

# 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对 气候要素的响应分析

彭剑峰<sup>1</sup>, 勾晓华<sup>1,\*</sup>, 陈发虎<sup>1</sup>, 李金豹<sup>1,2</sup>, 刘普幸<sup>1,3</sup>, 田沁花<sup>1</sup>, 张永<sup>1</sup>, 张永香<sup>1</sup>

(1. 西部环境教育部重点实验室 兰州大学 中德干旱环境研究中心, 兰州 730000; 2. 美国哥伦比亚大学 Lamont-Doherty  
树木年轮实验室, 纽约 10964; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:**天山东部西伯利亚落叶松的树木年轮学研究可以看出:森林上限树轮宽度年表之间相关性较高而下限年表间相关稍低,表明下限小生境要素对树木生长干扰较大。森林上下限树轮年表中样本的总解释量(ESP)和信噪比(SNR)都比较高,说明树木中都含有较多的环境信息;但标准年表中平均敏感度(M.S.)和轮宽指数的标准差(S.D.)都是森林上限数值低于下限,这表明森林上限树木生长对环境变化响应的敏感性降低;相关分析和响应分析也发现森林下限生长的树木对气候因子的响应较为显著。就温度而言,森林上限和下限表现基本一致,树木生长多与温度负相关,其中下限树木生长与春季均温和3~6月份均温显著负相关;降水表现出一定的差别,上限树木生长与春季、夏季及年降水量有较高的负相关,而对下限树木生长影响最大的则是冬季和3~6月份降水。湿润指数与降水基本一致即上限呈负相关而下限正相关,温暖指数全为负相关,寒冷指数下限负相关显著;显然该地区森林上下限树木生长的生态模式存在着一定的差异。研究发现,冬春季节的不同水热组合则是形成树木年轮宽窄的限制因素;同时,前期生长的滞后效应对年轮形成有重要的影响。

**关键词:**树木年轮;标准年表;气候因子;前期生长;滞后效应

文章编号:1000-0933(2006)08-2723-09 中图分类号:P935 Q948 文献标识码:A

## The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledb to climatic change in eastern Tianshan Mountains

PENG Jian-Feng<sup>1</sup>, GOU Xiao-Hua<sup>1,\*</sup>, CHEN Fa-Hu<sup>1</sup>, LI Jin-Bao<sup>1,2</sup>, LIU Pu-Xing<sup>1,3</sup>, TIAN Qin-Hua<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-Xiang<sup>1</sup> (1. Center for Arid Environment and Paleoclimate Research (CAEP), Key Laboratory of Western China's Environment Systems MOE., Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2. Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University in U. S. A., New York, 10964; 3. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2723 ~ 2731.

**Abstract:** Tree-ring cores were collected for *Larix sibirica* Ledb from the upper and lower forest border in eastern Tianshan Mountains, northwestern China, and four ring-width chronologies were developed using 64-year spline function. The correlations of each standard ring-width chronology pair were different. The high correlation between the two chronologies from the upper forest border means they have the identical strong environmental information; and the less high correlation between chronologies of the lower forest border means they could have been disturbed by small different ecotypic forces. Comparison of chronological statistics showed that there were a lot of information in both the chronologies from the upper forest border and the lower forest border.

**基金项目:**国家自然科学基金创新群体资助项目(40421101);国家自然科学基金资助项目(90502008, 40201049, 40125001)

**收稿日期:**2005-06-23; **修订日期:**2006-01-05

**作者简介:**彭剑峰(1965~),男,博士生,主要从事树木年轮年代学和树木年轮生态学研究. E-mail: jfpeng@lzu.edu.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhgou@lzu.edu.cn

**致谢:**感谢新疆维吾尔自治区天然林保护中心领导对野外工作的支持,感谢新疆气象局袁玉江研究员对野外采样工作的指导和饶治国、喻树龙同志参与野外采样。

**Foundation item:** The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40421101) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40201049; 40125001)

**Received date:** 2005-06-23; **Accepted date:** 2006-01-05

**Biography:** PENG Jian-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in dendrochronology and dendroecology. E-mail: jfpeng@lzu.edu.cn

However, lower mean sensitivity (M. S.) and less standard deviation (S. D.) of the upper forest border chronologies indicated trees growing had lower sensitivity to the climate change in the study area.

There were different relationships between tree growth and the climate factors: all chronologies were negatively correlated with temperature, especially with the spring and March-June mean temperature at the lower forest border. Tree growth at the upper forest border was further negatively correlated with spring, summer and annual mean precipitation, while winter and March-June precipitation had great influence on tree-growth at the lower forest border. Radial growth showed negative correlation with humidity index at the upper forest border, but had significant positive correlations at the lower forest border. All tree radial growth was negatively correlated with warmth index, but only significant negative correlation with coldness index was found at the lower forest border. Thus, these results demonstrated there was a great diversity of ecological patterns at the upper and the lower forest border.

The paper gave a particular analysis on the lag-effect of preseason tree-growth on ring-width, and found that preseason growth was one of the important factors influencing tree growth in the eastern Tianshan Mountains. Also, the paper analyzed the influence of previous and current year climate forces on the formation of the characteristic rings, i. e., the widest and the narrowest rings, and the results showed that the combination of atmosphere temperature and precipitation during last winter and current spring was the main limiting factor influencing the patterns of wide and narrow rings.

