郭新月,硕士研究生。研究方向为森林可持续经营。E-mail: 3191332175@qq.com
*通信作者:董灵波,博士,副教授。研究方向为森林多目标经营决策。E-mail: farrell0503@126.com
引文格式:郭新月,王文彬,董灵波. 长白落叶松人工林年轮宽度对气候变化的响应[J]. 森林工程, 2024,40(1):64-73.
GUO X Y, WANG W B, DONG L B. Response of ring width of *Larix olgensis* plantation to climate change[J]. Forest Engineering, 2024,40(1):64-73.

0　引言

随着经济快速发展,人类活动加剧,对生态环境的保护刻不容缓。就全球范围来看,北半球中高纬度干旱半干旱区树木的径向生长对气候变化的响应显著[1],未来气候变暖的持续发生,加剧了发生干旱的可能性[2]。对树木年轮宽窄与气候波动之间联系研究的尝试始于 20 世纪初[3]。在过去二十年中,树木年轮学发展迅速,到目前为止,已经有将近 150 个超过 1 000 a 的年轮年表[4]。Yang 等[5]研究表明,由于环境的改变现有森林结构发生了显著变化,且不同地区影响树木径向生长的主导气候因子也不同。随着全球气候的持续变暖,极端高温、干旱等气候灾害频发,导致树冠枯死甚至树木死亡的现象越发普遍,这些现象均对生物群落造成不可忽视的影响[6]。极端干旱条件下美国黄松(*Pinus ponderosa*)的树高要比极端寒冷气候条件的树木矮小[7]。气候是树木生长的主要影响因子,树木年轮记录其生长以来的气候变化,因此树木年轮成为气候变化的最大生物信息来源[8]。树木生长与气候息息相关[9],随着全球温度的持续升高,热浪事件将会变得更为频繁,这无疑将会对树木的生长产生负面影响[10-11]。研究证明温度通常是影响潮湿山区树木生长的主要限制因子,而降水则是影响热带或干旱地区树木生长的主要限制因子[12]。温度是影响生长季树木生长的主要限制因素,而且随着海拔的升高,温度与树木生长的响应更强烈[13]。我国对树木年轮早材和晚材的研究与对全材的研究相比,并不全面。早晚材由于形成的时间不一样,受不同气候的影响,因此分离早材和晚材宽度能获得更多的气候信息,环境因子发生变化,在早材和晚材特征上会有所反映[14],同时有研究证明调整后的晚材生长与气候最为密切相关[4]。

长白落叶松(*Larix olgensis*)是东北地区主要造林树种之一,但其径向上早材和晚材年轮宽度对气候变化的响应仍不清楚,因此本研究以东北林业大学帽儿山实验林场 27 块样地 135 株样木的树芯为数据源,采用相关性分析,量化不同气候特征对长白落叶松的早材、晚材和全材年轮宽度生长的影响,为长白落叶松人工林的经营管理提供精细化的理论依据。

1　研究区概况

研究区位于黑龙江省东北林业大学帽儿山实验林场(45°14′~45°29′ N,127°29′~127°44′ E)。全区总面积 26 496 hm^2,森林覆盖率 95%,总蓄积量达 412 万 m^3。该区地势由南向北逐渐升高,海拔多在 200~600 m,全区年平均气温 2.4 ℃,年均降水量 700 mm,年均无霜期 125 d。全区植被属长白植物区系,但经长期无序采伐现已退化为典型的天然次生林区,形成了以白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia tuan*)、山杨(*Populus davidiana*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等为主的次生林与红松(*Pinus koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *Mongolica*)等人工针叶林镶嵌分布的景观格局。

2　研究方法

2.1　样本采集及处理

在全面勘查的基础上,于 2018—2019 年在帽儿山实验林场设置长白落叶松人工林固定样地 27 块(30 m×30 m);在样地中心位置使用 GPS 记录坐标、海拔和坡度等信息。对样地内所有胸径≥5 cm 的乔木进行每木调查,记录其树种、胸径、树高、冠幅和状态等信息。依据各样地胸径检尺数据,采用等断面积标准木法将所有树木划分为 5 个等级,即优势木、亚优势木、平均木、被压木和濒死木。为避免对样地的破坏,在每块样地附近依据各等级标准木的胸径、树高和冠长等特征选择标准木,并分别从东西—南北 2 个方向钻取样芯,总计 270 个(27 个样地×5 棵树/样地×2 个样芯/棵树)。样地和轮宽特征见表 1。

钻取的样芯在试验室静置 2~3 d,将干燥的样芯放置样芯槽内,用胶水将断裂处粘好,减少处理时的误差;用砂纸打磨粘好的样芯,直至年轮清晰可见;将打磨好的样芯放置扫描仪中进行扫描(分辨率为 200 dpi);将扫描的图片用年轮图像分析系统(WinDENDRO)进行交叉定年以及年轮宽度的测定,测量精度精确到 0.001 mm;将得到的年轮宽度用 COFECHA(交叉定年程序)进行交叉定年检验及质量控制,避免因为误差而影响后续分析;将 COFECHA 检验的过程进行多次重复,将输出的 part5 中显示为 A、B 的保留,其中 A 表示检测的片段与主序列之间的相关性高,B 表示检测的片段时间序列与主序列的相关性高[15];经过最终筛选,220 个样芯符合精度要求,约占总采样数量的 81.5%;最后利用 R 3.6.2 完成去趋势和建年表处理,同时获得年表统计量和公共区间分析数据。全轮(RW)、早材(RE)和晚材(RL)的年轮宽度趋势如图 1 所示。

