

黑龙江胜山保护区阔叶红松林不同演替阶段径向生长与气候变化的关系

梁鹏鸿 王襄平* 吴玉莲 徐凯 吴鹏 郭鑫

北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要 黑龙江黑河为我国红松(*Pinus koraiensis*)分布的北界, 在研究红松林的生长、演替、分布, 及其对气候变化的响应上有独特的意义。该文通过研究胜山保护区内阔叶红松林的演替系列(软阔叶林、硬阔叶林、阔叶红松近熟林和成熟林4个阶段), 分析了树木径向生长与气候变化的关系在不同演替阶段的差异。结果表明: 从演替早期的软阔叶林到晚期的红松成熟林, 年表统计特征表明树木径向生长对气候波动的敏感性逐步降低。对年轮-气候关系的分析结果也表明气候对树木径向生长的影响随着演替的进展呈现规律性的变化。上年6月和12月的气温与红松成熟林的径向生长显著正相关, 表现出明显的“滞后效应”。红松成熟林的轮宽指数与当年6月气温显著负相关, 而与当年6月降水量显著正相关, 反映出生长季水分对红松生长的限制。上述这些限制作用均随着演替的进展而增强, 但在演替的早期影响不显著。相反, 上年6月降水量与软阔叶林的生长显著负相关, 但该限制作用在演替的中晚期消失。这些差异反映出随着演替的进展, 优势树种对水分的需求逐步提高。滑动相关分析表明研究区近几十年明显的气候干暖化趋势对各林型的生长兼具有利和不利的影响。不同因素综合作用下, 软、硬阔叶林阶段生长尚未产生清晰的长期变化趋势。但由于水分对红松林生长的限制作用增强, 红松林生长明显下降。今后气候进一步干暖化可能对红松林的生长、恢复演替和分布有不利影响。

关键词 红松林; 演替; 树木年轮; 气候变化; 胜山自然保护区

引用格式: 梁鹏鸿, 王襄平, 吴玉莲, 徐凯, 吴鹏, 郭鑫 (2016). 黑龙江胜山保护区阔叶红松林不同演替阶段径向生长与气候变化的关系. 植物生态学报, 40, 425–435. doi: 10.17521/cjpe.2015.0357

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

LIANG Peng-Hong, WANG Xiang-Ping*, WU Yu-Lian, XU Kai, WU Peng, and GUO Xin

Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China.

Abstract

Aims This research examined the different response of tree growth to climate change at the early, middle, late and matured successional stages of Korean pine (*Pinus koraiensis*) and broadleaf mixed forest.

Methods This research used dendroecological methods to analyze radial growth at different successional stages of Korean pine forests in response to climatic change in the Shengshan Nature Reserve of Heilongjiang.

Important findings Chronology statistics indicated that the sensitivity of radial growth to inter-annual climate variability decreased from early to later successional stage. Meanwhile, the influence of some climate indices to radial growth also changed during the successional process. Radial growth of matured forest was positively related to mean monthly temperature in June and December of previous year, revealing an obvious “lag effect” of temperature. The ring-width of matured forest had a negative correlation with mean monthly temperature but a positive correlation with monthly precipitation in June of current year, reflecting the limiting role of growing season water availability. However, these limiting effects gradually disappeared towards the earlier stages of forest succession. On the contrary, the growth of early successional forest was negatively correlated to precipitation in June of previous year, and this effect disappeared towards the later successional stages. These differences revealed increased demand of water by dominant species from early to later successional stages. A moving correlation analysis showed that the increased warming and drying climate in the research area had both positive and negative influences on radial growth of each forest type. Earlier successional forests did not show clear long-term growth

收稿日期Received: 2015-10-10 接受日期Accepted: 2016-02-19

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: wangxiangping@bjfu.edu.cn)

responses, but Korean pine forests had decreased radial growth in the past decades due to reduced water availability. Climate warming and drying in the future may impose negative impact on the growth, succession and distribution of Korean pine forests.

Key words Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest; succession; dendroecology; climate change; Shengshan Nature Reserve

Citation: Liang PH, Wang XP, Wu YL, Xu K, Wu P, Guo X (2016). 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*, 40, 425–435. doi: 10.17521/cjpe.2015.0357

全球气候变暖会影响陆地生态系统的结构、功能和分布,特别是在中高纬度地区(Hu *et al.*, 2002)。IPCC (2007)报告指出,高纬度地区气候变化的幅度比低纬度地区大。根据大气环流模型(GCMs)预测,我国大陆平均气温增幅可达5–6 °C,东北地区作为我国纬度最高的森林分布区,增幅可能更大(王冀等, 2008)。

气候变化对森林的一个直接影响是作用于树木的生长过程(Kramer *et al.*, 2000),使树木呈现出相应的径向生长变化(Goldblum & Rigg, 2005),但径向生长对气候变化的响应因树种、环境因素和地域的差异而有明显不同(Leal *et al.*, 2007)。气候变化的长期影响可能会改变物种的分布范围(Walther, 2003),进而改变植物群落的分布和物种组成。树木年轮能够准确记载树木生长过程中经历的气候和环境的变化过程(Fritts, 1976),因此成为研究树木生长、群落动态对气候变化响应的一种重要手段(Wang *et al.*, 2006b; 常锦峰等, 2009)。

目前有关树轮气候学的研究,由于针叶树种的早晚材区别明显,轮印清晰更便于分析,更多地选取针叶树种作为研究对象,如通过云杉(*Picea asperata*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、红松(*Pinus koraiensis*)等针叶树种来研究年轮与气候的关系(Leal *et al.*, 2007; 陈力等, 2011; 曾令兵等, 2012);也有少数研究用阔叶树进行年轮气候分析,如在长白山林线附近研究气候因子对岳桦(*Betula ermanii*)的生长限制(Yu *et al.*, 2007),在东北南部研究蒙古栎(*Quercus mongolica*)生长对气候变化的响应(李腾等, 2014)等。在混交林中开展的工作则相对较少(Lebourgeois *et al.*, 2013)。

红松针阔混交林是我国东北东部的地带性森林植被,在东北亚森林中占有重要的地位(周以良, 1997)。但是,目前阔叶红松林被严重破坏,形成了大量处于不同演替阶段的次生林。研究不同演替阶

