

小兴安岭红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应

于 健^{1,2} 刘琪璟^{1*} 周 光¹ 孟盛旺¹ 周 华¹ 徐振招¹ 史景宁¹ 杜文先¹

(¹北京林业大学林学院, 北京 100083; ²江苏农林职业技术学院, 江苏句容 212400)

摘 要 基于树木年代学方法,利用小兴安岭低海拔阔叶红松林优势树种红松和鱼鳞云杉树轮宽度资料,分别建立年轮宽度年表,探讨影响2个树种径向生长的关键气候因子。结果表明:2个树种对气候因子的响应存在差异,红松较鱼鳞云杉对气候因子的响应更加敏感,更适合用于年轮气候学研究;响应函数分析表明,红松径向生长与当年6月平均温度呈显著负相关,与当年6月降水量呈显著正相关,而鱼鳞云杉与气候因子未表现出显著相关关系;空间相关分析揭示,红松年表具有较大的空间代表性,相关性最高出现在研究区域附近;升温导致的干旱胁迫是限制红松树木生长的主要原因,如果未来全球气温进一步增加,将对红松产生不利的影响;一些大尺度的大气-海洋变化的耦合作用可能对小兴安岭红松径向生长产生影响。

关键词 小兴安岭; 红松; 径向生长; 气候变化; 干旱胁迫

Response of radial growth of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* to climate change in Xiaoxing'anling Mountains, Northeast China. YU Jian^{1,2}, LIU Qi-jing^{1*}, ZHOU Guang¹, MENG Sheng-wang¹, ZHOU Hua¹, XU Zhen-zhao¹, SHI Jing-ning¹, DU Wen-xian¹ (¹College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, Jiangsu, China).

Abstract: Based on dendrochronological methods, we established residual chronologies of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis*, with the dominant species of broadleaved Korean pine mixed forest at low altitudes chosen as the research object, to identify the key climatic factors affecting the radial growth of the two species in Xiaoxing'anling Mountains, Northeast China. The results showed that the responses of the two species to climate factors were different, and *P. koraiensis* was more sensitive, and hence more suitable for dendroclimatological analysis. Response function coefficients indicated that the radial growth of *P. koraiensis* negatively correlated with June mean temperature of current year, while positively correlated with precipitation in June of current year. There was no significant correlation between *P. jezoensis* and all climate variables. Spatial correlation analysis revealed that variations in chronology of *P. koraiensis* contained strong regional signals, and the highest correlation occurred in the vicinity of the study area. Warming caused drought stress, which was the main factor that limited the growth of *P. koraiensis*, and it might have adverse effects on the Korean pine if global temperature continues to increase. The coupling effects of large-scale atmospheric-oceanic variability may affect the radial growth of *P. koraiensis* in Xiaoxing'anling Mountains.

Key words: Xiaoxing'anling Mountains; *Pinus koraiensis*; radial growth; climate change; drought stress.

近年来,气候变暖造成的干旱胁迫是导致半干

旱地区树木死亡的最大驱动因素,对区域和全球森林生产力和碳固定等产生极大的影响^[1-3]。北半球高纬度地区较低纬度地区增温显著,表现出明显的暖干化趋势^[4]。这意味着分布在北方高纬度地区的森林生态系统更易遭受全球气候变化的影响。

本文由国家自然科学基金项目(31670436)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31670436).
2017-03-27 Received, 2017-08-28 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqijing@bjfu.edu.cn

小兴安岭位于我国高纬度区域,是受气候变化影响最显著的地区之一^[5].红松(*Pinus koraiensis*)是小兴安岭地带性森林生态系统阔叶红松林的主要建群树种,对气候变化的响应直接影响阔叶红松林群落的动态变化.鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)作为红松重要的混生树种,主要分布于我国东北大小兴安岭及长白山地区海拔 300~2000 m 地带.因此,研究阔叶红松林群落的红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应,对了解全球气候变化背景下北半球高纬度森林的响应,尤其是小兴安岭典型阔叶红松林的动态变化具有重要意义.

近些年,树木年轮已被广泛用于评估树木生长与气候变化的关系^[6-7]及古气候重建^[8-9].红松和鱼鳞云杉由于年轮界限清晰,已经成为东北地区年轮气候学研究的 2 个主要树种^[10-12].近年来,一些学者对红松径向生长应对气候变化的响应进行了研究^[13-15].例如,Yu 等^[12]研究证实,长白山红松径向生长对气候的响应随海拔不同.刘敏等^[14]研究表明,东北地区不同纬度红松径向生长对当地气候因子的响应存在差异,如果未来气温升高而降水不变,红松分布区可能缩小.于健等^[13]研究发现,温度是限制长白山原始阔叶红松林红松径向生长的主要因子,气候变暖将促进红松的径向生长.高露双等^[16]研究指出,火干扰后红松生长对温度较敏感,全球变暖可能导致火烧后红松的生长量降低.王晓明等^[17]研究表明,年龄因素对红松年表的气候响应存在一定影响,且高龄年表对气候响应的敏感性更高,包含更多的气候信息.Wang 等^[15]研究表明,温度对亚洲东北部红松径向生长具有关键作用,但却显示出强烈的地理模式差异.此外,高露双等^[18]研究发现,去趋势方法对鱼鳞云杉生长-气候关系的影响在不同海拔梯度上有所差别.Yu 等^[19]研究证实,气候对长白山不同海拔梯度鱼鳞云杉生长影响存在差异,具体表现为低海拔鱼鳞云杉主要受降水量影响,而高海拔地区树木生长更多受最低温度控制.以上研究多基于红松或鱼鳞云杉单一树种进行研究,同时考虑红松和鱼鳞云杉 2 个树种的研究较少^[10-11].例如,高露双等^[10]发现,长白山过渡带红松和鱼鳞云杉对气候的响应存在差异,气候变暖有利于红松的径向生长.李广起等^[11]研究指出,生长季温度和降水的增加对长白山分布上限红松的生长具有促进作用,升温导致的干旱胁迫是造成上限鱼鳞云杉年轮宽度与温度变化趋势相反的重要因素.Zhuang 等^[20]研究表明,长白山海拔上限红松和鱼鳞云杉对气候

变暖的响应不同,温度升高可以促进红松径向生长,抑制鱼鳞云杉树木生长.然而,以上这些研究主要集中于长白山地区^[10-11].本文利用年轮气候学方法,对小兴安岭地区红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化响应进行研究,以期揭示全球气候变化背景下该地区典型阔叶红松林主要树种的群落动态变化,为未来该区域气候重建提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

小兴安岭(46° 28'—49° 21' N, 127° 42'—130° 14' E,平均海拔 500~1000 m),位于中国黑龙江省东北部,为亚洲东北部兴安岭山系西北-东南走向山脉之一,也是东北地区东北部的低山丘陵山地,是松花江以北的山地总称^[5].该区气候为温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,夏季温暖多雨,气候特征四季变化明显.小兴安岭地区雨热同期,降水导致的干湿季节差异明显.年均温 3.6℃,1 月最冷,平均气温为-18.1℃,7 月最热,平均气温为 22.1℃,年降水量为 552.1 mm,降水主要集中在 6—8 月,约占全年总降水量的 62.8%.