表1 样地和年轮宽度统计特征

Tab. 1 Statistics of stand and ring-width

特征值 Eigenvalue	样地 Plot					样木 Tree		
	胸径(DBH)/cm Diameterat breast height	树高(H)/m Height	年龄/年 Age	蓄积/($m^3 \cdot hm^{-2}$) Stock	株数密度/(株·hm^{-2}) Number density	全轮宽度(RW)/cm Ringwood width	早材宽度(EW)/cm Earlywood width	晚材宽度(LW)/cm Latewood width
最小值(Min) Minimum value	9.66	10.98	10.00	116.00	577.78	0.21	0.12	0.09
平均值(Mean) Mean value	19.71	19.10	28.03	217.89	1 161.93	0.43	0.32	0.11
最大值(Max) Maximum value	29.24	26.08	45.00	349.00	3 022.22	0.78	0.66	0.16
标准差(Std) Standard deviation	4.88	3.45	6.68	63.66	517.67	0.15	0.14	0.02
变异系数(CV)(%) Coefficient of variation	24.76	18.06	23.83	29.22	44.55	34.88	43.75	18.18

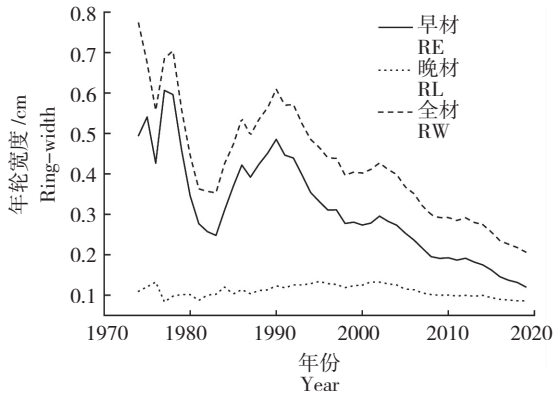


图1 全材、早材和晚材的年轮宽度

Fig. 1 Ring width of ringwood, earlywood and latewood

2.2 气候数据

ClimateAP(Climate Change Adaptation)模型通过提取PRISM模型(Parameter-elevation Rearessions on Independent Slopes Model)和WorldClim(World Climate)模型所生成的分辨率为2.5°×2.5°的正常月气候数据,采用双线性插值和动态局部回归的方法将其降尺度为无尺度的点数据。Wang等[16]等研究表明ClimateAP模型输出的月均温和月均降水量的预测误差分别较PRISM和WorldClim模型减少27%和60%。根据各样地经纬度坐标和海拔数据,本研究采用ClimateAP模型提取研究区域1970—2019年的年度、季度和月度气候数据,见表2。除常规气候指标外,本研究还通过年均温和年降水量计算出了湿度指数,如式(1)所示[11]。

$$A_{HM}=(M_{AT}+10)/(M_{AP}/1\,000)。\quad(1)$$

式中:A_{HM}为湿度指数;M_{AT}为年均温,℃;M_{AP}为年降水量,mm。

2.3 数据处理

为了消除早材变异性对晚材的影响,利用Pompa-garcla等[17]建立的晚材(RL)线性回归方程见式(2),对RL进行调整。

$$R_{Ladj}=R_L-(0.624\,6R_E+0.39)。\quad(2)$$

表2 各气候指标及含义

Tab. 2 Climate indicators and their meanings

气候指标 Climate indicators	含义 Meaning	气候指标 Climate indicators	含义 Meaning	气候指标 Climate indicators	含义 Meaning	气候指标 Climate indicators	含义 Meaning
MAT	年均温	Tmax_DJF	第一季度最高温	Tave_DJF	第一季度平均温	NEFD_DJF	第一季度无霜期
MAP	年降水量	Tmax_MAM	第二季度最高温	Tave_MAM	第二季度平均温	NEFD_MAM	第二季度无霜期
Temperature	温度	Tmax_JJA	第三季度最高温	Tave_JJA	第三季度平均温	NEFD_JJA	第三季度无霜期
Precipitation	降水	Tmax_SON	第四季度最高温	Tave_SON	第四季度平均温	NEFD_SON	第四季度无霜期
Tmax	最高温度	Tmin_DJF	第一季度最低温	PPT_DJF	第一季度平均降水量	PAS_DJF	第一季度降雪量
Tmin	最低温度	Tmin_MAM	第二季度最低温	PPT_MAM	第二季度平均降水量	PAS_MAM	第二季度降雪量
NEFD	无霜期	Tmin_JJA	第三季度最低温	PPT_JJA	第三季度平均降水量	PAS_JJA	第三季度降雪量
PAS	降雪量	Tmin_SON	第四季度最低温	PPT_SON	第四季度平均降水量	PAS_SON	第四季度降雪量
AHM	湿度指数						

