DOI: 10.5846/stxb201408171625

李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 方克艳, 李晓岚, 栗燕, 布文丽, 李玉晗. 芦芽山华北落叶松(Larix principis-rupprechtii) 树轮宽度年表对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(6): - .

Li Y J, Wang S Y, Niu J J, Fang K Y, Li X L, Li Y, Bu W L, Li Y H.Climate-adial growth relationship of *Larix principis-upprechtii* at different altitudes on Luya Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

芦芽山华北落叶松(Larix principis-rupprechtii)树轮宽 度年表对气候因子的响应

李颖俊^{1,2},王尚义^{1,*},牛俊杰¹,方克艳²,李晓岚³,栗 燕⁴,布文丽⁵,李玉晗⁶

1 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心,晋中 030619

2 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007

3 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119

4 河北沧州献县一中,沧州 062250

5 山西平遥香乐乡第二初级中学,晋中 031100

6河北唐山丰润镇中学,唐山 064001

摘要:在芦芽山地区采集三个不同海拔的华北落叶松(Larix principis-rupprechtii),在传统去趋势的基础上,采用"signal-free"方法 对拟合曲线进行修正,避免了中等频率的气候信息引起的拟合偏差,最终建立三个不同海拔树轮宽度标准年表(STD)。同时以 10年为界对上述年表进行滤波处理,得到三个低频年表。年表特征值表明,随着海拔升高,年轮平均轮宽变窄,敏感性和高频 信息增强,低频信息减弱,这可能与逐渐恶劣的生境有关。中、低海拔年表的低频信息更一致,中、高海拔的高频信息更接近,而 高、低海拔无论是标准年表还是高频、低频年表相似性均较差。树轮气候响应分析显示,低海拔 STD 年表与5 月最低温负相关 最为显著,STD 和低频年表均与5、6 月份土壤温度显著负相关,说明生境暖干,树木主要受生长季的干旱胁迫;中海拔 STD 年表 与当年5 月最高温正相关最为显著,STD 和低频年表与土壤温度相关均不显著,说明生境逐渐变得冷湿,生长季的低温成为树 木生长的限制因子;高海拔 STD 年表与气象要素相关不显著,低频年表与当年4 月土壤温度正相关,说明高海拔最为冷湿,并 有季节性冻土分布,生长季的土壤低温成为树木生长的限制因子。因此,全球变暖的趋势将更有利于高海拔树木的生长,而低 海拔树木的干旱胁迫进一步加剧。

关键词:华北落叶松;海拔梯度;树轮气候响应

Climate-adial growth relationship of *Larix principis-rupprechtii* at different altitudes on Luya Mountain

LI Yingjun^{1,2}, WANG Shangyi^{1,*}, NIU Junjie¹, FANG Keyan², LI Xiaolan³, LI Yan⁴, BU Wenli⁵, LI Yuhan⁶ 1 Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan normal university, Jinzhong 030619, China

2 School of Geographic science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Tourism and Environment College, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 The First Middle School of Xian County, Cangzhou 062250, China

5 The Second Junior Middle School of Xiangle Town in Pingyao County, Jinzhong 031100, China

6 The Fengrun Town Middle School, Tangshan 064001, China

Abstract: Tree-ring samples were collected from Larix principis-rupprechtii trees at three sites at different altitudes on Luya

基金项目:山西省高等学校哲学社会科学研究项目(2011325);山西省软科学项目(2012041015-03,201204101502);国家自然科学基金项目 (41171423)

收稿日期:2014-08-17; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wsy326@263.net

Mountain, in the Shanxi Province of North Central China. We used a "signal-free" method to alleviate potential biases due to climate medium-frequency disturbances, and generated three standard (STD) chronologies. The mean tree-ring width, first-order auto-correlation (ac1), and standard deviation (SD) of the three chronologies decreased as the altitude increased, and the mean sensitivity (MS), absent rings percentage, and series inter-correlation (r) increased with increasing altitude. The low-frequency and high-frequency chronologies were generated by applying low-pass (f < 0.1037) and high-pass (f > 0.1037) filters. Generally, the climate sensitivity and high-frequency variability of tree-ring chronologies increase with increasing altitude, while mean tree-ring widths and low-frequency variability were lower at high elevations. Low-frequency chronologies from middle and low altitudes exhibit less variation; while high-frequency chronologies from middle and high altitudes are similar to each other. The chronologies of high and low altitudes have few common variations. The correlation function and response function analyses were used to identify the key climate factor limiting the growth of trees at different altitudes. A significant negative correlation was observed between tree rings at low altitudes and the minimum temperature in May, while standard and low-frequency chronologies were significantly negatively correlated with soil temperatures in May and June. This indicates that trees at low altitudes experience drought stress due to the warm, dry climate. The STD chronology is most significantly positively correlated with the maximum May temperature, and significantly negatively correlated with the maximum April temperature at the middle altitude site, which has a relatively cold and wet climate. The relationship between chronology and soil temperature is not significant. High April temperatures intensified drought conditions and suppressed the expansion and absorption of water by cambium cells. Greater moisture and higher temperatures in May were more beneficial for tree growth than high moisture and temperatures in April. The relationships between chronologies (STD and low frequency) and climate factors at the high-altitude site with seasonally frozen soil are not significant, while the low-frequency chronology is positively correlated with April soil temperatures. Low soil temperatures could suppress the activity of cambium cells and delay the beginning of the growing season; thus, leading to the formation of narrow growth rings. Generally, the environmental conditions became increasingly moist and cold as altitude increased, and the factors limiting tree growth changed from growing season drought conditions to low soil temperatures at the beginning of the growing season. It appears that the current warming trend favors coniferous forests at high altitudes. However, drought stress on the mixed broadleaf-conifer forest at the low altitude site may be intensified; this would provide a reasonable advice for the forestry management in arranging the forest pattern in different altitudes.

