

DOI: 10.5846/stxb201502060304

秦进, 白红英, 李书恒, 王俊, 甘卓亭, 黄安. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异. 生态学报, 2016, 36(17): - .

Qin J, Bai H Y, Li S H, Wang J, Gan Z T, Huang A. Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异

秦 进¹, 白红英^{1,*}, 李书恒¹, 王 俊¹, 甘卓亭², 黄 安¹

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721000

摘要:气候变化对秦岭植被生长的影响已经引起了人们的广泛关注,在相同的立地条件下,植被对气候变化的响应会因坡向不同而产生差异,秦岭的分水岭太白山尤为典型,为进一步揭示不同坡向太白红杉(*Larix chinensis*)对气候变化响应的差异,本文以树木年代学为依据,利用采自太白山南、北坡相同海拔的太白红杉树芯样本分别建立了树轮年表,并分析了两者的年表特征,探讨了树轮宽度指数与气候因子之间的相关性以及逐步线性回归方程。结果表明:太白山南、北坡太白红杉年表的平均敏感度、样本间平均相关系数、样本总体代表性等特征值较高,表明两个不同坡向年表中皆含有丰富的环境信息,相对而言,北坡样地植被对气候的响应较南坡样地敏感;由相关性分析可知,南北坡太白红杉差值年表对气温和降水响应显著的月份有所差异,北坡样地轮宽指数与当年和前一年 1—6 月平均气温皆为显著正相关关系,而南坡样地轮宽指数仅与当年 5—6 月平均气温通过显著性检验。南、北坡太白红杉径向生长都明显受到前一年 6 月降水“滞后效应”的一致影响,但北坡仅与当年 8 月的降水呈显著正相关,南坡与当年 1—4 月的平均降水量存在十分显著的负相关;多元线性逐步回归模型显示,气温因子对回归方程的贡献最大值均大于降水因子的贡献最大值,表明气温因子的变化更易引起太白红杉树轮宽度的变化,另外,气温因子对北坡样地回归模型的贡献值比气温因子对南坡样地回归模型的贡献值大,表明北坡样地处树轮宽度指数对气温因子更敏感,并且与相关分析结果一致。

关键词:气候变化;不同坡向;树轮宽度;太白红杉;气候响应

Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China

QIN Jin¹, BAI Hongying^{1,*}, LI Shuheng¹, WANG Jun¹, GAN Zhuoting², HUANG An¹

1 College of urban and environment science, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 College of geography and environment science, Baoji University of arts and sciences, Baoji 721000, China

Abstract: The impact of climate change on the plant growth has gained attentions, especially for those boreal trees growing at the timberline area. Topographical character such as slope aspect may affect the response of plants growth to climate even if with the same stand condition. This is especially significant between southern and northern slopes of Mt. Taibai, the main geographical watershed of Qinling Mountains. In this study, the chronologies were established by exploiting *Larix chinensis* tree-ring samples that collected from both northern and southern slopes of Mt. Taibai with a similar elevation of 3100-3200 meters. The characteristics of the chronologies were compared and the correlations between tree ring width indices and

基金项目:林业公益性行业科研专项(201304309);太白山林线树种年轮指数与气候变化响应的时空差异性研究(2014JQ5172)

收稿日期:2015-02-06; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongyingbai@163.com

climatic factors were analyzed for both slopes of Mt. Taibai, respectively. The mean sensitivity, sample inter-correlation coefficients, overall sample representative and other values of the chronology characteristics are all very high, indicating that the tree-ring samples collected from both slopes of Mt. Taibai contained enough environmental information, and the plants at the timberlines were more sensitive to climate change on the northern than on the southern slope. According to the correlation analysis, radial growth of the *Larix chinensis* in different slopes were mainly affected by different aspects of the climatic factors from different months. Residual chronology was correlated positively with mean air temperature during January to June on the northern slope, while only with that during May to June on the southern slope. The *Larix chinensis*' growth on both northern and southern slopes were correlated positively with the precipitation occurred in June of the previous year. However, the tree-ring width indices had a significant positive correlation with precipitation occurred in August of current year on the northern slope, while had a significant negative correlation with the mean precipitation from January to April of current year on the southern slope. The multi-variant liner step-wise regression modeling showed that the maximum contribution values of the air temperature factor in both regression functions are greater than that of the maximum value of attribution from precipitation, indicating that the change in tree-ring width of *Larix chinensis* was due to the variations in temperature than in precipitation in Mt. Taibai. Moreover, the tree-ring width residual chronology was more sensitive to temperature on the northern slope than on the southern slope since the temperature contribution to the function on the northern slope was higher than that on the southern slope which is also confirmed by the correlation analysis between the residual chronologies and the climate factors.