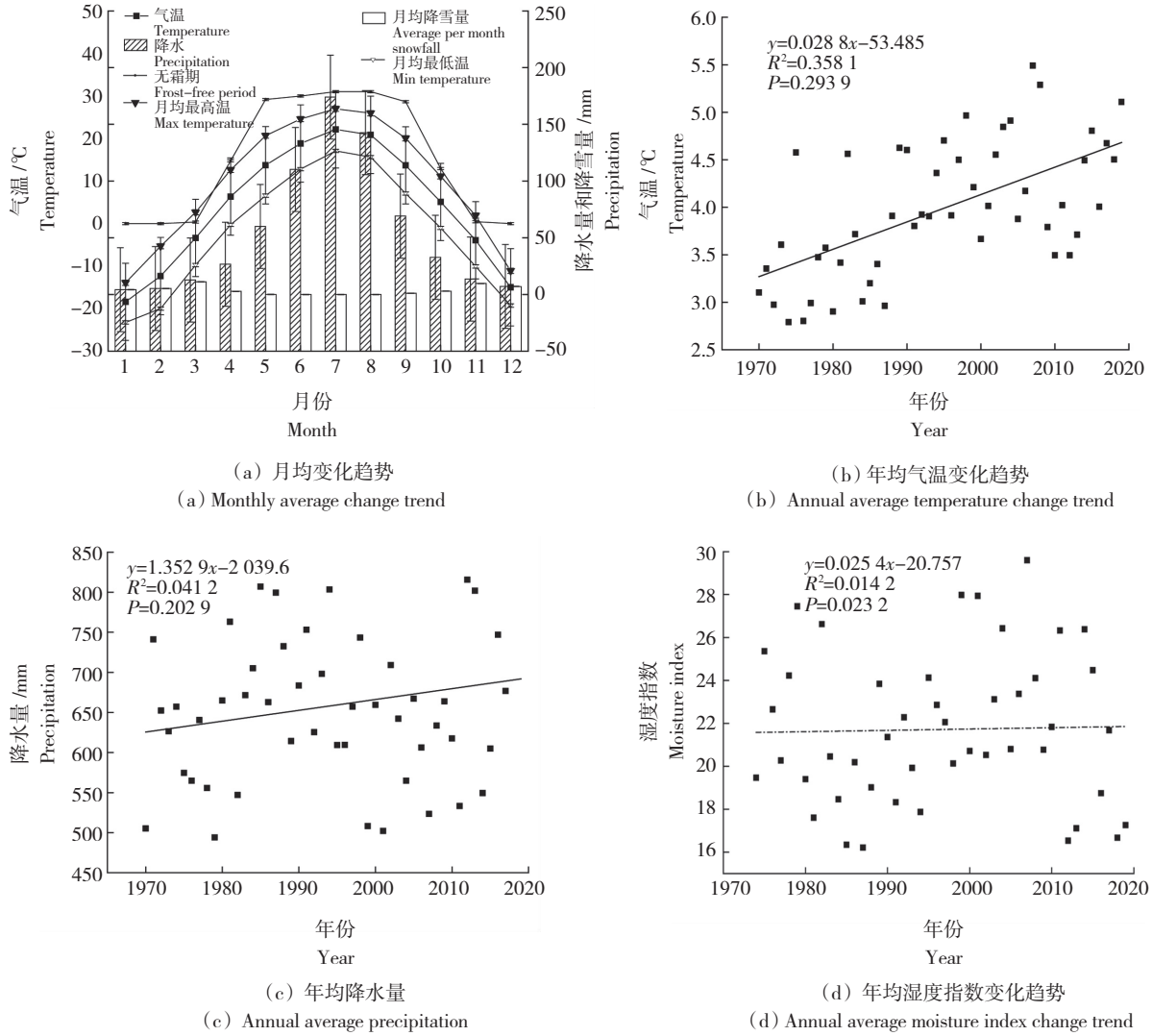
式中:R_{Ladj} 为调整后的晚材;R_L 为晚材;R_E 为早材。

全材、早材和晚材轮宽与气候的关系采用 Pearson 相关性进行分析($\alpha=0.05$),图的绘制采用 Origin 2018,表的制作采用 Excel 2010。

3　结果与分析

3.1　气候特征

1970—2019 年,帽儿山地区的年均降雪量为 44.39 mm,年均无霜期为 178 d,年均最高温度为 9.68 ℃,年均最低温度为-2.03 ℃。由图 2(a)可知,其年均温度和年均降水量的变化趋势均呈显著的单峰状趋势。由如图 2(b)和图 2(c)可知,高温期和雨季均在 6—8 月份,其中 7 月温度和降水达到最高值,月均温约为 22.13 ℃,月均降水量约为 174.0 mm。由图 2(d)可知,帽儿山地区 1970—2019 年的年均气温和年均降水量分别为 3.98 ℃和 658.73 mm,两者均随时间呈明显的线性增加趋势,其平均增长幅度分别为 0.24 ℃/10 a 和 11.04 mm/10 a。区域内湿度指数(Annual heat:moisture index,AHM)的平均值为 21.69,整体上呈现微弱的上升趋势(1.43%),表明当地气候具有逐渐变暖的趋势。



