

DOI: 10.5846/stxb201308262159

张雪, 高露双, 丘阳, 郭静. 长白山红松不同树高处径向生长特征及其对气候的响应. 生态学报, 2015, 35(9): 2978-2984.

Zhang X, Gao L S, Qiu Y, Guo J. Characteristics of Korean pine (*Pinus koraiensis*) radial growth at different heights and its response to climate change on Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2978-2984.

长白山红松不同树高处径向生长特征及其对气候的响应

张 雪, 高露双*, 丘 阳, 郭 静

北京林业大学, 森林资源与环境管理国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要: 利用长白山红松不同树高(0.3、1.3、4、10、15、20、25 m)处的径向生长资料, 分析各树高处径向生长特征, 建立红松生长与气候因子的相关关系, 以期完善红松种群对气候变化的响应机制。结果表明: (1) 红松不同树高处年径向生长量变化趋势基本一致, 除在 1980 年前后, 20 m 处径向生长量出现异常增加外, 其他各高度径向生长均出现下降趋势, 红松基部和顶端(0.3、1.3 m 和 20 m)处径向生长年际变化更明显。随着树高增加, 各处年径向生长率有所降低, 0.3 m 处生长速率最大, 且与 10 m 和 15 m 处径向生长差异显著($P < 0.05$)。 (2) 不同树高处径向生长对气候因子的响应存在明显差异, 10 m 树高是红松径向生长对温度和降水响应差异的分界线。10 m 以下红松径向生长主要受到生长季温度的负作用, 尤其是 4 m 处, 与当年生长季初期(4 月和 5 月)温度显著负相关($P < 0.05$)。0.3 m 和 1.3 m 处径向生长分别与上年 9 月平均温度显著正相关($P < 0.05$), 当年 6 月平均和最高温度显著负相关($P < 0.05$)。随着树高上升, 降水对径向生长的促进作用增强, 而温度对径向生长的作用也发生改变。10 m(含)以上则受到温度和降水的共同作用。10 m 处径向生长对气候因子响应最敏感, 受到当年生长季高温的抑制作用, 还与上年和当年生长季末(9 月)降水显著正相关($P < 0.05$)。15 m 处径向生长与上年 9 月最低温度和降水显著正相关($P < 0.05$), 而与当年 5 月月平均温度显著负相关($P < 0.05$)。20 m 处径向生长与当年 3 月月平均、最低和最高温度, 当年 7 月月平均温度以及当年 5 月降水显著正相关($P < 0.05$), 而与当年 1 月降水显著负相关($P < 0.05$)。

关键词: 不同树高; 径向生长; 温度; 降水; 红松

Characteristics of Korean pine (*Pinus koraiensis*) radial growth at different heights and its response to climate change on Changbai Mountain

ZHANG Xue, GAO Lushuang*, QIU Yang, GUO Jing

Key Lab. for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Understanding the relationship between climate and growth at different heights gives insight into the mechanisms by which trees respond to climate change. In this paper, tree-ring data at different heights (0.3, 1.3, 4, 10, 15, 20, and 25 m,) on the north side of Korean pine (*Pinus koraiensis*) trees on Changbai Mountain were collected from 155 cores, taken from 25 Korean pine trees. Dendrochronology and a multiple comparison method (LSD) were used to analyze the radial growth characteristic and the climate-growth relationship. The results show that the trends in annual radial growth of Korean pine at different heights were essentially identical. Apart from an abnormal increase in the annual radial growth at a height of 20 m around 1980, the annual radial growths at other heights showed a downward trend. The most obvious variations were found at the base (0.3 m and 1.3 m) and crown (20 m) of Korean pines. With increasing tree height, the annual growth rates at different heights were all reduced. The maximum growth rate was observed at a height of 0.3 m, which

基金项目: 北京林业大学青年科技启动基金(bkx2011004); 国家"十二五"科技支撑计划(2012BAC01B03)

