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

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

易紫 李俊杰 孙海龙 陈美晴 李爽 向玮

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

Yi Ziyue, Li Junjie, Sun Hailong, Chen Meiqing, Li Shuang, Xiang Wei

引用本文:
易紫, 李俊杰, 孙海龙, 陈美晴, 李爽, 向玮. 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[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):55–63. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220332
Yi Ziyue, Li Junjie, Sun Hailong, Chen Meiqing, Li Shuang, Xiang Wei. Contribution rate of climate factors to radial growth of main coniferous species in spurce–fir conifer mixed forest of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):55–63. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220332

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220332

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

长白山针阔混交林乔木幼苗组成与空间分布
Composition and spatial pattern of tree seedlings in a coniferous and broadleaved mixed forest in Changbai Mountain of northeastern China
北京林业大学学报, 2018, 40(2): 68–75. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170370

普达措国家公园海拔上限3个针叶树种径向生长对气候变化的响应
Response of radial growth of three conifer trees to climate change at their upper distribution limits in Potatso National Park, Shangri–La, southwestern China
北京林业大学学报, 2017, 39(1): 43–51. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160184

长白山云冷杉针阔混交林林木空间利用率混合模型
Mixed model of forest space utilization in spruce–fir coniferous and broadleaved mixed forest of Changbai Mountains, northeastern China
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 71–79. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190112

庐山日本柳杉早材与晚材年轮宽度对气候变化的响应
Response of earlywood and latewood ring width of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, eastern China
北京林业大学学报, 2020, 42(9): 61–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190439

将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应
Response of *Pinus massoniana* tree–ring width in the Jiangle Area of Fujian Province to climate change
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30–39. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190067

秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应
Age–dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China
北京林业大学学报, 2017, 39(9): 58–65. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170161

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220332

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

易紫玥[1]　李俊杰[2]　孙海龙[3]　陈美晴[1]　李　爽[1]　向　玮[1]
（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. 广西林业勘测设计院，广西 南宁 530011；
3. 吉林省长白山森工集团汪清林业分公司，吉林 延吉 133200）

摘要:【目的】为分析气候变化对针叶树种径向生长的影响，揭示针叶混交林对气候变化的响应规律，在全球气候变暖的背景下，对森林生态系统的适应性经营提供理论支撑。**【方法】**以金沟岭林场云冷杉针叶混交林中的 3 个针叶树种为研究对象，建立 3 个针叶树种的树轮宽度标准化年表，分析 3 个树种的树轮宽度与气候因子之间的相关关系，明确该地区显著限制其径向生长的气候因子，并用层次分割法量化气候因子对各树种树轮宽度变化的贡献率。**【结果】**在 95% 的置信区间下，与气候因子相关分析显示：红松和臭冷杉的径向生长同时受气温和降水的影响，与生长季初期气温正相关；鱼鳞云杉的树轮宽度主要受气温影响，与秋冬季节气温负相关，与降水量的整体相关性较低。3 个树种均受到上一年气候因子的影响，有一定的“滞后效应”。滑动相关分析表明，本研究 3 个主要针叶树种与气候因子的响应关系存在差异，主要表现为负相关性呈增强趋势。3 月平均气温对红松的贡献率最高，为 34.56%，4 月最低气温对臭冷杉的贡献率最高，为 22.29%，对鱼鳞云杉的贡献率为 60.89%。**【结论】**层次分割分析法能够有效量化气候因子对各树种树轮生长的贡献率，分析结果可为制定该地区应对未来气候变化的经营管理措施提供理论参考。

关键词：云冷杉针叶混交林；树轮宽度；针叶树种；气候响应
中图分类号：S716；S791　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)05−0055−09
引文格式：易紫玥，李俊杰，孙海龙，等. 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［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：55−63. Yi Ziyue, Li Junjie, Sun Hailong, et al. Contribution rate of climate factors to radial growth of main coniferous species in spurce-fir conifer mixed forest of northeastern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 55−63.

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

Yi Ziyue[1]　Li Junjie[2]　Sun Hailong[3]　Chen Meiqing[1]　Li Shuang[1]　Xiang Wei[1]
(1. State Key Laboratory of Efficient Producton of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Guangxi Forestry Survey and Design Institute, Nanning 530011, Guangxi, China;
3. Changbai Mountain Forest Industry Group Wang Qing Forestry Branch, Yanji 133200, Jilin, China)

Abstract:［**Objective**］This paper aims to analyze the effects of climate change on radial growth of conifers, reveal the response rules of forests to climate change, and provide theoretical support for the adaptive management of forest ecosystem under the background of global warming.［**Method**］Taking three conifer species in the spurce-fir conifer mixed forest of Jingouling Forest Farm of northeastern China as the research object, the standardized chronology of ring width of three conifer species was established. The correlation between ring width of three species and climate factors was analyzed, so as to clarify the

