

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210479

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

贡晓清¹ 谢 榕² 杨 华¹

(1. 北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 玉环市自然资源与规划局, 浙江 台州 317600)

摘要:【目的】气候因子影响树木生长发育, 对树木径向生长与气候因子之间的关系进行分析, 以探究长白山地区云冷杉针阔混交林森林生态系统对气候变化的响应, 为该地区天然林经营管理提供科学依据。【方法】本研究于 2019 年在吉林省汪清县云冷杉针阔混交林中对常见针叶树臭冷杉、鱼鳞云杉和红松进行样芯的采集, 用树木年轮学方法建立标准年表, 进而分析比较不同树种生长与气候因子的关系。【结果】该地区树木标准年表的平均敏感度和信噪比分别为 0.16~0.27、6.14~19.98, 其中臭冷杉包含更多的气候信息, 其平均敏感度、标准差、信噪比和样本总体代表性等统计量均高于鱼鳞云杉和红松。上年 9 月平均气温及上年、当年 7 月最低气温与臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长均呈显著正相关($P < 0.05$), 这表明同一区域不同树种径向生长对气候的响应具有一定的相似性。3 种树种径向生长对气候变化的响应也存在差异, 臭冷杉径向生长受气温和降水的共同作用, 鱼鳞云杉和红松径向生长主要受气温限制。升温突变(1985 年)后, 臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长与气温相关性增强但与降水量相关性减弱, 且升温后树木径向生长有显著上升趋势。【结论】不同树种径向生长对气候变化的响应既有共性又存在差异, 目前升温可能仍在臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长的临界阈值内, 促进其径向生长。

关键词: 长白山; 树轮; 气候变化; 生长-气候关系; 径向生长

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)04-0001-10

引文格式: 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 Xiaqing, Xie Rong, Yang Hua. Response of radial growth of three common tree species to climate change in a spruce-fir mixed stand in Changbai Mountain of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 1-10.

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

Gong Xiaqing¹ Xie Rong² Yang Hua¹

(1. Research Center of Forest Management Engineering of

National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Bureau of Natural Resources of Yuhuan City, Taizhou 317600, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Climate factors affect tree growth and development, and the relationship between tree radial growth and climate factors was analyzed to explore the response of spruce-fir coniferous and broadleaved mixed forest ecosystem to climate change in Changbai Mountain of northeastern China, so as to provide scientific basis for natural forest management in this area. [Method] In this study, we used dendrochronological techniques to sample tree-ring cores of *Abies nephrolepis*, *Picea jezoensis* and *Pinus koraiensis*, which were the common tree species in the spruce-fir mixed stand in Wangqing County, Jilin

收稿日期: 2021-11-19 修回日期: 2021-12-09

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0504101)。

第一作者: 贡晓清。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: 550581327@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: 杨华, 教授。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: huayang8747@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Province of northeastern China in 2019. We developed tree-ring width chronologies of three conifers and conducted growth-climate relationship analyses to reveal the influence of climate factors on tree radial growth. [Result] The mean sensitivity and signal-to-noise ratio of the three tree species were 0.16–0.27 and 6.14–19.98. Among them, *A. nephrolepis* contained more climate information, and its average sensitivity, standard deviation, signal-to-noise ratio, and overall sample representativeness were all higher than those of *P. jezoensis* and *P. koraiensis*. The average temperature in September of the previous year and the minimum temperature in July of the previous year and the current year were significantly positively correlated with the radial growth of three tree species ($P < 0.05$), indicating that climate had a similar effect on the ring width growth in the same area. The responses had a certain similarity. However, the response of radial growth of the three conifers to climate change was different too. The radial growth of *A. nephrolepis* was affected by the combined effect of temperature and precipitation, while the radial growth of *P. jezoensis* and *P. koraiensis* was mainly restricted by temperature. After abrupt temperature rising (1985), the radial growth of the three tree species had an enhanced correlation with temperature but a weakened correlation with precipitation, and the radial growth of trees increased significantly. [Conclusion] The response of radial growth of different tree species to climate change has both similarities and differences, The increase in temperature may still be within the critical threshold of radial growth of *A. nephrolepis*, *P. jezoensis* and *P. koraiensis*, so climate warming promotes their radial growth.

Key words: Changbai Mountain; tree ring; climate change; growth-climate relationship; radial growth

在当前全球气候不断变暖的背景下,中国气候发展趋势变化明显,其升温速度远远超过了同期的全球平均水平^[1];作为由中纬度向高纬度过渡的地区,东北地区在过去50年中平均温度每10年增加0.3℃^[2]。长白山位于我国东北温带季风气候区,其森林面积大,生境条件多样,且受到人为活动干扰少,是研究气候变化对森林生态系统影响的理想区域^[3],近年来该地区生态环境受气候变化的影响被广泛关注^[2]。

树木的生长和发育与气候因子紧密相关,它可以对环境变化和极端气候产生长期的响应并将其记录在年轮宽度信息之中^[4-5]。树木年轮由于具有定年准确、分辨率高、连续性强、分布广泛、易于采样等特点^[6],已成为研究气候变化对树木生长的影响和重建过去气候变化的关键资源^[7-8]。近年来,已有大量研究运用树木年轮学从不同角度探讨长白山森林生长对全球气候变化的响应。例如:高露双等^[9]通过研究阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林建群树种的生长—气候关系指出,不同树种的径向生长与气候因子之间的关系有所不同;王守乐等^[10]研究了同一生境下不同树种对季节性气候的响应及其动态关系;于健等^[11]研究了长白山地区群落交错带不同树种的径向生长对气候变暖的响应,但大部分研究仍集中于阔叶红松林中共存的两个树种与气候因子之间的关系,还缺乏对于云冷杉针阔混交林中多个共存树种径向生长对气候变化响应的研究。