该区地带性植被是以红松为主的温带针阔叶混交林,乔木以红松为建群种,与长白山地区不同的是,除了伴生多种温性阔叶树种,如紫椴(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、色木槭(*Acer mono*)、裂叶榆(*Ulmus lacinata*)、枫桦(*Betula costata*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、春榆(*Ulmus japonica*)、山杨(*Populus davidiana*)和花楸(*Sorbus dacica*)等

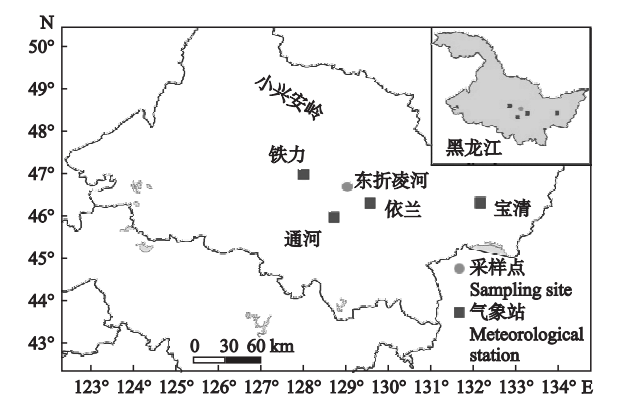


图 1 研究区采样点及气象站
Fig.1 Sampling sites and the meteorological stations in study area.

外,还伴生一些寒温性树种,如鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)等。林内灌木主要有毛榛(*Corylus mandshurica*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)和刺五加(*Acanthopanax senticosus*)等。藤本植物主要为狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)。

1.2 样芯采集和年表建立

研究地点位于小兴安岭南部黑龙江朗乡林业局东折凌河林场(46°41′33″N, 129°2′17″E, 海拔390 m)(图1)。森林类型为枫桦红松林,林龄200年以上。林分郁闭度为0.9,坡向为东北,坡度25°。受人为干扰因素影响较小。于2015年7月开展野外踏查,沿东西走向设立了10个10 m×100 m的临时样地(总面积为1 hm²)进行样地调查,对样地内所有林木(胸径≥10 cm)进行每木检尺,记录乔木层全部树木的树种名称、胸径以及坐标,林木株数密度为352 株·hm⁻²。

按照树木年代学传统方法,在10个样地内随机选取位于林冠上层生长健康的红松和鱼鳞云杉,利用生长锥在树木胸高位置钻取完整的年轮样芯(尽可能通过髓芯)。为减少对树木造成的损伤,每株树

仅钻取一根年轮样芯。红松和鱼鳞云杉分别钻取48和28根样芯。

年轮样芯经过粘贴、风干、打磨,直到年轮界限在显微镜下清晰可见,在双筒显微镜下用骨架图法进行目视交叉定年。利用LINTABTM6.0年轮宽度测量仪(精度为0.001 mm)测量年轮宽度。运用COFECHA程序^[21]对交叉定年和测量结果进行检验,剔除与主序列相关性差和难以交叉定年的样芯,将保留的样芯用于年表建立。年表建立采用ARSTAN程序完成^[22]。以2/3年龄作为步长的样条函数法去除树木本身的遗传因子和干扰竞争产生的生长趋势(即去趋势),并对去趋势的序列以双重平均法合成标准年表(STD)。以时间序列的自回归模型对去趋势的序列再次标准化,以双权重平均法将差值序列合成差值年表(RES)(图2)。本研究选用统计参数更高、年表质量更优的标准年表用于年轮气候学分析。

1.3 气候资料与统计分析

研究选取距离采样位置最近的依兰气象站(图3, 46°18′N, 129°35′E, 海拔100.1 m),时间跨度为56年,即1959—2015年。该站距离采样点的水平距离为60.33 km。气象要素包含月平均温度(T_m)和

