

DOI: 10.5846/stxb201812292845

苑丹阳, 赵慧颖, 李宗善, 朱良军, 国森, 张远东, 王晓春. 伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(4): 1150-1160.

Yuan D Y, Zhao H Y, Li Z S, Zhu L J, Guo M, Zhang Y D, Wang X C. Radial growth of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* response to climate change in Yichun city, Heilongjiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1150-1160.

伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应

苑丹阳^{1,2}, 赵慧颖³, 李宗善⁴, 朱良军^{1,2}, 国森⁵, 张远东⁶, 王晓春^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院生态研究中心, 哈尔滨 150040

2 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

3 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

4 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

5 黑龙江省伊春林业学校, 伊春 153000

6 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘要: 树木生长-气候关系对准确评估气候变化对森林生态系统影响、预测森林生产力与植被动态及揭示树木对气候变化的响应策略至关重要。在全球变暖背景下, 升温可能会对树木的生长产生影响, 从而改变区域森林生态系统的生产力或碳储量。本研究利用生长-气候响应函数、滑动相关分析等树木年轮学方法, 探讨伊春地区阔叶红松林内红松和红皮云杉径向生长的主要限制因子及两者径向生长对快速升温(1980年后)响应的异同。结果表明: 1980年前红松径向生长有明显加速的趋势, 红皮云杉上升趋势较弱; 而1980年后红松径向生长趋势显著下降, 红皮云杉则下降不明显。红皮云杉径向生长与上一年9月及当年6月平均气温显著负相关, 而红松径向生长与上一年12月及当年1月、4月和6月最低气温显著正相关。1980年快速升温后, 高温对两树种生长的抑制作用增强, 尤其是红松。生长季末(9月)降水对红松和红皮云杉的限制作用由升温前的负相关转变为升温后的显著正相关。温度是限制红松和红皮云杉径向生长的主要气候因子, 降水影响相对较弱; 其中红松径向生长对气候变化的响应比红皮云杉更敏感。快速升温后, 红松和红皮云杉生长-气候关系的变化可能与升温导致的暖干化有关。若气候变暖持续或加剧, 二者径向生长的气候限制因子也将由温度转变为水分; 红松和红皮云杉会出现生长衰退, 尤其是红松。

关键词: 树轮; 气候变暖; 生长-气候关系; 径向生长; 红松; 红皮云杉

Radial growth of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* response to climate change in Yichun City, Heilongjiang Province

YUAN Danyang^{1,2}, ZHAO Huiying³, LI Zongshan⁴, ZHU Liangjun^{1,2}, GUO Miao⁵, ZHANG Yuandong⁶, Wang Xiaochun^{1,2,*}

1 Center for Ecological Research, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Harbin 150040, China

3 Heilongjiang Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

5 Yichun Forestry School in Heilongjiang Province, Yichun 153000, China

6 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Tree growth-climate relationship is critical for accurately assessing the impact of climate change on forest

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877426, 31770490); 中央高校基本科研业务费高层次人才发展专项(2572017DG02); 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室基金(stqx2018zd02)

收稿日期: 2018-12-29; **网络出版日期:** 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangx@nefu.edu.cn

ecosystems, predicting forest productivity and vegetation dynamics, and revealing tree adaptation strategies to climate change. In the context of global warming, rising temperatures may have an impact on tree growth, thereby changing the productivity or carbon storage in regional forest ecosystems. We investigated the main climatic limiting factors of radial growth of Korean pine (*Pinus koraiensis*) and Korean spruce (*Picea koraiensis*) in broad-leaved Korean pine forests in Yichun city, China. We also discussed the similarities and differences of their response to rapid warming (after 1980) by using the growth-climate response function analysis, moving correlation analysis, and other dendroclimatology methods. The results showed that the radial growth of Korean pine was accelerated before 1980, and the upward trend of Korean spruce was weaker than that of Korean pine. However, after 1980, the radial growth trend of Korean pine was significantly decreased, while that of Korean spruce was not. The radial growth of Korean spruce was significantly negatively correlated with the mean temperature in previous September and current June, while the radial growth of Korean pine was significantly positively correlated with the minimum temperatures in previous December and January, April and June of the current year. After rapid warming in 1980, the high temperature significantly increased the growth inhibition of the two species, especially for the Korean pine. The limiting effect of precipitation at the end of growing season (September) on Korean pine and Korean spruce changed from the negative correlation before warming to significant positive correlation after warming. In general, temperature is the main climate factor limiting the radial growth of Korean spruce and Korean, followed by precipitation. The radial growth of Korean pine was more sensitive to climate change than that of Korean spruce. After rapid warming, the change of growth-climate relationship of Korean pine and Korean spruce may be related to the 'Warm-dry Phenomenon' caused by the warming. If climate warming continues or intensifies, the climatic limiting factor of the radial growth of the two species will change from temperature to moisture, and their radial growth will decline, especially for Korean pine.

Key Words: tree rings; climate warming; growth-climate relationship; radial growth; *Pinus koraiensis*; *Picea koraiensis*

近一百年来,全球气候呈现显著的持续变暖趋势,全球平均气温每 10 年大约上升(0.85 ± 0.15) $^{\circ}\text{C}$,平均降水量增加了 21 mm^[1]。气候变化是影响森林结构、功能和动态变化的关键因素之一,全球气候变暖日益突出,森林生态系统的结构、功能及其动态均受到了不同程度的影响^[2-3]。野外调查、增温实验、模型模拟等手段均表明气候变暖将会对森林生态系统产生重要影响,尤其是在中高纬度以及高海拔区域^[4]。中国东北森林面积大且纬度较高,是对气候变化最为敏感的地区之一^[5]。阔叶红松林是中国东北长白山、完达山及小兴安岭地区的地带性顶极植被,其建群种独特、结构复杂、生物多样性丰富,是维系我国乃至东北亚生态经济安全的重要保障^[6]。在过去一个多世纪中,人为采伐及自然干扰频繁,使东北地区原始阔叶红松林的数量正在逐年递减^[7]。近年来,有研究表明气候因素,尤其是气候变暖会导致阔叶红树林衰退加剧,部分针叶树出现了衰退或大面积死亡现象^[7]。