段树木生长对气候变化的响应,对于气候变化背景下促进阔叶红松林的恢复演替有着重要的意义。但是,迄今为止还很少有人对阔叶红松林的不同演替阶段进行年轮-气候关系的比较研究。高露双等(2013)曾对长白山阔叶红松林中共存的红松和山杨(*Populus davidiana*)进行了比较研究,但并没有包括阔叶红松林各演替阶段的不同林型。丘阳等(2014)在长白山的研究虽然包括了3个演替阶段,但只针对红松种群的生产力进行了分析,而没有对每个演替阶段的优势种进行比较。这些研究对于理解红松林恢复演替对气候变化的响应有重要意义,直接针对对不同演替阶段的比较研究无疑是必要的。

目前关于阔叶红松林及其次生林的树木年轮研究多集中在长白山地区,仅有少量文献涉及其他区域,这不利于全面地理解阔叶红松林的恢复演替与气候变化的关系。黑龙江黑河市的胜山保护区地处小兴安岭西北坡,是温带、寒温带的过渡地带。这种生态交错区由于许多物种处于寒冷胁迫的临界状态,生态系统对气候变化十分敏感(国庆喜等, 2001; Wang *et al.*, 2006b)。同时,该地区是我国红松分布的北界,对于研究阔叶红松林的生长、分布、恢复演替对气候变化的响应都有着重要的意义。

本文以胜山阔叶红松林不同演替阶段的4种林型(软阔叶林(早期)、硬阔叶林(中期)、阔叶红松近熟林(中晚期)和红松成熟林(晚期))为研究对象,通过研究树木径向生长与气候因子的关系,探讨气候变化对不同演替阶段树木生长影响的差异。这对于预测未来气候变化背景下森林的演替以及红松林的分布格局具有重要的参考价值。

1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省黑河市境内的胜山国家级自然保护区(49.42°–49.67° N, 126.42°–127.03° E)。保护区地处小兴安岭西北坡,毗邻大兴安岭林

区,为大小兴安岭的交错过渡地带。该地区属于温带和寒温带气候的过渡区,气候寒冷,年平均气温 -2°C ,最低气温 -40°C ,最高气温 36°C ,年降水量550–620 mm,主要集中在夏季6–8月,占全年降水量的65.7%。这里海拔不高,一般为500 m左右,没有明显的植被垂直分布。其植被呈现出大、小兴安岭植物区系交错、过渡的特点。代表林型是以红松为主的针阔混交林,主要阔叶树包括紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、色木槭(又称五角枫, *Acer pictum* subsp. *mono*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)等,同时还伴生一些欧亚大陆针叶林中的寒温性树种,如红皮云杉(*Picea koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)等。研究区内地带性土壤为暗棕壤,非地带性土壤有草甸土、沼泽土、泥炭土等(吴鹏, 2015)。

2 研究方法

2.1 调查取样及年轮测定

本研究在胜山自然保护区选择阔叶红松林演替序列上的4种林型,即软阔叶林、硬阔叶林、阔叶红松近熟林和成熟林。其中软阔叶林的主要树种为白桦,硬阔叶林的主要树种为蒙古栎,红松近熟林和成熟林的主要树种包括红松、红皮云杉。为了避免局域环境差异的影响,不同林型尽量选择立地条件相似的林分设置样方。样方坡向均为北坡,海拔范围在460–630 m,坡度在 3° – 18° 之间,立地条件基本相似。各林型基本情况见表1。每个林型设置1个样方,样方面积50 m \times 40 m,由10 m \times 10 m的样格组成。对样方中的乔木进行调查,记录物种组成,对每木测定胸径和树高。

在每个林型的样方内,随机选择50株达到林冠

层且健康生长的优势树种的个体。用生长锥在胸径处(距地面1.3 m)沿东北、西南方向各钻取一根树芯,样本于2013年夏季采集。采集的年轮样本按照标准的处理程序进行干燥、固定和打磨(Stokes, 1996),直至能在显微镜下清楚地分辨树木年轮的早材和晚材的分界线。然后通过LINTAB6年轮测量仪(Rintech, Heidelberg, Germany)和TSAP软件进行年轮宽度的测定,量测的精度是0.001 mm。采用骨架图法、COFECHA程序对年轮序列进行交叉定年(Holmes, 1983),对数据进行检验、修正错误并剔除异常序列及与主序列相关性差的样芯,直至最终满足要求。最后利用ARSTAN程序对经过交叉定年的数据进一步处理(Cook, 1985),采用负指数函数模拟树木的生长趋势,以去除树木自身遗传因素产生的生长趋势和树木之间竞争导致的抑制和释放等生长趋势,得到标准年表和差值年表,年表中的轮宽指数为实际年轮宽度与去除生长趋势后的轮宽值的比值(Fritts, 1976)。经比较,差值年表的统计特征明显好于标准年表,其优点在于保留了更多的高频振荡信息,因此最终采用差值年表进行树木生长和气候关系的分析。

2.2 气候数据和分析

胜山保护区地处偏远地区,附近没有气象台站。因此本文气候资料采用CRU TS 3.22高分辨率的月平均气温和月降水量数据,空间分辨率是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。该数据在国内外树轮年代学研究中得到了广泛的应用(Liang *et al.*, 2008)。闻新宇等(2006)指出CRU资料在区域尺度上与全国典型分区的气温变率一致,降水量的变化与160个气象站点的观测吻合,有较高的可信度。

气候数据的时间段为1960–2012年。考虑到上一年气候对当年树木生长可能会产生影响,即产生

表1 各演替阶段样方的林分特征

Table 1 Stand characteristics of the plots for different succession stages

| 演替阶段 Successional stage | 优势种 Dominant species | 胸径平均值 Mean DBH (cm) | 树高平均值 Mean tree height (m) | 最大胸径 Max DBH (cm) | 最大树高 Max tree height (m) | 林分密度 Stem density (tree·hm ⁻²) |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| 早期 Early | 白桦 <i>Betula platyphylla</i> | 13.2 | 13.3 | 29.8 | 22.6 | 953 |
| 中期 Middle | 蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i> | 11.1 | 8.9 | 43.8 | 24.3 | 1 576 |
| 中晚期 Mid-late | 红松 <i>Pinus koraiensis</i> , 红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i> | 11.9 | 12.0 | 51.8 | 28.9 | 1 723 |
| 晚期 Late | 红松 <i>Pinus koraiensis</i> , 红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i> | 16.6 | 13.1 | 67.7 | 28.6 | 1 180 |

DBH, diameter at breast height.