**Key words:** tree ring; standard chronology; climate force; preseason growth; lag-effect

树木年轮中含有大量过去气候变化的信息,以定年准确、连续性强、分辨率高、轮宽量测精度高、与气候要素相关度高、地域分布广泛、易于采样和复本量好等特点发展很快<sup>[1]</sup>。近几十年来,利用树轮宽度和密度序列,主要进行了局地长时间尺度上的气候重建<sup>[2-4]</sup>和区域空间范围上过去几百年气候变化的重建<sup>[5]</sup>。天山是我国树木年轮学开展最早的地区之一,北坡中东部的昌吉和哈密等地早在 20 世纪 80 年代初就建立了大量的年表<sup>[6-8]</sup>;90 年代之后树轮研究有较大发展,如利用树木年轮宽度指标,罗格平等<sup>[9]</sup>重建了巴里坤盆地近 250a 来的冷暖变化;袁玉江等<sup>[10,11]</sup>分析了天山东端树轮年表的响应函数,并重建了巴里坤地区 300a 来的干湿变化特征;张志华等<sup>[12]</sup>重建了东天山 300 多年来干旱日数的变化。虽然这些成果为本地区环境变化的研究提供了科学依据,但这些研究使用的树木年轮样本大多是 20 世纪 70~80 年代采集的,建立年表的样本复本量也较少,样品与气象资料相关及响应分析的时段相对较短,且当时的分析手段较现在也有一定的局限性,因此有必要对该地区进行重新研究。

本文主要对天山东部巴里坤地区森林上下限树木生长与气候因子等的关系做了相关研究,既对比分析了不同生境树木生长对气候因子等的不同响应,又对气候记录时期影响树木特征年轮(最宽和最窄年轮)的气候因子进行了验证分析。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区概况

巴里坤哈萨克自治县是新疆维吾尔自治区东北部的一个边境县,位于天山山脉东段与东准噶尔断块山系之间的草原上,地理坐标为东经 91°19'30"~94°48'30"、北纬 43°21'~45°5'19",受地质构造控制,其地势东南高西北低,形成了水气入侵的天然缺口,属温带大陆性冷凉干旱气候,年平均气温 -2.5~5℃,1 月份平均气温为 -18~-13℃,7 月份为 16.9~24.6℃;年平均降水只有 202 mm,山区降水量可多达 400~500 mm,季节分布也不平衡,夏季(6~8 月份)多,占全年降水量的 51%~77%,冬季少,仅占全年水量的 4%~14%,无霜期平均 104d 左右。森林分布在海拔 2100~2800m 的阴坡地带,以西伯利亚落叶松 (*Larix sibirica* Ledb.) 和天山云杉 (*Picea schrenkiana* Fisch.) 为主。

### 1.2 树轮资料

树木年轮气候学要求采样时尽量选在树木生长过程受到气候限制的地区,如位于森林群落或该树种分布的最南或最北端、上限或下限位置,因为在这些位置年轮的形成显著受到气候因子的影响<sup>[13]</sup>。为了对比不同海拔高度树木生长对气候因子的敏感性,本研究在地形较为开阔、森林分布垂直高差较大的巴里坤北山地区

红旗沟和蓝旗沟的上下限共采集了 4 个样点:BLKA 和 BLKD, BLKB 和 BLKC, 树种均为西伯利亚落叶松。采样遵循一定的采样策略<sup>[14]</sup>和一定的采样原则<sup>[15]</sup>, 每个采样点都在 20 株树以上, 每树用生长锥在树木胸径位置的不同方向取两芯作为样本, 样本树多为健康树(如表 1)。

表 1 采样点概况

Table 1 Summary of tree-ring sampling sites

代码 Code	采样点 Sampling sites	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔高度 Elevation(m)	样本数(株) Sample number
BLKA(上 upper)	红旗沟	43°51'	93°18'	2810	91(43)
BLKD(下 lower)	Hongqi valley	43°49'	93°18'	2380	49(26)
BLKB(上 upper)	蓝旗沟	43°50'	93°23'	2840	51(25)
BLKC(下 lower)	Lanqi valley	43°49'	93°20'	2480	49(25)

样品带回实验室后, 进行处理, 其基本过程是按照 Stokes 和 Smiley<sup>[16]</sup>的方法进行: 晾干、固定、磨平打光, 直至在显微镜下能够清晰的分辨出细胞的形状和大小以及早晚材的分界线为止, 然后交叉定年和测量树轮宽度。最后利用 COFECHA 程序<sup>[17]</sup>对交叉定年和测量结果进行检验, 本研究仅仅剔除了几个树芯中与主序列相关较差的时段, 这样就为建立可靠的年表打下坚实的基础。

树轮宽度年表的建立就是通过 ARSTAN 程序<sup>[18]</sup>采用负指数函数或样条函数拟合去掉树木本身遗传因子产生的生长趋势和树木之间干扰竞争产生的抑制和释放等的生长趋势, 然后利用样本序列值和其拟合生长曲线值的商进行订正使其标准化。为了便于对比分析, 本研究通过不同的尝试, 最终选取了统一的去生长趋势方法即 64 步长的样条函数去趋势, 并得出标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS), 表 2 是四个采样点标准年表(STD)年表特征和公共区间特征统计结果。

表 2 天山东部采样点的标准年表(STD)的统计特征值及共同区间分析结果

Table 2 Standard chronology statistics and results of common interval analysis of tree-ring data from the eastern Tianshan Mountains

采样点 Samples sites	Mean	M.S.	S.D.	$R_1$	$R_2$	$R_3$	SNR	ESP	$PCA_1$ (%)
BLKA	0.9923	0.1657	0.1854	0.420	0.417	0.688	27.856	0.965	43.53
BLKD	0.9835	0.2216	0.3160	0.532	0.526	0.800	24.378	0.961	56.44
BLKB	0.9891	0.2068	0.2193	0.428	0.423	0.662	18.310	0.948	44.81
BLKC	0.9698	0.2415	0.3131	0.380	0.368	0.782	11.080	0.917	41.44