尽管已有学者就阔叶红树林内的针叶树种开展了一些研究,但主要集中在红松等针叶树的生长衰退、生长-气候关系及其对气候变暖响应等方面^[7-10],目前红松与其他伴生针叶树种的对比研究较少。部分研究指出气候变暖会对红松生长产生较大影响,甚至会加速红松生长衰退或死亡。例如,尹红等^[11]发现由于大气 CO₂ 浓度持续增加,温度不断上升,小兴安岭地区红松的生长期提前,但是谷地云冷杉林却出现随气候变暖生长衰退的现象^[12]。然而,在长白山阔叶红松林分布上限,红松径向生长却与温度升高具有一致的趋势,而鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)生长则出现随温度升高而下降的现象^[13]。升温导致的水分胁迫可能是造成分布上限鱼鳞云杉生长与温度变化趋势相反的重要原因。姚启超等^[14]也发现小兴安岭丰林臭冷杉(*Abies nephrolepis*)和红皮云杉(*Picea koraiensis*)径向生长主要受温度制约,并且云冷杉衰退的原因可能是大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)、太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的相位转换造成区域升温引起的。不同生境、不同年龄红松对气候的响应也不一致,Wang 等^[8]发现近几十年的快速升温

导致幼龄及偏南部的红松出现生长衰退。红松是小兴安岭阔叶红松林内的主要建群树种,红皮云杉为其重要的伴生树种,两者的分布区域及生长习性具有极大的相似性^[15];但两者之间与气候关系是否完全一致尚不清楚,两者对升温的响应关系是否一致有待研究。

小兴安岭伊春地区是阔叶红松林在中国分布最为集中且保存完好的核心地区,在东北地区的生态与气候调节中起着举足轻重的作用^[16-17]。中国东北是全球变暖最显著的区域之一,也是近年来气候变化较为敏感的区域之一^[18-19]。在全球气候变暖的大背景下,小兴安岭伊春地区阔叶红松林内主要针叶树种红松及其伴生树种红皮云杉如何响应气候变化及响应方式是否存在差异?升温后两者径向生长与气候因子之间是否会出现前人研究中的“响应分异现象”?解决以上问题对于阔叶红松林生态系统的保护和恢复至关重要,对理解和应对全球气候变化意义重大。红松和红皮云杉作为阔叶红松林主要优势树种,在生态学和经济具有重要价值^[10,20]。因此,本研究在小兴安岭伊春地区选取典型阔叶红松林作为研究对象,开展红松和红皮云杉生长-气候关系及其对气候变暖的响应异同研究,以期为全球变暖背景下该地区阔叶红松林的恢复、保护及利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省伊春市溪水国家森林公园,该区域位于小兴安岭中麓南坡、地形平缓,属典型温带大陆性湿润季风气候。春季风大少雨,易干旱;夏季高温多雨;秋季气温下降速度快,9月中旬左右出现早霜;冬季受西伯利亚和蒙古高压影响和控制,寒冷而干燥^[6]。附近气象站器测数据表明,1958年以来该区年平均气温 0°C 左右,其中11月至3月平均气温都在 0°C 以下,5—9月平均气温一般高于 10°C ;多年平均降水量为700 mm左右,雨季(6—9月)占全年降水量的70%以上(图1)。值得注意的是,该地区1980年前年平均气温趋于稳定,但1980年后却以 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率快速升高;年降水量在1980年前有显著下降的趋势(-8.55 mm/a),而在1980年后下降趋势减弱(-3.67 mm/a),见图2。

研究区地带性土壤主要是在花岗岩上发育起来的暗棕壤,在其他位置常常分布有一定面积的草甸土及沼

泽土,例如山间谷地和河谷阶地等位置。研究区以中低山为主要地形。研究区主要植被林型为阔叶红树林,优势树种以红松为主,伴生有红皮云杉(*Picea koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula costata*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)等乔木。

红松是松科松属的常绿乔木,喜光性强,对土壤水分要求较高,不宜过干、过湿的土壤及严寒气候。浅根性,常生于排水良好的湿润山坡上,对大气湿度较敏感。红皮云杉是松科云杉属常绿乔木,喜空气湿度大、土壤肥厚而排水良好的环境,较耐荫、耐寒,也耐干旱;浅根性,侧根发达,生长较快。

1.2 样品采集和年表建立

2015年7月,在溪水国家森林公园内选择人为干扰较小的区域进行树木年轮样品采集(经度 $129^{\circ}1.294'$ E,纬度 $47^{\circ}54.474'$ N,海拔346 m)。挑选生长良好且径级较大的红松和红皮云杉作为取样目标,利用生长锥

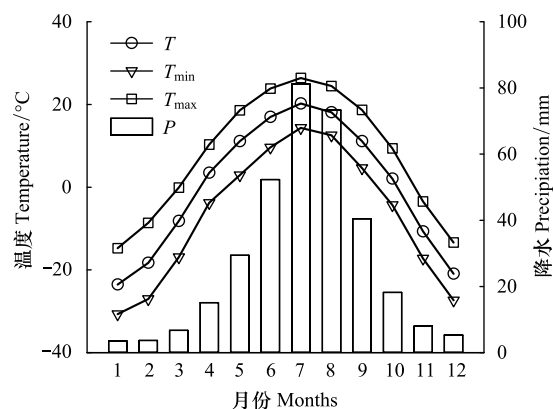


图1 五营1958—2011年月平均气温和月降水量变化

Fig. 1 Variations of monthly mean temperature and total precipitation in Wuying weather station from 1958 to 2011

