

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

高露双 王晓明 赵秀海*

北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 利用树轮生态学方法, 研究了长白山阔叶红松林和暗针叶林过渡带优势树种红松(*Pinus koraiensis*)和鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *komarovii*)的生长特征及其与气候因子的关系, 以期揭示气候响应关系的种间差异性。结果表明, 红松和鱼鳞云杉年平均径向生长量与生理年龄显著相关, 红松先于鱼鳞云杉达到最大年生长量, 且红松年平均生长速率显著高于鱼鳞云杉($p < 0.001$); 红松和鱼鳞云杉对气候的响应存在差异, 红松与7月份的月平均温度和降水显著正相关, 而鱼鳞云杉与5月平均温度显著正相关, 与5月降水显著负相关。响应面分析进一步证实, 红松生长主要与生长季温度和降水相关, 而生长季初期的降水是限制鱼鳞云杉生长的主要原因。全球变暖有利于红松径向生长, 红松种群有向高海拔上升的可能。

关键词 气候因子, 树轮生态学, 鱼鳞云杉, 红松

Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China

GAO Lu-Shuang, WANG Xiao-Ming, and ZHAO Xiu-Hai*

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

Abstract

Aims Our objective was to reveal the climate sensitivity of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii*.

Methods We used dendroecological methods to analyze growth characteristics and responses to climate of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii*, dominant species in the transition of broad-leaved Korean pine forest and dark coniferous forest in Changbai Mountain, China, to reveal their climate sensitivity.

Important findings Radial growth of both species was significantly correlated with the age. Maximum annual growth occurred earlier in *Pinus koraiensis* than *Picea jezoensis* var. *komarovii*. Annual growth rate was significantly higher in *Pinus koraiensis* than *Picea jezoensis* var. *komarovii* ($p < 0.001$). Response to climate also differed. Radial growth of *Pinus koraiensis* was significantly positively correlated with monthly mean temperature in July and precipitation in September ($p < 0.05$). However, radial growth in *Picea jezoensis* var. *komarovii* was significantly positively related to monthly mean and maximum temperature in May and was negatively related to May precipitation. Results from response surface analysis suggested that radial growth was mainly controlled by the temperature and precipitation of the growing season, but precipitation during the early growing season was the most important factor for growth of *Picea jezoensis* var. *komarovii*. Global warming will favor radial growth of *Pinus koraiensis*, and this species will be able to extend to higher elevation.

Key words climate factor, dendroecology, *Picea jezoensis* var. *komarovii*, *Pinus koraiensis*

东北地区是我国升温最为明显的地区之一(陈隆勋和朱文琴, 1998; 刘实和王宁, 2001; 杨素英和王谦, 2003)。根据大气环流模型(GCMs)预测(Kroon & Schieving, 1991; 高学杰等, 2003; 赵宗慈等, 2007), 我国大陆气温每年平均增加2 °C或4 °C, 东北地区的气温升幅可能更大(王冀等, 2008)。东北

东部也是我国境内降水量变化与东南季风强弱变化相关性最高的地区之一(郭其蕴, 1983; 白人海和郭家林, 1985), 长白山地区降水波动剧烈, 且与全球变化趋势一致(张寒松等, 2007), 降水量以每10年0.5%–1%的速度增加(IPCC, 2007), 暴雨事件发生的频率也以2%–4%的速度在增加(Nicholls *et al.*,

1996; IPCC, 2001)。气温升高和降水分布的变化都将改变地表植被分布(孙睿和朱启疆, 2001)和森林演替格局(Guetter & Kutzbach, 1990)。前人的研究表明, 气候变化将导致长白山林线上升(于大炮等, 2004), 落叶松(*Larix gmelinii*)林分布范围扩大(于大炮等, 2005, 2006), 苔原带将消失(周园等, 2009)。气候变化对森林的影响是直接作用于树木的生理过程(Kramer *et al.*, 2000; Walther, 2003), 使得树种呈现出独特的径向生长趋势(Goldblum & Rigg, 2005), 因此, 通过树轮资料建立径向生长与气候因子的关系(Fritts, 1976), 能够从本质上揭示气候变化对植被的影响(He *et al.*, 2005), 从而有利于掌握气候变化对植物区系格局的影响。在长白山地区, 前人曾利用树轮资料重建了1655年以来1–4月月平均最高气温的变化(吴祥定和邵雪梅, 1997)和降水变化(张寒松等, 2007), 充分体现了该地区树木生长对气候因子的敏感性。本文利用树木年轮生态学方法, 通过研究长白山阔叶红松林和暗针叶林过渡带内优势树种红松(*Pinus koraiensis*)和鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *komarovii*)径向生长对气候因子的响应, 以期揭示气候变化对过渡带优势树种生长趋势的影响, 同时也为准确地评价全球气候变化对长白山植被垂直分布格局的影响提供依据。