“滞后效应” (李江风, 2000), 选取上年6月到当年9月平均气温和月降水量与轮宽指数进行相关性分析、滑动相关分析, 其中滑动分析选择的滑动区间为32年, 从1961年开始每32年计算一个相关系数, 然后逐年向后滑动, 分析了1961–1992年至1981–2012年的轮宽指数与气候因子的相关关系, 以研究树木径向生长对气候变化的响应。另外, 还分析了其他气候指标, 如各季节的平均气温和降水量等, 由于结果相似, 故不列出。数据分析采用DendroClim 2002程序完成。

3 结果和分析

3.1 研究区的气候变化特征

胜山地区的气候记录表明, 自1960年以来, 研究区的年平均气温以每年0.04 °C ($R^2 = 0.52$)的速度递增, 年降水量以每年5.33 mm ($R^2 = 0.27$)的速度递减, 即该地区的气候近几十年来表现出明显的干暖化趋势。

3.2 年表特征分析

由胜山自然保护区各林型的差值年表(图2)可以看出, 阔叶红松近熟林和成熟林的轮宽指数的波动趋势较为一致, 但与阔叶林的波动并不一致。而软阔叶林和硬阔叶林的波动趋势也有明显的差异。各演替阶段年表之间的相关分析结果(表2)进一步表明, 演替阶段相差越远, 年表之间的相关性越低。这些结果说明径向生长对气候变化的响应在不同的演替阶段有明显的差异。在近几十年的共同区间内, 阔叶林年表的波动幅度明显大于红松林, 说明演替前期阔叶林阶段的树木生长对气候波动更为敏感。

年表的统计参数也证实了这一点。由表3可知: 从演替早期的软阔叶林到演替晚期的红松成熟林, 平均敏感度和标准偏差总体上下降, 说明树木生长对气候波动的敏感性降低; 第一主成分所占的方差量、信噪比以及样本的总体代表性也均随着演替的进展而呈现总体下降的趋势, 表明演替早期的林分生长受环境因子波动的限制作用更强。

总体代表性能够反映所建年表代表整个群体的程度。表3中4种林型的差值年表的总体代表性均超过了阈值0.85, 这说明年表的可信度较高, 适于进行年轮-气候关系的分析(Cook & Kairiukstis, 1990)。

3.3 径向生长与月气候因子的相关分析

不同林型年表的轮宽指数与不同月份气候指标

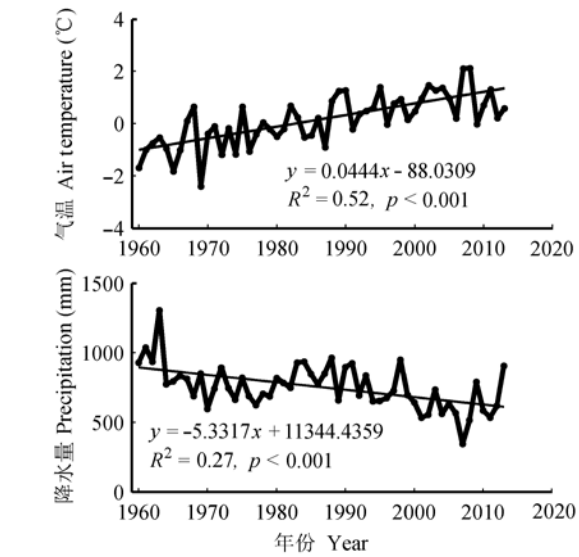


图1 研究区年平均气温和年降水量的变化。
Fig. 1 Changes in mean annual temperature and precipitation in the study area.

表2 1960–2012年4个演替阶段差值年表间的相关系数
Table 2 Correlations among the residual chronologies for four successional stages during the period from 1960 to 2012

| | 早期 Early | 中期 Middle | 中晚期 Mid-late |
|--------------|----------|-----------|--------------|
| 中期 Middle | 0.186 | | |
| 中晚期 Mid-late | 0.074 | 0.261 | |
| 晚期 Late | 0.048 | 0.242 | 0.569** |

**, $p < 0.01$.

的相关关系见表4, 可以看出树木生长与气候因子的关系在不同的演替阶段存在明显的差异。

气候对树木生长的影响表现出明显的“滞后效应” (李江风, 2000), 但上年气候对生长的影响随着演替阶段的不同而有明显的差异。比如, 上年6月的气温与红松成熟林的轮宽指数显著正相关, 但与前几个演替阶段径向生长的相关性均不显著(表4)。上年6月降水量与软阔叶林的轮宽指数显著负相关($r = -0.43$), 但这种关系在后几个演替阶段较弱($r > -0.22$)且不显著(图3A)。

上年12月的气温与红松成熟林的轮宽指数显著正相关($p < 0.05$), 但与其他几个林型的相关关系并不显著, 且相关系数从演替晚期的0.27逐步下降到演替早期的-0.13 (表4; 图3B), 这也表明了气候对径向生长的影响随着演替的进展有规律性的变化。

从当年气候来看, 当年6月的气温和红松近熟林、成熟林的轮宽指数显著负相关, 而在两个阔叶林型中相关关系不显著。同样, 这种相关性也表现

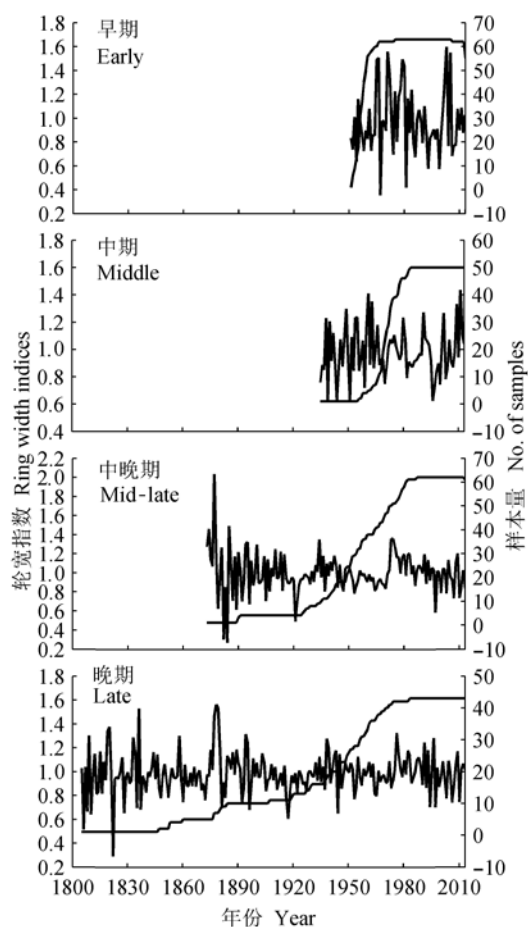


图2 不同演替阶段的轮宽指数(差值年表)和样本量。

Fig. 2 The residual chronology and number of samples for different successional stages.