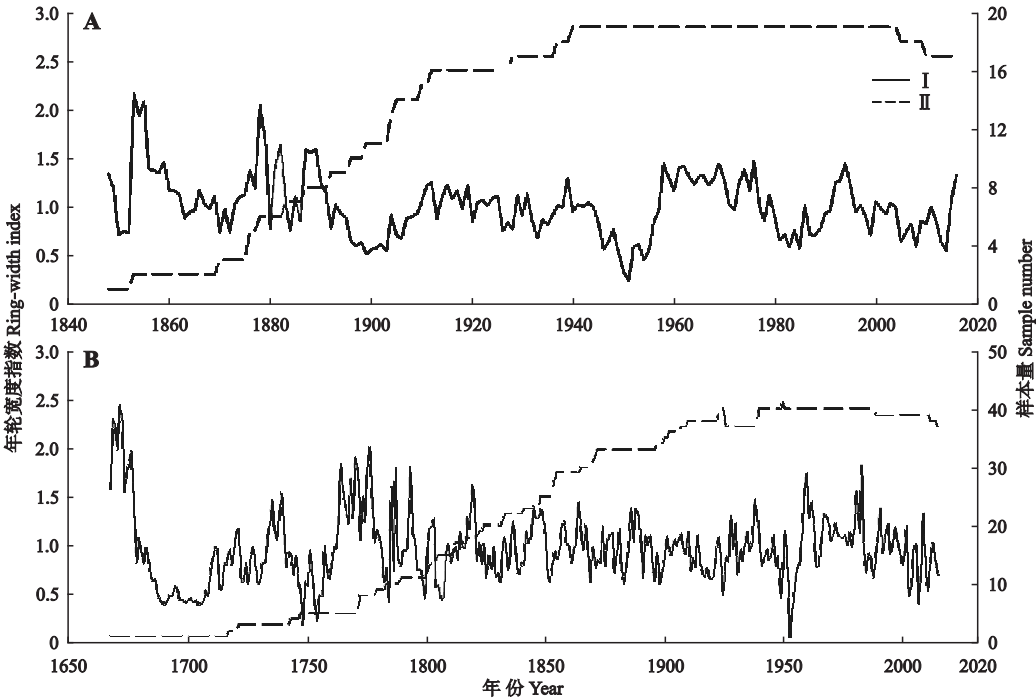


图2 小兴安岭红松和鱼鳞云杉标准年表序列及样本量
Fig.2 Tree-ring width chronologies and number of the core samples of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* in Xiaoxing'anling Mountains.
A: 红松 *Pinus koraiensis*; B: 鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*. 下同 The same below. I: 年轮宽度指数 Tree-ring width index; II: 样本量 Sample number.

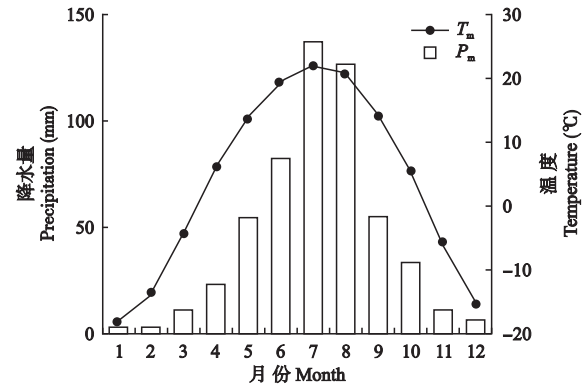


图3 1959—2015 年研究区月均气温和月降水量
Fig.3 Monthly mean temperature (T_m) and precipitation (P_m) in the study area from 1959 to 2015.

月总降水量(P_m).气候资料来自中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>).过去 56 年小兴安岭东折凌河林场地区的气温不断升高,降水呈微弱下降趋势.温度气候倾向率为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,降水量以 $3.84\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 的速率缓慢递减(图 4).

本研究分别对红松和鱼鳞云杉标准年表与逐月气候因子进行相关和响应函数分析,获得 2 个树种树木生长与气候因子之间的关系.考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响,故选用上年 5 月到当年 9 月(共计 17 个月)的气候数据与所得的年轮标准年表进行分析.此外,本研究采用滑动相关和响应分析,研究树木生长与气候因子的动态关系.滑动分析选择的滑动区间为 35 年,从 1961 年开始每 35 年计算一个相关及响应系数,然后逐渐向后滑动,计算了 1961—1995 年至 1981—2015 年的年轮宽度指数与气候因子的相关及响应系数.

1.4 数据处理

采用 DendroClim2002 程序对年表与气候因子进行相关分析和响应函数分析,该软件用拔靴法

表 1 红松和鱼鳞云杉年轮年表的统计特征及共同区间分析
Table 1 Statistical characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* and common intervals analysis

统计特征 Statistic characteristics	红松 <i>Pinus koraiensis</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i>
公共区间 Common interval	1856—2011	1914—2004
平均值 Mean	0.96	1.24
平均敏感度 Mean sensitivity	0.18	0.18
标准偏差 Standard deviation	0.30	1.73
一阶自相关 First-order autocorrelation	0.71	0.56
树间相关系数 Inter-tree correlation	0.25	0.36
信噪比 Signal-to-noise ratio	8.45	8.42
样本总体代表性 Expressed population signal	0.89	0.89
第一主成分方解释量 Variation in first eigenvector (%)	28.4	45.0

1000 次重采样计算相关和响应系数,并检验其 0.05 水平下的显著性^[23].为评估采样点年表的大范围空间代表性,选取 CRU TS3.1 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 格点数据与年轮年表进行空间相关分析(<http://www.climexp.knmi.nl>).利用 KaleidaGraph 3.6 软件作图.

2 结果与分析

2.1 年表的统计特征

如表 1 所示,红松年表时间跨度较长,为 349 年(1667—2015 年),而有效年表公共区间长度为 156 年(1856—2011 年).鱼鳞云杉年表时间跨度仅为 169 年(1848—2015 年),公共区间为 91 年(1914—2004 年).红松年表的平均敏感度、标准偏差、一阶自相关和信噪比均高于鱼鳞云杉年表.关于树间相关系数,鱼鳞云杉较高(0.36).2 个树种的样本总体代表性均为 0.89,均超过了样本总体代表性(EPS)可接受的临界阈值 0.85^[24].高质量的年表一般具有较高的标准差、平均敏感度、信噪比和样本总体代表

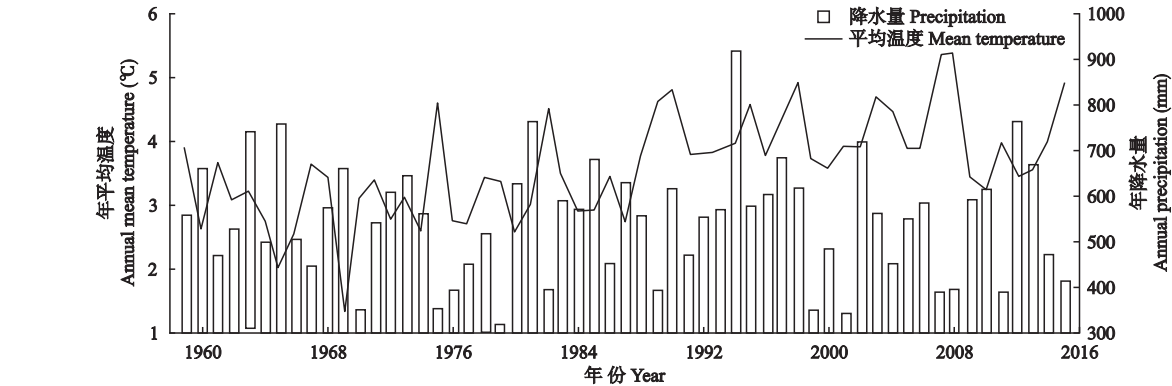


图4 研究区温度和降水量的年变化
Fig.4 Annual variation of temperature and precipitation in the study area.