T : 平均温度 Mean monthly temperature; P : 降水 Precipitation; $T_{\min}$: 平均最低温度 Mean monthly minimum temperature; $T_{\max}$: 平均最高温度 Mean monthly maximum temperature

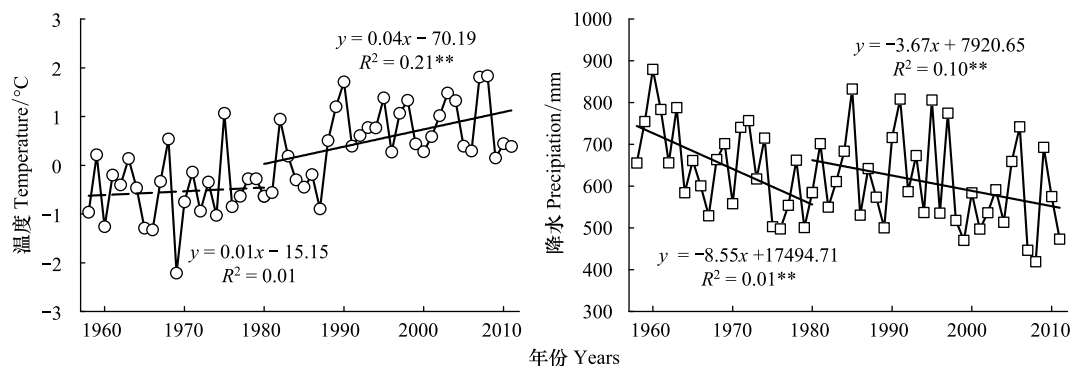


图2 1958—2011年五营年平均气温和总降水变化

Fig.2 Variation of annual mean temperature and precipitation in Wuying from 1958 to 2011

* * $P < 0.01$. 短划线为气象资料的分段线性拟合趋势线

(5.15 mm)于胸高处(1.3 m)钻取树木年轮样芯。每个树种共采集 20 棵树,每棵树从南北两个方向采集 2 个样芯。将所取样芯放入塑料管内,并对样芯进行编号,同时记录每棵树的生境。

将采集的样品带回实验室,按照树木年轮学传统方法,完成红松和红皮云杉年轮样品的固定、风干、打磨等预处理。打磨时按砂纸目数由低到高的次序逐步打磨,直到在体式解剖镜下能够看清细胞并分辨年轮界限为止。采用骨架图法在解剖镜下对每个样品进行目视交叉定年^[21],待定年完成后利用 Velmex 年轮宽度测量仪(Velmex Tree-Ring System, Velmex, Inc.)逐年量测样芯上每一年的宽度,测量精度为 0.001 mm。运用 COFECHA 程序对交叉定年及测量质量进行检验^[22],将与主序列相关性差或难以交叉定年的样芯剔除。年表建立由 ARSTAN 程序完成^[23],采用负指数函数或线性回归拟合方法进行去趋势,剔除树龄及其他非气候因素导致的生长趋势。对去除生长趋势的序列进行双权重平均法合成红松及红皮云杉的标准年表,最终用于建立年表的样芯为各树种 35 个。

1.3 气象资料与统计分析

气象数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供。本文选取距离采样点最近的五营气象站(48°7' N, 129°15' E, 海拔 299.1 m)的气象资料用于年轮-气候分析。气候要素包含 1958—2011 年逐月的平均气温、平均最低气温、平均最高气温及总降水量。

利用相关分析评估月气候对红松和红皮云杉径向生长的影响,找出树木生长的主要限制因子。考虑到上一年气候对当年树木在径向生长的影响,选择上一年 3 月到当年 9 月(总计 19 个月)作为相关分析窗口。为评估快速升温(1980 年后)对生长-气候关系的影响,本研究比较了 1980 年升温前后主要气候因子与红松、红皮云杉径向生长的关系差异,在此基础上,进一步利用滑动相关分析尝试揭示红松及红皮云杉生长-气候关系的稳定性,滑动窗口为 31 年,步长为 1 年。利用 SPSS 19.5 软件完成统计分析, Sigma Plot 12.5 和 Excel 2016 等软件进行图表制作。

2 研究结果

2.1 年表统计特征比较

红松和红皮云杉年表整体变化趋势差异显著,尤其是在 1980 年前后(图 3)。1980 年前红松年轮指数有明显上升趋势(0.05 a^{-1} , $R^2 = 0.64$),红皮云杉年轮指数虽有上升趋势但不如红松明显;1980 年后红松年轮指数出现显著下降趋势(-0.03 a^{-1} , $R^2 = 0.44$),而红皮云杉年轮指数下降趋势较弱。

年表统计量特征可以反映出树木在生长过程中的一些基本特性,同时也能反映出树轮年表所含有不同频率信息量的多少。伊春地区红松和红皮云杉标准年表的平均敏感度(MS)分别为 0.25、0.21(表 1),表明伊春

地区红松和红皮云杉的径向生长对气候变化较为敏感,受气候因子的限制作用较强。红松和红皮云杉标准年表的一阶自相关系数(AC)分别为 0.75 和 0.82,说明伊春地区的红松和红皮云杉年轮生长受前一年气候因子影响较大(表 1)。另外,红松和红皮云杉样本总体代表性(EPS)均高于 0.85,表明年表具有区域代表性(表 1)。总体来说,各项年表特征均表明,红松和红皮云杉年表均适用于树木年轮气候学分析。

表 1 红松和红皮云杉标准年表的主要统计特征

树种 Tree species	时间跨度 Time span SSS>0.85	标准年表特征值 Eigenvalue of standard chronology						公共区间统计值 Common interval analysis (1912—2013)		
		MS	SD	MC	BT	WT	AC	SNR	EPS	VF
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	1852—2014	0.25	0.45	0.17	0.52	0.80	0.75	21.3	0.96	57.8
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	1926—2014	0.21	0.35	0.45	0.45	0.80	0.82	18.5	0.95	50.3