汪清地区是长白山云冷杉针阔混交林的重要分

布区,已有众多学者对该地区云冷杉针阔混交林进行研究,包括林分结构^[12]、进界模型^[13]、林下更新^[14]等多个方面。为了解该地区云冷杉针阔混交林中不同树种对气候因子的响应特征及升温后气候因子对不同树种生长的影响。本研究以吉林汪清金沟岭林场云冷杉针阔混交林为研究对象,对臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)和红松3种常见树种进行采样,建立树木年轮宽度标准年表,分析其对气候因子的响应特征,探讨不同树种径向生长与气候因子的关系及升温对其生长的影响,为该地区树木的保护提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省延边汪清林业局金沟岭林场(43°17′~43°25′N、130°05′~130°20′E),属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,经营面积16 286 hm²。全场四面环山,以低山丘陵地貌为主,海拔500~1 200 m,坡度多在5°~25°。林区属温带大陆性季风气候,年均温4℃左右,年降水量600~700 mm。林区属低山灰化土灰棕壤区,母岩为玄武岩。研究区内的主要树种有臭冷杉、鱼鳞云杉、红松、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、枫桦(*Betula costata*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、色木槭(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗

(*Phellodendron amurense*)等; 草本植物以苔草(*Carex tristachya*)和禾本科(*Gramineae*)为主。

1.2 样品的采集与处理

2019年8月在典型云冷杉天然林, 海拔710 m, 西北坡向, 按照径级选取生长良好的臭冷杉、鱼鳞云杉和红松作为取样目标, 利用口径为5.15 mm的树木生长锥在胸高(1.3 m)位置钻取年轮样芯(尽可能通过髓芯)。为减少对树木的损害, 每株树仅钻取一根样芯。臭冷杉、鱼鳞云杉和红松分别钻取了65、25和55根样芯。将采集的样芯进行编号并记录每株树的生境信息。将样品带回实验室后, 对年轮样芯进行风干和打磨等处理。打磨时用200目、400目、600目的砂纸依次打磨, 直到年轮界限在显微镜下清晰可见。

1.3 建立年表

1.3.1 年表的制作方法

利用LINTAB™6.0年轮宽度测量仪(测量精度为0.001 mm)及配套的TSAP软件测量年轮宽度。利用COFECHA程序^[15]对定年和测量结果进行检验, 剔除与主序列相关性差以及难以交叉定年的样芯, 将保留的样芯用于建立年表。为消除其他非气候因素导致的生长趋势, 利用R语言“dplR”包中的ModNegExp方法对树轮宽度序列进行去趋势和标准化处理^[16], 建立3个树种标准年表。

1.3.2 标准年表统计参数

年轮宽度指数、信噪比、样本一阶自相关系数、样本间相关系数、平均敏感度、树木年轮的标准差、样本总体代表性等见文献。

(1)年轮宽度指数。在建立树木年轮宽度年表时, 将树木年轮宽度序列用统计学方法进行曲线拟合, 得到树木生长的期望值(Y_i), 树木年轮实际宽度值(W_i)与期望值(Y_i)的比值为年轮宽度指数(I_i)。

$$I_i = \frac{W_i}{Y_i} \quad (1)$$

(2)信噪比。信噪比(signal-to-noise ratio, R_{SN})用于表示样本中所包含环境信息多少的统计量, 其值为树木年表中气候信息与非气候噪声之比, 若数值越大, 则年表中包含的气候信息越多。

$$R_{SN} = \frac{N\bar{r}_{bt}}{1 - \bar{r}_{bt}} \quad (2)$$

式中: N 代表样本数, $\bar{r}_{bt}$ 代表不同样芯间的平均相关系数。

(3)平均敏感度。平均敏感度(mean sensitivity, S_M)用于衡量年轮宽度的逐年变化, 是无量纲值, 其值越高, 树木生长对气候变化越敏感, 受到气候因子的限制作用越强。

$$S_M = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{i+1} - x_i)}{x_{i+1} + x_i} \right| \quad (3)$$

式中: x_i 和 x_{i+1} 分别是第 i 个和第 $i+1$ 个年轮的宽度值; n 为该树轮样本的年轮总数。

(4)样本总体代表性。样本总体代表性(expressed population signal, S_{EP})表示采集的树轮样本能够代表采样点森林总体生长趋势的百分比值, 是决定采样是否成功的一项指标, 其值越大, 建立的树轮年表越具有理论年表的特征, 采样工作越成功。

$$S_{EP} = \frac{\bar{r}_{bt}}{\bar{r}_{bt} + (1 - \bar{r}_{bt})/N} \quad (4)$$

样本总体代表性的阈值通常设定为0.85^[17]。

1.4 气象数据

从中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)获取距离采样点最近的汪清气象站(43°18'N、129°47'E, 海拔244.8 m)的气象资料, 时间为60年(1958—2018年)。气象要素包含逐月的最低气温、最高气温、平均气温和总降水量。根据气象站内的降水量和温度数据使用R软件的“SPEI”包来计算标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)。利用Mann-Kendall(M-K)方法^[18]对年平均气温进行突变分析。