性等特点^[25]. 综上表明, 所建立的 2 个树种年表对气候变化均具有一定的敏感性, 并且红松年轮年表在多数统计特征值上都优于鱼鳞云杉年轮年表, 表明红松较鱼鳞云杉对气候变化响应更为敏感, 更适于年轮气候学研究.

2.2 年表与气候因子的关系

影响红松和鱼鳞云杉径向生长的气候因子存在一定差异. 图 5 表明, 红松树木生长与上年 9 月和当年 6 月平均温度呈显著负相关, 与当年 2 月降水量呈显著负相关, 与当年 4 和 6 月降水量呈显著正相关. 鱼鳞云杉树木径向生长与大多数月平均温度均为负相关, 与上年 5、6、12 月和当年 4、6 和 8 月平均温度呈显著负相关, 与降水量的相关性均未达到显著水平. 响应函数分析表明, 红松树木生长与当年 6 月平均温度呈显著负相关, 与当年 6 月降水量呈显著正相关. 鱼鳞云杉与各月平均温度和降水量均未表现出显著相关关系.

2.3 年表与气候因子的动态相关

为了评估长期气候动态变化对红松和鱼鳞云杉径向生长的影响, 本文通过窗口为 35 年的滑动相关和响应函数研究 2 个树种径向生长与气候因子的动态关系. 由图 6 可知, 上年 9 月平均温度和当年 6 月平均温度、降水量对红松径向生长的影响具有一定

的稳定性, 尤其是当年 6 月平均温度, 在整个滑动时间序列呈显著负相关, 并保持较高的稳定性. 红松与当年 2、4 和 7 月降水量的相关关系存在波动, 仅在一定时间区间内呈显著相关关系. 上年 12 月平均温度对鱼鳞云杉的径向生长的抑制作用具有一定的稳定性, 但在滑动区间 (2011—2015 年) 相关关系减弱, 并未达到显著水平. 鱼鳞云杉与降水量的相关性仅在个别月份个别时间段达到显著水平. 由图 7 可知, 上年 9 月和当年 6 月平均温度对红松的径向生长具有稳定的抑制作用. 当年 6 月降水量对红松树木生长具有稳定的促进作用, 但显著相关关系仅发生在 2002—2015 年滑动区间. 鱼鳞云杉年表与当年 2 月和上年 12 月平均温度以及上年 5、7 月降水量存在较大的不稳定性, 仅在极少的区间达到显著水平.

2.4 大尺度区域信号

由图 5 可知, 当年 6 月平均温度和降水量是小兴安岭低海拔地区红松径向生长的主要限制因子. 为进一步评估当年 6 月平均温度和降水量对红松生长影响的空间代表性, 利用红松标准年表分别与 CRU TS3.1 (0.5°×0.5°) 6 月平均温度和降水量格点气象数据进行空间相关分析. 由图 8 可以看出, 1960—2015 年, 小兴安岭红松标准年表与该区 6 月

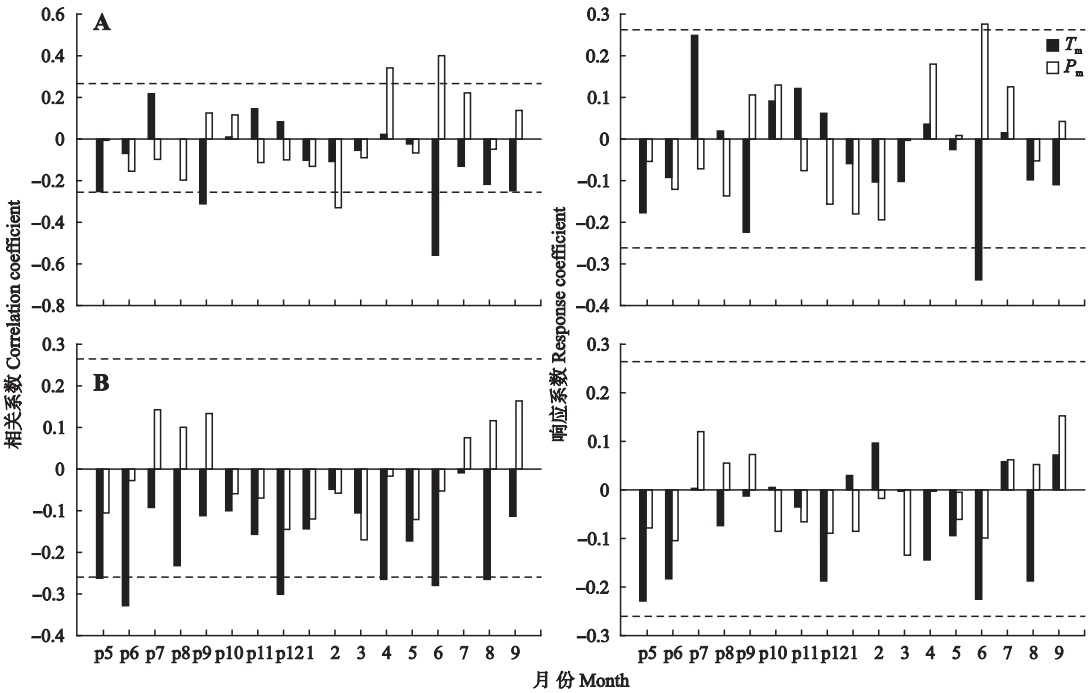


图 5 小兴安岭红松和鱼鳞云杉年表与气候因子的相关和响应函数分析
Fig.5 Correlation analysis and response function analysis of standard chronology for *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* in relation to climate factors in Xiaoxing'anling Mountains.
 T_m : 月平均温度 Monthly mean temperature; P_m : 月降水量 Monthly precipitation. p: 上年 Previous year. 下同 The same below. -, $P<0.05$.