1 研究地概况

采样区域位于长白山北坡自然保护区内, 采样点分布在阔叶红松林和暗针叶林的过渡带(42°13.88' N, 128°05.15' E, 海拔为1 050–1 200 m)。

受季风和地形影响, 该地区属于亚高山气候类型, 具有冬季寒冷而漫长、夏季温暖多雨而短暂的特点, 年平均气温为1.18 °C, 年累积降水量为900–1 340 mm。树木生长主要集中在5–9月, 生长季平均温度在11.6 °C左右, 6–9月降水量占全年降水量的60%, 年相对湿度为70%左右(图1)。采样区域乔木以红松和鱼鳞云杉为主。

红松是阔叶红松林单一优势树种, 耐寒力强, 喜湿润、土层深厚、肥沃、排水和通气良好的微酸性土壤。红松对土壤水分要求较严格, 对土壤的排水和通气状况反应敏感, 不耐湿, 不耐干旱, 不耐盐碱。红松喜光, 幼年时期耐阴。是浅根性树种, 主根不发达, 侧根水平扩展十分发达。

鱼鳞云杉是暗针叶林的主要优势乔木树种, 阴性树种, 浅根性, 喜生于土层深厚、湿润、肥沃、排水良好的微酸性棕色森林土壤上, 生长发育良好, 能耐低温严寒, 但不耐干旱、瘠薄、盐碱, 不能生长在干燥的瘠薄山地(刘慎谔, 1955)。

2 材料和方法

2.1 样本的采集及处理

在采样区内, 随机选取健康的红松和鱼鳞云杉树种各40株。在样树胸径处(距地面1.3 m高处)钻取样芯, 尽量确保样芯穿过髓心, 样本采集于2007年9月完成。将样芯带回实验室自然风干后, 进行固定, 并用不同粒度的干砂纸进行打磨(砂纸粒度分别为100、300、500、800、1 000和1 500目共6种), 直到在显微镜下能够清晰地分辨年轮的界限为止。

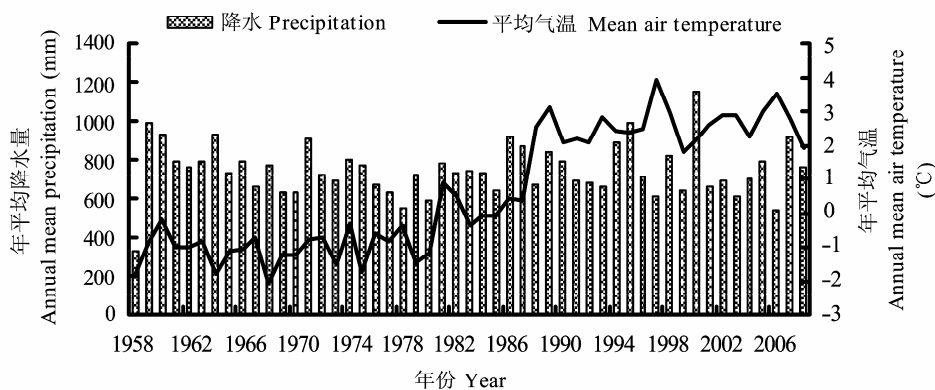


图1 长白山阔叶红松林和暗针叶林过渡带年平均气温以及年降水量。

Fig. 1 Distribution of annual mean air temperature and precipitation in the transition zone of broad-leaved Korean pine forest and dark coniferous forest of Changbai Mountain.

2.2 年表的建立

利用Lintab 5年轮宽度测量仪(Rintech, Heidelberg, Germany)在0.001 mm水平上测定树轮宽度,并结合树轮软件TSAP和COFECHA (Holmes, 1983)对样本序列进行交叉定年,剔除异常和难以交叉定年的序列,最终保留35株红松样本和33株鱼鳞云杉样本。通过ARSTAN软件(Cook & Holmes, 1986),分别建立红松和鱼鳞云杉树轮宽度年表,同时采用50年的样条函数去除样本序列的低频变化,最终建立红松和鱼鳞云杉的标准化年表。