1.5 统计分析

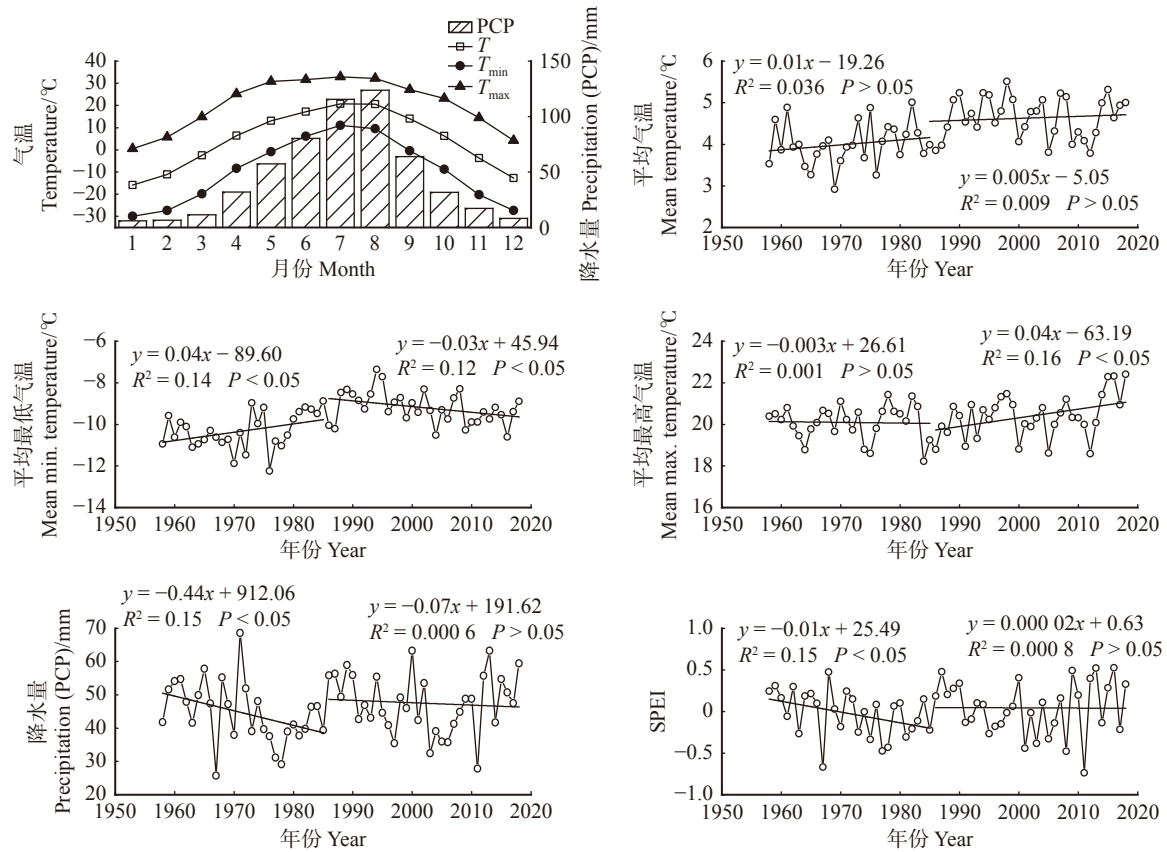
利用Pearson相关分析分别对臭冷杉、鱼鳞云杉及红松的径向生长对逐月气候因子的响应进行分析。考虑到前一年气候的条件可能对树木当年径向生长存在影响^[19], 故选用上一年6月至当年9月的气候数据用于分析。为研究升温突变(1985年)后树木生长与气候关系的变化, 对1985年升温前后主要气候因子与臭冷杉、鱼鳞云杉、红松径向生长的关系进行比较。利用滑动相关分析探讨径向生长与气候因子的动态关系, 滑动窗口为32年。利用R软件计算各年表的参数, 所有相关分析利用DendroClim2002程序^[20]进行, 使用Origin 2019软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 气候因子变化特征分析

该区域具有雨热同期的规律, 最低平均气温出现在1月(约-18℃), 最高平均气温在7月(约6℃)。降水集中在5—9月, 最大降水量在8月, 10月份开始降水逐渐减少, 12月份降水量最低(图1)。

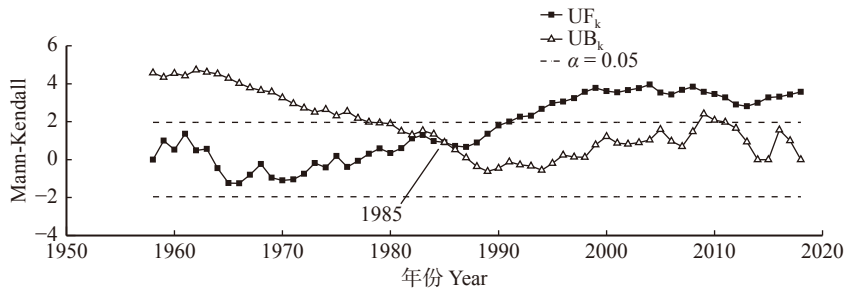
Mann-Kendall的检验结果为1978年后正常的统计值时间序列 $UF_k > 0$, 表明近40年平均气温呈增加趋势, 且1985年为年平均气温升高的突变点(图2)。1958—1985年年均气温为4℃, 1986—



T : 平均气温; $T_{\min}$: 最低气温; $T_{\max}$: 最高气温; SPEI: 标准化降水蒸散指数。 T , mean temperature; $T_{\min}$, minimum temperature; $T_{\max}$, maximum temperature; SPEI, standardized precipitation evapotranspiration index.

图1 研究区 1958—2018 年气象数据

Fig. 1 Meteorological data of research area from 1958 to 2018



UF_k : 正常的统计值时间序列; UB_k : 逆序的统计值时间序列。 UF_k , normal statistical time sequence; UB_k , inverted statistical time sequence.

图2 1958—2018 年年均气温 Mann-Kendall 检验结果

Fig. 2 Mann-Kendall test results of average annual temperature from 1958 to 2018

2018 年年均气温为 $4.65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比突变前增加了 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1958—1985 年年均降水量为 44.58 mm , 1986—2018 年年均降水量为 47.51 mm , 增温突变后的年均降水量大于突变前。1958—1985 年期间, 平均气温以 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的速率上升, 但变化趋势不显著, 平均最低气温以 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的速率显著上升, 平均最高气温变化趋势不显著, 降水量以 0.44 mm/a 的速率显著下降, 标准化蒸散指数以 0.01 的速率显著下降。1986—2018 年期间平均最低气温以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的速率显著下降, 平均最高气温以 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的速率显著上升, 平均气温、降水量和标准化蒸散指数变化均不显

著。总体而言, 汪清地区在 1958—2018 年期间高温变高, 低温变低, 平均气温升高, 降水量及干旱情况不变。

2.2 标准年表的统计特征

臭冷杉、鱼鳞云杉和红松年表整体变化趋势差异显著, 特别是在 1985 年前后(图 3)。1985 年前臭冷杉年轮指数有明显下降趋势(-0.03 a^{-1} , $R^2 = 0.77$), 鱼鳞云杉和红松年轮指数下降趋势较弱; 1985 年后臭冷杉年轮指数出现显著上升趋势(0.05 a^{-1} , $R^2 = 0.89$), 鱼鳞云杉次之(0.04 a^{-1} , $R^2 = 0.81$), 红松年轮指数上升趋势较弱。