Mean: 平均指数 mean indices; M.S.: 平均敏感度 mean sensitivity; S.D.: 标准差 standard deviation;  $R_1$  为样本之间的平均相关系数 mean correlations among all radii;  $R_2$  为树与树之间的平均相关系数 mean correlations between trees;  $R_3$  为同一棵树不同样本之间的平均相关系数 mean correlations within the same tree; SNR 为信噪比 signal-to-noise; ESP 为样本量的总体解释信号 radii vs mean;  $PCA_1$  代表第一主分量所占总方差量的百分比 variance in first eigenvector

为了建立可靠的年表, 本研究中采纳了子样本强度 SSS(subsample signal strength)<sup>[19]</sup>大于 0.8 的样本量作为年表的起始点, 这样高于该起始点样本量的年表序列才是可靠的, 其 4 个采样点的标准年表如图 1 所示。

### 1.3 气候资料

本研究利用的气候资料来自巴里坤县气象站(43°36'N, 93°00'E, 1650.9m)。所用气候要素为 1961~1999 年之间的月平均气温和月降水量及其不同时段、季节指标和不同生态气候指标。对于不同时段的气候因子, 本研究选取了响应较为显著的 3~6 月份和年的数值来做分析, 而生态气候指标则利用了生态学上常用的温暖指数、寒冷指数和湿润指数<sup>[20~23]</sup>。温暖指数是采用月平均气温高于 5℃的总和, 作为植物生长的热量条件; 寒冷指数是采用月平均气温低于 5℃的总和来表示; 湿润指数则是年降水量与温暖指数的比值<sup>[22]</sup>。

### 1.4 相关分析和响应分析

树轮宽度的可靠年表之间的和树轮宽度指数与气候要素之间的相关关系, 本研究分别选用了 SPSS 分析软件<sup>[24]</sup>和 Dendroclim2002 应用软件<sup>[25]</sup>, 旨在揭示不同采样点树木年轮年表之间的关系及树木生长与气候要素

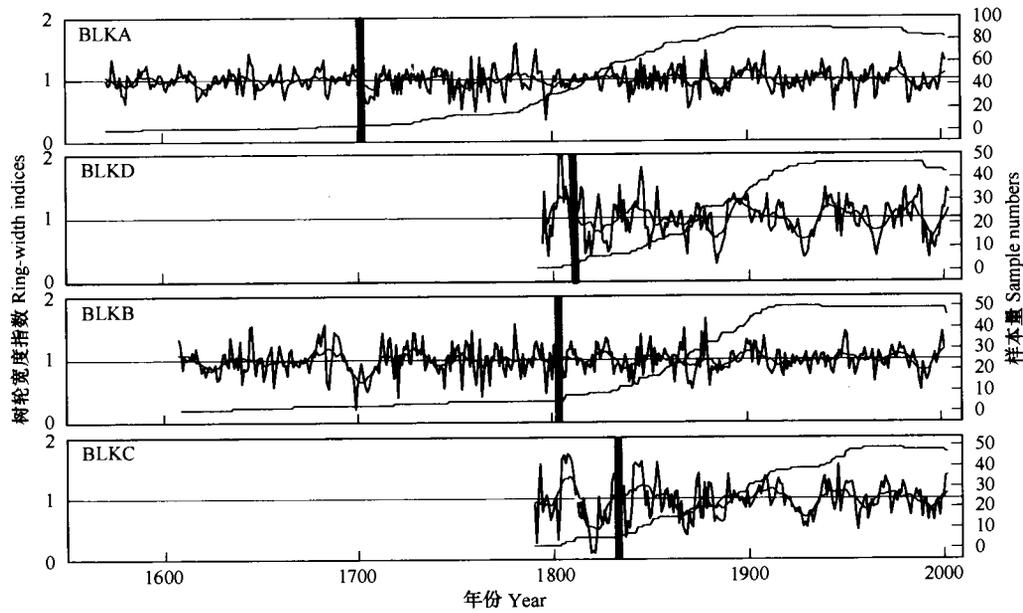


图 1 天山东部采样点森林上下限树轮宽度指数标准年表 STD 和 10 年滑动平均图

Fig. 1 Standard chronologies of ring-width index and 10 point FFT smoothing from the eastern Tianshan Mountains

粗竖线条是子样本强度  $sss > 0.8$  的样本量起点,表示年表在该样本量之后是可靠的;BLKA:红旗沟上限 Hongqi lowerlimit;BLKB:蓝旗沟上限 Lanqi upper limit;BLKC:蓝旗沟下限 Lanqi lower limit

之间的关系,发现与树木生长关系密切的气候因子加以重建,以寻求长序列气候要素的变化。本研究还利用树木年轮的 PRECON 应用程序<sup>[26]</sup>来研究气候因子及其前期生长对树木年轮形成和发展的贡献,选用巴里坤气象站前一年 9 月份到当年 10 月份的月平均气温和月降水量的综合或单因子及滞后 3a 共 31 或 17 个因子分别对不同采样点的树木年轮宽度指数做了响应分析,显著性检验用 Bootstrap 方法<sup>[27]</sup>随机执行 500 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 树轮可靠年表之间的环境信息

4 个树轮指数的可靠标准年表(BLKA1702-2002; BLKD1812-2002; BLKB1806-2002; BLKC1838-2002)之间的相关系数(如表 3)表现出明显的差异性,两大采样点的上限年表的相关系数最高(0.733),下限年表的相关系数次之(0.708),且均达到置信度 99% 以上,这足以说明位于两采样点上限的树木生长的大环境因子具有较大的相似性,而下限可能因地形、地貌和坡向等小环境的差异使两地相关稍弱;上下限年表的相关系数虽小但均达到置信 95% 以上,这也从另一方面说明该地区森林主要受大环境因子影响,只是森林下限受地形及土壤等小生境因子的干扰较强,使森林上下限对环境因子的响应表现出一定的差异。