Key Words: Larix principis rupprechtii; altitudinal gradients; climate-growth relationship

树木生长不仅受自身遗传因子的影响,还受外界环境因子的支配^[1-2],其中海拔高度是影响树木生长的 重要环境因子,它往往造成热量和水分的再分配,使树木的生长环境更加复杂多样^[3]。通常认为,在半干旱 地区,低海拔树木一般趋向于干旱响应,降水是树木生长的限制因子;随着海拔升高,降水增加,温度降低,低 温更容易成为影响树木生长的关键因子^[4]。但是这种关系对不同地区的不同树种并不一定成立。在祁连山 中部地区,森林下限的青海云杉(*Picea crassifolia Kom.*)呈现干旱响应,与5、6月份降水正相关,但是森林上限 树木与温度和降水关系不显著^[5];青藏高原东北部都兰地区,森林上、下限的祁连圆柏(*sabina przewalskii Kom.*)均与晚春和早夏的降水正相关,呈干旱响应^[6];青藏高原东南部林芝地区气候冷湿,整个山体的冷杉 (*Abies georgei var. smithii*)均受夏季低温的制约^[7];长白山地区高海拔红松(*Pinus koraiensis*)呈现干旱响应,与 夏季降水正相关,中低海拔红松受初春低温的限制^[8];高、低海拔长白落叶松(*Larix olgensis*)均与降水关系不 显著,高海拔与当年3月温度负相关,当年6月温度正相关,低海拔与前一年冬季气温显著负相关^[8]。

土壤温度直接影响着植物根部的发育和植株的生长^[9]。低海拔地区受到干旱的胁迫,较高的土壤温度 是植物生长的限制因子,但是在高海拔地区,较低的土壤温度是限制树木生长的关键因子^[10]。土壤温度过低 导致冻土层深厚,来年融化缓慢,同时土壤的冻融作用对树木的根部有一定的损伤,不仅影响根部分生组织的 生长,还影响根部养分和水分的运输和分配,因此不利于第二年树木的生长^[9-11]。

华北地区乡土树种——华北落叶松(Larix principis-rupprechtii)在不同海拔与气候响应关系的研究较少, 虽然芦芽山地区已有相关研究,但是分析主要侧重高频上的响应关系^[12-14],且没有考虑土壤温度对树木生长 的影响。因此本文在山西省芦芽山地区开展不同海拔的华北落叶松与温度、降水和土壤温度的响应研究,找 寻限制不同海拔树木生长的关键因子,对森林生态系统的分布格局和森林生产力研究有一定的借鉴意义。

3

1 材料和方法

1.1 研究区概况

芦芽山是管涔山的主峰,位于吕梁山脉北端,东经 111°50′—112°5′,北纬 38°35′—38°45′,处于宁武、神池、五寨、岢岚等县的交界地(图1)。芦芽山山体由东北向西南斜向延伸,地势高峻,常常受蒙古高原气候影响,具有明显的大陆性气候特点,夏季凉爽多雨,冬季寒冷干燥。芦芽山植被有明显的垂直地带性,植被垂直带自下而上可划分为:森林草原带(1300—500m),落叶阔叶林带(1350—1700m),针阔叶混交林带(1700—1850m),寒温性针叶林带(1750—2600 m),亚高山灌丛草甸带(2450—2772m)^[15-16]。根据研究区内五寨和宁武气象站的观测资料,研究区 1971—2010时段平均降水为 444mm,年均温为 5.9℃。研究区最低温出现在 1 月-10.7℃,最高温在 7 月 20.2℃,最高降水出现在 7 月(101.5mm)和 8 月(105.5mm)。根据 1960—1966, 1975—2007时段五寨气象站 80cm 深度土壤温度数据(图2),年均土温 7.73℃,最高温出现在 8 月份(18.2℃),比最高气温滞后一个月,1—3 月土温在 0℃以下,其余月份均在 0℃以上(图2)。