收稿日期: 2022−08−11　**修回日期:** 2022−11−03
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: 易紫玥。主要研究方向：树木年轮气候学研究。Email: yzy99708866@163.com　地址：100083 北京市海淀区北京林业大学林学院。
责任作者: 向玮，博士，教授。主要研究方向：森林生长收获模型。Email: wxiang@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

significant climate factors limiting their radial growth in this area and the stability of correlation relationship. The contribution rate of significant climate factors to the change of tree ring width was quantified using the hierarchical partitioning method. [**Result**] Under the 95% confidence interval, the correlation analysis with climatic factors showed that the radial growth of *Pinus koraiensis* and *Abies nephrolepis* was affected by both air temperature and precipitation, and was positively correlated with the temperature at the beginning of growing season. The tree-ring width of *Picea jezoensis* was mainly affected by temperature, the overall correlation with precipitation was weak, and it was negatively correlated with temperature in autumn and winter. The three tree species were affected by the climate factors of previous year to a certain extent. The effect of tree growth was the “lag effect”. The sliding correlation analysis showed that there were differences in the response relationship between three major conifer species and climate factors in the Jingouling Forest Farm in this study, and the negative correlation showed an increasing trend. By quantifying the contribution rate of significant climate factors to the change of tree ring width, it was found that the average temperature in March had the highest contribution rate to *Pinus koraiensis* (34.56%), the lowest temperature in April had the highest contribution rate to *Abies nephrolepis* (22.29%), and the lowest temperature in April had the highest contribution rate to *Picea jezoensis* (60.89%). [**Conclusion**] The hierarchical partitioning analysis can effectively quantify the contribution rate of climate factors to tree ring growth of various species. The analysis results can provide theoretical and data reference for formulating forest management measures in this region in the future.

Key words: spurce-fir conifer mixed forest; tree-ring width; coniferous species; climate response

森林作为全球碳循环的重要组成部分，提供包括木材资源、动物栖息环境、气候调节等多种生态系统服务[1]。树木作为森林的组成单位，其生长除受自身生理特性、立地环境条件等因素的影响外，还受到气候条件的密切影响[2]，这使树木年轮能够真实地记录下每年有利或不利于树木生长的气候因素[3]。自工业革命以来，全球气候持续变暖。20 世纪 80 年代以来，北半球中高纬度干旱半干旱区树木生长对气候变化的响应尤其显著[4]。树木年轮数据具有分辨率高、连续性强和容易获取的特点[5−6]。因此许多科研工作者利用树木年轮资料在长白山地区开展树轮宽度变化特征、树木径向生长气候响应、历史气候水文重建等系列研究工作。Gao 等[7]对长白山的 3 个主要树种研究发现不同树种树木生长对气温变化的响应存在差异，且 1980 年以后气温升高抑制了红松的生长。于大炮等[8−9]研究发现，长白山不同海拔处的落叶松(*Larix gmelinii*)树轮宽度与年平均最低气温呈正相关关系。而在较干旱地区，树木径向生长主要受降水的影响[10−11]，降水充足年份树木生长状况更好，并为下一季生长提供更多有机物。Yu 等[12]研究发现，生长季降水量与长白山所有样点树木生长均表现为正相关，这表明在长白山地区，水分胁迫是一个普遍现象，充足的降水有助于树木的生长。此外，树轮生长对气象因子的响应可能存在一定的“滞后性”，树轮宽度除了受当年气候因子的影响，还受前一年气候因子的影响[13]。Sheppard 等[14]对针叶树年轮研究得出，树轮宽度与前一年夏季高温呈负相关；也有研究表明[15]，树木径向生长与上一年冬季的气温成负相关，可能是由于冬季低温使植物叶片细胞脱水，根系被冻死，树木生长状况差。

传统的树木年轮气候学的研究多集中在树轮宽度和月均气温、降水量的线性相关关系上，难以量化各气候因子对树轮生长的贡献情况。层次分割分析法(hierarchical partitioning，HP)能够量化多变量的共同解释效应且直观获取每个环境因子的单独贡献。此前，Zhang 等[16−17]采用该方法分析了林分竞争、林龄、立地和气候等变量对树木死亡的相对贡献。本研究尝试采用层次分割分析法将定量分析与定性分析有机结合起来，研究各气候变量对健康木树轮宽度的相对重要性。

长白山地区是我国受气候变化影响最敏感的地区之一，是温带针阔叶混交林生态系统的重要组成部分。该区生境条件丰富多样，是开展树轮气候学研究的理想地区。因此本研究以长白山地区金沟岭林场云冷杉针叶混交林中的主要针叶树种红松(*Pinus koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)为研究对象，开展如下工作：(1)分别建立 3 个树种的树轮宽度标准年表，分析其年表统计特征值；(2)分析 3 个树种树轮生长与气候因子之间的相关关系，并明确该地区显著限制其径向生长的气候因子及相关关系的稳定性；(3)量化气候因子对各树种树轮宽度变化的贡献率。

1　研究区概况

研究地区位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清林业局金沟岭林场，属于中国东北地区长白山老爷岭山脉雪岭支脉。地理位置为 130°05′ ~ 130°20′E，43°17′ ~ 43°25′N，全区总面积为 16 286 hm^2，森林覆盖率为 96%。金沟岭林场海拔在 550 ~ 1 029 m 之间，属于大陆性温带季风气候，冬季长夏季短，年平均气温为 22 ℃，极端最高气温为 37 ℃，极端最低气温为−37 ℃，年平均降雨量为 600 ~ 700 mm，主要集中于 7 月份，冬季寒冷干燥，夏季炎热湿润。