### 2.2 树轮年表基本统计特征的差异

一般认为: $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $SNR$ 、 $ESP$  和  $PCA_1$  统计量的数值越大,则表明所选样本对于群体的代表性越好即序列的共性越强,整个分析中的环境信息含量就越大。本研究 4 点树轮宽度年表的这些数值都比较大,但两个采样点森林上下限树轮宽度标准年表 STD 的特征值之间也存在着一一定的差异。从表 2 的 4 个树轮宽度标准年表 STD 的特征值可以发现:平均敏感度(M.S.)、轮宽指数的标准差(S.D.)和同一棵树样本之间的相关系数( $R_3$ )都是森林上限数值较低而下限较高,表明森林上限树木生长对环境变化响应的敏感性

表 3 4 个树木年轮指数可靠的标准年表(STD)之间的相关对比  
Table 3 Compare and contrast of correlation coefficients of dependable standard chronologies between four sampling sites

	BLKA	BLKD	BLKB	BLKC
BLKA	1			
BLKD	0.272**	1		
BLKB	0.733**	0.179*	1	
BLKC	0.333**	0.708**	0.199*	1

\*\* 表示置信度在 99% 以上 Significant test with 99%; \* 表示置信度在 95% 以上 Significant test with 95%

降低,这与海拔升高降水增加,降水对树木生长的限制作用的减弱有关<sup>[28]</sup>;同样在图 1 年表序列中也可直观看出树轮指数的波型变化的振幅下限高于上限。但不同树木和不同样本间的相关系数( $R_1, R_2$ )两采样点的上下限表现出相反的特征,这可能与两个采样点的走向、坡向及树木生长的小生境等的影响有关。样本的总解释量(ESP)和信噪比(SNR)在两大采样点中都较高,说明该地区生长的树木中都含有较多的环境信息;第一主分量( $PCA_1$ )除红旗沟下限 BLKD 树轮宽度指数中含量最高达 56.44% 外,其余 3 点相差不大,说明红旗沟下限影响树木生长的限制因子比较突出。

### 2.3 树轮宽度指数对气候因子等的响应

树木年轮的生长受到诸多因子的影响,它不仅受到树木本身内在的遗传因子的影响,还更多的受到外界环境条件的影响<sup>[29]</sup>。每一年树木年轮的形成都取决于当年及生长前期的许多种环境因子如气候因子等的综合作用<sup>[15]</sup>。

#### 2.3.1 树轮宽度指数对单月气候因子的响应

使用 Dendroclim 2002 应用软件<sup>[25]</sup>分别对红旗沟和蓝旗沟两点的上下限的树轮宽度指数与巴里坤气象站的单月因子(前一年 8 月份~当年 10 月份)进行相关分析,其结果如图 2 所示。巴里坤北山是西伯利亚落叶松生长的南部边界且生长海拔较高,属于喜光耐寒耐旱的树种<sup>[30,31]</sup>。在一定的高度范围内,随海拔的升高降水有逐步增加的趋势,降水对树木生长的限制作用也逐步减弱,在降水最大高度的位置降水对树木生长的限制作用可能达到最小值;这样在降水满足森林生长时,树轮宽度指数对单月气候因子的响应基本都不显著,因此,两个采样点森林上限落叶松树轮宽度指数都仅与 7 月降水表现出显著的负相关,这可能与 7 月份较多的降水会引起太阳辐射减弱和土壤水分过多,结果抑制了喜光耐旱的落叶松的生长有关。下限的树木生长对单月气候因子的响应也表现出相似的变化特征,前一年 11 月份到翌年 1 月份的降水对树木的生长有着促进作用:一方面,上年秋季树木各组织器官的生长基本停止,但仍能进行一定的光合作用,此时湿润的条件有利于积累更多的光合产物,为下年春季形成层活动提供较多的养分<sup>[29]</sup>;另一方面,秋冬季降水可以提高土壤含水量,为树木下年的生长提供必要的水分<sup>[32]</sup>。当年生长季降水则主要通过影响净光合产量而影响树木生长<sup>[29]</sup>,前一年 11 月份到当年 6 月份期间(冬春)的较高温度往往会使得大气降水(积雪)减少和土壤中水分蒸发散失较多,这加剧了水分对树木生长的限制作用;3 月份降水偏多能使 4 月份落叶松发芽获得较好的水分条件<sup>[11]</sup>,而 3 月份的高温会导致土壤中水分大大减少抑止落叶松的发芽,因此 3 月份气温与树木生长表现出显著的负相关。上限树木生长对气候因子的响应不显著与对应的气象站海拔高度有一定的联系,但从对气候因子的响应分析中可以看出该地区森林上下限树木生长的生态模式存在着一定的差异。