1.2 样品采集和年表建立

2011年9月在山西省管涔山脉芦芽山地区三个样点采集树轮样本,树种均为华北落叶松(Larix principisrupprechtii)(图1,表1)。海拔最高采样点位于芦芽山顶峰马仑草原处(又名黄草梁)(标号LYS1),此处为树 线位置,主要景观为草甸草原^[17],树木均为孤立木,由于常年受山顶大风影响,呈典型旗形树冠,地表有明显 的冻胀土丘;中海拔采样点位于芦芽山荷叶坪(标号LYS2),为华北落叶松纯林,树木生境良好,森林郁闭度 达0.8,土壤腐殖质较厚,林下有少量灌木和禾本科草类分布;低海拔点LYS3位于芦芽山顶峰东北部,生境良 好,郁闭度达0.6,为华北落叶松、青杄(Picea wilsonii)和白桦(Betula platyphylla)的混交林,华北落叶松为建群 种,在林中选取树龄较大的华北落叶松进行采样,土壤腐殖质层较厚,林下植被丰富,有大量禾本科草类和少 数灌木分布。

	Table 1 Survey of the sampling sites of tree rings										
样点	纬度(N)	经度(E)	海拔(m)	坡度	坡向	郁闭度					
Site	Latitude	Longitude	Altitude	Gradient	Slop aspect	Canopy Density					
LYS1 (芦芽山 1)	38°45′	111°55′	2621	地势平坦	无明显坡向	0.1					
LYS2 (芦芽山 2)	38°44′	111°54′	2339	40°	西偏北 20°	0.8					
LYS3 (芦芽山 3)	38°55′	112°06′	2162—2270	40—45°	正西	0.6					
五寨	38°55′	111°49′	1401								
宁武	39°00′	112°18′	1437								

表1 采样点和气象站信息

采样时严格按照树轮采样规范,在树木的胸径(1.3m)位置附近取样,每棵树在上坡向和平行于坡向方向 上钻取两颗样芯,在坡向不明显的 LYS1 样点,一般选择树干长势均匀的部位,两个钻孔朝向相对。个别树木 钻取三根样芯,详细记录采样点生境。样本带回实验室后严格按照 Stokes 和 Smiley 阐述的方法进行处理^[18]。 经过晾干、固定、打磨,使得样本在显微镜下年轮轮廓和细胞结构清晰可见。之后进行树木年轮定年和年轮轮



图 1 采样点和气象站分布图 Fig. 1 Distribution of the sample sites and the weather stations 黑色三角是树轮采样点,黑色圆点为气象站,下面两幅图为详细采样点高程图,海拔从高到低依次为:LYS1,LYS2 和 LYS3

宽测量工作:首先在坐标纸上画骨架图,进行初步交叉定年,然后在 Velmex 树木年轮宽度量测仪上逐轮进行 年轮宽度的量测,量测精度为 0.001mm,然后用 COFECHA 程序进行定年的质量控制^[19]。各采样点交叉定年 后树轮宽度统计信息见表 2。LYS1 和 LYS3 样点采用线性和负指数函数进行生长趋势拟合^[20],LYS2 样点为 了减小拟合偏差,采用样芯长度 2/3 步长的样条函数拟合。

Table 2 Statistical characteristics of the tree-ring widths											
样点 Sample site	树\芯数 Tree/core	主序列 Master series	平均序列 Mean length	r	М	S D	Ac1	M.S	缺轮率 % Abscentring		
LYS1	27\64	252	175.1	0.694	0.83	0.498	0.728	0.399	1.387		
LYS2	24\45	114	84	0.657	2.28	1.045	0.742	0.269	0.184		
LYS3	21\45	113	69.7	0.535	2.84	1.291	0.745	0.259	0.096		

表 2 样芯轮宽基本统计特征 2 Statistical characteristics of the tree-ring wid

主序列是指交叉定年后采样点最长样芯的长度;平均序列是指 COFECHA 程序输出结果中所有样芯序列平均长度;r(Series inter correlation) 是 COFECHA 程序输出的所有样芯间的平均相关系数;M(Mean tree-ring width)是多年平均轮宽值;M.S(Mean sensitivity)是指树木对气候因子响 应的敏感性;S D(Standard Deviation)为标准差;a c(First-order auto-correlation)是一阶自相关系数。

为了避免由于测量序列中的中等频率的气候信息引起的去趋势曲线的拟合偏差,本文采用"signal-free" 方法对去趋势曲线进行修正^[21-23]。主要步骤如下:(1)先采用上文提及的传统去趋势拟合曲线建立最初的 STD 年表,该年表代指树轮记录的气候信息;(2)原始测量序列除以最初的 STD 年表,得到零信号序列。该序 列含有树木生长信息和中等频率的气候信息;(3)对零信号序列进行曲线拟合和去趋势,拟合曲线即树木生 长信息,去趋势后建立的年表为携带的气候信息,即零信号年表;(4)采用第三步的拟合曲线对原始测量序列 进行去趋势,得到初步迭代 STD 年表。经过以上 2-4 步多次迭代,直到最后两次迭代的 STD 年表差别不明显 为止。最终的零信号年表指数值也接近于 1,说明几乎不含有气候信息,即把最初传统去趋势曲线携带的气 候信息全部加回到修正后的 STD 年表中^[21-23]。以上去趋势过程在 RCSsigFree 软件上完成。可以看出修正后 年表与最初标准年表有所差别,尤其在年表尾端差别明显(图 3),例如 LYS2 和 LYS3 年表的末端比原始标准 年表有所降低,避免了由于传统去趋势拟合不当造成的末端上升现象。根据子样本信号强度(SSS)值大于 0. 85 的部分为可靠年表^[24](图 3,表 3)。