出随着演替进展的规律性变化: 相关系数从演替早期的0.19逐步下降到演替晚期的-0.32 (图3D)。这实际上反映了红松林相对于演替早期树种对生长季降水的较高需求。这一点从当年6月降水量和轮宽指数的关系也可得到印证(图3C)。该相关关系在硬阔叶林到红松成熟林的演替阶段较高($r = 0.22-0.36$), 而在软阔叶林中很低($r = -0.05$), 也反映出随着演替的进展优势树种对水分需求提高的总体趋势。

3.4 径向生长与气候因子的动态关系

采用窗口为32年的滑动相关来分析各演替阶段年表与气候因子的动态关系。结果表明, 对于软阔叶林, 在滑动区间内(1992–2012年)上年6月的降水量与径向生长的负相关是一种稳定的限制作用。当年4月降水量与树木生长的正相关关系增强, 当年1–4月及6–7月气温与生长的显著相关性则都在近些年消失。

对于硬阔叶林, 上年12月的降水量与生长的正相关虽有所波动, 但总体上表现为稳定的限制因素。上年9月降水量与生长的正相关则在2002年后消失。

对于红松林, 当年生长季水分对生长的限制作用有增强趋势, 表现为近熟、成熟林的生长与6、7月气温的负相关, 以及与6、7月降水量的正相关都总体上增强。上年12月气温与生长的正相关在近熟、成熟林中也有增强的趋势。

在各林型中, 都还有一些其他的显著关系, 由于相关性显著的年份较少或相关性存在起伏波动, 难以判断为明确的变化趋势, 也不能排除为偶然的相关(常锦峰等, 2009; 曾令兵等, 2012), 暂不予讨论。

总体来看, 除一些气候因子对径向生长表现出稳定的限制作用之外, 对红松林而言, 当年生长季水分、上年冬季气温对其径向生长的正作用都有增强趋势, 而对于演替早期的软阔叶林, 当年春季(4月)降水量与其径向生长的正相关也有增强的趋势。

4 讨论

本文通过对阔叶红松林不同演替阶段的径向生长和气候因子关系的分析发现气温和降水量对树木径向生长的影响随着演替的进展存在着规律性的变化。本文研究结果与以往在东北地区的研究既有一致的地方, 也有一些明显的差异。

4.1 红松林径向生长的影响因素

前人对长白山中低海拔红松林的研究表明, 红松的径向生长与上年冬季(12月)月平均气温显著负相关(高露双等, 2013), 本研究的结果与之相反, 这可能是由于研究地点的不同所导致的。很多研究都指出, 不同气候条件下, 同一树种的生长和某一气候指标的关系会有很大的差异(常锦峰等, 2009; 曾令兵等, 2012)。胜山自然保护区位于红松分布的北纬上限, 冬季的气温远低于长白山。在本文研究中, 上年冬季气温和年轮生长的正相关关系应当反映了高纬度地区冬季低温对红松生长的限制作用。比如, 在寒冷地区冬季的气温较高可保持树木代谢活动的正常, 有利于常绿针叶树进行光合作用, 从而为下年树木的生长积累能量, 加快树木下一生长季的径向生长(Fritts, 1976; Gutiérrez, 1991)。这种冬季气温对树木径向生长的正效应在软阔叶林、硬阔叶林阶

表3 不同演替阶段的年表统计参数

Table 3 Summary statistics for residual chronology of different successional stages

| 演替阶段 Successional stage | 早期 Early | 中期 Middle | 中晚期 Mid-late | 晚期 Late |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------------|-----------|
| 共同区间 Common interval time span of year | 1957–2013 | 1969–2013 | 1951–2013 | 1949–2013 |
| 样本数(树芯/株数) Number of cores/trees | 63/48 | 50/41 | 63/48 | 43/33 |
| 平均敏感度 Mean sensitivity | 0.289 | 0.236 | 0.248 | 0.178 |
| 标准偏差 Standard deviation | 0.280 | 0.188 | 0.216 | 0.177 |
| 一阶自相关系数 Autocorrelation order 1 | 0.165 | −0.244 | −0.166 | 0.188 |
| R1样本间平均相关系数 Mean correlations among all radii | 0.473 | 0.251 | 0.341 | 0.299 |
| R2不同树木之间平均相关系数 Mean correlations between trees | 0.729 | 0.402 | 0.689 | 0.700 |
| R3同一树木不同样本之间平均相关系数 Mean correlations between trees and within trees | 0.470 | 0.250 | 0.336 | 0.293 |
| 信噪比 Signal-to-noise ratio | 26.043 | 6.380 | 13.459 | 10.682 |
| 样本总体代表性 Express population signal | 0.963 | 0.864 | 0.931 | 0.914 |
| 第一主成分所占方差量 PCA1 (%) | 0.501 | 0.308 | 0.377 | 0.347 |

PCA1, variance in the first principal component.