SSS: 子样本信号强度 Sub-sample signal strength; MS: 平均敏感度 Mean sensitivity; SD: 标准差 Standard deviation; MC: 平均相关系数 Mean correlation; AC: 一阶自相关 First order autocorrelation; SNR: 信噪比 Signal-to-noise ratio; EPS: 样本量的总体解释信号 Expressed population signal; VF: 第一特征根解释量 Variance in first eigenvector (%)

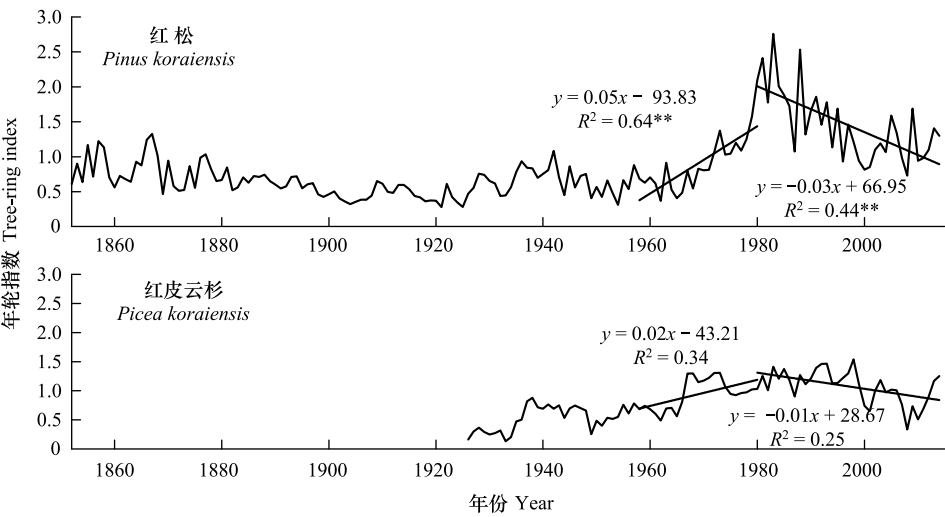


图 3 红松和红皮云杉标准年表的变化趋势

Fig.3 Variations of the tree-ring standard chronologies of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis*

* * $P < 0.01$

2.2 径向生长与气候因子的关系

红皮云杉和红松径向生长的主要限制因子均为温度(图 4),但红皮云杉和红松径向生长与气候因子的响应模式或程度存在显著差异。红松径向生长主要受到月最低温度的限制,而红皮云杉径向生长则主要受到月平均温度的限制。其中,红松径向生长与上一年 4 月、12 和当年 1 月、4 月、6 月最低温度显著正相关($P < 0.05$);但与月平均温度和月最高温度负相关($P > 0.05$)。红皮云杉径向生长与上一年 9 月最低温度显著负相关($P < 0.05$),与当年 6 月平均温度和月最高温度显著负相关($P < 0.05$)。降水对红皮云杉和红松径向生长的影响明显弱于温度。当年 4 月降水与红松径向生长显著正相关($P < 0.05$),而与红皮云杉径向生长的相关不显著($P > 0.05$)(图 4)。