2　研究方法

2.1　树轮样本的采集与年表建立

2021 年 7 月，在研究区设置 20 个样地开展树轮样芯的野外采集工作。样地大小为 20 m × 110 m，分布在海拔 610~735 m，坡度 6°~35°，坡向 45°~360°的范围内。选取样地中间人为干扰较少且群落结构完整的林分，选位于林冠上层，长势健康、干形通直、直径较大的树木进行年轮样芯采样。样本经过粘贴、打磨、扫描等预处理后用 WinDENDRO 年轮分析系统[18]对树芯样本的扫描图像进行分析，利用 COFECHA 程序[19]对样本树轮宽度序列进行交叉定年，减少初步定年和测量工作中产生的误差，提高数据的可靠性，剔除与主序列相关性较低，序列过短等不合格的个别序列，保留满足要求的样芯用于年表构建。最终确定样品红松 45 根，臭冷杉 42 根，鱼鳞云杉 47 根。最后运用 ARSTAN 程序[20]里的线性和负指数去趋势法，去除树木年龄、遗传等树木内在因素对树木年轮变化所产生的影响，从而得到标准年表（standard chronology，STD）、差值年表（residual chronology，RES）和自回归年表（autoregressive chronology，ARS），通过比较，标准年表既含有高频信息又含有低频信息，包含信息更多，最终确定采用标准年表进行后续研究。

2.2　气象资料及分析方法

本研究所使用的金沟岭林场气候资料来源于 ClimateAP[21]，其中红松和鱼鳞云杉的气候资料时间段为 1952—2021 年，臭冷杉所使用的气候资料时间段为 1964—2021 年，包括月降水量、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温。为便于表述，依据树木生长特性和气候变化特征，将 4—8 月划分为生长季，9 月至次年 3 月划分为非生长季[22]。可以看出该研究区气温和降水呈现同步增长趋势，夏季高温且多雨，冬季寒冷且干燥（图 1）。

利用软件 Dendroclim 2002[23]中的 Pearson 相关分析法分析标准年表与气候变量之间的相关性，在 0.05 水平上测试其显著性。考虑到上一年气候因子对当年树木生长状况的影响，选择该地区上一年 7 月至当年 10 月的气候资料与标准年表进行逐月的相关分析，以确定影响树木生长的气候因子。采用滑动相关分析，选择时间窗口为 40 年，研究树轮宽度与气候因子之间的动态关系，并用 R 中 pheatmap 程序包进行做图，实现数据可视化[24]。使用层次分割分析法对各主要气候因子的贡献率进行量化[17,25]，计算通过 R 中 hier.part 程序包实现。

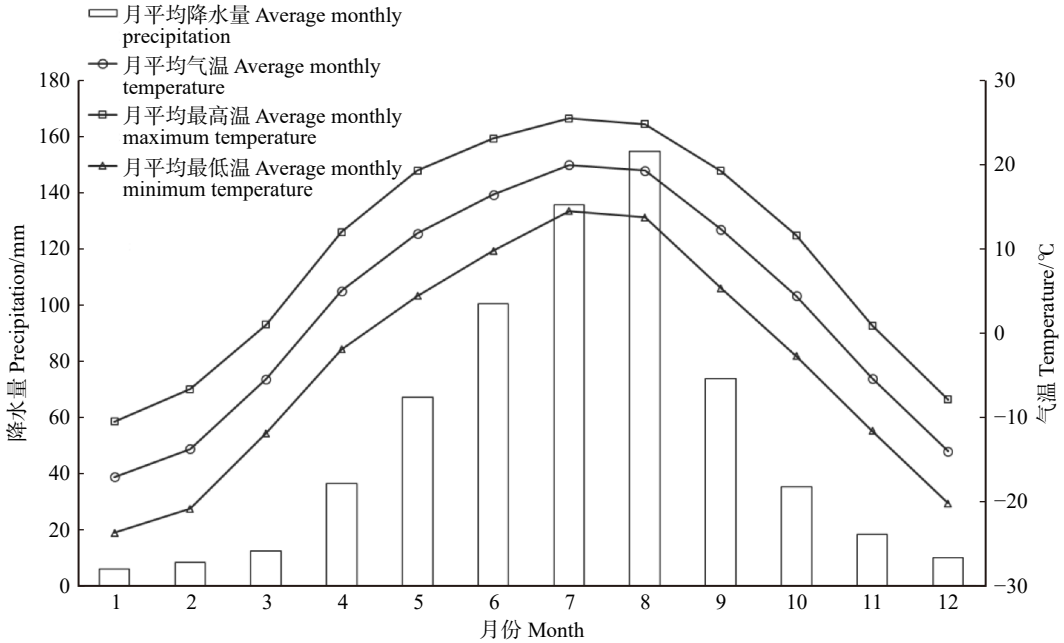


图 1　金沟岭林场 1952—2021 年气象数据

Fig. 1　Climatic characteristics of Jingouling Forest Farm from 1952 to 2021

3 结果与分析

3.1 年表特征分析

使用 ARSTAN 程序对已完成交叉定年的树轮宽度数据进行去趋势和标准化，得到红松、臭冷杉、鱼鳞云杉树轮宽度标准年表(表 1)和样本量图(图 2)。红松和鱼鳞云杉的样本总体代表性分别为 0.878 和 0.934 均大于 0.85，表明样本能较好地代表研究区内树木径向生长的基本特征；臭冷杉样本总体代表性为 0.842，超过 80%，且第一主成分所占方差为 25.32%，可以认为该样本能够较好地代表该区域臭冷杉生长的总体情况。从图 2 可以看出，金沟岭林场内 3 个针叶树种树轮宽度标准年表树轮指数上下波动明显，说明树木年轮的宽窄有明显的年际变化。其中红松的树轮宽度标准年表的标准差为 0.272，说明波动性更为明显。此外，金沟岭林场云冷杉针叶混交林内一阶自相关数值均比较高，表明上年气候状况可能对当年树木年轮的形成有强烈的影响，具有一定的“滞后效应”[26]。