图 2 研究区多年平均月均温度、降水和 80cm 深土壤温度 Fig. 2 The monthly precipitation, mean temperature and soil temperature of 80cm depth for two meteorological stations 1971—2010年宁武和五寨气象站月均温度、降水平均,五寨 80cm 土壤温度时段 1960—1966,1975—2007



图 3 芦芽山高海拔(LYS1)中海拔(LYS2)低海拔(LYS3)最初 标准年表和修正后标准年表,虚线代表可靠年表起始时间(纵坐 标统一)

Fig. 3 The original and revised STD chronologies of high altitude (LYS1), middle altitude (LYS2) and low altitude (LYS3)

表 3 年表特征值和公共区间特征分析表

Table 3	Statistical	characteristics of	the S	STD	chronologies	and	the	results	of	common	interv	al	analy	ysis
---------	-------------	--------------------	-------	-----	--------------	-----	-----	---------	----	--------	--------	----	-------	------

样点 Sample site	公共区间 Common period	SSS>0.85	R1	R2	R3	SNR	EPS	PC1(%)
LYS1	1848—2010	1787—2010	0.428	0.421	0.643	28.39	0.966	44.9
LYS2	1933—2010	1904—2010	0.499	0.499	0.499	20.9	0.954	53.7
LYS3	1931—2010	1929—2010	0.476	0.454	0.840	8.167	0.891	47.9

R1(All Series Rbar)指所有样本间的平均相关系数;R2(Within-trees Rbar)指不同树木之间的平均相关系数;R3(Between-trees Rbar)指同一 棵树的不同样本之间的平均相关系数;SNR(Signal to Noise Ratio)是信噪比; EPS(Expressed Population Signal)是样本对总体的解释信号;PC1 (The First Principal Component)为年表第一主成分的解释方差。

2 结果与讨论

2.1 年表比较分析

从表2可知,LYS1的主序列最长,为252年,LYS2和LYS3主序列长度相似,分别为114和113年。随着海拔的升高,样芯间相关系数(r)逐渐增大,从0.535到0.694,LYS3的值偏低可能与生境有关,采样点的华北落叶松是与青杆、白桦的混交林,选择树龄较大的华北落叶松进行采样,部分树木相距较远。三个年表的平均轮宽值随着海拔的升高逐渐降低,这很可能与树木生境有关,LYS2和LYS3轮宽值(M)均较高,说明中、低海拔树木生境良好,LYS1平均轮宽最窄,高海拔生境相对较差。轮宽随着海拔升高逐渐减小在该地区已有工作中也同样有所体现,张文涛等对该地区不同海拔高度的40-85年长度的华北落叶松年表进行分析,同样得出轮宽随着海拔升高逐渐减小,也间接说明海拔引起的生境差异是影响轮宽生长的主要因素,排除了高海拔窄轮宽受树龄的影响^[12]。敏感度(M.S)越大说明树木对外界环境因子的变化越敏感,敏感度和缺轮率随着海拔的升高逐渐增大,同样与生境的变化有关,高海拔LYS1,敏感度0.399,缺轮率1.387%均较高,说明LYS1的生境最为恶劣,对气候变化最为敏感。敏感度反映的是树木轮宽年际间变化幅度,即高频变化,而标准差是综合高频和低频变化为一体,反映样本中年轮指数值围绕平均值变化的幅度。本文中年表的标准差随着海拔的升高而降低,与敏感度的变化趋势相反,说明随着海拔升高,低频变化减弱。一阶自相关值(a c1)均较高,且随着海拔升高而降低。一阶自相关表现为前一年树木的生长对当年树木生长有促进作用,生长季刚开始时植物光合作用较弱,生成的营养物质不足以为树木形成层的活动提供能量,而前一年树木积累的非结构性碳水

化合物(NSC)为早期管胞的形成提供营养,管胞为枝叶萌发后树木逐渐增强的蒸腾作用和营养物质的传输提供通道^[25];同时研究区较厚的土壤层能储存前一年的水分和养分供给第二年树木的生长。

表3 所示,三个年表的样芯相关系数(R)值、样本对总体的信号解释量(EPS)和第一主成分(PC1)均较高,说明年表质量较好,含有较多的环境信息。信噪比(SNR)在低海拔LYS3 较低,随着海拔的升高而增大,说明随着海拔的升高,年表的代表性增强。在该地区已有的研究中,华北落叶松差值(RES)年表,同样表现出随着海拔升高,SNR和 EPS 逐渐升高的趋势^[12]。这与在干旱和半干旱地区的研究结果相反^[26],干旱区随着海拔升高水分条件越来越充足,生长季的少降水对树木生长的限制作用减弱,因此 SNR 和 EPS 值逐渐降低;而本研究处于半湿润地区,降水对树木生长的限制作用比干旱区减弱,随着海拔升高,低温对树木生长的限制更加凸显^[12],所以 SNR 和 EPS 值逐渐升高。