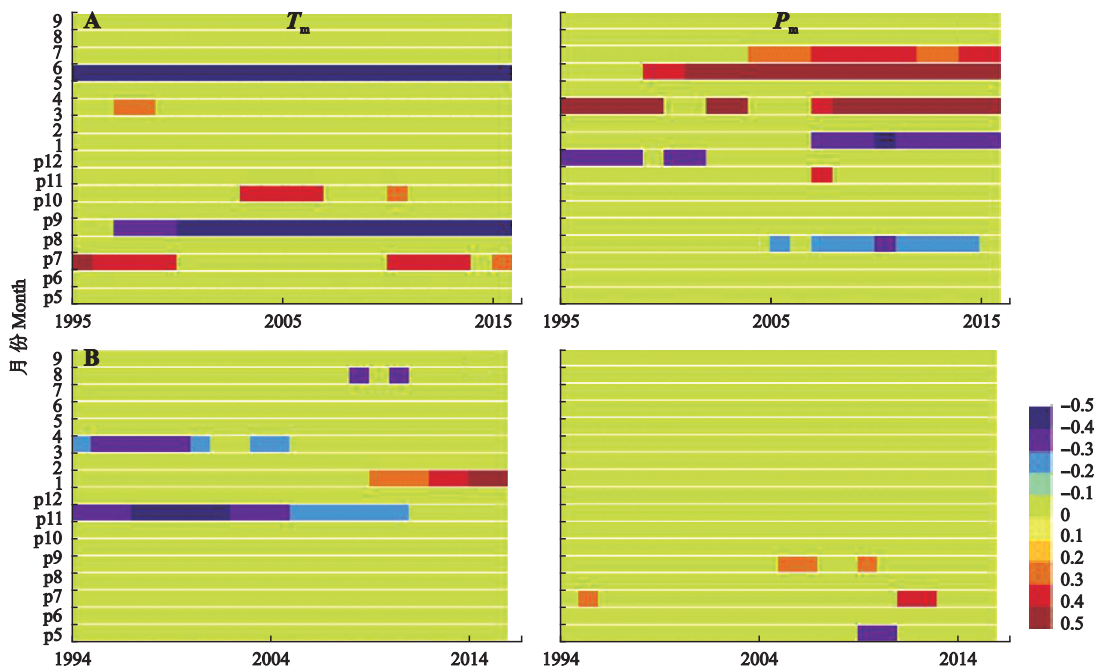


图 6 红松和鱼鳞云杉与气候因子的滑动相关分析

Fig.6 Moving correlation analysis of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* with climate factors.

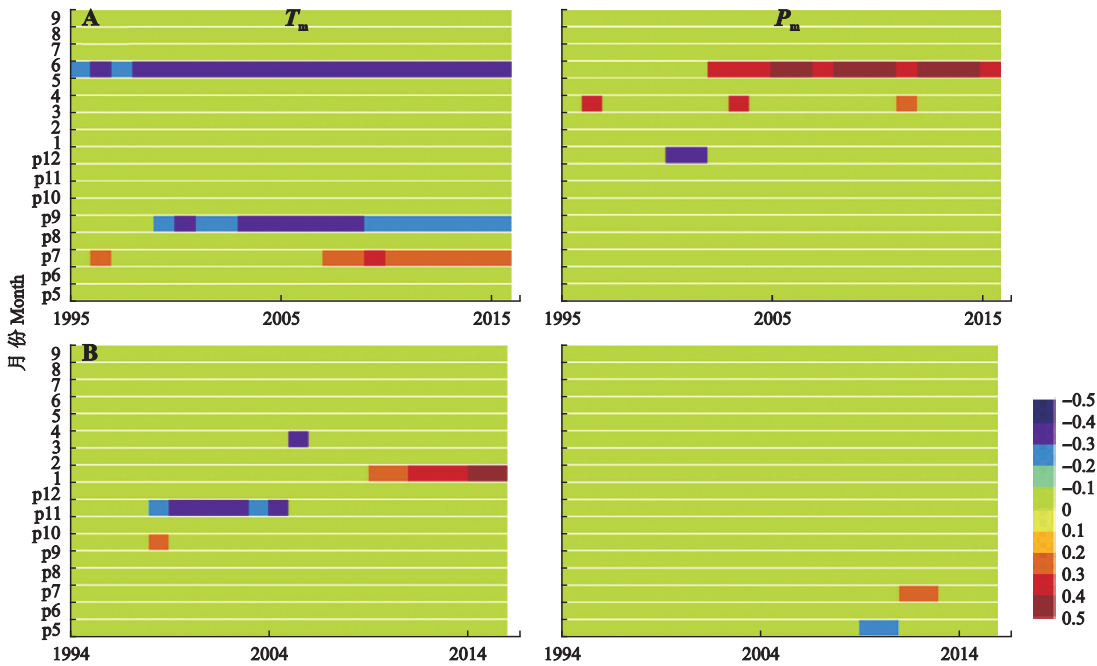


图 7 红松和鱼鳞云杉与气候因子的滑动响应分析

Fig.7 Moving reponse analysis of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* with climate factors.

平均温度和降水量呈显著相关,与当年 6 月平均温度相关性显著范围较小,但能够较大范围地反映当年 6 月降水量变化,并且显著相关关系包括较大的地理范围,主要围绕中国东北、朝鲜半岛北部、日本、俄罗斯远东地区、蒙古东部以及西伯利亚东南部,但相关性最高发生在研究区附近.综上,夏季(尤其是 6 月)平均温度和降水量对小兴安岭低海拔红松径

向生长具有明显的限制作用.

3 讨 论

3.1 不同树种年表统计特征比较

高质量的年表一般具有较大的标准差、平均敏感度、信噪比和样本总体代表性等特点^[25].本研究发现,小兴安岭阔叶红松林内红松和鱼鳞云杉径向

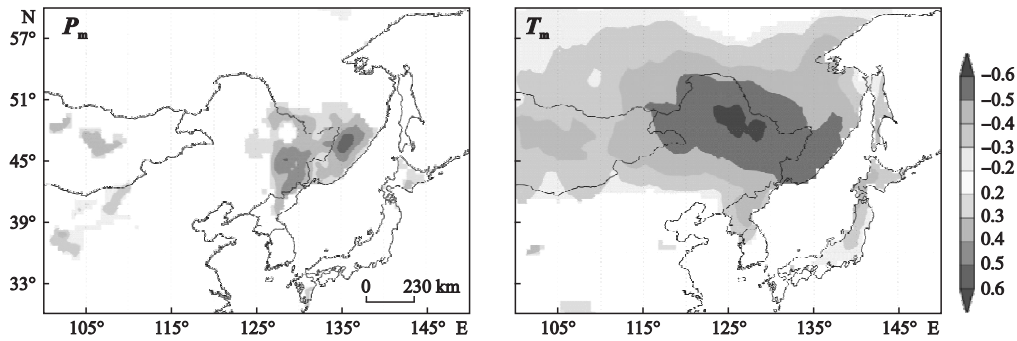


图 8 小兴安岭 1960—2015 年 6 月平均温度和降水量与红松标准年表相关系数的空间格局
Fig.8 Spatial pattern of correlation coefficients of mean temperature and precipitation in June with standard chronology for *Pinus koraiensis* in Xiaoxing'anling Mountains (1960—2015).