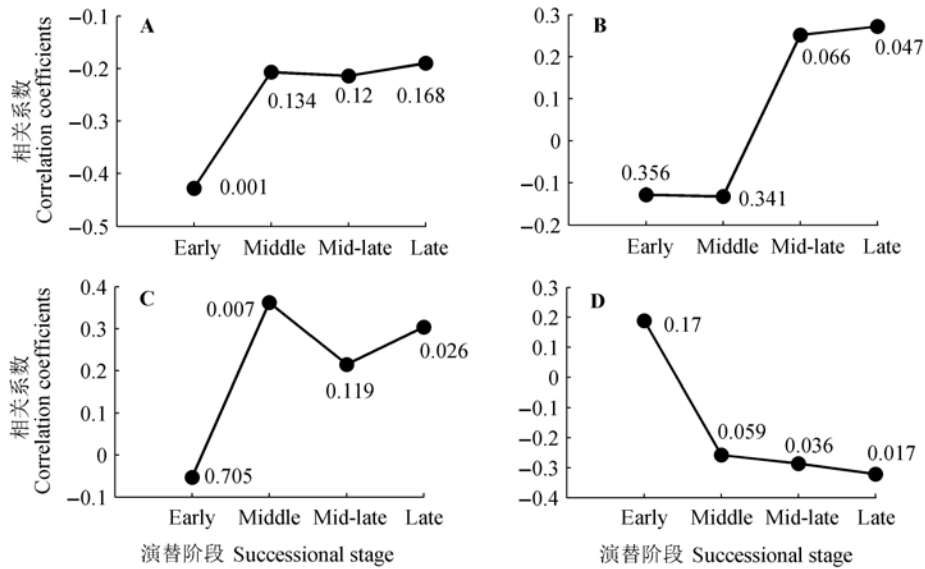


图3 不同演替阶段轮宽指数与单月气候因子的相关系数(标注的数字为 p 值)。A, 上年6月降水。B, 上年12月平均气温。C, 当年6月降水。D, 当年6月平均气温。Early, 早期; Middle, 中期; Mid-late, 中晚期; Late, 晚期。

Fig. 3 Correlation coefficient between ring-width indices and monthly climate parameters of different successional stage (the number associated with each coefficient was p value). A, Precipitation in June of the previous year. B, Mean air temperature in December of the previous year. C, Precipitation in June of the current year. D, Mean air temperature in June of the current year.

段完全不显著,可能与其优势种桦树、蒙古栎等在冬季不能进行光合作用有关。相反,较高的冬季气温还会增加这些落叶阔叶树种因呼吸作用而消耗的有机物质,可能影响来年树木生长。

对长白山中低海拔红松林的研究表明,红松的轮宽指数与当年生长季的气温负相关(高露双等, 2013),本研究的结果与之一致。树木径向生长与生长季的气温负相关主要是由于气温上升加快了土壤的水分蒸发,并促进植物的蒸腾作用,进而导致水分有效性降低,实际上体现了水分的限制作用(曾

令兵等, 2012)。对长白山暗针叶林和红松林过渡带的研究则表明,红松径向生长和生长季气温正相关(高露双等, 2011)。有研究表明,随着海拔升高,热量减少而水分条件改善(包括降水量的增加和蒸发量的减少),降水量对树木生长的限制作用逐步减弱乃至消失(常锦峰等, 2009)。因此上述研究结果的差异说明,红松对水分条件的要求是比较高的,其生长首先受到水分的限制,生长季气温升高对其生长的正效应只有在没有水分亏缺的情况下(如海拔分布上限)才能实现,这一点在本文与高露双等

表4 研究区不同演替阶段差值年表轮宽指数与单月气候因子的相关性

Table 4 Correlations between ring-width indices and monthly climatic indices for different successional stages

| | 月平均气温 Monthly mean air temperature | | | | 月降水量 Monthly precipitation | | | |
|-----|------------------------------------|-----------|--------------|---------|----------------------------|-----------|--------------|---------|
| | 早期 Early | 中期 Middle | 中晚期 Mid-late | 晚期 Late | 早期 Early | 中期 Middle | 中晚期 Mid-late | 晚期 Late |
| p6 | 0.175 | 0.246 | 0.107 | 0.276* | -0.428** | -0.207 | -0.214 | -0.190 |
| p7 | -0.023 | -0.059 | 0.088 | 0.068 | -0.112 | 0.028 | -0.077 | -0.155 |
| p8 | -0.074 | 0.069 | -0.232 | -0.120 | -0.266 | -0.037 | -0.009 | 0.032 |
| p9 | 0.060 | 0.058 | 0.021 | -0.151 | -0.022 | 0.147 | 0.091 | 0.114 |
| p10 | -0.147 | 0.139 | -0.061 | 0.131 | -0.199 | -0.102 | 0.068 | -0.025 |
| p11 | 0.102 | 0.011 | 0.021 | 0.089 | -0.088 | 0.048 | 0.211 | -0.133 |
| p12 | -0.128 | -0.132 | 0.252* | 0.272* | 0.110 | 0.353** | -0.171 | -0.086 |
| c1 | -0.129 | 0.010 | -0.052 | -0.048 | 0.149 | 0.023 | -0.110 | 0.065 |
| c2 | -0.224 | -0.033 | -0.021 | 0.015 | 0.160 | -0.007 | 0.031 | -0.139 |
| c3 | -0.013 | -0.025 | 0.128 | 0.052 | -0.130 | -0.154 | -0.113 | -0.019 |
| c4 | -0.184 | -0.275* | 0.053 | 0.051 | 0.208 | 0.037 | 0.182 | 0.045 |
| c5 | 0.027 | -0.114 | -0.103 | -0.065 | -0.065 | 0.054 | -0.051 | 0.018 |
| c6 | 0.189 | -0.258* | -0.286* | -0.322* | -0.053 | 0.362** | 0.215 | 0.304* |
| c7 | -0.318* | -0.106 | -0.115 | -0.158 | 0.067 | 0.100 | 0.132 | 0.228 |
| c8 | -0.028 | -0.020 | -0.015 | -0.004 | -0.019 | 0.079 | -0.174 | 0.079 |
| c9 | 0.021 | 0.001 | 0.092 | -0.069 | 0.059 | 0.117 | 0.180 | 0.021 |

c1-c9表示当年1-9月的气候指标, p6-p12表示上一年6-12月的气候指标。*, $p < 0.1$; **, $p < 0.05$; ***, $p < 0.01$ 。c1-c9 were climatic indices from Jan. to Sept. of the current year, p6-p12 were climatic indices from June to Dec. of the previous year. *, $p < 0.1$; **, $p < 0.05$; ***, $p < 0.01$.