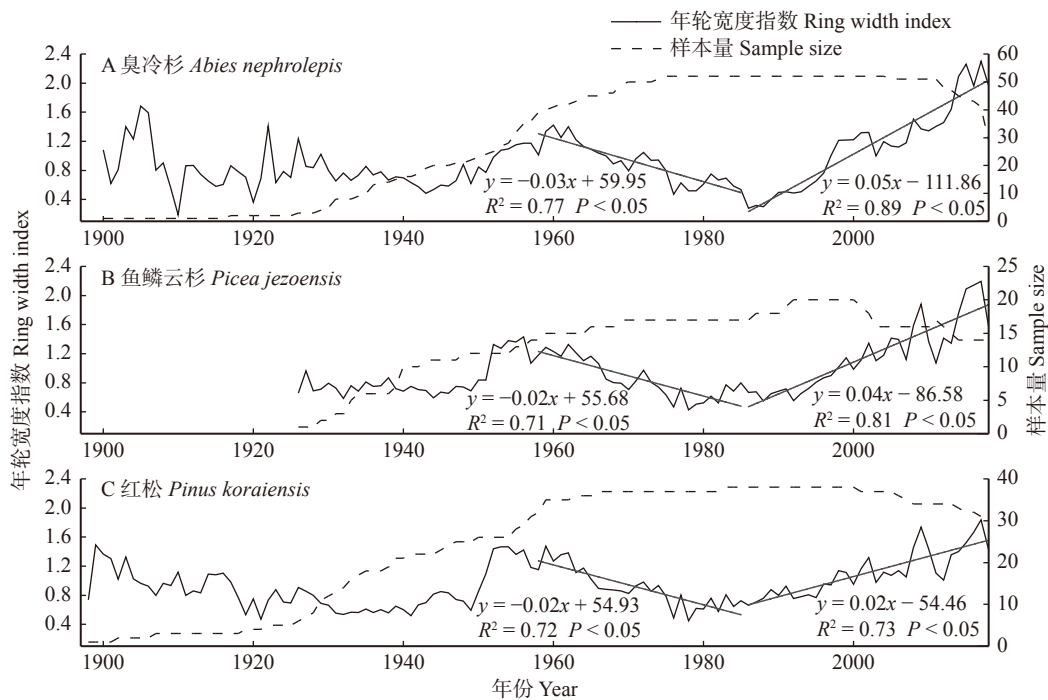


图 3 3 种常见树种的标准年表和样本量

Fig. 3 Standard chronology and sample size of three common tree species

如表 1 所示, 3 个树种年表序列长度的平均值为 110 年, 其中红松年表的时间跨度最长, 达 120 年 (1898—2018 年), 臭冷杉、鱼鳞云杉年表时间跨度分别为 118 年 (1900—2018 年)、92 年 (1926—2018 年)。平均敏感度 (S_M) 为 0.16 ~ 0.27, 信噪比 (R_{SN}) 为 6.14 ~ 19.98, 臭冷杉的值均为最大。3 个树种的平均敏感度、信噪比等指标均较高, 说明所建立的年表包含较多的气候信息, 对气候变化敏感, 适用于气候因子分析。一阶自相关系数为 0.81 ~ 0.86, 说明汪清地区臭冷杉、鱼鳞云杉、红松年轮受前一年气候因子影响较大。样本总体代表性 (S_{EP}) 高达 0.86 ~ 0.92, 均超过了可接受的临界阈值, 表明样本包含的信号基本代表当地的总体特征。3 个树种相比, 虽然臭冷杉标准年表的一阶自相关系数低于鱼鳞云杉, 但其平均敏感度、标准差、信噪比、样本总体代表性均高于另外两个树种, 说明臭冷杉更适用于气候研

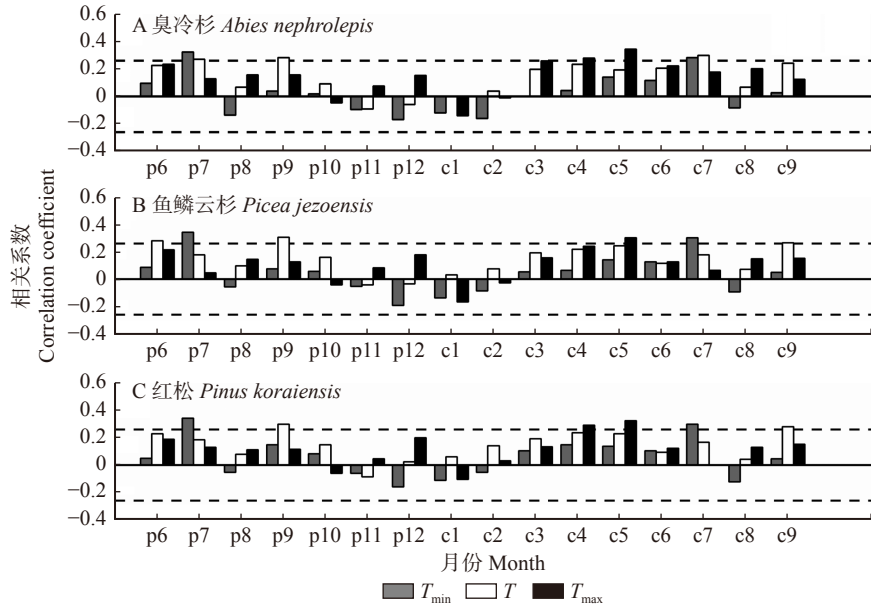
究。总体上, 各项年表特征均表明, 臭冷杉、鱼鳞云杉和红松年表均适用于树木年轮气候学分析。

2.3 不同树种径向生长对气候因子的响应特征

由图 4、5 可知, 臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长均与上年生长季末期 (9 月) 平均气温及上年、当年 7 月最低气温呈显著正相关 ($P < 0.05$); 鱼鳞云杉和红松与降水、标准化降水蒸散指数 (SPEI) 无显著性关系 ($P > 0.05$); 臭冷杉和红松与生长季前期 (4—5 月) 最高气温呈显著正相关 ($P < 0.05$)。此外臭冷杉径向生长与当年 7 月和上年 7 月平均气温呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与当年 5 月和上年 11 月降水、SPEI 呈显著正相关 ($P < 0.05$); 鱼鳞云杉与上年 6 月平均气温呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与当年 5 月最高气温呈显著正相关 ($P < 0.05$)。这表明臭冷杉年表较鱼鳞云杉和红松年表对气候因子响应更加敏感。臭冷杉径向生长受到气温和降水的制约, 而鱼