3.2 树轮宽度与气候因子的相关分析

通过相关分析可得，各个气候因子对红松、臭冷杉和鱼鳞云杉径向生长的影响存在差异(图 3)。红松主要受降水和气温影响。红松年轮序列仅与当年 1 月降水量显著负相关($P < 0.05$)，与气温总体呈现正相关关系，尤其与最低气温在多个月份(前一年 7 月、当年 1—7 月)均呈现显著正相关($P < 0.05$)。臭冷杉主要受降水和气温的影响(图 3)，降水量对臭冷杉的“滞后效应”明显，在 4 月达到显著的负相关($P < 0.05$)，形成窄年轮，与前一年 7 月、12 月、当年 4 月、7 月、9 月的平均气温、最高气温、最低气温呈现显著正相关($P < 0.05$)。鱼鳞云杉树轮宽度主要受气温影响，与降水量的相关性没有达到显著水平。鱼鳞云杉与当年 4 月气温呈现显著正相关($P < 0.05$)；与上年 10 月最高气温呈现显著负相关($P < 0.05$)。鱼鳞云杉与气温总体上呈现为与秋冬季(8—12 月)气温负相关，与春夏季(1—7 月)气温正相关。

通过滑动相关分析可得，红松径向生长与前一年 7 月降水量显著负相关($P < 0.05$)。平均气温、最高气温、最低气温对红松的径向生长波动明显，仅在 4 月呈现较稳定的显著正相关($P < 0.05$)(图 4)。红松径向生长与当年 5—6 月最低气温由显著正相关(1991—2008 年)逐渐转变为显著负相关(2009—2021 年)(图 4)。臭冷杉径向生长与降水量的相关显著性微弱，与上年 7 月和当年 4 月气温(平均温度、最高气温、最低气温)呈现稳定的显著正相关($P < 0.05$)，且与 4 月气温的相关性更高。在 2004—2006

表 1 主要针叶树种标准年表特征及公共区间分析

Tab. 1 Characteristics and common interval analysis of standard chronology of main coniferous tree species

年表特征值 Characteristic value of chronologies	红松 *Pinus koraiensis*	臭冷杉 *Abies nephrolepis*	鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*
样本数量 Sample number	45	42	47
平均敏感度 Mean sensitivity	0.159	0.127	0.172
标准差 Standard deviation	0.272	0.180	0.246
信噪比 Signal-to-noise ratio	7.196	5.324	14.105
一阶自相关 Autocorrelation order 1	0.767	0.526	0.588
树间平均相关系数 Mean correlation coefficient between trees	0.163	0.139	0.282
样本总体代表性 Sample overall representativeness	0.878	0.842	0.934
第一主成分所占方差 Variance of the first principal component/%	25.14	25.32	34.60

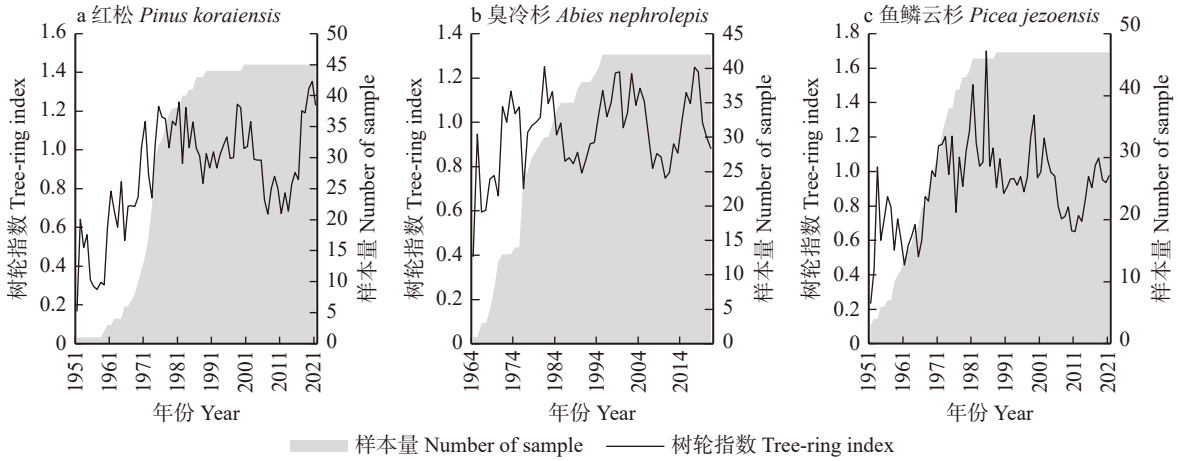
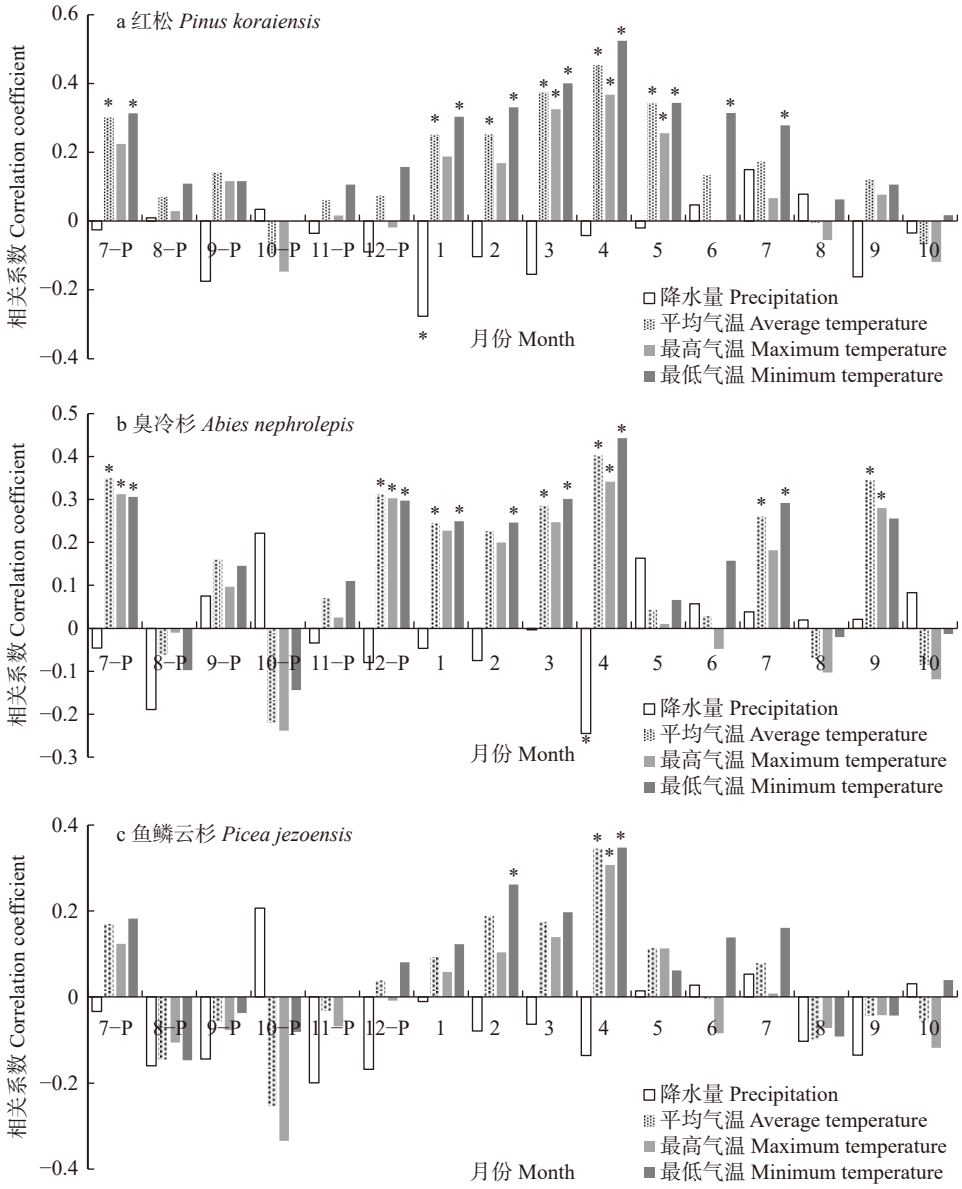