2.3 气候资料的来源

采样区邻近的4个气象站分别为松江气象站、二道气象站、中国科学院长白山生态定位站和天池气象站(表1)。采用Kendall (Kendall, 1970)和Double-mass方法(Kohler, 1949)检验,对气象站气候资料进行均一性检验,结果表明,气候资料无随机突变和明显不均匀分布的情况,可用来代表自然气候的变化。考虑到气候资料的完整性和有效长度,松江气象站数据与其他气象站的气候数据均达到了0.01水平显著相关,相关系数高达90%,因此本文选择松江气象站的气候数据进行气候因子相关分析。

2.4 数据处理和分析

2.4.1 确定样本年龄

根据公式(1)和(2)确定未通过髓心的样本年龄。首先测定最靠近髓心的一个完整的树轮弧的高度(L)和宽度(h),由公式(1)确定树芯上最靠近髓心的一个完整的树轮弧到髓心的距离 d (Duncan, 1989; Vicente, 2003)。

$$d = (L^2 + 4h^2) / 8h \quad (1)$$

由公式(2)计算缺失的树轮数 N 。

$$N = d / rw5 \quad (2)$$

式中, $rw5$ 代表与树轮弧最接近的5个相毗邻的树轮弧的平均宽度(Norton *et al.*, 1987; Stephenson & Demetry, 1995)。

将缺失树轮数与所测量的样本树轮数相加,即为样本的年龄。

2.4.2 计算树种生长量和生长速率

考虑到不同树种不同生长阶段的径向生长速率有一定的变化,因此在保证气候因子一致的情况下,对树种生长量进行分段比较,分别选取公共生长期0-50年、50-100年、100-150年和大于150年这4个龄级,比较各阶段的径向年平均生长量;为了突出气候因子对树木生长的影响,分别建立公共生长期树轮径向生长速率和去除年龄和生理因素后样本径向生长速率的变化趋势,采用单因素方差分析方法检验两树种不同龄级年平均生长量和径向年平均生长速率的差异性,为满足方差分析数据的要求,将绝对生长量进行开方转换(Shapiro-Wilk 检验;数据变换前: $W = 0.918, p < 0.0001$;数据开方变换后: $W = 0.979, p = 0.1231$)。

2.4.3 径向生长对气候因子的响应

利用DENDROCLIM 2002程序(Biondi & Waikul, 2004)实现在0.05水平上两个树种的树轮宽度指数与逐月气候因子的响应分析。鉴于气候因子对树轮宽度指数有一定的滞后作用,选取松江气象站自1959年起的上一年10月到当年9月逐月气候变量(包括月平均温度、平均最高温度、平均最低温度和降水量)与树轮标准化年表进行响应分析,并建立树轮宽度指数与显著气候因子的响应面图,进一步了解温度和降水对年轮的综合影响。

3 结果

3.1 年龄组成及生长动态

采样区内红松样本的平均年龄为145年(103-210年),其中,80%的红松样本年龄达到126年,20%的红松样本年龄超过平均年龄;鱼鳞云杉样本的平均年龄为137年(77-203年),但是各年龄层样本分布较均匀,80年左右的鱼鳞云杉占总数的20%,60%的

表1 气象站资料

Table 1 Information of weather station

气象站 Weather station	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation (m)	气象数据起始年 The beginning year for climate data
松江 Songjiang	42°32' N, 128°15' E	591	1958
二道 Erdao	42°43' N, 128°12' E	700	1960
长白山生态定位站 Ecological Research Station of Changbai Mountain	42°41' N, 128°11' E	740	1982
天池 Tianchi	42°01' N, 128°05' E	2 600	1958

天池气象站自1989年以后变为季站。

Tianchi weather station has been a seasonal meteorological station since 1989.

样本年龄在100年左右, 超过137年的样本占20%。红松和鱼鳞云杉年生长量与生理年龄均具有较高的非线性相关(图2), 86年的红松具有最大年生长量(1.86 mm), 而鱼鳞云杉在146年达到最大年生长量, 为1.36 mm。在0–50年(1805–1854年)、50–100年(1855–1904年)、100–150年(1905–1954年)和大于150年(1955年以后)龄级内, 红松生长速率分别为1.48、1.58、1.52和1.19 mm·a⁻¹, 而鱼鳞云杉的径向生长速率分别为1.08、1.07、1.11和0.8 mm·a⁻¹, 红松年平均生长速度显著高于鱼鳞云杉($p < 0.001$)。因此, 在过渡带内, 红松大树生长情况较好, 红松幼年时期生长缓慢, 后期生长速度显著加快, 而且在一定时期内能维持较大的生长量, 年龄结构以老龄树为主, 低龄树较少; 鱼鳞云杉大树生长速率较慢, 老龄树和幼树各占一定的比例。