收稿日期: 2013-08-26; **网络出版日期:** 2014-08-01

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

was significantly different from the annual growth rates at 10 m and 15 m ($P < 0.05$). We identified a differential response of radial growth to temperature and precipitation at different heights, depending on whether the height was above or below 10 m. Radial growth at heights below 10 m was mainly controlled by temperature, particularly at a height of 4 m. The radial growth at 0.3 m and 1.3 m was significantly positively correlated with monthly mean temperature in September of the previous growing season ($P < 0.05$) and significantly negatively correlated with the monthly mean and maximum temperatures in June of the current growing season ($P < 0.05$), respectively. At a height of 4 m, the radial growth was significantly negatively correlated with the temperature at the beginning of current growing season (May and June) ($P < 0.05$). The positive influences of precipitation on radial growth became stronger and the impact of temperature on growth also changed with increasing tree height. Radial growth at heights above 10 m was strongly affected by both temperature and precipitation. The radial growth of Korean pine at a height of 10 m was much more sensitive to the climate than that at other heights. Radial growth at a height of 10 m was significantly negatively correlated with the temperature in the current growing season, and significantly positively correlated with precipitation at end of the previous and current growing seasons (September) ($P < 0.05$). The radial growth at a height of 15 m was significantly positively correlated with the monthly minimum temperature and precipitation in September of the previous season ($P < 0.05$), but negatively correlated with the monthly mean temperature in May of the current season ($P < 0.05$). At a height of 20 m, radial growth was significantly positively correlated with the monthly mean and maximum and minimum temperatures in March of the current season, and with the monthly mean temperature in July of the current season ($P < 0.05$).

Key Words: tree height; radial growth; temperature; precipitation; Korean pine

树木径向生长与气候因子密切相关在高纬度、高海拔地区,上一年夏季高温以及冬季低温都将抑制树木径向生长^[1-2],而在干旱、半干旱地区,树木径向生长主要受到降水的影响^[3-5]。树木径向生长与气候因子的关系研究已被广泛应用在气候、环境、考古、地质、生态、水文等方面^[6]。其中,长白山地区围绕建群种红松也已经分别从不同海拔^[7-11]、不同林型^[12-13]、不同年龄^[14]以及火干扰^[15]等条件下研究了红松径向生长对气候因子的响应关系。由于胸高位置(距地面 1.3 m)采样方便且在生理生态方面有一定代表性,以往研究中的树轮数据多取自胸径处^[16]。然而,树干不同高度处径向生长^[17-19]和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[20]均具有一定差异,早晚材平均宽度比由基部至顶部增大, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化则呈现单峰趋势,最大值出现在冠层底部附近^[21],胸高处树木径向生长间相关性较差,快生树种较慢生树种不同高度宽度序列长度差异更显著^[22-23]。由于树木生长受自然和环境因素的共同作用^[24],不同的生长趋势可能是不同高度处树木径向生长对外界环境响应差异的反映,有研究指出 4 m 处圆盘的径向生长对气候最敏感^[25],所以仅考虑树木胸径处径向生长与气候因子的关系,有可能低估某些气候因子对树木径向生长的作用,或者夸大部分限制因子的有效作用范围,进而降低预测结果的可靠性。因此,本文以长白山北坡红松为研究对象,通过获取不同树高处径向生长数据,对比分析不同树高处径向生长特征,建立不同树高处径向生长对气候因子的相关关系,以期完善红松的气候响应机制,对进一步分析和重建长白山地区气候具有重要意义。

1 研究区域

本文选在长白山北坡阔叶红松林顶级群落北京林业大学 3 号固定样地(42°20.211'N, 128°05.705'E,海拔 784 m)。研究区乔木以红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、色木槭(*Acer mono*)、假色槭(*Acer pseudo*)、春榆(*Ulmus propinqua*)等树种为主,混有臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、岳桦(*Betula ermanii*)和白桦(*Betula platyphylla*)。灌木及下木主要种类有花楸(*Sorbus pohuashanensis*)和紫枝忍冬(*Lonicera maxmowiczii*)等。草本种类主要有类叶升麻(*Actaea asiatica*)卵叶风毛菊(*Saussurea grandifolia*)、粗径鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma*)等。土壤类型为山地暗棕色

森林土,土层厚度 20—100 cm,速效氮、磷、钾含量分别为 72.43、1.42、5.20 mg/kg,pH 值为 5.2。受季风影响,研究区气候属于温带大陆性气候,具有冬季寒冷而漫长,夏季温暖多雨而短暂的特点。年均气温约 2.8℃,平均年降水量为 600—900 mm,降水多集中在夏季,6—9 月份降水量占全年降水量的 80%之多,年相对湿度在 70%左右。