一般认为十年以上为年代际变化,十年以下为年际变化,因此我们以十年为界(0.1037HZ)分别对三个标准年表进行低通和高通滤波处理,以上过程在 OriginPro8 软件上进行。在公共时段 1929—2010 内分别对标准年表之间、低频年表之间和高频年表之间进行相关分析(表 4)。结果显示海拔差距最大的低海拔 LYS3 和高海拔 LYS1 的标准年表相关以及高频相关和低频相关均不显著,说明海拔引起的生境差异明显,树木生长记录不同的气候信息。高、中海拔年表的高频变化相似性更强;而中、低海拔的低频变化一致性更强,1960s以来出现明显的下降趋势(表 4,图 4)。高频变化上,高海拔波动最为显著,中海拔其次,低海拔最为平缓(图 5),且高、中海拔相似性更强。这在敏感度随着海拔升高依次增大上同样表现出来。

表 4 LYS1、LYS2、LYS3 标准、及低频和高频年表在共同时段 1929—2010 的相关系数

Table 4The correlation coefficients between STD, low frequency and high frequency chronologies of LYS1, LYS2 and LYS3 during1929—2010

年表 Chronology -	标准 STD				低频 Low frquency		高频 High frquency			
	LYS1	LYS2	LYS3	LYS1	LYS2	LYS3	LYS1	LYS2	LYS3	
LYS1	1	0.439 **	0.102	1	0.364 **	0.148	1	0.545 **	0.117	
LYS2		1	0.402 **		1	0.434 **		1	0.372 **	
LYS3			1			1			1	

n=82, **达到 99%置信水平



图 4 芦芽山高海拔(LYS1)中海拔(LYS2)低海拔(LYS3)低频 年表变化比较

Fig. 4 The compare of low frequency chronologies between LYS1, LYS2 and LYS3



图 5 芦芽山高海拔(LYS1)中海拔(LYS2)低海拔(LYS3)标准 年表高频变化比较(纵坐标统一)

Fig. 5 The compare of high frequency chronologies between LYS1, LYS2 and LYS3

2.2 树轮气候响应分析

2.2.1 树轮与温度、降水响应关系

采用距离采样点最近的宁武和五寨气象站观测资料的公共时段(1971—2010)的平均值进行树轮气候响 应分析,所用气象要素包括月平均温度、月平均降水量、月平均最高温、月平均最低温。分析时段为前一年 6 月到当年 10 月,包含前一年和当年两个生长季。分析方法 person 相关函数分析和响应函数分析,分别在 SPSS 软件和 Dendro2002 软件上进行。



图 6 LYS1(1)、LYS2(2)、LYS3(3)分别与五寨和宁武气象站平均(1971—2010)月均温度、降水、最高温、最低温的相关分析,点线为达到 95%置信水平,短线为达到 99%置信水平

Fig. 6 The correlation coefficients of LYS1 (1), LYS2 (2) and LYS3 (3) with monthly temperature, precipitation, maximum temperature and minimum temperature of the average of Ningwu and Wuzhai weather stations (1971–2010). The dot line indicates P=0. 5, the short line indicates P=0.01

相关函数分析和响应函数分析均表明高海拔 LYS1 与月均温度、降水、最高温、最低温相关均不显著(图 6 a b)。根据董满宇等在该地区林线处华北落叶松的径向生长监测结果,发现在一年内不同季节树木径向净变 化的主要限制因子不同^[27]。水分恢复期(4 月末—6 月初),树木主要表现为茎干膨胀,并未进行细胞分裂生 长,土壤含水量是树木径向变化的主要限制因子;茎干快速增长期(6 月初—8 月中旬),即生长季,树木径向 变化与土壤温度显著正相关;茎干脱水收缩期(8 月中旬—12 月末),树木径向变化与空气、土壤温度和土壤 水势负相关;冬季茎干相对稳定期(12 月末—4 月末),树木停止生长,径向变化微弱,主要是空气温度变化引

6期

起的"茎干冻融作用"影响。由于树木生长各个时期的主要限制因子不同,树木年径向生长是多种因素综合作用的结果,因此本文分析的逐年平均径向变化与逐年单月气候因子的相关均没有显著关系。此外,本文分析所用气象资料站点海拔与林线位置差异较大,气象资料可能没有很好的代表该地区的气候也可能是另外一个原因。Cai et al.在周边地区林线位置的华北落叶松年表同样与月均气候要素没有显著关系^[28],同时 Cai et al.所用年表 151 年,而本年表 252 年,说明树龄可能不是影响树轮气候响应关系的主要因素^[28]。但是 Jiang et al.在该地区的工作显示高海拔(2650m)华北落叶松与当年 5 月温度显著正相关,6 月降水显著负相关^[13],这可能与采样点的坡向、海拔高度和所用气象资料的不同有关。本采样点位于平坦的草原上,Jiang et al.采样点位于山体的北坡,并且海拔高出本采样点大约 30m,热量条件相对较差,水分条件充足,因此生长季的高温和少雨更有利于树木生长。此外,Jiang et al.文章所用气象资料为研究区及周边地区多气象站点资料平均,本文为距离采样点最近的气象资料,也可能是造成分析结果不同的另一个原因^[13]。