2.3 两树种径向生长对升温的响应差异

由于伊春地区气候(温度和降水)条件在 1980 年前后明显不同(图 2 和 3),因此分两个时间段(1958—

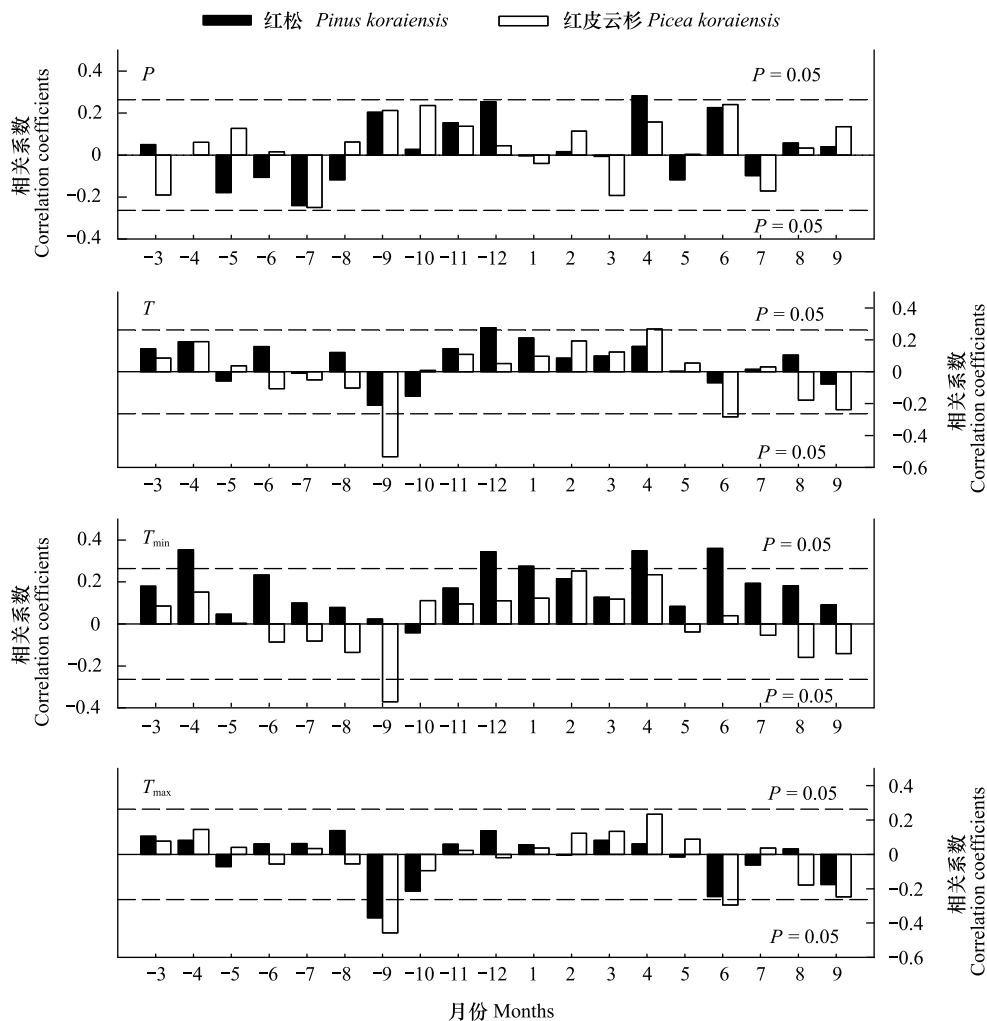


图4 红松和红皮云杉标准年表与月气候因子的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between tree-ring standard chronologies of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* and monthly climatic factors

虚线表示 95%置信水平. -3: 上一年 3 月 March of previous year. 1: 当年 1 月 January of current year

1979 年和 1980—2011 年) 分别评估温度和降水对两树种生长的影响。在 1980 年后, 温度和降水对红松径向生长的促进/抑制作用明显高于红皮云杉(图 5)。其中, 红松径向生长与上一年 5 月及当年 6、7 月温度的相关性由升温前的正相关变为升温后的显著负相关($P < 0.05$); 红松径向生长与上一年 8 月温度的相关性由升温前的显著负相关($P < 0.05$)变为升温后的不相关, 而与上一年 9 月温度的负相关性在升温后明显增加。红皮云杉径向生长与上一年 9 月温度的负相关关系在升温后减弱, 而与当年 6 月温度的负相关性在升温后明显增强。

红松径向生长与上一年 9 月降水由负相关变为升温后的显著正相关($P < 0.05$), 与当年 5、6 月降水的相关性在升温后明显增加; 红皮云杉径向生长与上一年及当年 9 月降水由升温前的负相关变为升温后的显著正相关($P < 0.05$), 与当年 3 月降水则由升温前的正相关变为升温后的显著负相关($P < 0.05$)。

滑动相关分析结果表明(图 6), 红皮云杉和红松与生长季温度及降水的相关性随 1980 年快速升温而发生显著变化。其中, 红松径向生长与生长季均温的相关性由升温前的不相关($P > 0.05$)变为升温后的显著负相关($P < 0.05$), 而红皮云杉径向生长与生长季均温的负相关性在升温后明显增加。

红松径向生长与生长季降水由升温前的不相关变为升温后的显著正相关($P < 0.05$), 而红皮云杉径向生长与生长季降水的相关性也在升温后明显增加。

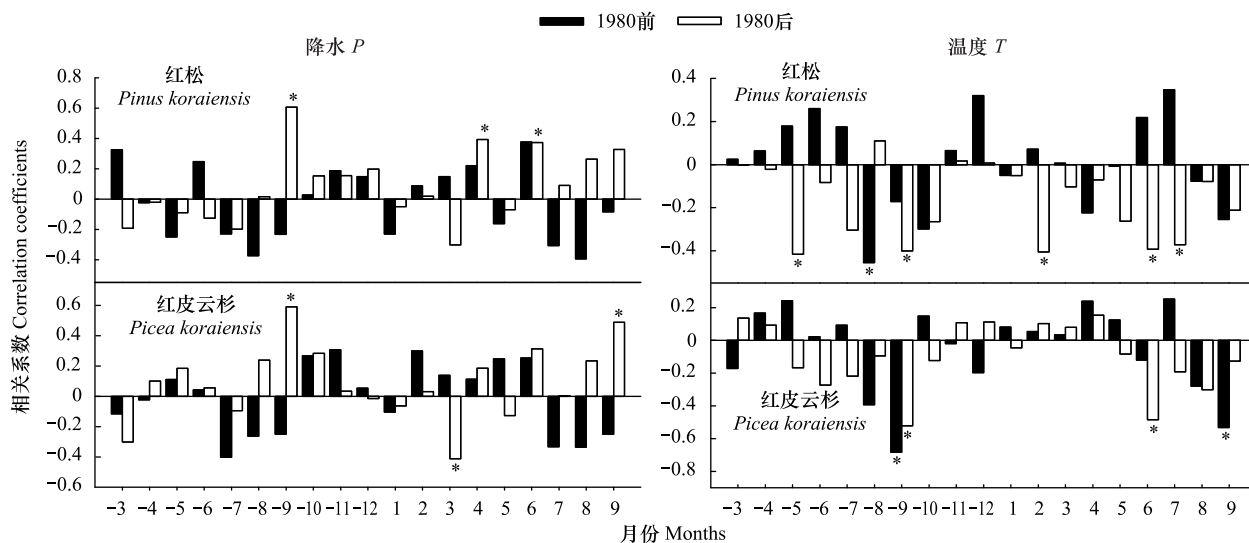


图5 升温前后红松和红皮云杉标准年表与月降水、均温的相关性

Fig.5 Correlation coefficients between tree-ring standard chronologies of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* and monthly total precipitation and mean temperature around the rapid warming