#### 2.3.2 树轮宽度指数对不同季节气候因子和不同生态气候指标的响应(图 3)

西伯利亚落叶松树轮宽度指

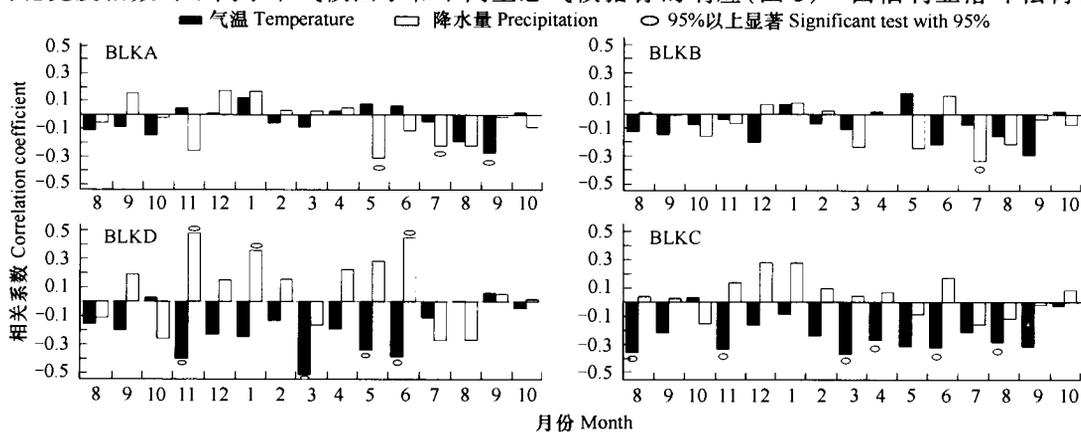


图 2 天山东部森林上下限树轮宽度指数与单月气候因子的相关对比

Fig.2 Compare and contrast of correlation coefficients between dependable standard chronologies and single-month climatic forces in upper and low limits forest of the eastern Tianshan Mountains

数对季节温度的响应无论是森林上限还是森林下限都表现出负相关,其中两采样点的下限树轮宽度指数与春季月均温、3~6月份月均温和年均温的负相关都比较显著,这与西伯利亚落叶松生长下限位于荒漠边缘有关,干旱地区春季气温回升迅速,往往使土壤中水分含量大大的减少,致使树木正常的生理生长机能恢复较慢。下限树木生长还与年均温呈负相关,说明温暖的年份不利于耐寒树种的生长发育。

森林上限年表与春季降水量、夏季降水量及年降水量有较高的负相关,这可能与森林上限降水比较丰富有关,降水量的增加和土壤湿度的增大往往不利于耐旱的西伯利亚落叶松根部呼吸而抑制树木的正常生长。森林下限表现出与冬季和3~6月份降水显著正相关关系,说明比较干燥的森林下限冬季丰富的降水一方面会保持土壤温度使树木免遭冻害,另一方面土壤湿度的增大有利于春季树木的萌芽生长,同时春季和夏初(3~6月份)随着温度的升高虽冰雪融化但蒸发量也大大增加,这时土壤的水分往往不能满足树木的快速生长,因此充足的降水就成为树木生长的必要条件。两采样点的森林下限对水分的响应也存在很大的不同,红旗沟森林下限 BLKD 与降水都成正相关,蓝旗沟 BLKB 则表现出秋冬季和年降水量为正相关,这可能与两沟的走向、采样点的坡向等小生境差异有关。

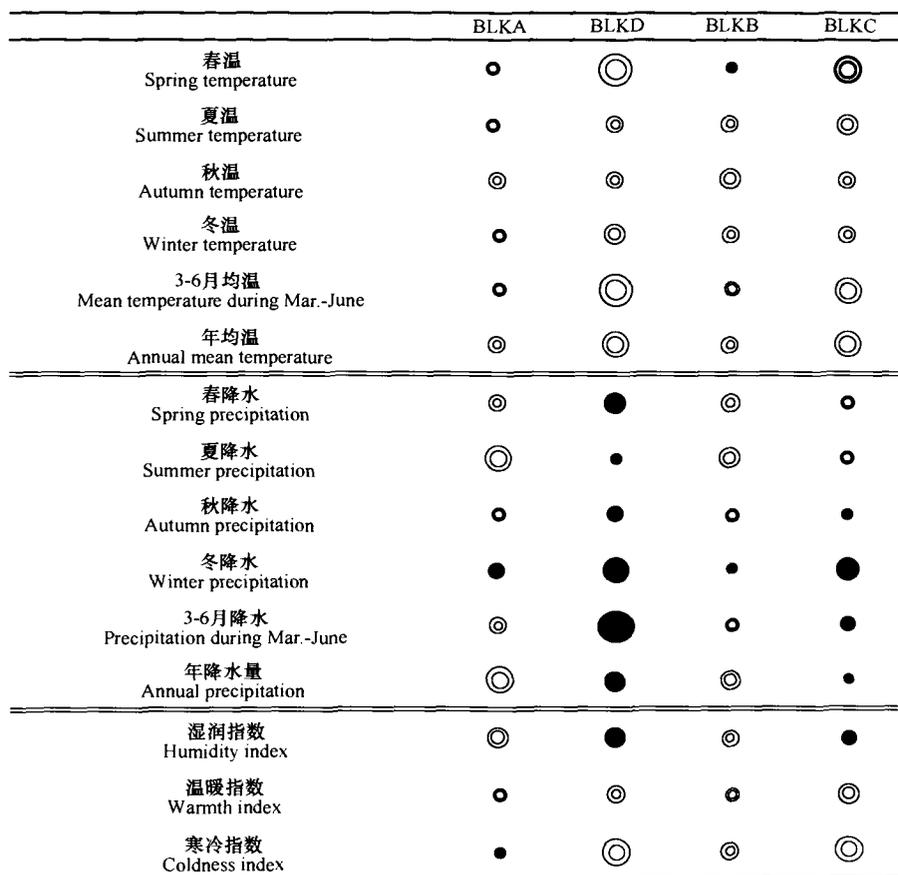


图3 两大采样点森林上下限标准年表与不同季节气候因子和不同生态气候指标的相关

Fig.3 Correlation coefficients between dependable standard chronologies and different seasons and different ecological climate forces in upper and low limits forest of the eastern Tianshan Mountains

●正相关 positively correlation, ⊙负相关 negative correlation, A 超过95%置信检验 significant test with above 95%

下限树木生长与温暖指数和寒冷指数都呈负相关(图3),而温暖指数实质上就是一种简化了的有效积温<sup>[21]</sup>,说明积温越高气候越温和越不利于耐寒树种的生长发育;同时也说明冬季的低温可能会超出西伯利亚落叶松的耐寒极限而抑制树木生长甚至造成树木死亡<sup>[33]</sup>;或冬季温度偏低造成冻土较厚,春温回升时热量多用于融化冻土,地温回升慢,根系生长开始晚,造成树木生长期缩短,形成偏窄轮<sup>[34]</sup>。树轮宽度指数与湿润指