2 研究方法

2.1 样本采集及处理

遵循《测树学》解析木采样原则,结合样地红松基本情况(胸径集中在 24—48 cm,树高在 16—24 m 范围内)和采样难度,选择的采样高度分别为 0.3 m(接近地表)、1.3、5、10、15 m 和 20 m,由于前人研究指出 4 m 处径向生长对气候的特殊敏感性^[25],因此,增加 4 m 处的取样点,取消 5 m 处的取样点,最终采样高度确定为 0.3、1.3、4、10、15 m 和 20 m。选择样地内健康红松,分别在每棵样树北向的 6 个取样高度用生长锥钻取样芯,确保样本过髓心。树芯取出后装在塑料管内,用标签纸封口并编号注明样地、树号及采样高度(例如:样本号 3-b11-20,表示在 3 号样地编号为 b11 的红松 20 m 处钻取的样芯)。带回室内自然风干,以备室内测量用。2012 年 8 月完成 7 棵健康红松的样芯采集工作,获取不同高度共计 50 个样芯,2013 年 10 月进行样芯补采,最终获取 25 棵样树,155 个样芯。待采集的样芯自然风干后,进行固定,打磨等预处理,使用 Lintab5 树轮测量和分析系统在精度为 0.001 mm 水平上测量样芯宽度。利用树轮软件 TASP 和 COFECHA^[26]通过相关检验进行交叉定年,剔除相关性差的样本,最终保留 144 个样芯(表 1)。

表 1 不同树高红松样芯的统计特征

Table 1 Statistics characters of Korean pine samples at different high level

统计指标 Statistical index	树高 Height/m					
	0.3	1.3	4	10	15	20
样本量(年表样芯量) Samples(cores)	25(24)	25(25)	25(25)	25(25)	25(24)	25(21)
平均序列长度 Mean length of series	149	124	99	84.3	72.8	40.6
主序列年限(年) Master series(a)	156	152	114	99	98	60
公共区间长度 Length of common interval	96	87	72	66	50	28

2.2 数据分析

通过红松连年树轮宽度的测定,获取不同树高的年径向生长量数据,建立样地内红松不同树高的径向生长量随年份变化的生长曲线,分析各时期内不同树高的径向生长速率变化,利用多重比较分析各树高处年均径向生长速率是否存在差异,此过程由 SPSS16.0 完成。

2.3 年表建立与气候响应关系分析

为去除树木自身生理差异(年龄)的影响,本文通过 ARSTAN 软件^[27],采用步长为 25a 的样条函数法去除生理趋势获取标准化年表,进行气候因子相关关系的分析。

气候资料来源于 CRU TS 3.1 全球气候数据库(<http://www.cru.uea.ac.uk/>,42°50'N,128°25'E 海拔 780 m)和中国科学院长白山生态定位站生态定位站(42°41'N,128°11'E,海拔 740 m)。CRU TS 3.1 全球气候数据库包含了 1901—2006 年间隔为 0.5°×0.5°的网格点月降水量(P_m)、月平均温度(T_{mean})、月最高温度(T_{max})及月最低温度(T_{min})。生态定位站记录了自 1982 年以来的该地区的月平均,最高和最低温度以及月降水量数据。两气象站采用 Kendall 方法检验了气候数据的突变性,使用 Double-mass 方法检查了气候数据的非随机性变化。检验的结果表明,该网格点和中国科学院长白山生态定位站气象站的气候数据均可以代表自然气候变化。鉴于气候因子的有效长度,最终选取 CRU 网格点气候数据,由于气候因子对树木生长的作用具有一定滞后性,选取上年 5 月到当年 9 月的气候因子(月平均温度,月最高温度和月最低温度以及月降水量),通过 DendroClimate 2002^[28]完成气候相关分析。