$P^* < 0.05$

3 讨论

3.1 红松和红皮云杉径向生长与气候因子的关系

本研究结果表明,温度是伊春地区阔叶红松林红松和红皮云杉径向生长的主要气候限制因子,其对两者径向生长的限制作用在限制程度或模式上存在显著差异;红松径向生长主要受到月最低温度的限制,而红皮云杉径向生长则主要受到月平均温度的限制。红松径向生长与生长季前(4月)最低温度显著正相关($P < 0.05$),这与朱良军等^[7]、李广起等^[13]研究结果相似,生长季前(4月)充足的热量是树木形成宽轮的主要原因之一。春季是树木结束休眠转入生长季的重要时期,适宜的温度有利于树木打破休眠,促进形成层活动;伊春地区春季开始时间较晚,故4月最低温度对红松径向生长的促进作用较为合理,早春低温可直接通过影响冻土和雪被融化速率以及改变当年有效积温等途径,调整树木生长期长短,也可影响光合产物积累直接决定宽轮或窄轮的形成^[24]。红松径向生长与冬季最低温度(12—次年1月)显著正相关($P < 0.05$),即研究区冬季较为温暖时,叶肉组织等可以避免被破坏,这样能够保证来年红松的正常代谢活动,进而增加其来年的生长潜力^[20]。同时,冬季温度偏高,可降低树木休眠时维持生理活动所需能量,减少能量消耗,促进树木来年生长^[25]。

红皮云杉径向生长与上一年9月温度因子(平均温度、最高温度和最低温度)显著负相关($P < 0.05$),红松径向生长与上一年9月最高温度显著负相关($P < 0.05$),即上一年气候变化也可能影响到当年树木的生长,这种现象通常被称为“滞后效应”^[26]。当上一年生长季末期温度较低时,树木叶肉细胞中的原生质可能会产生

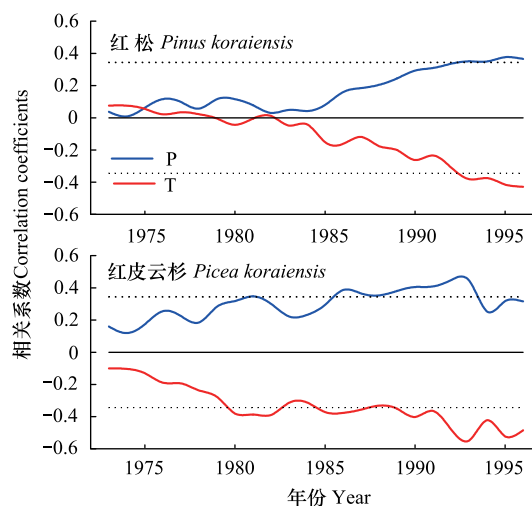


图6 红松和红皮云杉标准年表与生长季均温和降水的滑动相关分析

Fig.6 Moving correlation analysis between tree-ring standard chronologies of *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* and mean temperature and precipitation during growing season

虚线表示 95%置信水平

脱水现象,同时还可能使土壤冻结造成根系的死亡,进而影响树木当年的光合作用、水分和养分的吸收等,从而导致窄轮的形成^[25];同时上一年生长季末期温度偏高,树木生长季延长,加剧了土壤水分蒸发,不利于根系、芽等越冬,减少对当年的营养物质供应,进而减缓当年红松和红皮云杉生长^[10]。另外,生长季末期温度偏高,树木的呼吸作用和蒸腾作用增强,不利于有机物质积累,降低当年红皮云杉的生长量,即温度的升高会增加水分的胁迫作用,从而使两者呈现明显的负相关关系^[8]。

总体而言,气候因子尤其是温度对红松径向生长的限制作用明显强于红皮云杉,可能是红松对生境要求更苛刻的结果^[27]。红松为半阳性树种,对光照,土壤水分及温度变化更为敏感,故生长季温度升高将会显著促进树木的各项生理活动,如提高酶的活性,增强光合作用效率,增加有机物质的积累,进而促进树木生长;但同时也会增强树木的呼吸及蒸腾作用,加快土壤水分的蒸发,加重干旱胁迫,导致生长量降低^[13]。树种生态习性差异可导致树木径向生长对气候因子的响应出现差异已被许多研究证实,如李广起等^[13]通过对长白山红松及鱼鳞云杉的研究发现,处于同一地点的不同树种间气候响应差异明显,红松径向生长与温度升高趋势一致,而鱼鳞云杉径向生长则出现随温度升高而下降的“分离现象”。此外,生境不同也会导致树木出现年轮-气候响应差异,如朱良军等^[7]研究发现小兴安岭阔叶红松林内林隙与非林隙红松、臭冷杉径向生长与主要气候因子存在显著差异,林隙木径向生长比非林隙木更易受到气候等环境因素的影响。

3.2 快速升温对不同树种径向生长的影响

最近,快速升温对树木年轮生长-气候关系的影响已被多数研究提出,尤其是北半球高纬度地区森林。随着温度的升高,树木生长对气候因子的敏感性在近几年呈减弱趋势,表现为气候敏感性的降低或趋势分歧^[28]。如在欧美高纬度地区树木年轮与气候因子之间的敏感性在 1960s 以后随着温度的升高而降低^[29]。树轮气候分异现象广泛存在于北美、欧亚大陆及极地圈内^[28]。然而,在一些树轮记录中却发现了对温度敏感性的增加^[30-32]。气候变暖后树木生长对温度敏感性的变化问题可能存在争论。20 世纪七八十年代以来,我国东北的温度急剧上升,红松和红皮云杉是东北阔叶红松林中重要的针叶树种,对环境变化具有较高的敏感性^[7,11,14]。本研究结果表明,快速升温后,红松和红皮云杉径向生长与温度的负相关性显著增加,而与降水的正相关性显著增加,即两者径向生长对温度的敏感性总体上呈增加趋势,转折点出现在快速升温(1980 年后)前后,该结果进一步证明快速升温后树木对气候因子的敏感性增强且持续变暖将不利于红松及红皮云杉径向生长;这与于健等^[33],高露双等^[34]得出的气候变暖促进红松径向生长的研究结果不一致,这可能是研究区海拔不同所造成的影响。即随海拔而改变的气候或环境条件也会在一定程度上影响树木的生长—气候响应,如周子建等^[35]对长白山不同海拔红松径向生长对气温突变的响应进行研究,得出随着气温持续升高,低海拔红松径向生长可能呈现下降趋势,中、高海拔红松径向生长可能呈现先增加后下降的趋势。不同海拔云杉对升温响应也存在差异,1980 年快速升温导致高海拔鱼鳞云杉生长加速,低海拔鱼鳞云杉生长衰退,但这一结论是否具有普适性需要进一步验证^[9]。