(a) 月均变化趋势
(a) Monthly average change trend

(b) 年均气温变化趋势
(b) Annual average temperature change trend

(c) 年均降水量
(c) Annual average precipitation

(d) 年均湿度指数变化趋势
(d) Annual average moisture index change trend

图 2　帽儿山地区 1970—2019 年月平均气温、年平均气温、年均降水量和年均湿度指数变化趋势

Fig. 2 Monthly/annual average temperature, annual average precipitation and annual average moisture index change trend from1970 to 2019 in Maoershan area

3.2　年表统计特征

采用 25 a 样条函数构建标准化年表,如图 3 所示。由图 3 可以看出,全材和早材年轮宽度的标准化指数在 1985 年前后呈现出 2 种完全不同的趋势,

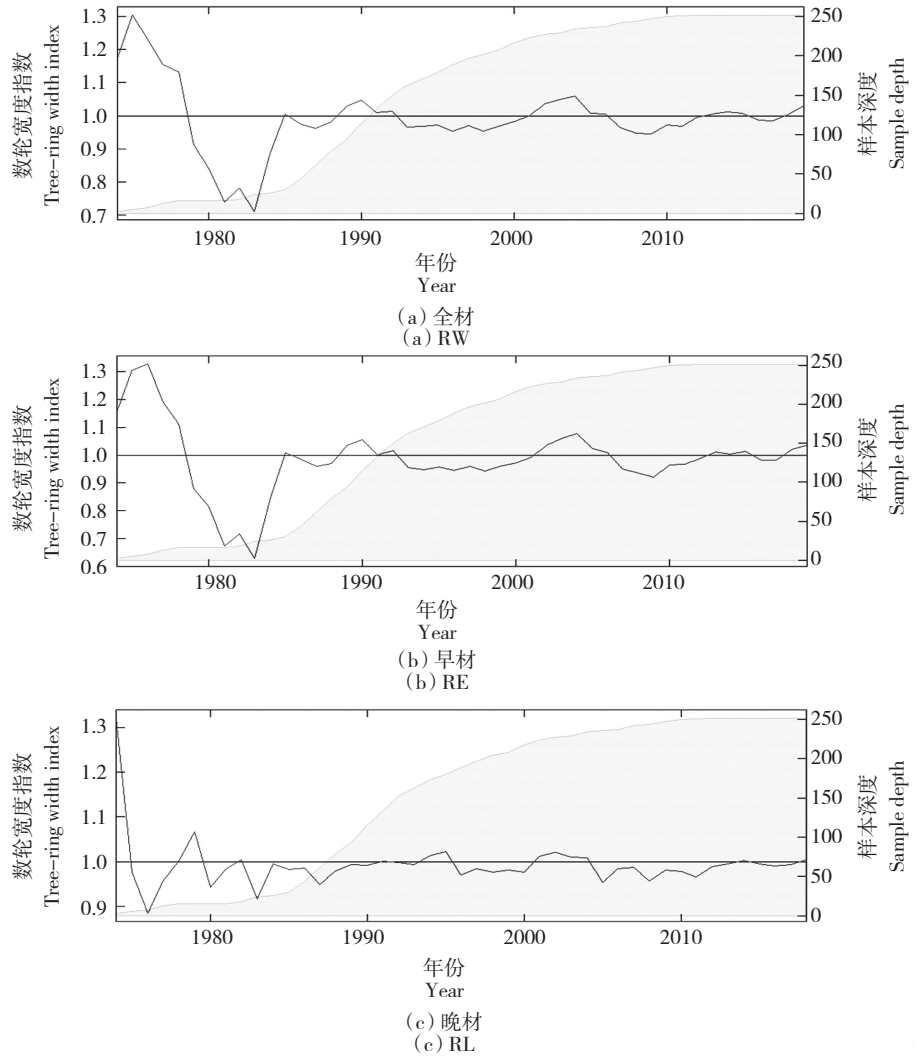


图3 长白落叶松全材、早材和晚材年轮宽度(实线)和样本深度(灰色区域)

Fig. 3 The ring width (solid line) of ringwood, earlywood, latewood and sample size (gray area) of *Larix olgensis*

其中,在1974—1985年树木年轮宽度呈明显下降趋势,而在1986—2019年树木年度宽度指数呈现出明显的多峰状格局。由表3可知,全轮、早材和晚材年轮宽度的信噪比(Signal-noise Ratio,SNR)分别为56.636、56.625和10.331,表明全材和早材所包含的共有环境信息较晚材多;标准差(Standard Deviation,Std)值分别为0.178、0.155和0.038,表明全材和早材年轮宽度年表所包含的环境信息较多;平均敏感度(Mean Sensitive,MS)值为0.20~0.30,表明样芯所包含的气候信息较多;全材和早材年轮宽度的一阶自相关系数(Frist-order Autocorrelation,ACI)为0.622、0.566,而晚材的ACI值为0.371,说明全材和早材的年轮宽度受上一年气候的影响较强,而晚材则相对较弱,也就是说气候对树木全材和早材年轮宽度的生长有更明显的"滞后效应"。