图 2 3 种主要针叶树种树轮指数与样本量

Fig. 2 Tree-ring index and sample number of three coniferous tree species



P 表示前一年。*表示在 0.05 水平下显著相关。下同。 P represents the previous year. * indicates significant correlation at 0.05 level. Same as below.

图 3　主要针叶树种树轮宽度与逐月气候因子的相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis between tree ring width of main coniferous species and monthly climatic factors

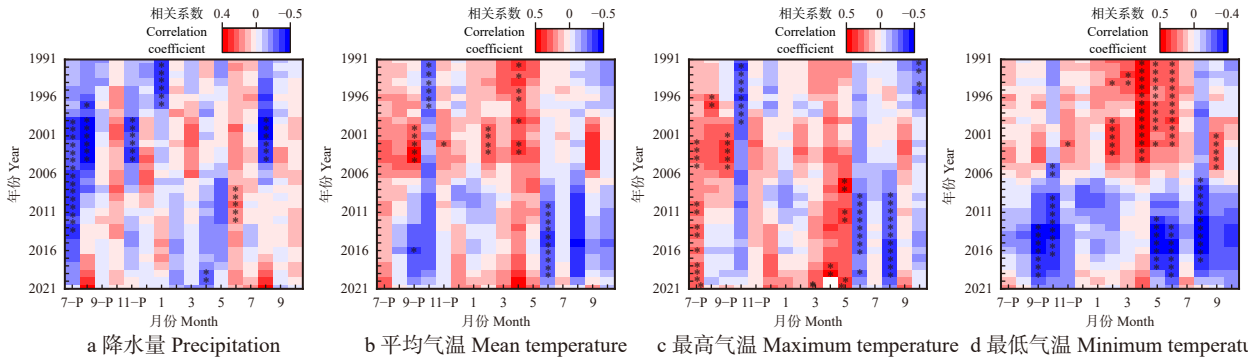


图 4　红松树轮宽度与气候因子的滑动相关分析

Fig. 4　Moving correlation analysis of *Pinus koraiensis* ring width with climate factors

年，上年 12 月、当年 1—2 月、6—7 月、9 月呈现显著正相关，之后相关性逐渐减弱(图 5)。鱼鳞云杉径向生长与上年 11 月降水量呈现较为稳定的显著负相关($P < 0.05$)，与上年 8 月和当年 8 月降水相关性表现出典型的“响应分异”现象，由负相关转为正相关。鱼鳞云杉径向生长与上年 10 月平均气温、最高