表 1 标准年表的统计特征及公共区间分析

Tab. 1 Statistical characteristics and common interval analysis of the standard chronology			
统计特征 Statistic characteristics	臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i>	红松 <i>Pinus koraiensis</i>
时间跨度 Time span	1900—2018	1926—2018	1898—2018
平均值 Mean value	0.93	0.96	0.95
平均敏感度 Mean sensitivity (S_M)	0.27	0.16	0.22
标准差 Standard deviation (SD)	0.40	0.38	0.30
一阶自相关系数 First-order autocorrelation coefficient (AC)	0.81	0.86	0.81
公共区间 Common interval	1969—2011	1969—2011	1959—2013
信噪比 Signal-to-noise ratio (R_{SN})	19.98	6.14	11.21
样本间相关系数 Correlation coefficient between samples (R_{bar})	0.40	0.31	0.32
样本总体代表性 Sample population representativeness (S_{EP})	0.95	0.86	0.92



p, 上年; c, 当年。下同。p, previous year; c, current year. The same below.

图4 标准年表与月最低气温、平均气温和最高气温的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients of the standard chronology with monthly minimum temperature, mean temperature and maximum temperature

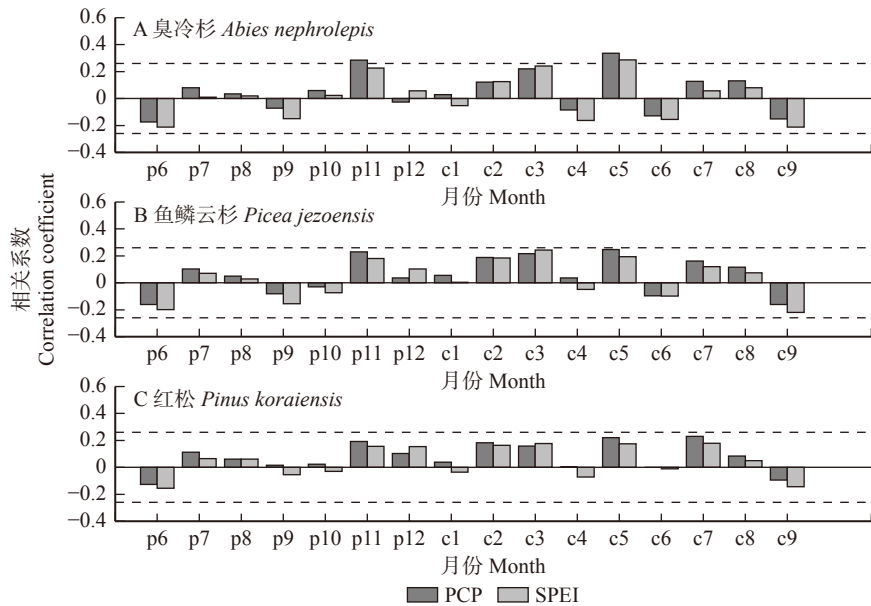


图5 标准年表与月降水量、SPEI的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients of standard chronology with monthly precipitation and SPEI

鳞云杉和红松径向生长的主要限制因子为温度。

2.4 不同树种径向生长对升温的响应差异

由于汪清地区的气候因子(气温和降水量)在1985年前后具有明显差别(图1、2),因此分两个时间段(1985—1985年和1986—2018年)分别评估温度和降水量对3个树种生长的影响。由图6可知,1958—1985年,臭冷杉和红松与上年9月、当年6月降水量呈显著正相关($P < 0.05$),鱼鳞云杉与上年8、9月降水量呈显著正相关($P < 0.05$),各树种与平均气温均未达到显著性水平($P > 0.05$)。1986—2018年,臭冷杉径向生长与当年4月和7月平均气

温呈显著正相关($P < 0.05$),鱼鳞云杉径向生长与平均气温均未达到显著水平($P > 0.05$),红松径向生长与当年4月平均气温呈显著正相关($P < 0.05$),各树种与降水量均未达到显著性水平($P > 0.05$)。由此可见,升温突变前后臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长与气候因子相关性均发生改变,主要表现为升温突变后径向生长与气温相关性增强但是与降水量相关性减弱。