利用单因素方差分析方法检验两树种年平均生长速率的差异性结果表明, 未进行去趋势的两树

种在公共生长期(1805–2007年)具有显著差异($p < 0.001$), 尤其在1886–1958年、1963–1977年和1991–2000年区间内, 红松年平均生长速率显著高于鱼鳞云杉(图3A)。本文也分析了过渡带内红松和鱼鳞云杉样本的年龄组成, 其中红松主要以120年以上的老龄树为主, 低龄树较少; 鱼鳞云杉年龄组成较均匀, 80年的鱼鳞云杉占总数的20%, 60%的样本年龄在100年左右, 超过137年的样本占20%, 因此上述差异有可能由样本年龄不同造成。对比分析去趋势后(图3B)两树种径向生长速率, 发现去除年龄和生理因素后, 仅在1991–2000年区间内存在显著差异, 红松年平均生长速率高于鱼鳞云杉($p < 0.001$)。有资料表明, 1990–1999年的气象记录达到历史上最高值(Easterling *et al.*, 2000), 长白山地区具有较多降水(张寒松等, 2007)。对去趋势前后两树种的生长速率差异分析表明, 本文使用的去趋势方法能够很好地去除年龄和生理因素对树木生长的影响, 且进

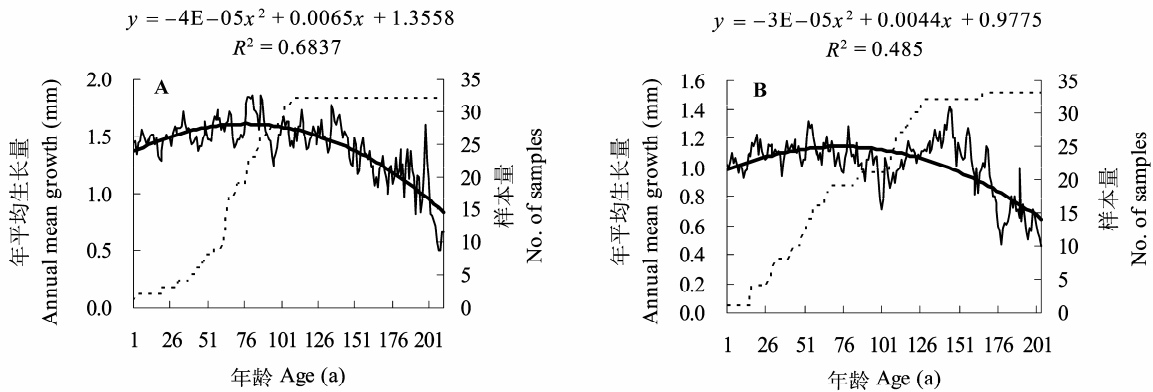


图2 红松(A)和鱼鳞云杉(B)年平均生长量及年龄分布图。——年平均生长量;样本量; ——趋势线。
Fig. 2 Annual mean growth and age distribution of *Pinus koraiensis* (A) and *Picea jezoensis* var. *komarovii* (B). —— Annual mean growth; No. of samples; —— Trend line.

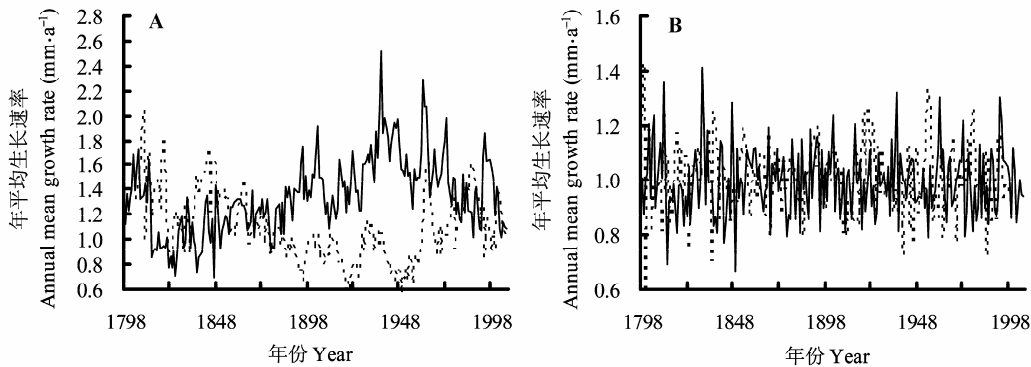


图3 红松(——)和鱼鳞云杉(.....)生长期未去趋势的年平均生长速率(A)和去趋势后年平均生长速率(B)。
Fig. 3 Annual mean growth rate of *Pinus koraiensis* (——) and *Picea jezoensis* var. *komarovii* (.....) in life span before detrending (A) and after detrending (B).