3 结果与分析

3.1 不同树高处径向生长差异分析

红松不同树高处径向年生长变化趋势基本一致,除在 1980 年前后,20 m 处径向生长量出现异常增加外,其余树高处径向年生长速率均呈下降趋势(图 1),但各树高处年径向生长量的变化幅度有所差异(图 2)。1950—1970 年间,红松各树高处年径向生长量都出现了大幅度的波动,尤其是 0.3 m 处年径向生长量由 1960 年的 3.57 mm 到 1965 年的 1.37 mm,下降幅度达 2 mm;1970—1990 年间,除 0.3 m 处径向生长出现大幅度波动外,各树高处径向生长均进入低速生长期,生长量均在 1—1.5 mm 范围内;1990—2011 年间,0.3、1.3 m 和 20 m 处年径向生长量年际变化幅度较大,4 m 和 15 m 下降幅度最小,不到 1 mm。同时,随着树高的增加,各处径向生长速率呈现下降趋势,0.3 m 处径向生长速率显著高于其他各树高,4 m 和 10 m 处径向生长速率则较低。多重比较(LSD)结果显示 0.3 m 与 10 m ($P<0.05$),0.3 m 与 15 m ($P<0.05$)处径向生长速率均差异显著。树木的径向生长一般受到自身生理因素(年龄)和外界环境的共同影响,不同树高处径向生长差异可能说明红松不同树高处径向生长对自身和气候等外界环境的响应不同。为去除年龄因素的影响,采用步长为 25a 的样条函数法进行去趋势,不同树高处红松标准化年表特征及公共区间分析(1964—2011 年)结果(表 2)表明各树高处样本具有较高的气候敏感性,因此,有必要对红松不同树高处径向生长与气候因子的相关关系进行深入研究。

3.2 逐月气候因子相关分析

不同树高处径向生长对气候因子的响应存在明显差异(图 3),10 m 树高是红松径向生长对温度和降水响应差异的分界线。10 m 以下红松径向生长主要受到温度的影响,其中 4 m 处树木的径向生长对温度表现出较强的敏感性,分别与当年 5 月的月最低温度,6 月的平均和最高温度显著负相关($P<0.05$);0.3 m 处径向生长与上年 9 月平均温度显著正相关($P<0.05$);1.3 m 径向生长与当年 6 月平均和最高温度显著负相关($P<0.05$)。

10 m 以上(含 10 m)降水对红松径向生长的作用增强。10 m 处径向生长对气候因子响应最敏感,分别与当年 4 月最低温度、6 月的月平均、最高和最低温度显著负相关($P<0.05$),而与上年和当年 9 月份的降水显著正相关($P<0.05$);15 m 处径向生长与上年 9 月最低温度和降水显著正相关($P<0.05$),而与当年 5 月月平均温度显著负相关($P<0.05$)。随着高度上升,径向生长与温度的关系有所变化,20 m 处径向生长与当年 3 月月平均、最低和最高温度,当年 7 月月平均温度以及当年 5 月降水显著正相关($P<0.05$),而与当年 1 月降水

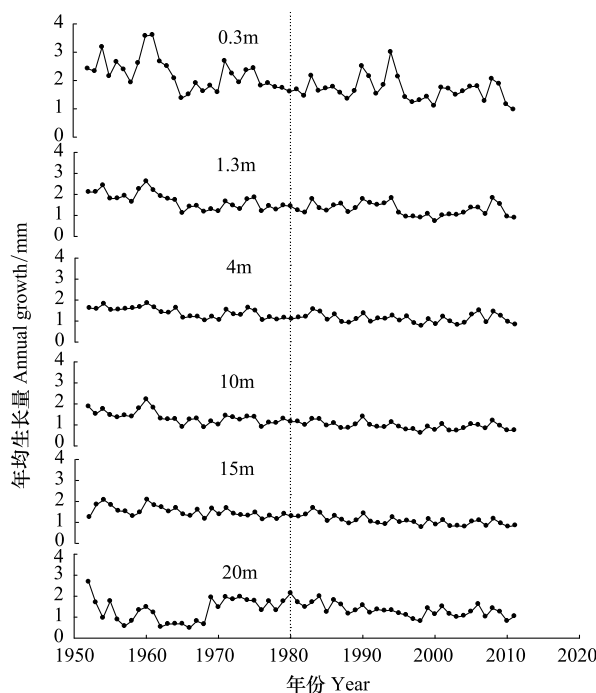


图 1 长白山红松不同树高处径向生长量

Fig. 1 Annual growth of Korean pine at different height in Changbai mountain

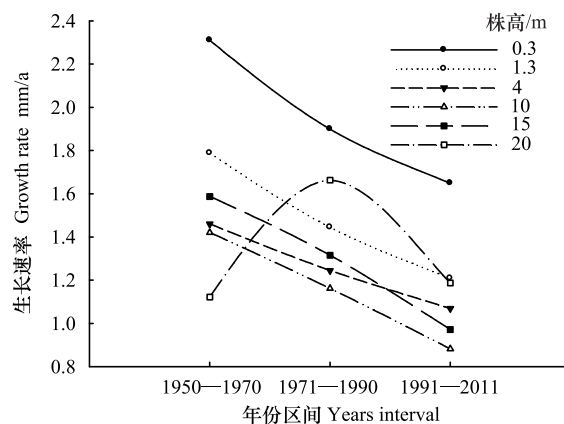


图 2 长白山红松不同树高处径向生长速率分析

Fig. 2 Analysis of growth rate of Korean pine at different height in Changbai mountain