生长对气候变化反应均较为敏感,这与文献[10–11]结果一致.此外,红松年表在大多数统计特征值上都明显优于鱼鳞云杉年表,这也表明了红松较鱼鳞云杉对气候变化更敏感(表 1),更适合于年轮气候学研究^[11].与长白山的红松和鱼鳞云杉(位于海拔 1050~1200 m 过渡带)年表统计特征值相比^[10],本文建立的 2 个树种的标准年表具有更大的信噪比和平均敏感度,可能包含更多的气候信息,这与一般认为接近树种自然分布区边缘的树木具有更高的气候敏感性的结论相同^[26].红松主要分布在亚洲东北部日本海西岸从朝鲜半岛经中国东北到俄罗斯远东南部的三角地带^[27].小兴安岭较长白山地区地理位置偏北,纬度更高,气温更低,两者的纬度差异是造成 2 个地区红松和鱼鳞云杉气候敏感性存在差异的主要原因.刘敏等^[14]研究指出,中国东北不同纬度红松径向生长对当地气候因子的响应存在差异.Jiang 等^[28]发现,中国东北部大兴安岭不同纬度梯度兴安落叶松径向生长对气候响应模式存在差异.Wang 等^[15]研究表明,亚洲东北部红松树木生长和对气候变暖响应表现出强烈的地理模式.纬度和海拔梯度一样可用于预测气候变化对森林生态系统的影响.一般来讲,地理分布更靠北的树木生长对温度响应更积极,沿纬度梯度由南向北,对气候变暖的负响应关系逐渐降低^[29].相似的研究结论在智利安地斯山脉^[30]、芬兰北方森林^[31]和西伯利亚针叶林^[29]也得到验证.

3.2 不同树种树木生长与气候因子的关系

本研究发现,红松与鱼鳞云杉径向生长对气候的响应存在一定差异,这也证实了前人对这 2 个树种的研究结论^[10].Yu 等^[32]研究发现,物种差异比海拔差异在影响特定地点物种径向生长方面更重要.具体表现为,红松径向生长与当年 6 月平均温度呈

显著负相关,与当年 6 月降水量呈显著正相关,类似的现象在多地都有报道^[15,33–35].有研究发现,当年 6 月气候因子是影响所有纬度红松径向生长的关键气候因子,不同纬度红松均与当年 6 月平均最高温度呈显著负相关^[14].梁鹏鸿等^[33]研究表明,红松成熟林的轮宽指数与当年 6 月气温呈显著负相关,而与当年 6 月降水量呈显著正相关.Wang 等^[15]研究证实,温度是控制红松生长的主要限制因子.尽管本研究采样点位于湿润的小兴安岭低海拔地区,该区域全年 47%的降水量集中出现在 7—8 月,6 月降水量仅为 87.7 mm(图 3).红松是喜温暖湿润的树种,不耐干旱,对土壤水分要求严格.一般来讲,生长季早期高温并伴随降水量严重不足会导致树木蒸腾作用和土壤蒸发加剧,会产生强烈的干旱胁迫限制树木生长^[15],这是东北地区关于红松生态学特性研究所得的普遍结论^[14,36].除此之外,Sidor 等^[37]研究发现,全球温度升高有可能增加高海拔地区树木生长量,降低低海拔树木生长量.Williams 等^[38]研究表明,温度作为一个强有力的驱动力,将使得区域森林遭受严重的干旱胁迫和导致树木死亡,这种影响很可能是全球性的.

小兴安岭地区生长季为 5—9 月,生长季前期(特别是 4 月)降水量的增加,能够有效地补充土壤水分,减少生长季由于温度过高导致的水分不足,较易形成宽轮^[39].研究区红松树木生长与上年 9 月平均温度呈显著负相关,这种抑制作用具有一定的稳定性(图 5~7),9 月过高的温度引起的干旱胁迫将造成该地区土壤水分可利用性严重不足,这对树木生长将产生抑制作用.Yu 等^[12]研究发现,9 月降水量对红松生长的影响反映出红松对土壤湿度的严格需求,该区降水量主要集中在生长季(7—8 月),9 月较少的降水量将限制生长季末期树木生长和同化

过程.相似的暖季高温限制树木生长的现象在中国东南地区^[34]和法国阿尔卑斯山^[40]也有报道.与红松年轮气候学研究结果不同,鱼鳞云杉年轮年表与大多数月平均温度均为负相关,与各月降水量均未表现出显著的相关关系(图5),这与前人在长白山的研究结果一致^[11].升温导致的干旱胁迫可能是造成小兴安岭低海拔地区鱼鳞云杉树木生长与温度负相关的重要因素.Yu等^[19]研究也证实了长白山低海拔地区鱼鳞云杉树木径向生长受降水量控制,气候可以通过改变土壤湿度有效性进而影响鱼鳞云杉生长.

3.3 未来气候变暖对2个树种的影响

20世纪以来,全球气候变暖已成为不争的事实.东北地区是北半球高纬度受气候变化影响最脆弱的地区之一^[3].Wang等^[3]研究指出,中国东北过去温度增加 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$.孙凤华等^[41]研究发现,东北地区总体气候变化存在暖干化倾向,气候暖干化趋势存在着季节性差异和地域性差异.有研究表明,亚洲东北部红松受温度的影响明显强于降水^[15].这也表明,未来全球气候变暖将导致暖干化加剧,可能显著影响东北小兴安岭地区阔叶红松林群落.目前,有关暖干化对树木生长影响的研究较多.例如,尹红等^[42]研究指出,未来50年的气温变化使小兴安岭红松树木径向生长量相对于1961—2010年减少约23%.Yu等^[12]研究发现,长白山低海拔地区红松生长主要受降水量限制,暖干化情景下树木生长量将下降.姚启超等^[43]研究得出,暖干化现象加剧将导致小兴安岭低海拔地区红皮云杉生长衰退.Wang等^[15]研究表明,温度增加导致的干旱胁迫是红松生长量下降的主要原因.由此可见,暖干化导致的干旱胁迫对树木正常生长造成的影响非常严重,相似的研究结果在大兴安岭^[44]、长白山^[36]和干旱半干旱地区^[45]都有报道.红松林的分布以中国东北东部为中心,北到俄罗斯,南至朝鲜半岛,森林面积约50万 km^2 ^[27].模型模拟研究表明,全球变暖背景下中国红松林分布边界将向北转移,适宜区面积将缩小,生长量下降^[14,33,36].此外,森林组成和结构、生物量、林分生产力和演替也随之改变,针阔混交林逐渐向阔叶林过渡^[46].