表3 年表统计特征

Tab. 3 Statistics characteristics of chronology

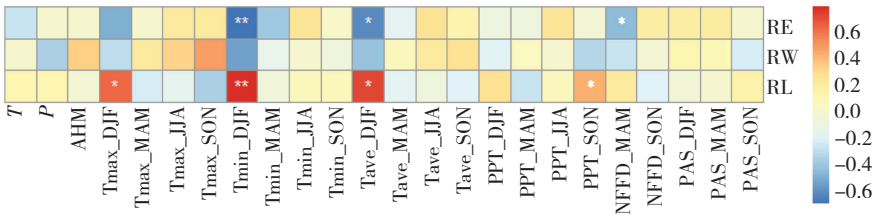
统计参数 Chronology parameter	全材 Ringwood	早材 Earlywood	晚材 Latewood
标准差 Standard deviation	0.178	0.155	0.038
平均敏感度 Mean sensitive	0.203	0.263	0.213
一阶自相关系数 Frist-order autocorrelation	0.622	0.566	0.371
信噪比 Signal-noise ratio	56.636	56.625	10.331
年表有效信号 Effective signal for chronology	0.425	0.425	0.119
样本总体代表性 Sample population representativeness	0.983	0.983	0.912

年表有效信号（Effective Signal for Chronology，reff）为 0.1～0.4，且样本总体代表性（Expressed Population Singal，EPS）均在 0.9 以上，说明所建年表符合理想年表特征。

3.3　树轮宽度与气候的关系

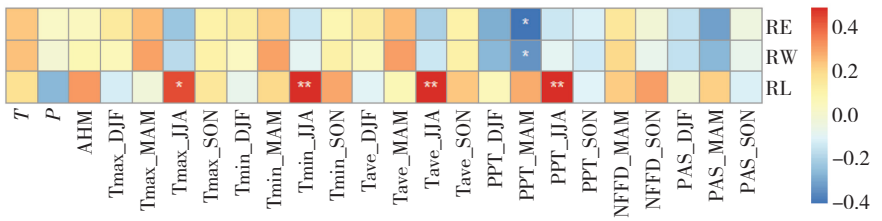
3.3.1　树轮宽度与季度气候的关系

长白落叶松全材、早材和晚材年轮宽度指数与各季度气候要素间的关系如图 4 所示。由图 4 可以看出，1974—1985 年的早材年轮宽度与冬季最高温显著负相关（R = −0.516），而晚材年轮宽度则与冬季最高温显著正相关（R = 0.609）；全材年轮宽度与秋季最高温度显著正相关（R = 0.455）；冬季最低温度与早材和全材年轮宽度显著负相关（R 为−0.719、−0.557），但与晚材年轮宽度显著正相关（R = 0.766）；春季的最低温度与早材年轮宽度的生长显著负相关（R = −0.420）；冬季的平均温度与早材和全材年轮宽度显著负相关（R 为−0.634 和−0.447），但与晚材的年轮宽度显著正相关（R = 0.705）；冬季的降水与晚材年轮宽度的生长显著正相关（R = 0.406）；春季的无霜期与早材年轮宽度的生长显著负相关（R = −0.480）（图 4（a））。1986—2019 年的年轮宽度生长与气候的相关性较差，春季降水与早材和全材年轮宽度的生长显著负相关（R 为−0.406 和−0.341）；夏季的最高温度、夏季的最低温度、夏季的平均温度以及夏季的降水与晚材年轮宽度的生长显著正相关（R 为 0.413、0.461、0.465 和 0.461）（图 4（b））。



（a）1974—1985 年早材、晚材和全材年轮宽度与季度气候的相关系数

（a）Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood and ringwood and season climate of 1974−1985



（b）1986—2019 年早材、晚材和全材年轮宽度与季度气候的相关系数

（b）Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood and ringwood and season climate of 1986−2019

P 为年均降水量；T 为年均温度。

P means average annual precipitation; T means average annual temperature.

图 4　早材、晚材和全材年轮宽度与季度气候的相关系数

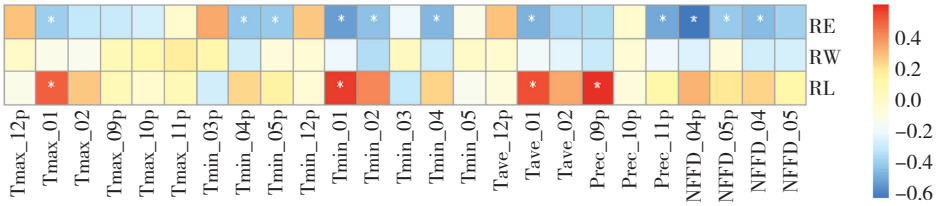
Fig. 4 Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood and ringwood and season climate