相关函数和响应函数分析均表明中海拔 LYS2 年表与 4 月最高温负相关, 与 5 月最高温正相关达到显著 水平, 与月均降水、温度和最低温相关均不显著(图 6 c d)。4 月树木进入茎干水分恢复时期^[27],该时期较高 的温度会加剧土壤水分的蒸发,从而限制树木的生长。5 月最高温对树木生长限制最为显著,在 1971—2010 时段, 两气象站 5 月平均温度 14.5℃, 平均最低温 3.2℃, 降水 33.8mm, 水热条件良好, 树木进入快速生长时 期^[27], 早材细胞开始形成, 在水分相对满足的条件下, 温度越高越有利于树木的生长。张文涛等在该地区中 海拔高度的阴坡^[12]和阳坡^[14]采集的华北落叶松 RES 年表同样表现为与当年 4 月温度的负相关, 5 月温度的 正相关。并且张文涛等阳坡所用年表可靠时段为 134 年^[14], 阴坡年表 85 年^[12], 本文半阳坡(西)年表 106 年, 也间接说明了坡向和树龄不是影响该地区树轮气候响应的主要因素。在相距不远五台山地区的相似海拔 高度(2450m)的华北落叶松同样与 5 月温度显著正相关^[29], 进一步证明了我们的结论。

相关函数分析表明低海拔 LYS3 普遍与温度负相关较显著。其中与前一年6、7月和当年5、6、7月平均温 度显著负相关。与前一年和当年7、9月最高温显著负相关;与当年5、6月最低温显著负相关(图6e)。其中 与当年5月最低温负相关最为显著(r=-0.539,P<0.01)。响应分析结果只与当年5月最低温负相关显著(图 6f)。因此,树木生长与前一年生长季温度的负相关,很可能是由于年表本身较高的一阶自相关(0.745)引起 的,只是统计上的相关。即树木生长受到当年生长季高温的负影响,而该年树木生长又影响第二年树木生长 的影响,那么相关上就表现为前一年生长季的高温对第二年树木的生长有一定的负影响。响应函数分析与前 一年气象因子没有显著关系也进一步验证了该地区年表较高一阶自相关值很可能是受前一年树木生长储存 的 NSC 影响。而土壤中保存的前一年的水分和养分对第二年树木生长的影响还有待商榷,因为在相关函数 和响应函数分析中并没有表现出与前一年降水的显著关系,并且该采样点海拔最低,降水比高海拔地区相对 减少,表现为干旱响应,前一年的降水是否能延续到下一年被植物利用,还有待进一步研究。5-9月为树木的 生长季,此时过高的温度引起的蒸腾作用会加重树木的干旱,从而影响树木的生长。此外,5月份树木刚进入 生长季,枝叶比较幼嫩,光合作用较弱,而最低温往往出现在夜间凌晨时刻,此时较高的夜间最低温度,增强了 树木的呼吸,增加了有机物质的消耗,限制了树木的生长。研究区已有工作也表明生长季的高温^[28]和少降 水^[13-14]是限制低海拔华北落叶松生长的关键因素。

2.2.2 树轮与土壤温度响应关系

有研究表明,在土壤性质和结构许可的情况下,多数树木的根系在土壤中的扩展程度远高于树冠的扩展 程度^[30]。据统计,落叶松树根的深度在 1.2—4.5m 范围内^[30]。80cm 深正是树木根部分布的区域,该深度的 土壤温度是影响根部细胞的生长和活动,以及营养物质和水分的吸收和运输的重要因素。同时由于土壤的储 热性和滤波性,使得土壤很好的记录了大气变化的低频信息^[31-32]。80cm 层土壤温度受表层天气过程的影响 较小,又没有来自地下热源的干扰,能很好的捕捉大气强迫和反馈的信号^[32]。进一步分析 80cm 土壤温度对 不同海拔树木径向生长的影响。由于土壤温度对气温存在明显的滞后现象,含有气候变化的低频信息^[31]。 因此我们把土壤温度与不同海拔的标准年表和滤波后的低频年表进行相关分析。分别截取标准年表和低频 年表 1960—1966,1975—2007 时段共 40 年的数据与 80cm 土壤温度同时段数据进行相关分析。分析月份同 样为前一年 6 月到当年 10 月,在 SPSS 软件上进行。