其次随着气温升高,土壤水分蒸发和植物蒸腾加快,当温度达到一定的阈值之后,使原本满足植物生长需求的有利水分条件转变成干旱限制;此时,高温会直接加剧升温所导致的暖干旱现象,进一步加剧处于干旱生境下树木的水分胁迫,抑制树木生长^[9,36]。这与先前部分研究结果相一致,即我国北部地区的兴安落叶松^[37]、中部地区的油松(*Pinus tabulaeformis*)^[38]、南部地区的马尾松(*Pinus massoniana*)^[39]、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[40]在温度持续升高后径向生长均与温度呈负相关,这表明随着气候变暖,大尺度范围下针叶树种均可能会出现生长衰退现象。在地中海的伊比利亚半岛森林^[41]、丹麦的同质园实验^[42]也发现同样的现象。化石资料证据表明,在寒冷的古新世和始新世,松科物种丰度显著增加,而在温暖时期则明显减少;同时,在温暖的中新世和上新世松科物种明显向北收缩^[43]。从中国和世界植被图可以看出针叶树种主要分布在北方地区和高海拔地区,这是否意味着随着气候变暖会导致或者加剧针叶树衰退的现象?其形成原因以及作用机理仍需进一步研究。

同时,在伊春地区,随着暖干旱加剧,红松和红皮云杉径向生长与温度之间出现了先前研究中所出现的响

应分异现象^[13,33,36]。快速升温后,温度和降水对红松径向生长的抑制/促进作用显著高于红皮云杉,温度升高使得红松和红皮云杉与生长季温度和降水的相关性出现显著差异(图6)。相比红皮云杉,红松径向生长对土壤中水分的要求比较严格,不宜在过干或过湿的土壤中生存即红松对水分条件更为敏感^[27],因此,两者生态习性的差异可能是升温对红松径向生长限制作用更显著的主要原因。在环北极地区,与其他科属树种相比,挪威云杉(*Picea abies*)、白云杉(*Picea glauca*)、黑云杉(*Picea mariana*)和西伯利亚云杉(*Picea obovata*)等云杉属树种响应分异现象最为明显^[24]。Wang 等^[8]认为这种生长-温度关系的分异现象主要由于干旱胁迫决定。部分研究表明,升温后树木生长对温度的响应分异现象与树木所处的研究区域以及树种特性密切相关^[44]。李宗善等^[45]在川西卧龙地区发现,该地区的树木生长与温度序列也出现了响应分异现象,造成这种现象的原因可能是温度升高后,使云层覆盖量增加,导致太阳辐射下降,进而树木生长可利用的光合有效辐射下降,造成生长受到抑制。D'Arrigo 等^[46]发现加拿大西北部地区高海拔林线树木生长与夏季温度呈非线性关系,这可能是树木净光合速率下降和升温导致的干旱胁迫共同造成的。Briffa 等^[47]则认为树木径向生长-温度关系的分异现象可能无法仅通过地理位置、采样点或当地气候来解释,并且可能与大规模气候变化或其他非气候驱动因素有关,如与 PDO 或 AMO 的相位转变有关^[3,10,14]。有研究表明温度升高会造成伊春地区冻土的消融甚至消失,加速积雪融化,导致春季径流提前,而过早的径流可能会减少土壤中水分的储存^[12,48]。因此,快速升温后,红松和红皮云杉的径向生长呈下降趋势。红松和红皮云杉径向生长与降水的显著正相关性增加,这可能是快速升温后树木呼吸作用加强,光合作用受阻,同时温度升高土壤水分的蒸腾作用增强,使得土壤水分缺失,从而对两者的径向生长产生抑制作用^[49]。

4 结论

小兴安岭伊春地区红松和红皮云杉径向生长与气候因子的响应变量和幅度存在差异。温度是二者生长的主要限制因子,降水的限制作用相对较弱,红松对气候变化响应比红皮云杉更敏感。均温和高温抑制红松生长,而冬季及生长季初低温促进红松生长,生长季初期及末期温度抑制红皮云杉径向生长;而生长季前(3、4月)降水促进红松径向生长,抑制红皮云杉生长。1980年升温前红松径向生长有明显加速的趋势,升温后则出现显著的下降趋势,而红皮云杉径向生长趋势受升温的影响不明显或不显著。1980年升温后,红皮云杉和红松与生长季温度和降水的相关性变化存在明显差异,可能与升温引发的暖干旱现象有关。持续变暖将加剧暖干旱,红松和红皮云杉将出现衰退尤其是红松,二者径向生长将由温度胁迫转为水分胁迫。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.
- [3] Zhu L J, Wang X C, Pederson N, Chen Z J, Cooper D J, Zhang Y D, Li Z S. Spatial variability in growth-climate relationships of Amur cork tree (*Phellodendron amurense*) and their connections with PDO in Northeast China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(5): 1625-1636.
- [4] 张慧, 邵雪梅, 张永. 不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究进展. 地球环境学报, 2012, 3(3): 845-854.
- [5] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [6] 李俊清, 李景文. 中国东北小兴安岭阔叶红松林更新及其恢复研究(英文). 生态学报, 2003, 23(7): 1268-1277.
- [7] 朱良军, 杨婧雯, 朱辰, 王晓春. 林隙干扰和升温对小兴安岭红松和臭冷杉径向生长的影响. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2085-2095.
- [8] Wang X C, Pederson N, Chen Z J, Lawton K, Zhu C, Han S J. Recent rising temperatures drive younger and southern Korean pine growth decline. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1105-1116.
- [9] Zhu L J, Cooper D J, Yang J W, Zhang X, Wang X C. Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) at two elevation gradient sites of northeast China. Dendrochronologia, 2018, 50: 52-63.
- [10] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1935-1944.