3.3.2 树轮宽度与月均气候的关系

根据早材、晚材以及全材年轮宽度的生长与季度气候的相关性，分析相关月份的气候与三者的关系（图 5（a））。1974—1985 年早材的年轮宽度与气候的相关性较晚材明显；当年 1 月的平均气温与早材年轮宽度的生长显著负相关（R=−0.483）；当年 1 月的最高温度与早材年轮宽度的生长显著负相关（R=−0.412）；上一年 4、5 月，以及当年 1、2、4 月的最低温度与早材年轮宽度的生长显著负相关，R 为−0.6～−0.4；上一年和当年 4、5 月的无霜期与早材年轮宽度的生长显著负相关，R 为−0.6～−0.4；当年 1 月的平均温度与晚材年轮宽度的生长显著正相关（R=0.523）；当年 1 月的最高温度与晚材年轮宽度的生长显著正相关（R=0.482）；当年 1 月的最低温度与晚材年轮宽度

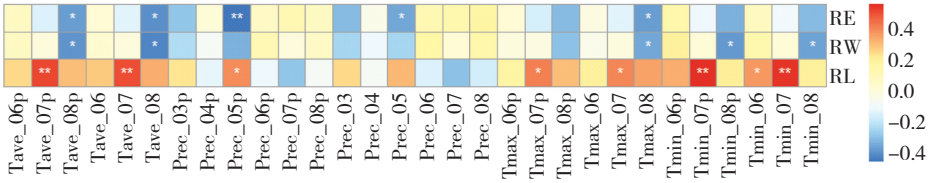
的生长显著正相关($R=0.552$)；当年 1 月的平均温度与晚材年轮宽度生长显著正相关($R=0.523$)；上一年 9 月的降水对晚材年轮宽度生长显著正相关($R=0.587$)。

1986—2019 年上一年和当年 8 月的平均温度以及当年 8 月的最高温度对早材年轮宽度的生长显著负相关，R 为-0.370、-0.399 和-0.369；上一年和当年 5 月的降水与早材年轮宽度显著负相关，R 为-0.450 和-0.350；上一年和当年 7 月的平均温度、最高温度以及最低温度与晚材年轮宽度的生长显著正相关，R 为 0.3~0.6；上一年 5 月降水与晚材年轮宽度的生长显著正相关($R=0.361$)；上一年和当年 8 月的平均温度与全材年轮宽度的生长显著负相关，R 为-0.387 和-0.412；当年 8 月的最高温度对全材年轮宽度的生长显著负相关($R=-0.348$)；上一年和当年 8 月的最低温度与全材年轮宽度的生长显著负相关，R 为-0.375 和-0.358(图 5(b))。



(a) 1974—1985 年早材、晚材、全材年轮宽度与月均气候的相关系数

(a) Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood, and ringwood and monthly average climate of 1974-1985



(b) 1986—2019 年早材、晚材、全材年轮宽度与月均气候的相关系数

(b) Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood, and ringwood and monthly average climate of 1986-2019

p 为上一年月份。

p means the month of the previous year.

图 5 早材、晚材、全材年轮宽度与月均气候的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between ring width of earlywood, latewood, and ringwood and monthly average climate

根据上述结果显示，温度是影响长白落叶松人工林树木生长的主要影响因子，早材和晚材与气候的相关性较全材明显。就 1974—1985 和 1986—2019 时间段而言，不论是季度气候还是月均气候早材和晚材对气候的响应程度均明显于全材对气候的响应。与季度气候的相关性来看，1974—1985 年早材和晚材生长与冬季气候的相关性较晚材显著；但在 1986—2019 年期间季度气候与晚材生长的相关性较早材和全材显著；从与月均气候的相关性来看，1974—1985 年早材的生长与气候的相关性较晚材和全材显著，1986—2019 年早材和晚材生长与气候的相关性较晚材显著。

4 讨论

本研究利用东北林业大学帽儿山实验林场设置的 27 块长白落叶松纯林样地，获取样芯，研究早材、晚材和全材对气候变化的响应，并进一步探讨不同季度和月份气候对长白落叶松人工林年轮宽度的影响。由结果可知，温度是帽儿山地区长白落叶松人工林早材、晚材和全材年轮宽度的主要限制

因素,而降水和降雪对其影响不明显,随着气候持续变暖,树木的年轮宽度对气候的敏感性显著增强,夏秋季是早晚材年轮宽度的生长季,适宜的高温有利于 2 个时间段的早材、晚材和全材年轮宽度的生长。

4.1　1974—1985 年早材、晚材和全材对气候的响应

1974—1985 年秋冬季节的温度对长白落叶松人工林的径向生长有显著的相关性,且 1974—1985 年的月均气候对早材和晚材年轮宽度生长的相关性较全材显著。帽儿山实验林场海拔低(200 ~ 600 m),夏秋季最高温度的升高延长了生长季,有利于帽儿山地区长白落叶松 1974—1985 年早材、晚材和全材年轮宽度的生长,但冬季最高温度和最低温度的升高,冬季温度也随之升高,积雪融化提前,影响长白落叶松的休眠期以及加速水分流失,从而与早材和全材年轮宽度的生长有显著的负相关性,尤其是 1、2 月最低温度的升高,4、5 月无霜期的延长,破坏了树木的休眠期,影响树木的生理活动,这与谢立红等[18]研究结果一致,气候变暖不利于低海拔地区林分树木的生长,由于内部竞争导致水分紧缺,从而抑制树木的生长[18-19];生长在低海拔地区的橡树(*Quercus palustris*),较高的温度对其径向生长同样有明显负相关性[20],AHM 整体上呈上升的趋势,致使较低的水资源利用率与较暖的时期同时出现,导致降水与早材、晚材和全材的生长相关性不明显,长白落叶松承受高温的能力下降,秋冬季的温度对早材、晚材和全材年轮宽度的生长有明显的负相关性,这与 Hartl-meier 等[22]研究结果一致,在较低的山地和山地带,树木生长对干旱敏感,与温度、日照时数呈现出负相关性,气候变暖加剧了干旱,对树木的生长起限制作用,从而容易导致森林衰退[23-24]。