一步证明在1991–2000年间, 气候因素是导致红松和鱼鳞云杉径向生长存在显著差异的主要原因。

3.2 标准化年表特征值分析

通过去除样本原始宽度序列的生理影响, 分别得到红松和鱼鳞云杉的标准化年表, 其特征值及公共区间分析结果见表2。红松和鱼鳞云杉标准化年表的样本总体代表性均超过80%, 第一主成分解释方差量分别为33.50%和35.22%, 因此可以认为, 样本能够代表该区域红松和鱼鳞云杉种群树木生长的总体情况, 且两树种的标准化年表中包含一定的气候信息, 适用于气候因子的响应分析。

3.3 红松和鱼鳞云杉树轮对逐月气候因子的响应分析

响应分析结果(表3)表明, 红松和鱼鳞云杉种群树木径向生长对逐月气候因子的响应关系有所差异。长白山红松树轮宽度标准化年表与该地区7–9月的温度和降水均有较好的正相关, 分别与7月平均气温和9月降水量显著正相关; 而鱼鳞云杉树轮宽度标准化年表与该地区5月平均气温和平均最高气温显著正相关, 和5月降水量则显著负相关。

3.4 红松和鱼鳞云杉对主要气候因子的响应面分析

红松树轮宽度指数与当年9月份降水和7月份月平均温度的响应面分析结果表明, 红松树轮宽度指数与当年7月份月平均温度呈线性正相关关系, 而与9月份降水呈现非线性关系。当降水在50 mm以内时, 降水对红松树轮宽度指数的影响不明显, 当降水超过50 mm时, 降水的增加将有利于红松径向生长。而且, 降水在0–50 mm范围内, 温度的升高对红松径向生长的影响不明显, 超过50 mm后, 温度的作用将被增强; 温度在20 °C时, 降水增强则显著促进红松树轮的宽度生长。

鱼鳞云杉树轮宽度指数与当年5月份的月平均

温度和月平均最高温度, 以及5月份降水的响应面分析结果表明, 鱼鳞云杉树轮宽度指数与5月份平均温度呈线性正相关, 与最高温度关系不明显, 而与5月份降水量之间存在明显的非线性关系, 在降水量小于60 mm时, 鱼鳞云杉径向生长与降水量呈正相关, 当降水量多于60 mm时, 降水增加将抑制鱼鳞云杉的径向生长, 且此时随着温度上升, 径向生长的速度有所减慢。在5月份平均温度和降水的共同影响下, 当平均温度在10 °C左右, 降水量在80–100 mm之间时, 最有利于鱼鳞云杉的径向生长。

鉴于红松和鱼鳞云杉生长与气候因子密切相关, 本文也试图建立树轮宽度指数与逐月气候因子的最优回归方程, 进而预测气候变化对树木生长的影响。

$$RWI_{Pinus} = -0.134 + 0.002P_9 + 0.051T_{7mean}$$

$$(R^2 = 0.578, n = 35, p = 0.002)$$

$$RWI_{Picea} = 0.845 + 0.034T_{5mean} - 0.002P_5$$

$$(R^2 = 0.266, n = 33, p = 0.004)$$

式中, RWI_{Pinus} 指红松树轮宽度指数, P_9 指当年9月降水量, T_{7mean} 为当年7月的月平均温度; RWI_{Picea} 指鱼鳞云杉树轮宽度指数, T_{5mean} 和 P_5 分别为当年5月的月平均温度和降水量。

从回归方程本身可以看出, 与鱼鳞云杉相比, 红松树轮宽度指数与逐月气候因子关系模拟得较好, 且气候因子起着较大的作用, 说明红松对环境的变化十分敏感, 受到气候因子的影响较大。而鱼鳞云杉树轮宽度指数与逐月气候因子的模拟方程表明, 5月份的平均温度和降水是主要气候因子, 但是基于该模型的预测值与真实值之间的相关性并未达到显著水平, 且预测值要高于观测值, 说明未来全球气候变暖有可能会使极端高温和寒冷的频度和强度加大以及气候的季节波动更为明显, 这将

表2 年表特征及公共区间分析(1900–2007年)

Table 2 Characteristics of chronologies and common interval time span analysis (1900–2007)

年表特征值 Characteristic values of chronologies	红松 <i>Pinus koraiensis</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>
平均敏感度 Mean sensitivity	0.119	0.126
标准偏差 Standard deviation	0.14	0.15
一阶自相关系数 Autocorrelation order 1	0.408	0.462
公共区间 Common interval time span	107 years	133 years
树间平均相关系数 Mean correlations between trees	0.566	0.57
信噪比 Signal-to-noise ratio	7.383	5.373
总体代表性 Express population signal	0.88	0.84
第一主分量方差 Variance in first eigenvector	33.50%	35.22%