- [11] 尹红, 王靖, 刘洪滨, 黄磊, 朱海峰. 小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应. 生态学报, 2011, 31(24): 7343-7350.
- [12] 王庆贵. 黑龙江省东部山区谷地云冷杉林衰退机理的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [13] 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. 植物生态学报, 2011, 35(5): 500-511.
- [14] 姚启超, 王晓春. 小兴安岭不同海拔臭冷杉年轮-气候关系及大尺度气候影响. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 30-38.
- [15] 王晓春, 赵玉芳. 黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释. 生态学报, 2011, 31(5): 1230-1239.
- [16] 郭树平. 小兴安岭阔叶红松林林分结构与修复. 森林工程, 2014, 30(6): 8-12.
- [17] 刘少冲, 段文标, 冯静, 韩生忠. 林隙对小兴安岭阔叶红松林树种更新及物种多样性的影响. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1381-1388.
- [18] IPCC. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [19] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应. 地理学报, 2003, 58(S1): 75-82.
- [20] 朱良军, 金光泽, 王晓春. 典型阔叶红松林干扰历史重建及干扰形成机制. 植物生态学报, 2015, 39(2): 125-139.
- [21] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Tucson: University of Arizona Press, 1996.
- [22] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.
- [23] Briffa K R, Melvin T M. A closer look at regional curve standardization of tree-ring records: justification of the need, a warning of some pitfalls, and suggested improvements in its application//Hughes M K, Swetnam T W, Diaz H F, eds. Dendroclimatology: Progress and Prospects. Dordrecht: Springer, 2010, 11: 113-145.
- [24] Lloyd A H, Bunn A G. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability. Environmental Research Letters, 2007, 2(4): 045013.
- [25] Wang H, Shao X M, Fang X Q, Jiang Y, Liu C L, Qiao Q. Relationships between tree-ring cell features of *Pinus koraiensis* and climate factors in the Changbai Mountains, Northeastern China. Journal of Forest Research, 2017, 28(1): 105-114.
- [26] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [27] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 张弥, 施婷婷, 韩士杰, 金昌杰. 长白山阔叶红松林主要树种及群落冠层光合特征. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(S1): 83-90.
- [28] D'arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P. On the 'divergence problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 289-305.
- [29] Jacoby G C, D'arrigo R D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(2): 227-234.
- [30] Zhang X L, Bai X P, Chang Y X, Chen Z J. Increased sensitivity of Dahurian larch radial growth to summer temperature with the rapid warming in Northeast China. Trees, 2016, 30(5): 1799-1806.
- [31] Cao J, Zhao B, Gao L S, Li J, Li Z S, Zhao X H. Increasing temperature sensitivity caused by climate warming, evidence from Northeastern China. Dendrochronologia, 2018, 51: 101-111.
- [32] Andreu L, Gutiérrez E, Macías M, Ribas M, Bosch O, Camarero J. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. Global Change Biology, 2007, 13(4): 804-815.
- [33] 于健, 刘琪璟, 周光, 孟盛旺, 周华, 徐振招, 史景宁, 杜文先. 小兴安岭红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3451-3460.
- [34] 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. 植物生态学报, 2011, 35(1): 27-34.
- [35] 周子建, 江源, 董满宇, 陶岩, 王明昌, 丁新原. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应. 生态学报, 2018, 38(13): 4668-4676.
- [36] Buntgen U, Frank D C, Schmidhalter M, Neuwirth B, Seifert M, Esper J. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. Trees, 2006, 20(1): 99-110.
- [37] Wang X C, Zhang Y D, Mcrae D J. Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China. Trees, 2009, 23(4): 875-885.
- [38] Liu Y, Zhang X J, Song H M, Cai Q F, Li Q, Zhao B Y, Liu H, Mei R C. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years. Climate Dynamics, 2017, 48(3/4): 867-879.
- [39] Duan J P, Zhang Q B, Lv L X. Increased variability in cold-season temperature since the 1930s in subtropical China. Journal of Climate, 2013, 26(13): 4749-4757.
- [40] 朱安明, 段爱国, 张建国, 张雄清. 广西柳州杉木种源树轮宽度对温度与湿度的年际响应. 林业科学研究, 2017, 30(1): 53-62.
- [41] Gómez-Aparicio L, García-Valdés R, Ruiz-Benito P, Zavala M A. Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2400-2414.

- [42] Huang W W, Fonti P, Larsen J B, Ræbild A, Callesen I, Pedersen N B, Hansen J K. Projecting tree-growth responses into future climate: a study case from a Danish-wide common garden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 240-251.
- [43] Brodribb T J, Pittermann J, Coomes D A. Elegance versus speed: examining the competition between conifer and angiosperm trees. *International Journal of Plant Sciences*, 2012, 173(6): 673-694.
- [44] Büntgen U, Frank D, Wilson R, Carrer M, Urbinati C, Esper J. Testing for tree - ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2443-2453.
- [45] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的时间稳定性评估. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1045-1057.
- [46] D'Arrigo R D, Kaufmann R K, Davi N, Jacoby G C, Laskowski C, Myneni R B, Cherubini P. Thresholds for warming-induced growth decline at elevational tree line in the Yukon Territory, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): GB3021.
- [47] Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H, Osborn T J. Influence of volcanic eruptions on northern hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, 393(6684): 450-455.
- [48] 吴秀臣, 裴婷婷, 李小雁, 刘鸿雁. 树木生长对气候变化的响应研究进展. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(1): 109-116.
- [49] Gazol A, Camarero J J, Andereg W R L, Vicente-Serrano S M. Impacts of droughts on the growth resilience of northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(2): 166-176.