数的相关两个采样点表现出一致性,森林上限树木生长都与湿润指数呈负相关而下限则都与湿润指数呈正相关,这一点和树木生长与降水量的相关关系表现出很好的一致性,表明正常情况下在森林上限水分已能满足树木需要,过多的水分反而会抑制树木的生长;对于比较干燥的森林下限,水分成为树木生长的主要限制性因子,充足的水分条件更有利于树木生长。

**2.3.3 树轮宽度指数对树木前期生长的响应分析** 在树木年轮指数中除包含有外界环境波动(如气候因子的变化)外,还受树木自身生长的滞后效应影响<sup>[15,35]</sup>。本研究利用树木年轮的 PRECON 应用程序<sup>[26]</sup>来研究气候因子及前期生长对树木年轮形成和发展的贡献,以对比天山东部森林上下限西伯利亚落叶松年轮宽度的生长差异及对环境要素的适应。从表 4 响应分析结果中可以看出,树木生长不论是受平均气温和降水量的综合影响还是受气温或降水的单因子影响,树木前期生长的解释量(方差)都占了总解释量的一半以上,均高于气候因子的解释量,尤其第 1 年滞后的解释量都呈显著响应,这一点不排除气象站与采样点之间高差较大造成的误差,但总体上两大采样点树木生长对气候因子的响应下限均高于上限而对前期生长的响应两大采样点正好呈相反的特征,这说明小生境的差异引起土壤含水量等的不同可能是造成树木滞后生长的主要原因。

表 4 1961~1999 年不同气候因子及前期生长(滞后 3a)对树轮宽度指数响应的解释量(%)

Table 4 Variance in 1961~1999 different climate forces and previous growth to ring-width indices (%)

	气温和降水 Temperature and precipitation	前期生长 Preseason growth	总响应 Total variance	气温 Temperature	前期生长 preseason growth	总响应 Total variance	降水 Precipitation	前期生长 preseason growth	总响应 Total variance
BLKA	27.0	41.2	68.2	18.0	33.9	51.9	24.1	31.1	55.2
BLKD	39.6	43.6	83.2	29.3	42.6	71.9	32.3	39.3	71.6
BLKB	24.3	37.1	61.4	16.6	24.8	41.3	19.7	24.9	44.5
BLKC	30.8	30.3	61.1	22.7	24.3	47.0	14.4	24.7	39.1

## 2.4 树轮宽窄对气候因子响应的分析验证

从树木生长对气候因子的响应分析得出,巴里坤 4 个采样点中下限的 BLKD 对气候因子有较高的响应关系,所以,为了更好地理解影响树木生长的限制因子,本研究选取 BLKD 采样点进行树木年轮特征年的单年分析(图 4)。本研究选取 BLKD 年表序列中树轮指数值最低(0.369)的 1992 年年轮和树轮指数值最高的 1987 年年轮(1.482)分别与前一年和当年的气候因子的距平来分析对比(如图 4)。树木生长对气候单月因子的相关分析结果显示(如图 2),影响下限 BLKD 西伯利亚落叶松树木生长的显著因子有前一年 11 月份和当年 6 月份的温度和降水、当年 3 月份和 5 月份温度及 1 月份降水。本研究以前一年 11 月份和当年 6 月份的月平均气温和月总降水量为例分析树木年轮产生宽窄变化的原因。1986 年 11 月份平均气温比历年月均温低 1.6℃左右,虽降水减少 4.3mm,但低温仍有利于土壤保持水分是土壤中又充足的含水量;而 1991 年 11 月份平均气温比历年月均温高 3.0℃,降水减少 6.0mm,高温会加剧土壤水分的缺失,可见,前一年 11 月份气温的异常是 1991 年产生窄轮的主要原因之一。1987 年 6 月份平均气温比历年月均温低 1.9℃,降水增加 48.2mm,而 1992 年 6 月份平均气温比历年月均温高 1.1℃,降水减少 13.1mm,这里可以看出 6 月份降水的多寡是形成树木年轮宽窄变化的主要原因。上述可知,1987 年 6 月份充沛的降水,加上上一年冬季降水的积累可以利用,即使高温的 7、8 月份降水很少,仍使当年树木快速生长形成了较宽的年轮;而 1992 年 6 月份降水减少温度却升高,造成蒸发旺盛,加上上一年 11 月份高温异常,使 6 月份较少的水分大大地限制了树木的生长,从而在当年形成了较窄的年轮。1992 年在降水量(3~4 月份)基本正常的情况下,3~4 月份偏高的气温抑止了树木的发芽,导致发芽期推迟,这也是形成窄轮的因素之一。因此,该分析不仅验证了树木生长对气候因子响应的差异,同时也表明:冬春季节的不同水热组合是形成树木宽窄年轮变化的重要限制因素。这与“干旱地区,无论在生长季以前一段时间还是生长季内,少雨和高温造成的影响是形成窄年轮的限制因子,其中少雨又是主要的限制因子”<sup>[15]</sup>基本一致。