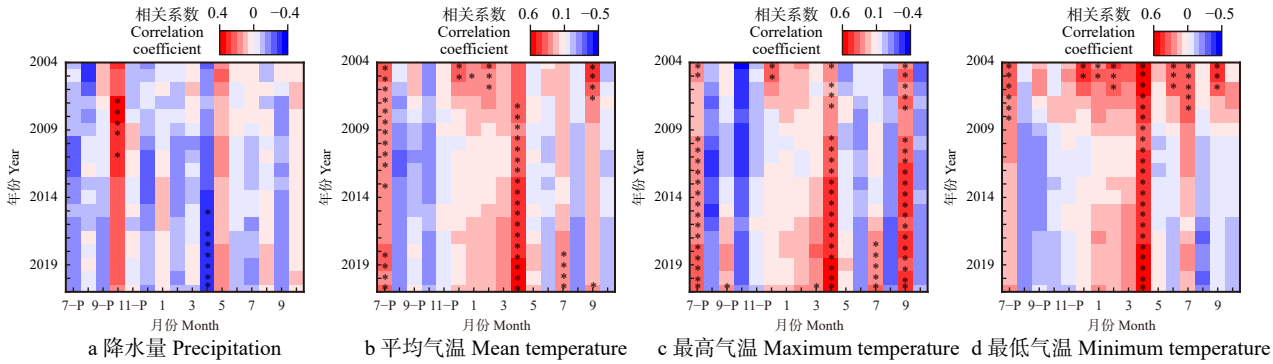


图 5 臭冷杉树轮宽度与气候因子的滑动相关分析

Fig. 5 Moving correlation analysis of *Abies nephrolepis* ring width with climate factors

气温呈现较为稳定的显著负相关($P < 0.05$)，与上年 8—9 月平均气温负相关逐渐增强，与当年 4 月正相关关系逐年减弱，当年 2 月、4 月、6 月最低气温对径向生长的促进作用逐年减弱，且 4 月更明显，上年 9—10 月、当年 5 月、9 月对鱼鳞云杉径向生长的抑制作用逐渐增强(图 6)。

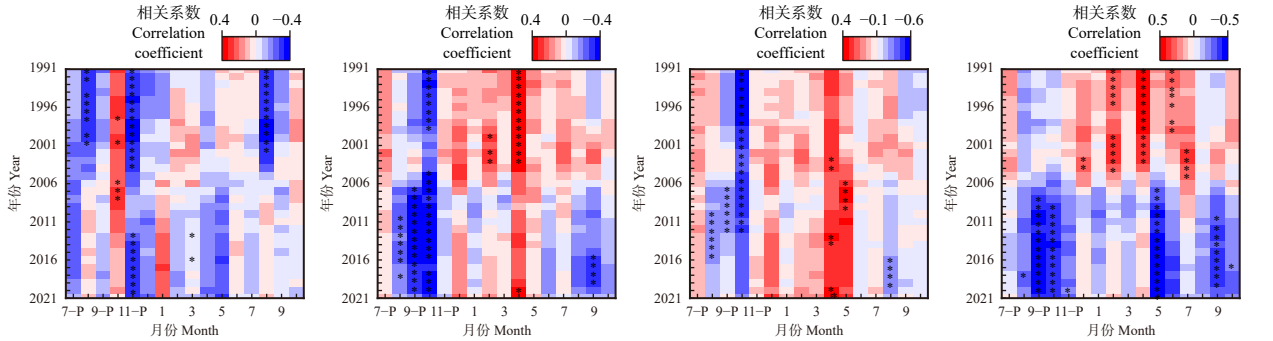


图 6 鱼鳞云杉树轮宽度与气候因子的滑动相关分析

Fig. 6 Moving correlation analysis of *Picea jezoensis* ring width with climate factors

3.3 气候因子对树轮宽度的贡献

图 7 分析了主要气候因子对各树种径向生长的贡献程度，生长季温度贡献最大。显著影响红松树轮宽度的气候因子中，3 月平均气温的贡献率最大为 34.56%，其次是 6 月最低气温和 7 月最低气温，分别为 18.08% 和 12.92%，而上年 7 月平均气温的贡献率较小，为 4.88%。显著影响臭冷杉树轮宽度的气候因子中，4 月最低气温和 7 月平均气温的贡献率较大，分别为 22.29% 和 18.23%，其次是 2 月最低气温和 4 月最高气温，为 9.83% 和 10.21%，而 1 月平均气温的贡献率较小，仅为 2.99%。影响鱼鳞云杉树轮宽度的显著气候因子中，4 月最低温的贡献率最大，为 60.89%，且 3 个针叶树种均为生长季最低气温的贡献率最大(表 2)，这表明温度是生长季初期限制 3 个针叶树种生长的主要因素。

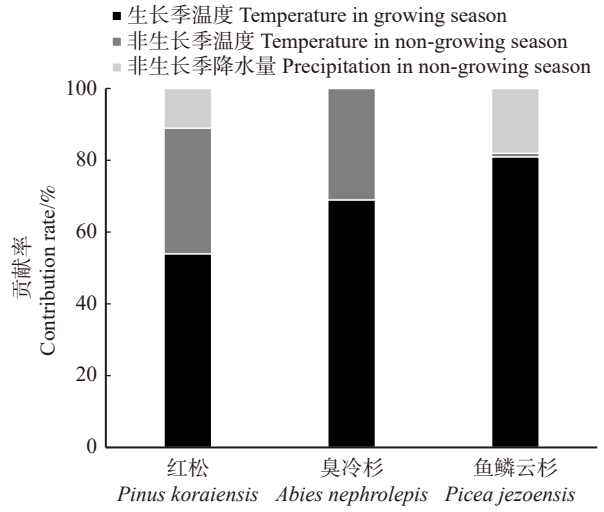


图 7 主要气候因子的贡献率

Fig. 7 Contribution rates of main climatic factors

4 讨 论

气温和降水是影响金沟岭林场针叶树径向生长的主要因素。本研究中的红松和臭冷杉与 1—4 月气温呈现正相关，可能是由于该时期属于生长季前期，气温升高能促进地温回升，进而加快冻土解冻，延长树木的生长期[26-27]。因此，较高的生长季前期气温有助于红松和臭冷杉形成较宽的年轮。在显著气候因子中，生长季最低气温的贡献率对树轮宽度影响最大，生长季早期最低气温适当升高有利于土壤解冻，提高叶片活性，延长生长季，形成较宽年轮[28]。气温对于树木生长的影响还存在“滞后效应”[29–30]，同时，