一些基于树木年轮的古气候重建表明,20世纪气候经历了史无前例的变暖^[47].随着气候变暖导致的暖干化逐步加剧,红松生长-气候关系在20世纪后半期呈现稳定的变化趋势,而鱼鳞云杉生长-气候变化关系不如红松稳定(图6、7).Yu等^[12]对长白山红松对气候响应的时间不稳定性进行了研究,发现

低海拔红松受降水量控制,高海拔上限红松更多受最低温度影响,并且这些影响随1970年以后温度迅速增加而变得强烈.Shen等^[48]研究表明,随1980年显著升温,长白落叶松树木生长与温度的关系变得不稳定.然而,时空不稳定也许并不能单独通过地理分布或局地气候得到解释,它或许与一些大尺度大气-海洋变化有关(图8).Wang等^[49]研究表明,北大西洋年代际振荡(AMO)可以影响亚洲东北部树木年轮宽度.姚启超等^[43]研究指出,AMO和太平洋年代际振荡(PDO)的相位转变以及1980年后的显著升温有一定关联,上述因素的耦合作用使得小兴安岭地区土壤蒸发量增加,暖干化现象加剧,进而导致低海拔红皮云杉生长衰退.Zhu等^[50]研究发现,全球气候振荡和海洋-陆地热力反差,例如,海平面温度、厄尔尼诺(ENSO)、AMO和太阳活动均可影响张广才岭地区生长季冷暖变化,进而导致对该区域树木生长产生影响.鱼鳞云杉生长出现随温度升高而下降的“分离现象”,该结果发现在长白山地区^[11].这种“分离现象”往往出现在北半球高纬度地区^[51].李宗善等^[52]研究发现,1976/1977年PDO相位转型所导致的大尺度气候异常可能是导致卧龙地区树木生长在近代出现显著下降,从而与温度出现明显分离的原因之一.Jiao等^[45]研究表明,温度驱动导致的干旱胁迫造成天山东部西伯利亚落叶松径向生长对生长季温度呈现出响应分离.综上所述,导致“响应分离”现象发生的因素很多,除了全球变暖导致的干旱胁迫外,还有非线性阈值、树木生长季节的变化、融雪延迟和“全球变暗”等^[51].因此,未来在该地区利用鱼鳞云杉年轮宽度作为代理资料进行古气候重建应当考虑这种“分离现象”.

参考文献

- [1] Toledo M, Poorter L, Pena-Claros M, *et al.* Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology*, 2011, **99**: 254–264
- [2] Xu CY, Liu HY, Anenkhonov OA, *et al.* Long-term forest resilience to climate change indicated by mortality, regeneration, and growth in semiarid southern Siberia. *Global Change Biology*, 2017, **23**: 2370–2382
- [3] Wang XD, Liu HQ, Fan WH, *et al.* Climate change in Northeast China between 1849 and 2008. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, **126**: 765–773
- [4] Gazol A, Camarero JJ, Anderegg WRL, *et al.* Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, **26**: 166–176
- [5] Local Chronicles Compilation Committee of Heilongjiang Province (黑龙江省地方志编纂委员会). The Land

- Chorography in Local Chronicles of Heilongjiang Province. Harbin: Heilongjiang People's Press, 1997 (in Chinese)
- [6] Yu J (于 健), Xu Q-Q (徐倩倩), Liu W-H (刘文慧), *et al.* Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2016, **40**(1): 24–35 (in Chinese)
- [7] Shi JF, Li JB, Cook ER, *et al.* Growth response of *Pinus tabulaeformis* to climate along an elevation gradient in the eastern Qinling Mountains, central China. *Climate Research*, 2012, **53**: 157–167
- [8] Lv LX, Zhang QB. Tree-ring based summer minimum temperature reconstruction for the southern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Climate Research*, 2013, **56**: 91–101
- [9] Zhu HF, Fang XQ, Shao XM, *et al.* Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon. *Climate of the Past*, 2009, **5**: 661–666
- [10] Gao L-S (高露双), Wang X-M (王晓明), Zhao X-H (赵秀海). Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(1): 27–34 (in Chinese)
- [11] Li G-Q (李广起), Bai F (白 帆), Sang W-G (桑卫国). Different responses of radial growth to climate warming in *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(5): 500–511 (in Chinese)
- [12] Yu DP, Liu JQ, Lewis BJ, *et al.* Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2013, **300**: 96–105
- [13] Yu J (于 健), Luo C-W (罗春旺), Xu Q-Q (徐倩倩), *et al.* Radial growth of *Pinus koraiensis* and carbon sequestration potential of the old growth forest in Changbai Mountain, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(9): 2626–2636 (in Chinese)
- [14] Liu M (刘 敏), Mao Z-J (毛子军), Li Y (厉 悦), *et al.* Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatic factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(5): 1341–1352 (in Chinese)
- [15] Wang XC, Zhang MH, Ji Y, *et al.* Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia. *Trees*, 2016, **31**: 415–427
- [16] Gao L-S (高露双), Zhao X-H (赵秀海), Wang X-M (王晓明). Correlations between meteorological factors and growth of *Pinus koraiensis* after fire. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(11): 5963–5970 (in Chinese)
- [17] Wang X-M (王晓明), Zhao X-H (赵秀海), Gao L-S (高露双), *et al.* Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(21): 6378–6387 (in Chinese)
- nese)
- [18] Gao L-S (高露双), Tang J-Y (唐景毅), Zhao X-H (赵秀海), *et al.* Effect of detrending methods on the relationship establishment between chronologies of *Picea jezoensis* var. *komarovii* and climate factors along altitudinal gradient. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2014, **20**(1): 128–133 (in Chinese)
- [19] Yu DP, Wang QL, Wang GG, *et al.* Dendroclimatic response of *Picea jezoensis* along an altitudinal gradient in Changbai Mountains. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2006, **49**: 150–159
- [20] Zhuang LW, Axmacher JC, Sang WG. Different radial growth responses to climate warming by two dominant tree species at their upper altitudinal limit on Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2017, **28**: 795–804
- [21] Holmes R. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, **43**: 69–95
- [22] Cook ER, Holmes RL. Users Manual for Program ARSTAN. Tucson, AZ: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986
- [23] Biondia F, Waikulb K. Dendroclim2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, **30**: 303–311
- [24] Wigley T, Briffa K, Jones P. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23**: 201–213
- [25] Wu X-D (吴祥定). Tree Rings and Climate Change. Beijing: China Meteorological Press, 1990 (in Chinese)
- [26] Liang EY, Dawadi B, Pederson N, *et al.* Is the growth of birch at the upper timberline in the Himalayas limited by moisture or by temperature? *Ecology*, 2014, **95**: 2453–2465
- [27] Ma J-L (马建路), Zhuang L-W (庄丽文), Chen D (陈 动), *et al.* Geographic distribution of *Pinus koraiensis* in the world. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1992, **20**(5): 40–48 (in Chinese)
- [28] Jiang YG, Zhang JH, Han SJ, *et al.* Radial growth response of *Larix gmelinii* to climate along a latitudinal gradient in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China. *Forests*, 2016, **7**: 295
- [29] Lloyd AH, Bunn AG, Berner L. A latitudinal gradient in tree growth response to climate warming in the Siberian taiga. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 1935–1945
- [30] Lara A, Villalba R, Wolodarsky-Franke A, *et al.* Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35°40'–55° S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography*, 2005, **32**: 879–893
- [31] Duthorn E, Schneider L, Günther B, *et al.* Ecological and climatological signals in tree-ring width and density chronologies along a latitudinal boreal transect. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, **31**: 750–757
- [32] Yu DP, Wang QW, Wang Y, *et al.* Climatic effects on radial growth of major tree species on Changbai Mountain. *Annals of Forest Science*, 2011, **68**: 921–933