表3 红松与鱼鳞云杉径向生长与上年10月到当年9月的月平均温度、月平均最高温度、月平均最低温度和月降水量的相关关系
Table 3 Correlation between radical growth of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* with monthly mean temperature, monthly mean maximum and minimum temperature and monthly precipitation from October last year to current September

月份 Month	月平均温度 Monthly mean temperature		月最高温度 Monthly maximum temperature		月最低温度 Monthly minimum temperature		月降水量 Monthly precipitation	
	红松 <i>Pinus</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>	红松 <i>Pinus</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>	红松 <i>Pinus</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>	红松 <i>Pinus</i>	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>
	<i>koraiensis</i>		<i>koraiensis</i>		<i>koraiensis</i>		<i>koraiensis</i>	
10	0.016 842	-0.148 610	0.144 202	-0.096 340	-0.008 030	-0.133 590	0.022 007	-0.026 140
11	0.045 559	-0.033 820	0.062 207	-0.138 050	0.116 282	-0.023 060	0.116 913	0.135 314
12	-0.041 140	0.017 396	-0.048 760	0.069 014	-0.075 900	-0.016 830	-0.073 260	-0.092 830
1	-0.061 620	-0.006 060	-0.018 220	-0.012 860	-0.061 140	-0.008 440	-0.071 820	0.154 860
2	0.007 696	-0.093 360	0.089 478	-0.056 980	0.036 983	-0.131 520	0.024 247	-0.020 790
3	0.055 464	-0.113 930	0.097 290	-0.095 060	0.045 146	-0.131 350	-0.026 790	-0.069 490
4	0.081 664	0.018 644	0.139 605	-0.031 780	-0.104 300	0.058 651	-0.098 390	0.197 255
5	-0.095 310	0.245 618*	0.001 078	0.257 572*	-0.160 240	0.011 220	0.031 262	-0.300 830*
6	-0.078 740	0.011 415	0.056 267	0.087 162	-0.112 860	-0.075 860	0.037 770	-0.124 800
7	0.272 550*	-0.108 090	0.235 536	-0.133 600	0.229 524	0.045 431	0.165 026	0.038 785
8	0.114 868	0.133 427	-0.025 770	0.028 028	0.206 359	0.117 503	0.199 656	-0.009 480
9	0.030 813	-0.061 030	-0.062 420	-0.155 970	0.096 529	0.033 930	0.291 068*	0.102 847

*, $p < 0.05$.

会对模型的稳定性造成更大的影响(刘国华和傅伯杰, 2001), 造成预测模型的不稳定性。

4 讨论

本文通过对阔叶红松林和暗针叶林过渡带内优势树种红松和鱼鳞云杉的径向生长及气候响应关系的分析, 发现红松和鱼鳞云杉年生长量与生理年龄均具有较高的非线性相关, 红松先于鱼鳞云杉达到年最大生长量, 且红松年生长量显著高于鱼鳞云杉($p < 0.001$); 红松径向生长与当年7月平均温度和9月降水量显著正相关; 鱼鳞云杉则与当年5月份的月平均温度显著正相关, 而与该月降水量显著负相关。红松和鱼鳞云杉对气候因子不同的响应关系进一步说明了树种对气候因子的响应具有一定的种群特性(Davi *et al.*, 2006)。

红松对温度的耐受范围较大(Berninger, 1997), 但对土壤水分要求较严(Weber *et al.*, 2007), 对土壤的排水和通气状况反应敏感(Rigling *et al.*, 2002; Eilmann *et al.*, 2006)。采样区降水多集中在7、8月份, 充足的降水提高蒸腾作用, 有利于叶片气孔开放, 吸收更多的 CO_2 , 有助于植物通过光合作用积累更多的有机物质, 因此在充足的降水条件下, 红松对温度较敏感, 生长季温度升高将提高酶的活性, 增强光合作用效率, 进而促进红松径向生长。同时, 在生长季之初, 温度决定生长季的开始, 但

是生长结束的时候, 足够的降水将延长植物的生长季, 9月份降水的增加有利于延长植物的生长季, 增加树轮宽度。因此, 红松的径向生长主要受到生长季温度和降水的影响, 且该地区雨热同期气候条件有利于红松种群的生长。