表 2　主要气候因子的相对贡献率

Tab. 2　Relative contribution rates of main climatic factors

树种 Tree species	主要气候因子 Main climatic factor	贡献率 Contribution rate/%
红松 *Pinus koraiensis*	上年7月平均气温 Average temperature in July of the previous year	4.88
	上年7月最低气温 Minimum temperature in July of the previous year	6.05
	3月平均气温 Average temperature in March	34.56
	5月最低气温 Minimum temperature in May	11.95
	6月最低气温 Minimum temperature in June	18.08
	7月最低气温 Minimum temperature in July	12.92
	1月降水量 Precipitation in January	11.56
	上年7月最高气温 Maximum temperature in July of the previous year	18.41
臭冷杉 *Abies nephrolepis*	上年12月最低气温 Minimum temperature in December of the previous year	6.55
	1月平均气温 Average temperature in January	2.99
	2月最低气温 Minimum temperature in February	9.83
	3月最低气温 Minimum temperature in March	6.17
	4月最高气温 Maximum temperature in April	10.21
	4月最低气温 Minimum temperature in April	22.29
	7月平均气温 Average temperature in July	18.23
	12月最高气温 Maximum temperature in December	5.31
鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*	上年10月降水量 Precipitation in October of the previous year	0.84
	2月最低气温 Minimum temperature in February	17.81
	4月最高气温 Maximum temperature in April	20.46
	4月最低气温 Minimum temperature in April	60.89

也有研究发现，因秋冬季降水量较少，气温在秋冬季对树木的抑制作用会加强[31]，在本研究中鱼鳞云杉的树轮宽度与前一年 10 月气温呈现负相关印证了这一发现。降水作为重要的气候因子，本研究中的 3 个针叶树种树轮宽度与降水量多表现为负相关，这可能是由于红松、臭冷杉、鱼鳞云杉都属于浅根型树种，对土壤水分要求较高[27]，较多的降水量会造成土壤含水量过高，致使树木根部产生无氧呼吸，对树木的生长产生不利影响[6]。

本研究中，3 个针叶树种随时间有不同的动态变化，且响应程度不同。红松与当年夏季最高气温的负相关性逐渐显著，甚至在当年 5—6 月最低气温出现由显著正相关转为显著负相关，这是因为气温升高导致的干旱胁迫是限制红松生长的主要因素[32−33]。鱼鳞云杉对降水量的响应也出现了类似的“响应分异”的现象，在生长季初，鱼鳞云杉的径向生长与降水量呈现显著负相关，但随着夏季气温的不断上升，降水缓解了干旱胁迫促进了鱼鳞云杉的生长，因此两者之间又转为正相关。同时，气温对鱼鳞云杉径向生长的抑制作用有逐渐增强的趋势，这可能与鱼鳞云杉耐阴、耐寒，喜湿润的生长特性有关[31,34]。

通过层次分割分析法对与各树种树轮宽度生长显著相关的气候因子进行量化发现，生长季气温对 3 个树种树轮宽度生长的贡献率最高，进一步证实了气温作为主控因子对树木径向生长的重要作用。综上所述，随着气温上升和土壤水分的改变而产生的干旱胁迫是对 3 个树种树木产生抑制作用的主要原因。

5　结　　论

本研究构建了云冷杉针叶混交林红松、臭冷杉和鱼鳞云杉的标准化年表。通过相关分析、滑动相关分析、贡献程度分析证实了气温和降水是影响 3 种针叶树种径向生长的主要气候因子，气候因子对各树种树轮生长存在一定的“滞后效应”。生长季内气温变化对树轮宽度生长的贡献率最高。本研究结果有助于了解研究区气候因子对树木年轮宽度的影响情况，但本研究样地位置相对集中，在后续的研究中可以进一步对不同海拔高度、不同立地条件的树轮样芯进行采集，不断完善该地区树木年轮资料库，为该地区森林经营管理措施提供理论及数据参考。

参　考　文　献

[1] Liang H, Huang J G, Ma Q, et al. Contributions of competition and climate on radial growth of *Pinus massoniana* in subtropics of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 274: 7−17.

[2] Buechling A, Martin P H, Canham C D. Climate and competition

effects on tree growth in rocky mountain forests[J]. Journal of Ecology, 2017, 105(6): 1636−1647.

[3] 刘敏, 毛子军, 历悦, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1341−1352.
Liu M, Mao Z J, Li Y, et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatical factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1341−1352.

[4] Huang J P, Wang T H, Wang W C, et al. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(19): 11398−11416.

[5] 李广起, 白帆, 桑卫国. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 500−511.
Li G Q, Bai F, Sang W G. Different responses of radial growth to climate warming in *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 500−511.

[6] 于健. 长白山阔叶红松林主要树种径向生长对气候变化响应及温度重建 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Yu J. Response of radial growth of main tree species of broad-leaved Korean pine forest to climate change in Changbai Mountain and temperature reconstruction [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[7] Gao L, Zhang Y, Wang X, et al. Sensitivity of three dominant tree species from the upper boundary of their forest type to climate change at Changbai Mountain, Northeastern China[J]. Tree-ring Research, 2018, 74(1): 39−49.