4.2　1986—2019 年早材、晚材和全材对气候对响应

在 1986—2019 年期间夏季的温度对树木的径向生长有显著的相关性。而在 1986—2019 年月均气候对晚材和全材年轮宽度的相关性较早材显著。生长在温度受限地区的树木对气温尤其敏感,因此气温是生长在中国东北大兴安岭西部永久冻土带落叶松生长的主要限制因素,且随着气候变暖的趋势,树木生长与温度之间的关系更为密切[25-26]。7、8 月气温的升高,导致树木的抗高温能力下降,对 1986—2019 年时间段的早材和全材年轮宽度有显著的负相关性,且研究证明黑龙江的气候变暖性质是夜间气温增加导致[27],晚材年轮宽度形成于气温下降、降水减少的季节,上一年和当年 6—8 月生长季,最低温度的升高一定程度上延长了晚材的生长季,为晚材年轮宽度的生长做足了物质准备,尤其有利于 1986—2019 年时间段晚材年轮宽度的生长,这与对瑞士石松(*Pinus cembra*)[28]的研究结果一致,瑞士石松形成层活动取决于温度,北坡对气候变暖反应强烈,致使积雪提前融化,从而延长了生长季,并且在低海拔地区晚材轮宽密度主要受春末和夏季的水分可利用性影响,因此气候变暖有利于瑞士石松的径向生长。

4.3　极端气候对树木生长的影响

极端气候事件会影响树木生长,黑龙江 1976—1985 年大部分年份降水低于平均值,年均温度也低于平均值,2006—2007 年的冬季黑龙江迎来了 1954 年以来第二个暖冬,由轮宽变化可知,轮宽在 2006 年气候发生了变化,但影响长白落叶松人工林在 1985 年、2006 年前后树木生长导致这 2 个时间段树木生长的区别是否受极端气候事件影响以及影响强度的大小还有待研究。

5　结论

1)上一年和当年生长季的气候对长白落叶松晚材年轮宽度影响显著,其中早材和全材年轮宽度的 SNR 值为 56.625、56.636,而晚材年轮宽度的 SNR 值为 10.331;早材和全材年轮宽度的 ACI 值为 0.566、0.622,晚材年轮宽度的 ACI 值为 0.371,表明早材和全材年轮宽度所包含的气候信息以及受气候“滞后效应”的影响均较晚材年轮宽度明显。

2)晚材年轮宽度的生长较早材、全材年轮宽度的生长稳定;帽儿山地区 1975 年、1989 年高温期间,长白落叶松人工林早材和全材年轮宽宽呈现下降的趋势,但晚材年轮宽度受其影响不显著。说明早材和全材年轮宽度对高温的敏感性较晚材强。

3)气候变暖对长白落叶松人工林早材和全材年轮宽度的影响较晚材年轮宽度强烈,且气候对1974—1985年树木生长的影响较1986—2019年强烈。综合来看,温度是早材、晚材和全材年轮宽度生长的主要限制因素。

【参 考 文 献】

[1] 郭冬,张同文,吐尔逊·哈斯木,等.西昆仑山两种针叶树种径向生长及其对气候变化的响应[J].生态学报,2022,42(24):10226-10240.
GUO D, ZHANG T W, TURSUN K, et al. Radial growth of two coniferous species in the western Kunlun Mountains and its response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10226-10240.

[2] 阎弘,孙滢洁,刘滨辉.竞争对红松树木的干旱适应性及生长衰退影响[J].北京林业大学学报,2022,44(6):1-9.
YAN H, SUN Y J, LIU B H. Effects of competition on drought adaptability and growth decline of *Pinus koraiensis* trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 1-9.

[3] 贾敏,朱万泽,王文志.树木径向生长主要去趋势方法与误差分析[J].世界林业研究,2017,30(3):59-63.
JIA M, ZHU W Z, WANG W Z. Detrending methods and biases analysis in tree radial growth[J]. World Forestry Research, 2017, 30(3): 59-63.

[4] 姜盛夏,袁玉江,喻树龙,等.阿尔泰山西伯利亚云杉多种树轮宽度年表研制及其气候响应研究[J].地球环境学报,2020,11(6):616-628.
JIANG S X, YUAN Y J, YU S L, et al. Development of multiple tree-ring width chronologies of *Picea obovata* for the Altay Mountains, China, and their climate response[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(6): 616-628.

[5] YANG R Q, FU P L, FAN Z X, et al. Growth-climate sensitivity of two pine species shows species-specific changes along temperature and moisture gradients in southwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 318: 108907.