2.5 不同树种径向生长—气候关系的时间稳定性

由图7可知,上年6月和当年4、6月平均气温对臭冷杉径向生长的影响具有一定的长期稳定性。

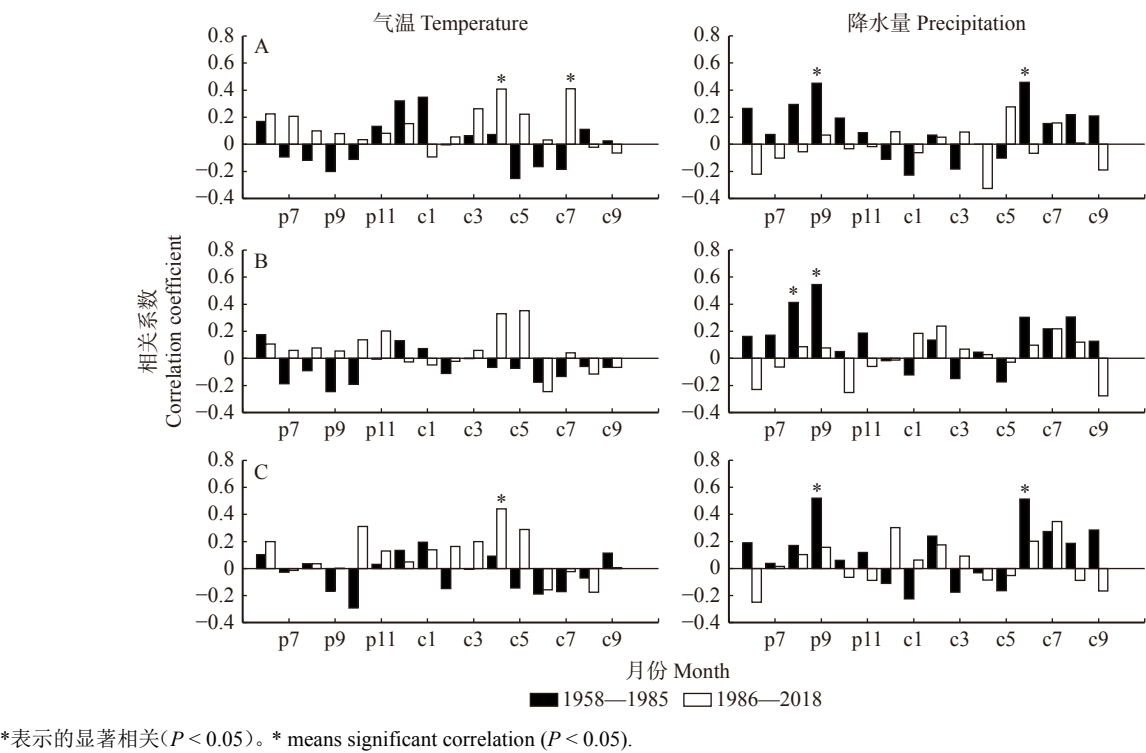


图 6 升温突变前后 3 种常见树种标准年表与气候因子的相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between the standard chronology of three common tree species and climate factors before and after the abrupt warming change

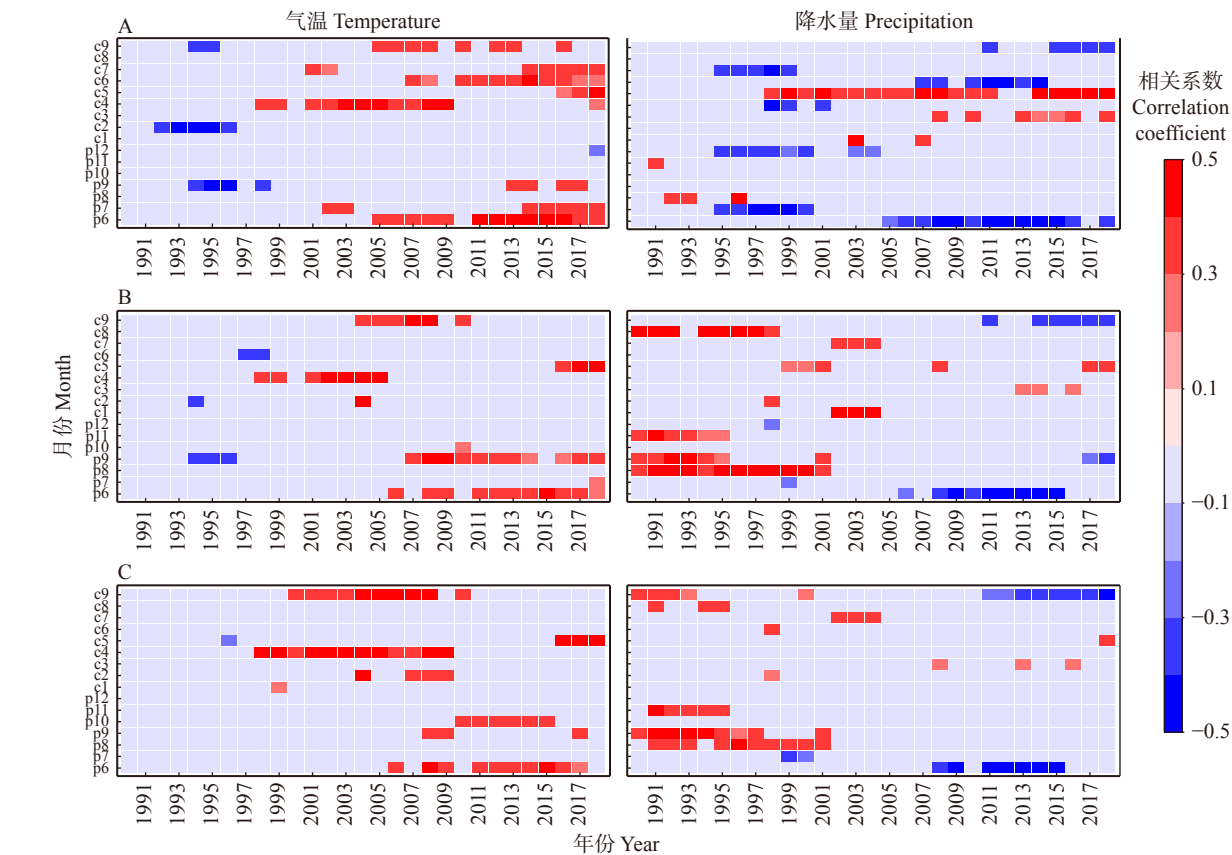


图 7 3 种常见树种与气候因子的滑动相关分析

Fig. 7 Moving correlation analysis of three common tree species and climate factors

臭冷杉标准年表与上年 9 月、当年 9 月平均气温由显著负相关转为显著正相关，与当年 6、7 月平均气温由不显著相关转为显著正相关，说明夏季气温对臭冷杉生长的影响逐渐增强，秋季气温对臭冷杉径

向生长由抑制作用转为促进作用。气温对红松的影响与臭冷杉和鱼鳞云杉相比,抑制作用较少。当年7月降水量与臭冷杉由显著负相关转为不显著相关,而与鱼鳞云杉和红松由不显著相关转为显著正相关。当年9月降水量对红松由促进作用变为抑制作用。上年6、7、12月和当年6、7、9月降水量对臭冷杉径向生长具有较明显的抑制作用,尤其是上年6月,显著相关关系持续时间长达11年(2005—2016)。

3 讨 论

3.1 臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长—气候关系差异

研究结果表明:臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长与均与上年9月平均气温呈显著正相关,这主要是因为树木的生长集中在6—9月,上年9月为上个生长季的末期,而当上个生长季结束时较高的温度有利于延长生长季,保证树木正常的代谢活动,使树木能够储存更多的营养物质以供下一个生长季开始时树木的生长,从而表现出促进作用^[21]。3个树种径向生长均与当年7月最低气温呈显著正相关,这可能是因为研究区在7、8月降水集中,水分充足,有利于增强植物的蒸腾作用,促进叶片气孔开放和CO₂吸收,在水分充足的条件下,生长季的温度升高有助于提高酶的活性,增加细胞生产速率,进而促进树木径向生长^[22]。以上结果表明同一区域不同树种径向生长对气候的响应具有一定的相似性,与杨婧雯等^[23]的研究结果一致,这可以解释为树木对区域气候信号的共同响应^[24]。