- [33] Liang P-H (梁鹏鸿), Wang X-P (王襄平), Wu Y-L (吴玉莲), *et al.* Growth responses of broad-leaf and Korean pine mixed forests at different successional stages to climate change in the Shengshan Nature Reserve of Heilongjiang Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2016, **40**(5): 425–435 (in Chinese)
- [34] Shi J-F (史江峰), Li L-L (李玲玲), Han Z-Y (韩志勇), *et al.* Tree-ring width based June–September temperature reconstruction and its teleconnection with PDO and ENSO in Mount Daowu, Hunan Province. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2015, **35**(5): 1155–1164 (in Chinese)
- [35] Cai QF, Liu Y. Climatic response of three tree species growing at different elevations in the Liliang Mountains of Northern China. *Dendrochronologia*, 2013, **31**: 311–317
- [36] Gao L-S (高露双), Wang X-M (王晓明), Zhao X-H (赵秀海). Growth response of two coexisting species to climate change in broadleaved Korean pine forests in Changbai Mountain, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2013, **35**(3): 24–31 (in Chinese)
- [37] Sidor CG, Popa I, Vlad R, *et al.* Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees*, 2015, **29**: 985–997
- [38] Williams AP, Allen CD, Macalady AK, *et al.* Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2012, **3**: 292–297
- [39] Fritts HC. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976
- [40] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps. *Tree-ring Bulletin*, 1993, **53**: 1–11
- [41] Sun F-H (孙凤华), Yang S-Y (杨素英), Chen P-S (陈鹏狮). Climatic warming-drying trend in Northeastern China during the last 44 years and its effects. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(7): 751–755 (in Chinese)
- [42] Yin H (尹红), Wang J (王靖), Liu H-B (刘洪滨), *et al.* A research on the response of the radial growth of *Pinus koraiensis* to future climate change in the Xiao Xing'anling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(24): 7343–7350 (in Chinese)
- [43] Yao Q-C (姚启超), Wang X-C (王晓春), Xiao X-W (肖兴威). Climate-growth relationships of *Picea koraiensis* and causes of its recent decline in Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(7): 1935–1944 (in Chinese)
- [44] Bai X-P (白学平), Chang Y-X (常永兴), Zhang X-L (张先亮), *et al.* Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical micro-topographies in the recent 30 years. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(12): 3853–3861 (in Chinese)
- [45] Jiao L, Jiang Y, Zhang WT, *et al.* Divergent responses to climate factors in the radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Tianshan Mountains, northwest China. *Trees*, 2015, **29**: 1673–1686
- [46] Zhou D-H (周丹卉), He H-S (贺红士), Li X-Z (李秀珍), *et al.* Potential impact of seasonal temperature increase pattern on the succession of coniferous-broadleaved Korean pine mixed forest in Xiaoxing'an Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 1925–1931 (in Chinese)
- [47] Zhu HF, Shao XM, Yin ZY, *et al.* August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, **305**: 84–92
- [48] Shen CC, Wang LL, Li MY. The altitudinal variability and temporal instability of the climate-tree-ring growth relationships for Changbai larch (*Larix olgensis* Henry) in the Changbai Mountains area, Jilin, Northeastern China. *Trees*, 2015, **30**: 901–912
- [49] Wang XC, Brown PM, Zhang YN, *et al.* Imprint of the atlantic multidecadal oscillation on tree-ring widths in northeastern Asia since 1568. *PLoS One*, 2011, **6**(7): e22740
- [50] Zhu LJ, Li ZS, Zhang YD, *et al.* A 211-year growing season temperature reconstruction using tree-ring width in Zhangguangcai Mountains, Northeast China: Linkages to the Pacific and Atlantic Oceans. *International Journal of Climatology*, 2017, **37**: 3145–3153
- [51] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, *et al.* On the 'divergence problem' in northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 2008, **60**: 289–305
- [52] Li Z-S (李宗善), Liu G-H (刘国华), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* Evaluation of temporal stability in tree growth-climate response in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(9): 1045–1057 (in Chinese)

作者简介 于健,男,1986年生,博士研究生.主要从事年轮气候学研究. E-mail: yujian1986829@sina.com

责任编辑 孙菊