[6] DIDIER B, FRANCOIS L, ADIB O, et al. Past and future radial growth and water-use efficiency of *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* in a long-term climate refugium[J]. Dendrochronologia, 2022, 72: 125939.

[7] QIU H Q, LIU S, ZHANG Y T, et al. Variation in height-diameter allometry of ponderosa pine along competition, climate, and species diversity gradients in the western United States[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 497: 119477.

[8] STAMBAUGH M C, BIGELOW S W, ABADIR E R. Linkages between forest growth, climate, and agricultural production are revealed through analysis of seasonally-partitioned longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree rings[J]. Dendrochronologia, 2021, 65: 125801.

[9] CONSTANTIN N, MARIA I A, DIANA C, et al. A tree ring Proxy evaluation of declining causes in *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* J. F. Arnold in Northeastern Romania[J]. Forests, 2022, 13(2): 336.

[10] MATUSICK G, RUTHROF K X, KALA J, et al. Chronic historical drought legacy exacerbates tree mortality and crown dieback during acute heatwave - compounded drought[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(9): 095002.

[11] PICHLER P, OBERHUBER W. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2): 688-699.

[12] WANG X P, FANG G Y, TANG Z Y, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234(1): 264-274.

[13] 张楠.兴安落叶松生长与气候变化的响应关系[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2022.
ZHANG N. Response of the growth of *Larix Gmelinii* to climate change in Daxing'anling Mountains[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.

[14] SOULE P T, KNAPP P A, MAXWELL J T, et al. A comparison of the climate response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) trees among standardized measures of earlywood, latewood, adjusted latewood, and totalwood radial growth[J]. Trees, 2021, 35: 1065-1074.

[15] 何海.使用WinDENDRO测量树轮宽度及交叉定年方法[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2005(4):39-44.
HE H. Measurement of tree-ring width with WinDENDRO and crossdating methods[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2005(4): 39-44.

[16] WANG T L WANG G Y, INNES J L, et al. ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. Frontiers of Agricul-

tural Science and Engineering, 2017, 4(4): 448-458.

[17] POMPA-GARCIA M, CAMARERO J J, COLANGELO M, et al. Inter and intra-annual links between climate, tree growth and NDVI: improving the resolution of drought proxies in conifer forests[J]. International journal of biometeorology, 2021, 65(12): 2111-2121.

[18] 谢立红,黄庆阳,曹宏杰,等. 气候变暖对黑龙江省五大连池兴安落叶松径向生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(2):150-158.
XIE L H,HUANG Q Y,CAO H J, et al. Effects of climate warming on radial growth of *Larix gmelinii* in Wudalianchi, Heilongjiang Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(2): 150-158.

[19] ZHANG L, SHI H, YU P T, et al. Divergent growth responses to warming between Stand-Grown and Open-Grown trees in a dryland montane forest in Northwestern China[J]. Forests, 2019, 10(12): 1133.

[20] SAUVAGE J C D, VITASSE Y, MEIER M, et al. Temperature rather than individual growing period length determines radial growth of sessile oak in the Pyrenees[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 317: 108885.

[21] BARBEITO I, DAWES M A, RIXEN C, et al. Factors driving mortality and growth at treeline: a 30-year experiment of 92 000 conifers[J]. Ecology, 2012, 93(2): 389-401.

[22] HARTL-MEIER C, DITTMAR C, ZANG C, et al. Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps[J]. Trees, 2014, 28(3): 819-829.

[23] ZHENG P F, WANG D D, JIA G D, et al. Variation in water supply leads to different responses of tree growth to warming[J]. Forest Ecosystems, 2022, 9(1): 100003-100003.

[24] 张晓,吴梦婉,Kwon S M,等. 不同林龄樟子松人工林径向生长对气候及地下水位变化的响应[J]. 生态学报,2022,42(16):6827-6837.
ZHANG X, WU M W, KWON S M, et al. Radial growth responses of Monglian pine (*Pinus syvestris* var. *mongolica*) plantations at different ages to climate and groundwater level changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6827-6837.

[25] ZHANG X L, BAI X P, CHANG Y X, et al. Increased sensitivity of Dahurian larch radial growth to summer temperature with the rapid warming in Northeast China[J]. Trees, 2016, 30(5): 1799-1806.

[26] 李颖辉,齐贵增,冯荣荣,等. 秦岭北麓油松径向生长对气候变化的响应[J]. 应用生态学报,2022,33(8): 2043-2050.
LI Y H, QI G Z, FENG R R, et al. Responses of radial growth of *Pinus tabulifromis* to climate change at the northern slopes of Qinling Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2043-2050.

[27] 朱红蕊. 黑龙江省近 49 年极端气温事件变化特征分析[C]. 第 27 届中国气象学会年会应对气候变化分会场—人类发展的永恒主题论文集,2010:329-336.
ZHU H R. Analysis on the characteristics of extreme temperature events in Heilongjiang Province in recent 49 years[C]. The 27th annual meeting of the chinese meteorological society on climate change - a collection of papers on the eternal theme of human development, 2010: 329-336.

[28] WALTER O. Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone[J]. Tree physiology, 2004, 24(3): 291-301.