鱼鳞云杉喜阴, 不耐湿(刘慎谔, 1955), 对土壤水分比温度更为敏感(Zhang *et al.*, 1999)。春季温度的上升固然能够提高植物的光合产物(Kozlowski & Pallardy, 1997), 但是较多的降水将改变土壤水环境(Armstrong *et al.*, 1994), 并抑制温度的作用, 从而导致生长速率降低。在采样区, 5月份是鱼鳞云杉的生长季初期, 温度快速上升有利于根部对营养物质和水分的吸收, 为植物进行光合作用提供足够的物质储备。长白山地区气候湿润, 生长期初期的迅速升温导致冬季积雪大量融化, 如果这一时期降水增加, 可能会导致林中大量积水, 造成树木根部的无氧呼吸, 消耗过多的光合产物, 进而抑制鱼鳞云杉的径向生长。

地带性植被的形成和发展与气候环境密不可分(韩士杰等, 1998)。根据植物动态学原理, 一定的气候区决定了地带性植被的分布(刘慎谔, 1985)。对立地选择的不同策略导致的松属植物和云杉类植物的不同气候响应机制(Yueh-Hsin *et al.*, 2010), 也形成了区域-树种依赖性的树轮响应机制。采样区属于红松分布的上限和鱼鳞云杉分布的下限, 而两

优势树种的气候响应关系表明, 采样区气候变暖将有利于红松种群的生长, 这与前人在东北地区所作的研究结果一致(周园等, 2009)。

致谢 林业公益性行业科研专项基金(200904022和20100400204)和国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0804)资助。

参考文献

- Armstrong W, Jackson MB, Brändle R (1994). Mechanism of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, 43, 307–358.
- Bai RH (白人海), Guo JL (郭家林) (1985). Correlation between the phenomenon of ENSO and the atmospheric circulation in northern hemisphere, and the low temperatures in Heilongjiang Province. *Journal of Tropical Meteorology* (热带气象), 1, 264–268. (in Chinese with English abstract)
- Berninger F (1997). Effects of drought and phenology on GPP in *Pinus sylvestris*: a simulation study along a geographical gradient. *Functional Ecology*, 11, 33–42.
- Biondi F, Waikul K (2004). DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computer & Geoscience*, 30, 303–311.
- Chen LX (陈隆勋), Zhu WQ (朱文琴) (1998). The climate change in China in nearly 45 years. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 56, 257–271. (in Chinese with English abstract)
- Cook ER, Holmes RL (1986). *Users Manual for ARSTAN*. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
- Davi H, Dufreâne E, Francois C, Le MG, Loustau D, Bosc A, Rambal S, Granier A, Moors E (2006). Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 35–56.
- Duncan R (1989). An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in kahikatea (*Dacrydium dacrydioides*). *New Zealand Natural Sciences*, 16, 31–37.
- Easterling DR, Evans JL, Groisman PY, Karl TR (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of American Meteorology Society*, 8, 417–425.
- Eilmann B, Weber P, Rigling A, Eckstein D (2006). The influence of drought on the wood structure of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd in Valais, Switzerland. *Dendrochronologia*, 23, 121–132.
- Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, New York. 261–268.
- Gao XJ (高学杰), Zhao ZC (赵宗慈), Ding YH (丁一汇) (2003). Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model (Part II). *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 61, 30–38. (in Chinese with English abstract)
- Goldblum D, Rigg LS (2005). Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 2709–2718.
- Guetter PJ, Kutzbach JE (1990). A modified Koppen classification applied to model simulations of glacial and interglacial climates. *Climate Change*, 16, 193–215.
- Guo QY (郭其蕴) (1983). Analysis of the intensity index and the change of East Asia wind. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 38, 207–217. (in Chinese with English abstract)
- Han SJ (韩士杰), Liao LP (廖利平), Jiang FQ (姜凤岐) (1998). Considerations on forest interface ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 9, 538–542. (in Chinese with English abstract)
- He JS, Zhang QB, Bazzaz FA (2005). Differential drought responses between saplings and adult trees in four co-occurring species of New England. *Trees*, 19, 442–450.
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–75.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Contribution of Working Group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DG, Noguer M, Linden PJ, Xiaosu D eds. *Climate Change in 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 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.
- Kendall MG (1970). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London. 125–130.
- Kohler MA (1949). On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 82, 96–97.
- Kozłowski TT, Pallardy SG (1997). *Growth Control in Woody Plants*. Academic Press, San Diego, USA.
- 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, 67–75.
- Kroon H, Schieving F (1991). Resource allocation patterns as a function of clonal morphology: a general model applied to a foraging clonal plant. *Ecology*, 9, 519–530.
- Liu GH (刘国华), Fu BJ (傅伯杰) (2001). Effects of global