(2011)的研究结果比较中表现得更为明显。本研究地区处于红松纬度分布的上限,从热量水平来说和高露双等(2011)的研究相似,都处在红松分布的热量下限(Wang *et al.*, 2006b)。但由于胜山是红松的分布北界,即红松只能分布在低海拔(周以良, 1997),水分条件不如长白山的暗针叶林和红松林过渡带,因此和长白山低海拔红松林(高露双等, 2013)一样,也表现出明显的生长季水分限制。森林或树种的海拔和纬度分布上限在气候变化尤其是树轮年代学的研究中受到了广泛的关注(Holtmeier & Broll, 2005; Wang *et al.*, 2006a),但关于同一树种在海拔和纬度分布上限的系统比较研究还很有限。上述分析表明,这种比较研究对揭示树种对气候变化的响应可能具有重要的意义,今后需要加强这方面的研究。

此外,其他的研究证据也支持红松对水分的这种生理需求。如陈列等(2013)对长白山典型红松林的研究发现红松的径向生长与当年生长季的降水正相关。吴玉莲等(2014)利用Biome-BGC模型模拟长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应,模拟结果表明红松净初级生产力与生长季的降水量正相关、与生长季初期的气温负相关,从另一个方面也印证了上述通过树木年轮得到的结果。

4.2 阔叶林径向生长的影响因素

相对于针叶树和高山林线(王晓春等, 2004; Yu *et al.*, 2007; 常锦峰等, 2009; 高露双等, 2011),在东北关于红松林演替系列的树轮比较研究还较少。本文的研究结果表明,径向生长对气候变化的响应随着演替的进展存在规律性的变化(图3),而这种变化与演替前期阔叶树与红松对水热条件的生理需求不同有着密切关系。比如,本文的结果表明软阔叶林与上年生长季的降水显著负相关且关系稳定(图4),这与高露双等(2013)对长白山山杨的研究结果一致。阔叶红松林演替的先锋树种山杨、白桦等属阳性树种,喜光耐寒,但不耐湿,生长季过多的降水会改变土壤的水环境,从而可能抑制下一年树木的生长(Armstrong *et al.*, 1994)。而随着演替的进展,林分优势种逐渐过渡为中生、耐阴树种,因此上年6月的降水与径向生长的负相关关系在后几个演替阶段就不再显著(图3A)。又如,当年6月气温对径向生长的负作用从演替早期到演替晚期逐渐增强,而当年6月降水对径向生长的正效应则呈相反的趋势(图3C、3D),这与随着演替的进展优势树种对水分的需求逐步提高的事实是一致的。

关于东北地区硬阔叶树的树轮研究目前还十分

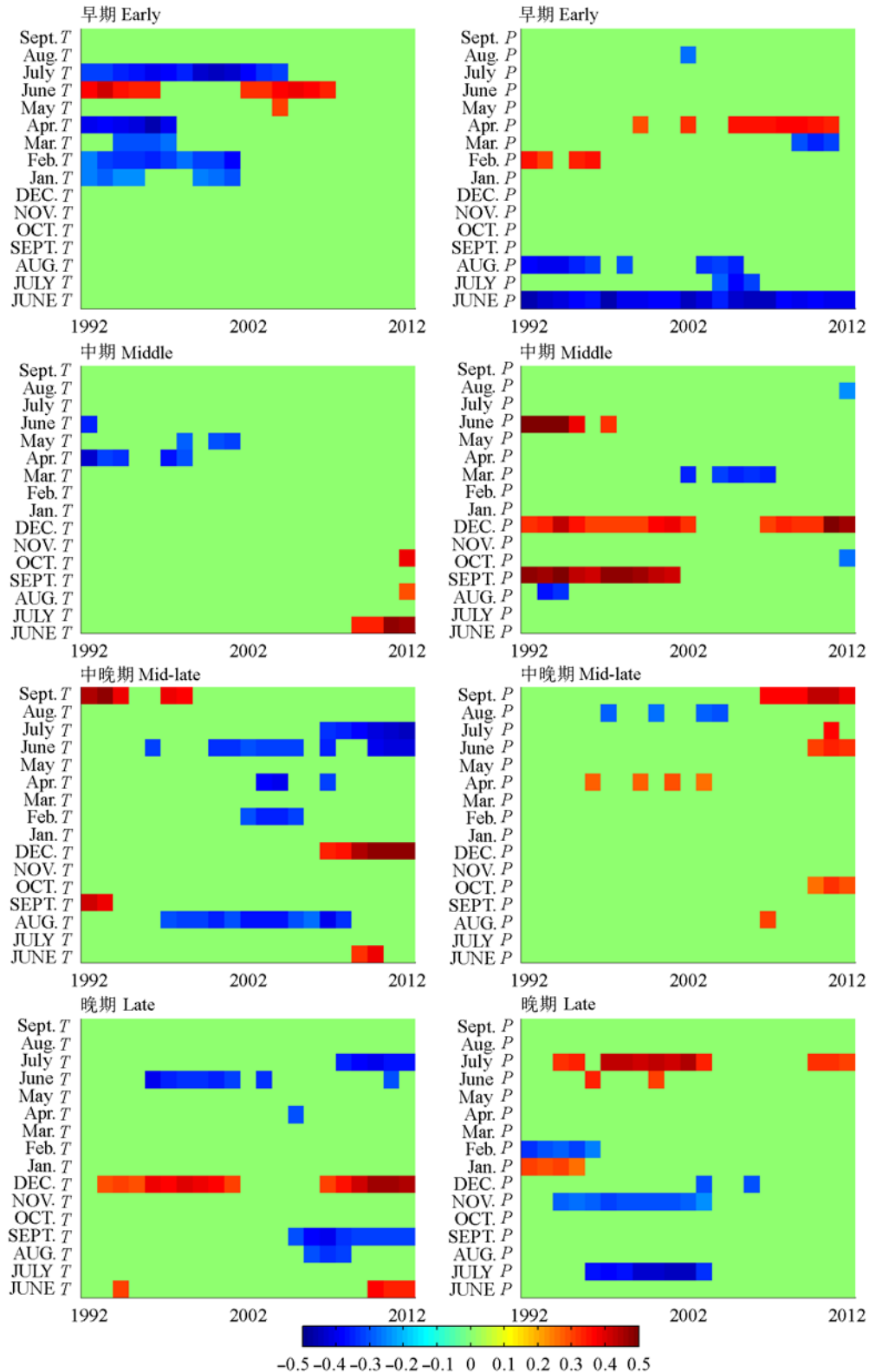


图4 不同演替阶段年表与气候因子的滑动相关关系分析。T, 月平均气温; P, 月降水量。T或P前的大写字母(如JUNE)为上年各月, 首字母大写的(如June)为当年各月。绿色表示年表与气候因子的相关关系不显著。

Fig. 4 Correlations with moving intervals between ring-width indices and monthly climatic indices for different successional stages. T, monthly mean air temperature; P, monthly precipitation. Capital letters before T or P (e.g. JUNE) denote the climatic indices for the previous year, and the first letter capitalized (e.g. June) is for the current year. Green color indicates non-significant correlations.