## 3 结论

目前普遍认为森林上限的树木生长主要受气温的影响而森林下限的树木生长主要受降水的影响<sup>[15]</sup>,而

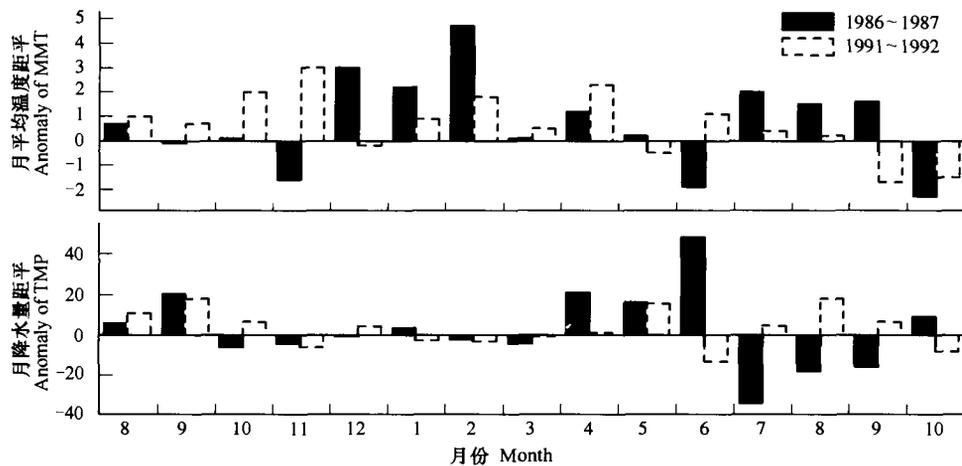


图4 1986~1987年和1991~1992年月平均气温距平和月总降水量距平的变化

Fig. 4 Anomaly of mean monthly temperature (MMT) and total monthly precipitation (TMP) in 1986~1987 and 1991~1992

侯爱敏等<sup>[36]</sup>通过大量年轮宽度与气候因子(主要是气温和降水)的相关分析表明,年轮宽度与气候因子有着复杂的相关关系,这种关系受气候因子之间的相互制衡和因物种而异的树木生长节律的影响。通过天山东部巴里坤北山两大采样点的森林上下限树木年轮要素的一系列对比分析研究,得出以下初步结论:

(1) 两大采样点森林上限树轮宽度指数年表之间有较高的相关性,这反映影响森林上限生长的大环境因子基本一致,而下限之间稍低的相关系数则表明树木生长其受小生境要素的干扰较大。

(2) 森林上下限4个树轮宽度标准年表STD的特征值表现出较大的差异。标准年表中平均敏感度(M.S.)和轮宽指数的标准差(S.D.)都是森林上限数值低于下限,这表明森林上限树木生长对环境变化响应的敏感性降低;而上下限树轮年表中样本的总解释量(ESP)和信噪比(SNR)都比较高,说明树木中都含有较多的环境信息;相关分析和响应分析也发现森林下限生长的树木对气候因子的响应较为显著。不论森林上限还是森林下限几乎都与温度呈负相关,下限表现尤为突出,其中春季均温和3~6月份月均温呈显著负相关;从树木生长对降水因子的响应来看,上限树木生长与春季、夏季及年降水量有较高的负相关,而对下限树木生长影响最大的则是冬季降水和3~6月份降水;湿润指数与降水基本一致:上限呈负相关而下限正相关;温暖指数全为负相关;寒冷指数下限负相关显著。

(3) 本文还针对树木生长过程中前期生长对树轮宽度的‘滞后效应’进行研究,结果发现在所有气候要素分析中树轮宽度的前期生长量大都占了总解释量的一半以上,均高于气候因子的解释量,尤其第1年滞后的解释量都呈显著响应,很显然树木的前期生长是该地区的重要影响因素。

(4) 通过对有气候数据记录的树木特征年轮的分析,发现冬春季节的不同水热组合是形成树木年轮宽窄的主要限制因子。

#### References:

- [1] Shao X M. Advancements in dendrochronology. *Quaternary Sciences*, 1997, (3): 265~271.
- [2] Graumlich L J. A 1000 year record of temperature and precipitation in the Sierra Nevada. *Quaternary Research*, 1993, 39(2): 249~255.
- [3] Lara A, Villaliba R. A 3620 year temperature record from Fitzroya cupressoides tree rings in southern South America. *Science*, 1993, 260: 1104~1106
- [4] Luchman B H. Tree-ring based reconstruction of summer temperature at the Columbia Icefield, Alberta, Canada, A.D. 1073~1983. *Holocene*, 1997, (7): 375~389.
- [5] Fritts H C. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. Tucson: The University of Arizona Press, 1991. 56~90.
- [6] Li J F, et al. *Study of dendroclimatology and dendrohydrology in Xinjiang*. Beijing: Meteorological Press, 1989. 25~48, 74~80.
- [7] Research group of dendroclimatology of Hami, Xinjiang. Tree ring chronology developed in adequate samples in Hami, Xinjiang. *Xinjiang Weather*, 1982, 5(9): 35~37.
- [8] Research group of dendroclimatology of Hami, Xinjiang. Establishment of tree-ring chronologies in eastern Xinjiang and study of climatic variation trend. *Xinjiang Geography*, 1983, 6(4): 27~38.
- [9] Luo G P, Yuan Y J. Fluctuate of modern climate and cold-warm change in recently 250 years in Balikun basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*,