本研究中,臭冷杉径向生长与生长季前期降水有较强相关性,生长季前期(当年5月)降水量的增加,不仅可以有效补充土壤水分,缓解生长季温度过高造成的水分不足,还可以促进细胞运输营养物质和合成蛋白质,从而促进宽轮的形成^[25]。树木需要通过根系从土壤吸收足够的水分来维持自身生理活动,作为喜湿、耐荫、浅根性树种,臭冷杉的生长很容易受到水分胁迫^[24],因此臭冷杉生长受温度和降水的共同影响。鱼鳞云杉径向生长与5月最高气温均呈显著正相关,可能是因为5月温度的升高不仅可以促进地面积雪的融化,温暖土壤和茎分生组织,使土壤早日解冻,还可以提高光合作用,增加细胞生产速率,进而促进早期树木的生长^[26-27]。红松径向生长与当年4月最高气温呈显著正相关,春季树木结束休眠转入生长季,较高的生长季前期温度可以促进生长季提前开始,从而延长生长季,而适宜的温度可以促进树木形成层活动,因此生长

季前期足够的热量有利于树木形成宽轮^[24]。该地区不同树种的生长与气候因子之间的关系存在一定差异可能是受树种遗传特性的影响^[28]。此外,韩艳刚等^[29]对长白山关于径向生长—气候关系已发表的文献总结的结果也显示长白山地区不同树种对气候因子的响应有所不同,在川西高原^[30]、大兴安岭^[23]等地的研究同样表明不同树种对气候因子的响应有差异。

3.2 气候变暖对不同树种径向生长的影响

本研究结果显示:升温突变(1985年)后,臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长与气温的正相关性增加,即升温突变后3个树种径向生长对气温的敏感性增加,且其径向生长具有与气温升高相一致的趋势;这与Andreu等^[24]研究发现的树木生长随着气温升高对气候的敏感性增加的结果一致,而与王守乐等^[10]研究显示的树木径向对气候的敏感性降低的结果不同。目前,已有很多研究提出气候变暖对树木径向生长影响。树木的径向生长随着气候变暖可能出现加快^[31]、降低^[32]、及变化不明显^[33]等多种情况。这也验证了气候变暖后树木径向生长对气候因子的响应存在差异。

此外,结果显示,气温升高有利于3个树种的径向生长,这与于健等^[11]在位于1 125 m海拔的研究地得出的气候变暖抑制鱼鳞云杉生长的研究结果不同。通常情况下,海拔可以改变树木的生长速度,进而影响树木生长与气候的关系。Zhu等^[34]研究表明鱼鳞云杉对气候变暖的响应存在海拔差异,快速升温加速了高海拔鱼鳞云杉的径向生长,而减少了低海拔鱼鳞云杉的径向生长。但是本研究在海拔低于于健等^[11]研究的情况下气候变暖仍然促进树木径向生长,这可能是由于气温的阈值效应,树木生长之所以会出现对气候因子响应的敏感性变化主要是因为该效应,气温的升高满足了树木生长的下限阈值,而逐渐突破了树木生长所需要的上限阈值^[35]。当气温高于树木生长的上限阈值后,会使其蒸发、蒸腾作用加剧,从而导致土壤水分有效性降低,此时水分可能变成限制因素,出现干旱胁迫现象^[31]。目前升温可能未超过臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长的临界温度,且由于汪清地区降水量充足(图1),故升温并未对该地区云冷杉林造成干旱胁迫,进而表现出对其径向生长的促进作用。李波^[13]在2017年对汪清地区云冷杉林的研究中同样发现该地区年均温促进树木的径向生长。即使目前汪清地区树木生长并未受到气温升高的抑制作用,但是随着未来气候的持续变暖,该地区树木生长对气候的响应仍需持续关注。

4 结 论

本研究表明, 相比较而言, 臭冷杉标准年表统计参数值高于鱼鳞云杉和红松, 其对气候变化的响应更敏感, 更适用于树轮气候学的研究。长白山汪清地区臭冷杉、鱼鳞云杉和红松径向生长对于特定气候因子的响应有一致性, 上年生长季末期(9月)平均气温及上年、当年7月最低气温促进3个树种径向生长。同时, 该地区树木径向生长—气候因子之间的关系也有着显著的差异, 臭冷杉生长受气温和降水的制约, 鱼鳞云杉和红松生长的主要限制因子为温度。这可能主要是因为树种的生理特征以及种间遗传因素存在差异。1985年升温前树木径向生长有显著下降趋势, 升温后则出现上升趋势。升温突变后, 臭冷杉、鱼鳞云杉和红松与气温和降水的相关性变化存在明显差异, 气温对树木径向生长的促进作用增加而降水的促进作用减弱。总体而言, 目前气温的升高促进汪清地区云冷杉林常见树种的径向生长。