- climate change on forest ecosystems. *Journal of Natural Resource* (自然资源学报), 16, 71–78. (in Chinese with English abstract)
- Liu S (刘实), Wang N (王宁) (2001). The effect of previous ENSO event to the summer temperature in the northeast. *Journal of Tropical Meteorology* (热带气象学报), 17, 314–319. (in Chinese with English abstract)
- Liu SE (刘慎谔) (1955). *Northeast Woody Plant Logos* (东北木本植物志). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Liu SE (刘慎谔) (1985). *Dynamical Geo-botany—Basic Theory and Its Application* (动态地植物学——基本理论的探讨及其应用). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Nicholls N, Gruza GV, Jouzel J, Karl TR, Ogallo LA, Parker DE (1996). Observed climate variability and change. In: Houghton JT, Filho-Meira LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K eds. *The Science of Climatic Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 132–192.
- Norton DA, Palmer JG, Ogden J (1987). Dendroecological studies in New Zealand. I. An evaluation of tree age estimates based on increment cores. *New Zealand Journal of Botany*, 25, 373–383.
- Rigling A, Bräker O, Schneiter G, Schweingruber F (2002). Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within the Erico-Pinion in the Valais (Switzerland). *Plant Ecology*, 163, 105–121.
- Stephenson PL, Demetry A (1995). Estimating ages of giant sequoias. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 223–233.
- Sun R (孙睿), Zhu QJ (朱启疆) (2001). Effects of climate change of terrestrial net primary production in China. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 5, 58–61. (in Chinese with English abstract)
- Vicente RZ (2003). Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods. *Plant Ecology*, 167, 193–212.
- Walther GR (2003). Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6, 169–185.
- Wang J (王冀), Jiang ZH (江志红), Ding YG (丁裕国) (2008). Multi-Model Ensemble prediction of extreme temperature indices in China. *Resource Science* (资源科学), 30, 1084–1092. (in Chinese with English abstract)
- Weber P, Bugmann H, Rigling A (2007). Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-alpine dry valley. *Journal of Vegetation Science*, 18, 777–792.
- Wu XD (吴祥定) (1990). *Tree-Ring and Climate Change* (树木年轮与气候变化). Meteorology Press, Beijing. (in Chinese)
- Wu XD (吴祥定), Shao XM (邵雪梅) (1997). Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeast China using tree-ring data. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 1, 76–85. (in Chinese with English abstract)
- Yang SY (杨素英), Wang QQ (王谦谦) (2003). The abnormal spatial and temporal changes of the summer temperature in nearly 50 a in the Northeast of China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (南京气象学院学报), 26, 653–660. (in Chinese with English abstract)
- Yu DP (于大炮), Wang SZ (王顺忠), Tang LN (唐立娜), Dai LM (代力民), Wang QL (王庆礼), Wang SX (王绍先) (2005). Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 16, 14–20. (in Chinese with English abstract)
- Yu DP (于大炮), Zhai LJ (翟连江), Dai LM (代力民), Wang QL (王庆礼) (2006). Dynamics of dominant tree species in a forest ecotone on the northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research* (林业研究), 17, 216–220. (in Chinese with English abstract)
- Yu DP (于大炮), Zhou L (周莉), Dong BL (董百丽), Dai LM (代力民), Wang QL (王庆礼) (2004). Structure and dynamics of *Betula ermanii* population on the Northern slope of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 23, 30–34. (in Chinese with English abstract)
- Yueh-Hsin L, Blanco JA, Brad S, Welham C, Kimmins JP (2010). Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 259, 932–942.
- Zhang HS (张寒松), Han SJ (韩士杰), Li YW (李玉文), Zhang JH (张军辉) (2007). Reconstruction of temporal variations of precipitation Changbai Mountains area over past 240 years by using tree-ring width data. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 26, 1924–1929. (in Chinese with English abstract)
- Zhang QB, Alfaro RI, Hebda RJ (1999). Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 121, 215–225.
- Zhao ZC (赵宗慈), Wang SW (王绍武), Luo Y (罗勇) (2007). The assessment and predictor of the increasing temperature since the founding of IPCC. *Advances in Climate Change* (气候变化研究进展), 3(3), 183–184. (in Chinese with English abstract)
- Zhou Y (周园), Zou CJ (邹春静), Xu WD (徐文铎) (2009). Study on the relationship between global warming and vegetation distribution in Northeast China. *Journal of Anhui Agriculture Science* (安徽农业科学), 37, 5229–5231. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 曹敏 责任编辑: 王葳