由图 7 可见,LYS1 标准年表与土壤温度相关不显 著,低频年表与当年 4 月的正相关达到显著水平(r= 0.315,P=0.05)。高海拔采样点位于树线位置,该地区 冬季冻土层深厚,林线处树木生长季的起始时间很大程 度由土壤温度决定,一般认为 20cm 深度土壤温度达到 6—7℃,树木根部分生组织才开始生长^[11,33],该地区已 有研究表明,林线处 4 月末为树木茎干恢复期,主要是 细胞吸水,径向膨胀增粗,土壤含水量成为该时期树木 径向变化的主要限制因子^[27]。该时期季节冻土开始融 化,土温越高,冻土融化越迅速,土壤水分含量越充足, 越有利于树木茎干的增粗。

中海拔和低海拔年表与土温的关系相似,无论是标准年表还是低频年表,都是与前一年生长季土温负相关,与生长季前冬土温正相关,与当年生长季土温负相关。其中,中海拔LYS2标准年表和低频年表与土温的相关性均不显著,低海拔LYS3标准年表与当年5、6月的土温显著负相关,低频年表与当年5、6月和前一年6、7月的土温显著负相关(图7)。其中与前一年土温



图 7 LYS1, LYS2 和 LYS3 STD 标准(柱状图)和低频(点线图) 年表分别与五寨 80cm 土壤温度(1960—1966,1975—2007)的相 关分析

Fig. 7 The correlation coefficients between STD and low frequency chronologies of LYS1, LYS2 and LYS3 with soil temperature of 80cm depth from Wuzhai weather station (1960—1966,1975—2007). The bar indicates the STD chronologies and the line with symbol indicates low frequency chronologies.

的负相关可能与年表较高的一阶自相关有关。低海拔处土壤水分相对不足,5、6月较高的土壤温度使土壤水 分蒸发植物蒸腾作用增强,树木受到干旱胁迫,不利于树木的生长。同时土壤升温,地下生物量与地上生物量 比值增大,这是因为植物根部向地下延伸受主要受低温的限制,随着土壤温度的升高,植物根部向地下和四周 扩散,以便从更大范围内吸收水分供给植物生命活动。生物量分配不均进一步限制了植物地上部分的生长, 有利于减弱蒸腾作用,减少水分消耗^[9,34]。因此过高的土壤温度对干旱地区的树木径向生长有一定的限制作 用。而中海拔处土壤水分介于高海拔和低海拔之间,表现出与生长季土壤温度的负相关,树木生长受到生长 季土壤高温的影响,表现出轻微的干旱胁迫特征,但是不显著。

以上分析表明随着海拔的升高,温度降低,降水增加,树轮气候响应关系也逐渐改变,低海拔生境较暖干, 土壤水分不足,生长季较高的气温和土壤温度成为树木生长的主要限制因子;中海拔生境逐渐变得冷湿,树木 主要受5月低温限制;而高海拔有季节性冻土分布,树木主要受4月土壤低温限制。张文涛等发现该地区近 1996年以来温度上升趋势明显,降水呈减少趋势,中高海拔间年表趋同现象明显,而低海拔年表由于干旱加 剧发生分异;中、高海拔年表受生长季的低温和降水影响减弱,而低海拔受生长季高温限制增强^[14]。根据以 上,我们进一步推测全球变暖的趋势将更有利于该地区高海拔树木的生长,对中海拔树木的生长也会有促进 作用,而低海拔的华北落叶松、青杆和白桦的混交林可能会由于干旱程度的增强,华北落叶松的生长受到抑 制,建群种以及群落结构发生改变,导致森林生产力布局发生变化。对五台山地区已有研究表明,近年来高山 带的植物群落和树木均有向高海拔爬升趋势,尤其是木本植物和高山草甸植物群落特征种分布的上移趋势明 显^[35],证实了我们的推测。

3 结论

本文在芦芽山地区采集三个海拔梯度的华北落叶松,在原始去趋势的基础上,采用"signal-free"方法进行 拟合曲线修正,建立的三个标准树轮宽度年表。 (1)随着海拔升高,年表的平均轮宽值、标准差、一阶自相关减小,敏感度、缺轮率增大,值随着海拔升高 而降低,说明随着海拔升高生境越差,树木对气候变化更加敏感,年表的高频变化增强,低频变化减弱。

(2)以10年为界对标准年表进行低通和高通滤波,高、低海拔年表滤波前后相关均不显著。高、中海拔 在高频变化上更相似,中、低海拔在低频上更一致。

(3)树轮气候响应分析表明,高海拔标准年表与月均气象要素相关均不显著,低频年表与当年4月土壤 温度显著正相关;中海拔树木与5月最高温正相关最为显著,与土壤温度相关不显著;低海拔树木与5月最低 温度负相关最为显著,标准和低频年表均与5、6月份土壤温度显著负相关。

(4)全球变暖的背景可能更有利于高海拔树木的生长,而低海拔的针阔混交林的干旱胁迫可能会进一步 加剧。

参考文献(References):