显著负相关($P<0.05$)。

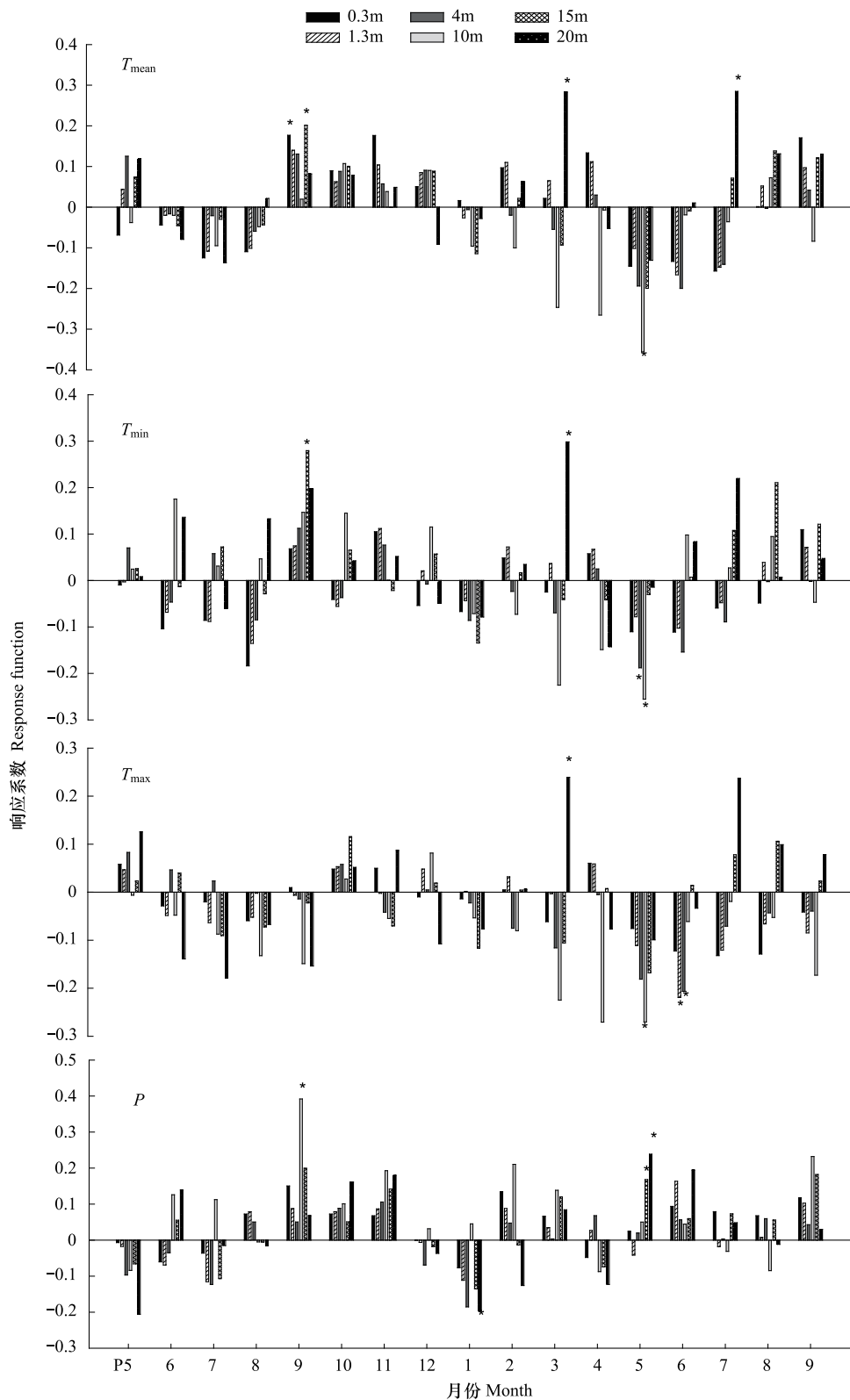


图3 不同树高处红松标准化年表与气候因子(月平均、最高和最低温度以及降水)响应关系

Fig.3 Correlation between Korean pine standard chronologies and climate factors (T_{mean} , T_{max} , T_{min} and P) at different high level
P 表示上年