[8] 于大炮, 周莉, 代力民, 等. 树木年轮分析在全球变化研究中的应用 [J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 91−96.
Yu D P, Zhou L, Dai L M, et al. Application of dendrochronology in global change research[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 91−96.

[9] 于大炮, 周莉, 董百丽, 等. 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 30−34.
Yu D P, Zhou L, Dong B L, et al. Structure and dynamics of *Betula ermanii* population on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 30−34.

[10] 张雪, 高露双, 丘阳, 等. 长白山红松不同树高处径向生长特征及其对气候的响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2978−2984.
Zhang X, Gao L S, Qiu Y, et al. Characteristics of Korean pine (*Pinus koraiensis*) radial growth at different heights and its response to climate change on Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2978−2984.

[11] Liang E, Shao X, Hu Y, et al. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of Meyer spruce(*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China[J]. Trees Structure and Function, 2001, 15(4): 230−235.

[12] Yu D, Wang Q, Wang Y, et al. Climatic effects on radial growth of major tree species on Changbai Mountain[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(5): 921−933.

[13] 秦进. 基于树木年轮的秦岭林线典型树种对气候的响应与区域气温重建 [D]. 西安: 西北大学, 2018.
Qin J. The tree-ring based study on response of typical timberline tree species in the Qinling Mountains to climate and regional temperature reconstruction[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.

[14] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate[J]. The Holocene, 1996, 6(1): 62−68.

[15] 吴笃信. 大兴安岭地区多点树轮序列对气候变化的响应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
Wu D X. The response of multi-point tree ring sequence to climate change in the Greater Khingan range[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.

[16] Zhang X Q, Sophan C, Fu L Y, et al. Climate-sensitive tree height–diameter allometry for Chinese fir in southern China[J]. Forestry, 2019, 92(2): 167−176.

[17] Zhang X Q, Wang Z, Sophan C, et al. Relative contributions of competition, stand structure, age, and climate factors to tree mortality of Chinese fir plantations: long-term spacing trials in southern China [J/OL]. Forest Ecology and Management, 2020, 465: 118103[2023−01−23]. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118103.

[18] 韩学利, 张宇彤, 孙帅超. 基于 WinDENDRO 的木芯样本年轮宽度分析与应用 [J]. 陕西林业科技, 2018, 46(6): 94−98.
Han X L, Zhang Y T, Sun S C. WinDENDRO-based analysis of ring width of wood cores[J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2018, 46(6): 94−98.

[19] Cufar K, Grabner M, Morgós A, et al. Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe[J]. Trees, 2014, 28: 1267−1277.

[20] 赵守栋, 江源, 焦亮, 等. ARSTAN 程序和 R 语言 dplR 扩展包进行树轮年表分析的比较研究 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7494−7502.
Zhao S D, Jiang Y, Jiao L, et al. A comparative analysis of ARSTAN and the dplR package of R language in analyses of tree ring chronologies[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7494−7502.

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

[22] 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.

[23] Franco B, Kishor W. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 303−311.

[24] R Core Team. R A language and environment for statistical

computing 2014 [M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015.

[25] Zhang X Q, Wang H C, Chhin S, et al. Effects of competition, age and climate on tree slenderness of Chinese fir plantations in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 458: 117815.

[26] Huber N, Bugmann H, Lafond V. Global sensitivity analysis of a dynamic vegetation model: model sensitivity depends on successional time, climate and competitive interactions[J]. Ecological Modelling, 2018, 368(1): 377−390.

[27] 姜倩倩, 田娜娜, 夏泰英, 等. 温度、降水与树木径向生长关系研究进展 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2012, 43(3): 480−482.
Jiang Q Q, Tian N N, Xia T Y, et al. The reaserch progress of relationship among temperature, precipitation and tree growth[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2012, 43(3): 480−482.

[28] 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.

[29] 韦玉贵, 彭琬钰, 邱颖青, 等. 庐山日本柳杉水分利用效率对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(3): 48−57.
Wei Y G, Peng W Y, Qiu Y Q, et al. Response of water use efficiency of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, Jiangxi Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(3): 48−57.

[30] 王兆鹏, 张同文, 袁玉江, 等. 罗霄山南部 4 个针叶树种生长特征及其气候响应对比分析 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(12): 1303−13133.
Wang Z P, Zhang T W, Yuan Y J, et al. Comparative analysis of growth characteristics and climate responses in four coniferous tree species of southern Luoxiao Mountains[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(12): 1303−1313.

[31] 郭媛媛, 江源. 环境因子对树木形成层活动及木质部发生影响的研究进展 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2015, 51(6): 613−619.
Guo Y Y, Jiang Y. Research progress on the effects of environmental factors on cambium activity and xylem occurrence of trees[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(6): 613−619.

[32] 黄伟程, 高露双, 赵冰倩. 不同间伐强度下竞争对东北阔叶红松林主要树种生长−气候关系的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 30−39.
Huang W C, Gao L S, Zhao B Q. Influence of competition on the relationship between tree growth and climate of main tree species in the broadleaved Korean pine forest under different thinning intensities in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 30−39.

[33] 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. 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.

[34] He D N , Peng D L, Yang H, et al. The response of seedlings and saplings to canopy structure and light in different gaps in a spruce-fir mixed stand in Changbai Mountains, China [J/OL]. Forest Ecology and Management, 2023, 546, 121365[2023−08−28]. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121365.

（责任编辑　范　娟　孟　瑶
责任编委　孟　平）