有限。李腾等(2014)在东北南部(辽宁千山)的研究表明, 蒙古栎的年轮宽度与当年春、夏的降水正相关, 与气温负相关, 和本研究在胜山得到的结果(表4)相似。此外, 吴玉莲等(2014)的Biome-BGC模拟结果表明, 长白山硬阔叶树净初级生产力也与生长季降水正相关。辽宁千山已超出了阔叶红松林分布的南界(周以良, 1997), 综合上述研究结果可以推测, 在整个红松林分布区, 当年生长季水分对硬阔叶树径向生长的强限制作用可能是普遍现象。从图3可以看出, 硬阔叶林与气候因子的关系总体上与两种红松林更为相似, 而与软阔叶林差距较大, 这与硬阔叶林的主要树种也是红松的伴生树种的事实也是吻合的。不过, 由于类似的研究还很少, 需要进一步开展红松林不同演替阶段的比较研究, 对这些问题进行系统的研究。

4.3 气候变化对红松林的可能影响

本研究区的气候近几十年来表现出明显的干暖化现象(图1), 这种气候变化趋势可能对红松林的生长、演替乃至分布产生影响。本文结果表明, 生长季降水对于分布区北缘的红松林生长是一种关键的限制作用(图3C、3D)。该限制作用在近十几年来有增强的趋势(图4), 也与气候干暖化的趋势一致。对长白山中低海拔红松林的研究(高露双等, 2013)也发现, 红松径向生长由于气候变暖, 与生长季气温的负相关关系在增强。长白山近几十年来降水量下降的幅度较弱, 因此, 高露双等(2013)的研究说明仅生长季气温上升导致的水分有效性降低就足以对红松生长产生明显抑制作用, 进一步反映了红松生长对生长季水分较高的需求。胜山地区降水量减少的趋势十分明显(图1), 可以预测, 气候变化对胜山红松林生长的不利影响较长白山将更为严重。

气候变暖对胜山红松林也表现出一定的促进作用: 上年冬季气温与生长正相关(图3), 且这种促进作用在两种红松林中都表现出增强的趋势(图4)。因此气候变暖可能存在有利于红松林生长的方面。不过, 从图2来看, 两种红松林的轮宽指数在20世纪70年代以来均表现出明显的下降趋势(轮宽和年份的相关系数在近熟林、成熟林分别为-0.47、-0.31), 说明生长季水分的抑制作用影响更大, 其综合效应表现为近几十年来的气候变化对分布区北缘红松林的生长不利。近年来, 不少气候-年轮学研究也都表明, 气候变暖导致的水分不足可能导致高纬度森林生长

下降, 而不是如早期所认为的气候变暖促进生长(Barber *et al.*, 2000)。

本文结果表明上年6月的降水与软阔叶林生长的负相关关系具有稳定性(图3A, 图4), 上年6月的降水是关键的限制作用, 进一步反映了白桦等先锋树种不耐湿的生理特征。未来降水进一步减少是否会导致该限制作用消失, 从而有利于软阔叶林的生长还有待进一步研究。滑动相关表明软阔叶林的生长与气温的显著相关性消失, 而与当年4月降水的正相关关系有增强趋势, 与研究区气候干暖化的趋势一致。从轮宽指数近几十年没有明显上升或下降的趋势(图2)来看, 气候变化的正、负效应同时作用, 对软阔叶林生长尚未产生明显的长期影响。对于硬阔叶林, 上年12月的降水与生长的正相关为稳定的限制作用, 而其余限制作用各有增强或消失的趋势(图4)。从年表来看, 各种因素综合作用下, 近几十年轮宽指数总体平稳, 但在1995年后有明显的增长。这种增长的趋势是否指示着气候变化的长期影响, 还有待进一步研究。

综合来看, 近几十年的气候干暖化对红松林各演替阶段的径向生长影响复杂, 正负效应都存在。对于演替前期的软阔叶林、硬阔叶林, 气候变化还没有导致明显的长期生长变化趋势。但对于红松林, 生长季水分的主导限制作用已导致生长的下降。可以预测, 今后的气候干暖化是不利于东北地区红松林的生长和恢复演替的。这有可能导致红松林分布区向南方降水量较高的区域退缩。高露双等(2011, 2013)在长白山的研究也认为气候变暖可能导致红松在低海拔的适宜分布区缩小, 但可能向较湿润的高海拔扩展。如果这些趋势在今后的研究中得到证实, 则意味着气候变暖后东北红松的适宜分布区将大幅缩小, 对阔叶红松林的恢复是十分不利的。

基金项目 国家自然科学基金(31370620)。

参考文献

- Armstrong W, Brändle R, Jackson M (1994). Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, 43, 307–358.
- Barber VA, Juday GP, Finney BP (2000). Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 405, 668–673.
- Chang JF, Wang XP, Zhang XP, Lin X (2009). Alpine timberline dynamics in relation to climatic variability in the