表 2 不同树高红松标准化年表特征及公共区间分析(1964—2011 年)

Table 2 Characters and common analysis (1964—2011) of Korean pine standard chronologies at different high level

年表统计指标 Chronology index	树高 Height/m					
	0.3	1.3	4	10	15	20
平均敏感度 Mean sensitivity	0.19	0.19	0.16	0.19	0.16	0.25
标准差 Standard deviation	0.32	0.18	0.15	0.36	0.15	0.23
一阶自相关系数 Autocorrelation order 1	0.22	0.23	0.22	0.51	0.06	0.11
信噪比 Signal-to-noise ratio	2.03	5.82	2.82	6.19	3.22	2.78
样本总体代表性 Expressing population signal	0.85	0.88	0.82	0.87	0.86	0.85

4 讨论

研究区内红松不同树高处径向生长速率自 1950 年后呈现下降的趋势,而 CRU 网格点气候数据表明该地区温度呈升高趋势,尤其是 1980 年后春季温度显著上升,这说明温度上升并没有加速红松径向生长,这与基于红松年生长量与水热因子关系的 W-T 模式得到的研究结果基本一致^[29]。树木生长是形成层分化的结果,每年生长季初期,形成层由顶部开始向基部方向发育,树木基部的形成层最后开始分化^[30-32],当生长季结束时由基部向顶部结束发育,树木基部最老的形成层组织首先休眠^[33]这就造成顶部生长周期长,而基部生长周期相对较短。红松光合速率、蒸腾速率、气孔导度均随树高增加而增加^[34],所以红松的生理特征有利于顶端树木生长。但本文研究发现红松生长速率随树高上升而降低,基部 0.3 m 处径向生长速率最高,主干部 4 m 和 10 m 处径向生长速率较低,顶部 20 m 处径向生长速率在 1980 年前后出现异常增加。红松之所以能够形成高干良材,主要是由于其“先高后径”的生长特性,红松的高、径生长过程在时间和空间上是分异性^[35]也可能导致红松生长速率随树高增加而降低。另外,有研究表明树木基部 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受到土壤水分的影响,而冠层部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 受环境温度、降水及光照等因素的影响较为显著^[21],所以红松各树高处径向生长速率变化可能与径向生长对气候因子的响应差异有关。

红松基部(4 m 以下)径向生长主要受到生长季初期高温的抑制作用,而 10 m 以上(含 10 m)受到温度和降水的共同影响。10 m 处径向生长对气候因子响应最敏感,与生长季初期温度负相关($P<0.05$),与生长季降水显著正相关($P<0.05$)。随着高度上升,径向生长与温度的关系有所变化,20 m 处径向生长与当年春季温度和降水显著正相关($P<0.05$)。研究区气候条件呈现平均温度和低温显著上升,而降水变化不明显的趋势^[36]。生长季初期高温,将加速蒸腾作用和呼吸作用,消耗光合作用积累的有机产物,进而减少生长投资,降低树木的径向生长速率。随着树高增加,树轮径向水分扩散能力下降,同时水分在纵向运输中也呈逆时针螺旋式上升^[37],水分向上部运输的阻力增大导致顶部叶片的水分相对减少,顶部叶片为防止空穴化而关闭气孔以降低蒸腾,同时气孔导度降低也将抑制叶片的光合固碳能力^[38],进而降低光合速率。生长季高温和水分胁迫的共同作用降低了主干的径向生长速率,也使得降水的促进作用增强。1980 年后春季温度的显著上升可能是造成 20 m 处径向生长在 1980 年出现异常增加的原因之一。

不同树高处树木径向生长与气候因子的关系进一步验证了 4 m 处径向生长对温度具有较强的敏感性,随着高度上升,限制径向生长的气候因子变量以及作用方式均有所改变,降水对径向生长作用增强,温度对径向生长的作用方式也由生长季初期温度的抑制作用转变为春季温度的促进作用。不同取样高度径向生长的气候响应差异,将降低气候重建以及未来生长趋势预测结果的准确性,因此,可以考虑利用材积和生物量等反映树木径向和高向生长的综合指标来探讨气候变化对红松种群的影响。

参考文献 (References):

- [1] 刘洪滨, 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮图像分析方法研究历史时期气候变化的可行性. 地理研究, 1996, 15(2): 44-51.
- [2] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展. 西北植物学报, 2004, 24(2): 345-351.