参 考 文 献

- [1] 2019 中国气候变化海洋蓝皮书发布 [J]. 中国环境监察, 2019(10): 4.
China ocean blue book on climate change released 2019 [J]. China Environment Supervision, 2019(10): 4.
- [2] 赵秀兰. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 144–149.
Zhao X L. Influence of climate change on agri-culture in Northeast China in recent 50 years [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(9): 144–149.
- [3] 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 76–85.
Shao X M, Wu X D. Reconstruction of past climate change in Changbai Mountain using tree-ring data [J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(1): 76–85.
- [4] Duchesne L, D'Orangeville L, Oulmet R, et al. Extracting coherent tree-ring climatic signals across spatial scales from extensive forest inventory data [J/OL]. PLoS One, 2017, 12: e189444[2021–10–19]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189444>.
- [5] Fritts H C. Growth-rings of trees: their correlation with climate [J]. Science, 1966, 154: 973–979.
- [6] 吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
Wu X D. Tree rings and climate change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990.
- [7] Smerdon J E, Kaufman D S, Asrat A, et al. Continental-scale temperature variability during the past two millennia [J/OL]. Nature Geoscience, 2013, 10.1038[2021–10–18]. <https://doi.org/10.1038/NNGEO1797>.
- [8] Jiang Y, Yuan X, Zhang J, et al. Reconstruction of June–July temperatures based on a 233 year tree-ring of *Picea jezoensis* var. *microserpa* [J/OL]. Forests, 2019, 10: 416[2021–10–15]. <https://doi.org/10.3390/f10050416>.
- [9] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山阔叶红松林共存树种径向生长对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 24–31.
Gao L S, Wang X M, Zhao X H. Growth response of two coexisting species to climate change in broadleaved Korean pine forests in Changbai Mountain, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 24–31.
- [10] 王守乐, 王晓雨, 盖学瑞, 等. 长白山落叶松与鱼鳞云杉生长—气候关系的种间差异 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1529–1535.
Wang S L, Wang X Y, Gai X R, et al. Interspecific difference of relationship between radial growth and climate factor for *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* in Changbai Mountain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1529–1535.
- [11] 于健, 陈佳佳, 孟盛旺, 等. 长白山群落交错带长白松和鱼鳞云杉径向生长对气候变暖的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 46–56.
Yu J, Chen J J, Meng S W, et al. Response of radial growth of *Pinus sylvestris* and *Picea jezoensis* to climate warming in the ecotone of Changbai Mountain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 46–56.
- [12] 陈亚南, 杨华, 马士友, 等. 长白山 2 种针阔混交林空间结构多样性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 48–58.
Chen Y N, Yang H, Ma S Y, et al. Spatial structure diversity of semi-natural and plantation stands of *Larix gmelinii* in Changbai Mountains, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(12): 48–58.
- [13] 李波. 气候敏感的云冷杉林进界模型的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Li B. Modelling tree recruitment in relation to climate in spruce-fir forests [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [14] 贺丹妮, 杨华, 温静, 等. 长白山云冷杉针阔混交林不同林隙下幼苗幼树密度及空间分布 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1916–1922.
He D N, Yang H, Wen J, et al. Density and spatial distribution of seedlings and saplings in different gap sizes of a spruce-fir mixed stand in Changbai Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1916–1922.
- [15] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 51–67.
- [16] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR) [J]. Dendrochronologia, 2008, 26: 115–124.
- [17] Wigley T, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23: 201–213.
- [18] Kendall M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology, 1990, 25: 86–91.
- [19] Fritts H C. Tree rings and climate [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1972.
- [20] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program

- for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30: 303–311.
- [21] Fkiri S, Guibal F, Fady B, et al. Tree-rings to climate relationships in nineteen provenances of four black pines sub-species (*Pinus nigra* Arn.) growing in a common garden from northwest Tunisia[J]. *Dendrochronologia*, 2018, 50: 44–51.
- [22] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 27–34.
- Gao L S, Wang X M, Zhao X H. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(1): 27–34.
- [23] 杨婧雯, 张秋良, 宋文琦, 等. 大兴安岭兴安落叶松和樟子松径向生长对气候变化的响应差异[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 1–14.
- Yang J W, Zhang Q L, Song W Q, et al. Response difference of radial growth of *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(10): 1–14.
- [24] Andreu L, Gutierrez E, Macias M, et al. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests[J/OL]. *Global Change Biology*, 2007: 1003002105[2021–12–18]. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01322.x>.
- [25] 余春燕. 喀纳斯自然保护区主要树种蒸腾耗水特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- She C Y. Research on transpiration water consumption of main tree species in the Kanas National Nature Reserve[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [26] Peterson D W, Peterson D L. Effects of climate on radial growth of subalpine conifers in the North Cascade Mountains[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(9): 1921–1932.
- [27] 曹受金, 曹福祥, 项文化. 利用树木年轮研究湖南炎陵气温变化情况——1840 年以来 5—7 月份气温变化情况重建[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(4): 10–14.
- Cao S J, Cao F X, Xiang W H. Tree-ring-based reconstruction of temperature variations from May to July since 1840 in Yanling County of Hunan Province, China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(4): 10–14.
- [28] Lyu S, Wang X C, Zhang Y D, et al. Different responses of Korean pine (*Pinus koraiensis*) and Mongolia oak (*Quercus mongolica*) growth to recent climate warming in northeast China[J/OL]. *Dendrochronologia*, 2017: S1720392102[2021–12–17]. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.08.002>.
- [29] 韩艳刚, 周旺明, 齐麟, 等. 长白山树木径向生长对气候因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1513–1520.
- Han Y G, Zhou W M, Qi L, et al. Tree radial growth-climate relationship in Changbai Mountain, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1513–1520.
- [30] 张萌, 石松林, 石春明, 等. 川西高原 4 种典型针叶树径向生长对气候因子的响应[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(7): 1947–1957.
- Zhang M, Shi S L, Shi C M, et al. Radial growth responses of four typical coniferous species to climatic factors in the western Sichuan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(7): 1947–1957.
- [31] 侯鑫源, 史江峰, 李玲玲, 等. 湖北神农架巴山冷杉径向生长对气候的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 689–696.
- Hou X Y, Shi J F, Li L L, et al. Growth response of *Abies fargesii* to climate in Shennongjia Mount of Hubei Province, Southeastern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 689–696.
- [32] 于健, 刘琪璟, 周光, 等. 小兴安岭红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3451–3460.
- Yu J, Liu Q J, Zhou G, et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* to climate change in Xiaoxing'anling Mountains, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3451–3460.
- [33] Yu D P, Gu H Y, Wang J D, et al. Relationships of climate change and tree ring of *Betula ermanii* tree line forest in Changbai Mountain[J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16: 187–192.
- [34] Zhu L J, Cooper D J, Yang J W, et al. Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microserma*) at two elevation gradient sites of northeast China[J]. *Dendrochronologia*, 2018, 50: 52–63.
- [35] Jacoby G C, D'Arrigo R D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 227–234.

(责任编辑 范 娟
责任编辑 臧润国)