doi: 10.17521/cjpe.2015.0357

- northern Daxing'an Mountains. *Mountain Research*, (6), 703–711. (in Chinese with English abstract) [常锦峰, 王襄平, 张新平, 林鑫 (2009). 大兴安岭北部长白山高山林线动态与气候变化的关系. *山地学报*, (6), 703–711.]
- Chen L, Gao LS, Zhang Y, ZHANG SX, Zhao XH (2013). Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 1285–1291. (in Chinese with English abstract) [陈列, 高露双, 张赞, 张思行, 赵秀海 (2013). 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系. *生态学报*, 33, 1285–1291.]
- Chen L, Wu SH, Dai EF (2011). Analysis of the tree-ring width chronologies of *Pinus koraiensis* and *Larix olgensis* on Changbai Mountains, Northeast China. *Geographical Research*, 30, 1147–1155. (in Chinese with English abstract) [陈力, 吴绍洪, 戴尔阜 (2011). 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征. *地理研究*, 30, 1147–1155.]
- Cook ER (1985). *A Time Series Analysis Approach to Tree-ring Standardization*. PhD dissertation, The University of Arizona, Tucson, USA.
- Cook ER, Kairiukstis LA (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Springer Science & Business Media, Berlin, Germany.
- Fritts HC (1976). Tree rings and climate. *Scientific American*, 226(5), 95–99.
- Gao LS, Wang XM, Zhao XH (2011). Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 27–34. (in Chinese with English abstract) [高露双, 王晓明, 赵秀海 (2011). 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*, 35, 27–34.]
- Gao LS, Wang XM, Zhao XH (2013). Growth response of two coexisting species to climate change in broadleaved Korean pine forests in Changbai Mountain, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 35(3), 24–31. (in Chinese with English abstract) [高露双, 王晓明, 赵秀海 (2013). 长白山阔叶红松林共存树种径向生长对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 35(3), 24–31.]
- Goldblum D, Rigg L (2005). Tree growth response to climate change at the deciduous boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 2709–2718.
- Guo QX, Li JL, Liu JX, Zhang YM (2001). The scientific significance of the forest vegetation ecotone between Daxing'an and Xiaoxing'an Mountains to global climate change study. *Journal of Northeast Forestry University*, 29 (5), 1–4. (in Chinese with English abstract) [国庆喜, 李具来, 刘继新, 张玉民 (2001). 大小兴安岭森林植被交错区生态系统在全球气候变化研究中的科学意义. *东北林业大学学报*, 29 (5), 1–4.]
- Gutiérrez E (1991). Climate-tree-growth relationships for *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Oecologica*, 12, 213–225.
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- Holtmeier FK, Broll G (2005). Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14, 395–410.
- Hu FS, Lee BY, Kaufman DS, Yoneji S, Nelson DM, Henne PD (2002). Response of tundra ecosystem in southwestern Alaska to Younger Dryas climatic oscillation. *Global Change Biology*, 8, 1156–1163.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the IPCC intergovernmental panel on climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL eds. *Climate Change in 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kramer K, Leinonen I, Loustau D (2000). The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: An overview. *International Journal of Biometeorology*, 44(2), 67–75.
- Leal S, Melvin T, Grabner M, Wimmer R, Briffa K (2007). Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: The influence of site, altitude, tree species and climate. *Boreas*, 36, 426–440.
- Lebourgeois F, Gomez N, Pinto P, Mérian P (2013). Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *Forest Ecology and Management*, 303, 61–71.
- Li JF (2000). *Research and Application of Dendrohydrology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李江风 (2000). 树木年轮水文学研究与应用. 科学出版社, 北京.]
- Li T, He XY, Chen ZJ (2014). Tree-ring growth responses of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) to climate change in southern Northeast: A case study in Qianshan Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1841–1848. (in Chinese with English abstract) [李腾, 何兴元, 陈振举 (2014). 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应——以千山为例. *应用生态学报*, 25, 1841–1848.]
- Liang EY, Shao XM, Qin N (2008). Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 61, 313–320.
- Qiu Y, Gao LS, Zhang X, Guo J, Ma ZY (2014). Effect of climate change on net primary productivity of Korean pine (*Pinus koraiensis*) at different successional stages of

- broad-leaved Korean pine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1870–1878. (in Chinese with English abstract) [丘阳, 高露双, 张雪, 郭静, 马志远 (2014). 气候变化对阔叶红松林不同演替阶段红松种群生产力的影响. *应用生态学报*, 25, 1870–1878.]
- Stokes MA (1996). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson, USA.
- Walther GR (2003). Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(3), 169–185.
- Wang J, Jiang ZH, Ding YG (2008). Multi-model ensemble prediction of extreme temperature indices in China. *Resource Science*, 30, 1084–1092. (in Chinese with English abstract) [王冀, 江志红, 丁裕国, 张金玲, 张霞 (2008). 21世纪中国极端气温指数变化情况预估. *资源科学*, 30, 1084–1092.]
- Wang T, Zhang QB, Ma KP (2006a). Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 406–415.
- Wang XC, Zhou XF, Li SJ, Sun L, Mu CC (2004). The effect of climate warming on the structure characteristic of the timberline in Laotudingzi Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 2412–2421. (in Chinese with English abstract) [王晓春, 周晓峰, 李淑娟, 孙龙, 牟长城 (2004). 气候变暖对老秃顶子林线结构特征的影响. *生态学报*, 24, 2412–2421.]
- Wang XP, Tang ZY, Fang JY (2006b). Climatic control on forests and tree species distribution in the forest region of Northeast China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 48, 778–789.
- Wen XY, Wang SW, Zhu JH, Viner D (2006). An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 30, 894–904. (in Chinese with English abstract) [闻新宇, 王绍武, 朱锦红, Viner David (2006). 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化. *大气科学*, 30, 894–904.]
- Wu P (2015). *Litter Fall Production and Decomposition in Relation to Climate, Biological and Local Environments Factors in Forests of Northeast China*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese) [吴鹏 (2015). 东北地区森林凋落物产量、分解速率及其与气候、生物因素、局域环境因子的关系. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Wu YL, Wang XP, Li QY, Sun Y (2014). Response of broad-leaved Korean pine forest productivity of Mt. Changbai to climate change: An analysis based on BIOME-BGC Modeling. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50, 577–586. (in Chinese with English abstract) [吴玉莲, 王襄平, 李巧燕, 孙阎 (2014). 长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应: 基于BIOME-BGC模型的分析. *北京大学学报 (自然科学版)*, 50, 577–586.]
- Yu DP, Wang GG, Dai L, Wang Q (2007). Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 240, 105–113.
- Zeng LB, Wang XP, Chang JF, Lin X, Wu YL, Yin WL (2012). Alpine timberline ecotone tree growth in relation to climatic variability for picea crassifolia forests in the middle Qilian Mountains, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(5), 50–56. (in Chinese with English abstract) [曾令兵, 王襄平, 常锦峰, 林鑫, 吴玉莲, 尹伟伦 (2012). 祁连山中段青海云杉高山林线交错区树轮宽度与气候变化的关系. *北京林业大学学报*, 34(5), 50–56.]
- Zhou YL (1997). *Vegetation Geography in Northeast China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [周以良 (1997). 中国东北植被地理. 科学出版社, 北京.]

责任编辑: 王仁卿 责任编辑: 王 葳



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览