- [3] 袁玉江, 李江风. 天山西部树轮年表的响应函数. 冰川冻土, 1995, 17(2): 170-177.
- [4] 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 邵雪梅. 利用树轮宽度重建近 280a 来祁连山东部地区的春季降水. 冰川冻土, 2001, 23(3): 292-296.
- [5] Liang E Y, Shao X M, Hu Y X, Lin J X. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationship of Meyer spruce (*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China. Trees, 2001, 15(4): 230-235.
- [6] 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.
- [7] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试. 地理学报, 1996, (S1): 92-101.
- [8] 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. 第四纪研究, 1997, 17(1): 76-85.
- [9] 高露双. 长白山典型树种径向生长与气候因子的关系研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [10] 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.
- [11] 陈力, 吴绍洪, 戴尔阜. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征. 地理研究, 2011, 30(6): 1147-1155.
- [12] 陈列, 高露双, 张赞, 张思行, 赵秀海. 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, 2013, 33(4): 1285-1291.
- [13] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山阔叶红松林共存树种径向生长对气候变化的响应. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 24-31.
- [14] 王晓明, 赵秀海, 高露双, 姜庆彪. 长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应. 生态学报, 2011, 31(21): 6378-6387.
- [15] 高露双, 赵秀海, 王晓明. 火干扰后红松生长与气候因子的关系. 生态学报, 2009, 29(11): 5963-5970.
- [16] Schweingruber F H, Kairiukstis L, Shiyatov S. Sample selection // Cook E R, Kairiukstis L A, eds. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 23-35.
- [17] Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976.
- [18] Kozlowski T T, Pallardy S G. Growth Control in Woody Plants. San Diego: Academic Press, 1997.
- [19] Wimmer R. Structural, chemical and mechanical trends within coniferous trees // Spiecker H, Kahle P, eds. Proceedings of Workshop Modelling of Tree-Ring Development-cell Structure and Environment. Universität Freiburg, Institut für Waldwachstum, 1994: 2-11.
- [20] Leavitt S W. Tree-ring C-H-O isotope variability and sampling. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5244-5253.
- [21] 商志远, 王建, 张文, 李彦彦, 崔明星, 陈振举, 赵兴云. 大兴安岭北部樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化及其与树轮宽度的关系. 应用生态学报, 2013, 24(1): 1-9.
- [22] Perala D A. Quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx) // Burns R M, Honkala B H, eds. Silvics of North America: 2. Hardwoods. Washington: Agriculture Handbook 654, US Department of Agriculture, Forest Service, 1990: 555-569.
- [23] Chhin S, Wang G G. Spatial and temporal pattern of white spruce regeneration within mixed-grass prairie in the Spruce Woods Provincial Park of Manitoba. Journal of Biogeography, 2002, 29(7): 903-912.
- [24] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [25] 白云庆. 测树学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1987.
- [26] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.
- [27] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [28] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computer Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.
- [29] Wei L, Wang H M, Wang Q D, Liu Y F, He Q T, Yuan J Z, Shao H R, Song C H. The influence of climate changes on Korean pine forest in China. Geographical Research, 1995, 14(1): 17-26.
- [30] Zimmermann M H, Brown C L. Trees: Structure and Function. Berlin: Springer-Verlag, 1971.
- [31] 克累默尔 P J, 考兹洛夫斯基 T T. 树木生理学//汪振儒, 译. 北京: 中国农业出版社, 1963.
- [32] Kozlowski T T, Pallardy S G. Growth Control in Woody Plants. San Diego: Academic Press, 1997.
- [33] Vaganov E A, Hughes M K, Shashkin A V. Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments. Berlin: Springer, 2006.
- [34] 方晓雨, 张宏琴, 姜超, 卢文敏, 范秀华. 3 种乔木叶片反射光谱与光合特性随树高的变化. 应用与环境生物学报, 2013, 19(2): 383-388.
- [35] Aron D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.
- [36] Wang J, Jiang Z H, Ding Y G, Zhang J L, Zhang X. Multi-Model Ensemble prediction of extreme temperature indices in China. Resource Science, 2008, 30(7): 1084-1092.
- [37] 刘盛, 宋彩民, 李国伟. 4 种林木年轮水分疏导模式研究. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 14-18.
- [38] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. Bioscience, 1997, 47(4): 235-242.