- [1] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht, The Nether lands: Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [2] Schweingruber F H. Tree Rings and Environment Dendroecology. Berne: Paul Haupt Publisher, 1996.
- [3] 彭剑锋,勾晓华,陈发虎,刘普幸,张永,方克艳. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮生长特性及其对气候的响应. 生态学报, 2007, 27(8): 3268-3276.
- [4] Zhang W T, Jiang Y, Dong M Y, Kang M Y, Yang H C. Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. Forest Ecology and Management, 2012, 265: 142-149.
- [5] 曹宗英,勾晓华,刘文火,高琳琳,张芬.祁连山中部青海云杉上下限树轮宽度年表对气候的响应差异.干旱区资源与环境,2014,28 (7):29-34.
- [6] Liu L S, Shao X M, Liang E Y. Climate signals from tree ring chronologies of the upper and lower treelines in the Dulan region of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of integrative Plant Biology, 2006, 48(3): 278-285.
- [7] Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, Liu B, Shao X M. Growth variation in Abies georgei var. smithii along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau. Trees, 2010, 24(2): 363-373.
- [8] 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 苑全治, 吴绍洪. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2014, 34(6): 1568-1574.
- [9] Kaspar T C, Bland W L.Soil temperature and root growth. Soil Science, 1992, 154(4): 290-299.
- [10] Weih M, Karlsson P S. Low winter soil temperature affects summertime nutrient uptake capacity and growth rate of Mountain Birch Seedlings in the Subarctic, Swedish Lapland. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2002, 34(4): 434-439.
- [11] Körner C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography, 2004, 31(5): 713-732.
- [12] 张文涛, 江源, 董满宇, 杨艳刚, 杨浩春. 芦芽山不同海拔华北落叶松径向生长与气候因子关系的研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 304-309.
- [13] Jiang Y, Zhang W T, Wang M C, Kang M Y, Dong M Y. Radial growth of two dominant montane conifer tree species in response to climate change in North-Central China. PLoS ONE, 2014, 9(11): e112537.
- [14] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2015, 35(19): 1-10.
- [15] 马子清. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 45-74.
- [16] 张金屯. 山西芦芽山植被垂直带的划分. 地理科学, 1989, 9(4): 346-388.
- [17] 任健美. 自然地理实验与实习教程. 北京: 气象出版社, 2011: 238-239.
- [18] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.
- [19] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 44: 69-75.
- [20] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization[D]. Tucson: University of Arizona, 1985.
- [21] Melvin T M, Briffa K R. A "signal-free" approach to dendroclimatic standardisation. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 71-86.
- [22] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Frank D, Liu C Z, Li J B, Kazmer M. Precipitation variability during the past 400 years in the Xiaolong Mountain (central China) inferred from tree rings. Climate Dynamics, 2012, 39(7/8): 1697-1707.
- [23] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Liu C Z, Davi N, Li J B, Zhao Z Q, Li Y J. Tree-ring based reconstruction of drought variability (1615-2009) in the Kongtong Mountain area, northern China. Global and Planetary Change, 2012, 80-81: 190-197.
- [24] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.

- 11
- [25] Babst F, Alexander M R, Szejner P, Bouriaud O, Klesse S, Roden J, Ciais P, Poulter B, Frank D, Moore D J P, Trouet V. A treering perspective on the terrestrial carbon cycle. Oecologia, 2014, 176(2): 307-322.
- [26] Gou X H, Chen F H, Yang M X, Li J B, Peng J F, Jin L Y. Climatic response of thick leaf spruce (*Picea crassifolia*) tree-ring width at different elevations over Qilian Mountains, northwestern China. Journal of Arid Environments, 2005, 61(4): 513-524.
- [27] 董满宇, 江源, 王明昌, 张文涛, 杨浩春. 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征. 生态学报, 2012, 32(23): 7430-7439.
- [28] Cai Q F, Liu Y. Climatic response of three tree species growing at different elevations in the Lüliang Mountains of Northern China. Dendrochronologia, 2013, 31(4): 311-317.
- [29] 孙毓,王丽丽,陈津,段建平,邵雪梅,陈克龙.中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应.中国科学:地球科学,2010, 40(5):645-653.
- [30] 斯蒂芬·帕拉帝.木本植物生理学.北京:科学出版社, 2011: 390-392.
- [31] 汤懋苍. 理论气候学概论. 北京: 气象出版社, 1989.
- [32] 王晓婷,郭维栋,钟中,崔晓燕.中国东部土壤温度、湿度变化的长期趋势及其与气候背景的联系.地球科学进展,2009,24(2): 181-191.
- [33] Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermanna N E. Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model. Ecological Modeling, 2008, 213(3/4): 345-355.
- [34] Landhäusser S M, Wein R W, Lange P. Gas exchange and growth of three arctic tree-line tree species under different soil temperature and drought preconditioning regimes. Canadian Journal of Botany, 1996, 74(5): 686-693.
- [35] 戴君虎,潘嫄,崔海亭,唐志尧,刘鸿雁,曹燕丽.五台山高山带植被对气候变化的响应. 第四纪研究, 2005, 25(2): 216-223.