- 1991, 13(1):77 ~ 83.
- [10] Yuan Y J, Wang C Y. 300 years' characters of dry-humid change and future forecast in Balikun. *Journal of Xinjiang Weather*, 1990, 13(4):10 ~ 14.
- [11] Yuan Y J, Li J F. The response functions of tree-ring chronologies in the East end of Tianshan Mountains. *Arid Zone Research*, 1994, 11(1): 27 ~ 34.
- [12] Zhang Z H, Wu X D, Li J. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 300 - year drought days in Eastern Tianshan Mountains. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1996, 7(1): 53 ~ 60.
- [13] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology*. Netherlands: Kluwer Academic, 1990.
- [14] Shao X M, Fang X Q, Llu H B, *et al.* Dating the 1000 year-old Qilian Juniper in Mountains along the Eastern Margin of the Qaidam Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 90 ~ 100.
- [15] Wu X D. *Tree-ring and climate change*. Beijing: Meteorology Press, 1990. 65 ~ 75.
- [16] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago: the University of Chicago Press, 1968.
- [17] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69 ~ 75.
- [18] Cook E R, Holmes R L. *Users manual for ARSTAN*. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson, 1986.
- [19] Cook E R, Kairiukstis eds. *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 1990.
- [20] Fang J Y. Arrangement of East-Asian vegetation-climate types on coordinates of temperature and precipitation. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(3): 290 ~ 294.
- [21] Fang J Y. Kira Tatsuo and development of ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, 14(2): 70 ~ 75.
- [22] Xu W D. Heat index of Kira Tatsuo and applications in vegetation of China. *Chinese Journal of Ecology*, 1985, 3(3):215 ~ 222.
- [23] Dai J H, Shao X M, Cui H T, *et al.* Reconstruction of past eco-climate by tree-ring width index of *Larix Chinensis* on Mt. Taibai. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(4):428 ~ 435.
- [24] Lu W D, Zhu Y L, Sha J, *et al.* SPSS for Windows. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. 206 ~ 213.
- [25] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, 32: 111 ~ 116
- [26] Fritts H C. Quick help for precon now called Preconk version 5.11. The University of Arizona, Tucson, Arizona, 1996.
- [27] Guiot J. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin*, 1991, 51:39 ~ 41.
- [28] Gou X H, Chen F H, Yang M X, *et al.* Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):172 ~ 176.
- [29] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- [30] Liu Z L, Fang J Y, Piao S L. Geographical distribution of species in genera *Abies*, *Picea* and *Larix* in China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5):577 ~ 586.
- [31] Li X B. On power of natural regeneration of *Larix sibirical Virgin* Forests. *Journal of Northwest Forestry University*, 2002, 17(2): 19 ~ 21.
- [32] Liang E Y, Shao X M, Hu Y X, *et al.* Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of *Meyer spruce* (*picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China. *Trees*, 2001, 15: 230 ~ 235.
- [33] Cao Y Z, Song Z W. *Plant Physiology*. Lanzhou: the University of Lanzhou Press, 1998. 375 ~ 383.
- [34] Yuan Y J, Li J F. Reconstruction and analysis of 450 years' winter temperature series in the Urumqi River source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1):64 ~ 70.
- [35] Xia B, Lan T, He S A. Estimation of canopy disturbance and dynamics of a stand of *Pinus taiwanensis* and broad-leaved trees in the west Tianmu Mountain. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1995, 4(3):15 ~ 20.
- [36] Hou A M, Peng S L, Zhou G Y. The study of the reactions of tree rings to the climate change and its applications. *Ecologic Science*, 1999, 18(3): 16 ~ 23.

## 参考文献:

- [1] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. *第四纪研究*, 1997, (3): 265 ~ 271.
- [6] 李江风, 等. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1989. 25 ~ 48, 74 ~ 80.
- [7] 哈密地区树木年轮气候研讨组. 以大样本建立哈密地区树木年表. *新疆气象*, 1982, 5(9):35 ~ 37.
- [8] 哈密地区树木年轮气候研讨组. 新疆东部树木年表的建立及近代气候变化趋势探讨. *新疆地理*, 1983, 6(4):27 ~ 38.
- [9] 罗格平, 袁玉江. 巴里坤盆地现代气候波动及近 250 年来的冷暖变化. *冰川冻土*, 1991, 13(1):77 ~ 83.
- [10] 袁玉江, 王承义. 巴里坤 300 年干湿变化特征及未来趋势预测. *新疆气象*, 1990, 13(4):10 ~ 14.
- [11] 袁玉江, 李江风. 天山东端树轮年表的响应函数. *干旱区研究*, 1994, 11(1):27 ~ 34.
- [12] 张志华, 吴祥定, 李冀. 利用树木年轮资料重建新疆东天山 300 多年干旱日数的变化. *应用气象学报*, 1996, 7:53 ~ 60.
- [14] 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析. *地理学报*, 2003, 58(1):90 ~ 100.
- [15] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [20] 方精云. 东亚地区植被气候类型在温度、降水量坐标中的表达. *生态学报*, 1994, 14(3):290 ~ 294.
- [21] 方精云. 吉良庵夫与生态学的发展. *生态学杂志*, 1995, 14(2):70 ~ 75.
- [22] 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用. *生态学杂志*, 1985, 3(3):215 ~ 222.
- [23] 戴君虎, 邵雪梅, 崔海亭, 等. 太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建. *第四纪研究*, 2003, 23(4):428 ~ 435.
- [24] 卢纹岱, 朱一力, 沙捷, 等. SPSS 从入门到精通. 北京: 电子工业出版社, 1997. 206 ~ 213.
- [28] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化. *生态学报*, 2004, 24(1):172 ~ 176.
- [30] 刘增力, 方精云, 朴世龙. 中国冷杉、云杉和落叶松属植物的地理分布. *地理学报*, 2002, 57(5):577 ~ 586.
- [31] 李行斌. 新疆落叶松原始林分天然繁衍的动力探究. *西北林学院学报*, 2002, 17(2): 19 ~ 21.
- [33] 曹仪植, 宋占午, 主编. *植物生理学*. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. 383 ~ 387.
- [34] 袁玉江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450a 冬季温度序列的重建与分析. *冰川冻土*, 1999, 21(1):64 ~ 70.
- [35] 夏冰, 兰涛, 贺善安, 等. 西天目山黄山松阔叶林的冠层干扰与动态推测. *植物资源与环境*, 1995, 4(3):15 ~ 20.
- [36] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 树木年轮对气候变化的响应研究及其应用. *生态科学*, 1999, 18(3): 16 ~ 23.