Key Words: climate change; slope aspect; tree-ring width; *Larix chinensis*; response to climate change

随着近年来气候极端事件的频繁发生,全球气候变化对生态环境的影响越来越深,已经被世界各国广泛关注。作为研究过去气候变化的主要代用资料之一,树木年代学具有定年精确,连续性强和分辨率高等特点,是揭示气候和环境变化的重要技术途径之一^[1-4]。树木径向生长的主要特征是树木年轮的形成和变异,它除了受树木本身遗传因素影响外,还受到外界生态环境的制约,并且树木年轮宽窄能够真实地记录下一定区域内每年有利或不利的气候因素^[5-7]。

太白山位于秦岭中部,是秦岭乃至我国东部地区的最高峰,该地区高山林线作为高山带一条重要的生态界限,相对其他区域更容易捕捉到气候变化的信号,更具有典型性,对全球和区域气候变化的反应十分敏感^[8-10]。太白红杉属红杉组分布的最东界种,属国家二级保护植物^[11],垂直分布于海拔 2850—3500m 的秦岭高山、亚高山地带,是该地区森林线地区唯一可成纯林的树种^[12],很少受到人为影响,是研究气候变化的理想树种之一,能够较好的反映气候变化^[13]。

很多学者利用树木年代学原理对秦岭地区不同区域高山地区开展了研究工作,比如邵雪梅^[14]等,根据秦岭东部华山地区采集的华山松建立了 3 种树木年轮年表并分析了树木生长对气候变化的响应关系,认为华山松的生长主要受当年 4 月气温和 4—7 月降水的影响,并与 6 月气温具有密切的关系;康永祥等^[15-16],研究了高山林线区与不同海拔太白红杉年轮宽度序列对气候变化的响应,发现太白红杉生长对气温具有较强的敏感性,降水的滞后现象较温度明显;王婷等^[17],利用位于秦岭余脉伏牛山的华山松树芯样本,研究了华山松径向生长与气候变化的关系,认为树轮年表对区域温度变化响应敏感,与研究区生长季前期的温度及生长季降水呈显著正相关,这些工作侧重于研究一定区域范围内植被对气候的响应或不同海拔植被对气候变化的响应;Dang 等^[18],以佛坪和周至自然保护区为南北对照,对秦岭南北坡油松生长对气候的响应的差异性进行了研究,发现在低中海拔,初春和夏季的温度是植物径向生长的主要限制因子对气候的响应,在高海拔,主要的限制因子为当年夏季降水,前一年生长季气候对南坡树轮宽度的影响大于北坡;刘禹等^[19],以南五台和木王两地为南北对照,对秦岭南北坡巴山冷杉生长对气候响应的差异性进行了研究,认为南坡树轮宽度对于上一年 9 月到当年 4 月气温有较强响应,而北坡树木对于当年初夏气温响应敏感。

以上所开展的工作对秦岭地区南、北坡植被对气候变化响应的差异研究提供了大量的经验和依据,然而,秦岭山脉东西跨度较大,南北地形复杂多变,局地气候差异明显,位于秦岭主脊和最高点的太白山是我国重要的分水岭,太白红杉作为该地区的林线树种极少受到人为影响,因此,开展太白山森林上线相同海拔不同坡向太白红杉对气候响应的差异研究对于认识太白山乃至秦岭山脉南北坡高山林线植被对气候响应的差异性具有重要补充作用。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

秦岭是我国地理最重要的南北分界线,它的隆起阻挡了夏季来自南方的东亚季风及冬季来自偏北方向的干冷气流,使得秦岭地区南、北坡向的景观和气候条件产生了比较显著的差异,山脉以北气候相对干燥,而山脉以南的地区气候较为温暖湿润^[20]。太白山位于秦岭山脉之中部地区(图1),地处周至、眉县和太白县行政边界的交界处,海拔3767米,地理坐标为(N 33°49'—34°10', E 107°19'—107°58'),该地区年平均气温1.8—2.1℃,降雨量800—900mm,属大陆性季风气候区。太白山植被带垂直分布特点明显,林线以上为第四季冰期形成的冰川遗迹和高山草甸,以下接巴山冷杉群系,土壤类型以森林草甸土为主^[21]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与年表建立

本项目组于2013年秋季在太白山拔仙台附近海拔

3100m—3200m之间生长茂盛的太白红杉林上线开展了采样工作,2个采样点分别设立于太白山主脊线以南和以北的冰川遗迹与太白红杉林交界处,土层厚度均在(20±10)cm范围内,立地坡度均在(30±15)°范围内,皆在同一气候区且受人为影响较小。采样的方法依据国际树轮数据库的标准(ITRDB),综合了敏感性原则、生态环境原则和复本原则等,在每个采样点30棵健康树上取样,使用生长锥在胸高位置从垂直方向上取2个树芯作为样本,每个方向取到树心处附近,将取得的树芯装入提前卷好的样本筒中,并做好编号。在北坡进行的采样点被命名为SBS(上板寺),在南坡进行的采样点被命名为YWD(药王殿)(图1)。

样本的基本处理过程是按照stokes和smiley的方法^[22],对树心进行晾干,固定,磨平,直到树芯表面光滑清晰达到树木年轮学分析要求,然后采用德国Frank Rinn公司生产的LINTAB轮宽分析仪测量树轮宽度,其精度为0.01mm。为确保测量的准确性,最后利用COFECHA^[23]程序对交叉定年和测量结果进行检验,剔除不能正常交叉定年的序列。通过Arstan^[24]程序采用负指数函数或者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,达到去趋势化和标准化的目的^[25],并得到三种年表:STD、RES和ARS年表。本文采用插值年表(RES)进行研究。

1.2.2 气象资料与数据分析

本研究的采样点由于分布于太白山的南、北两坡,缺乏长期的器测数据,为了更能体现该区域代表性,选取了太白山北坡太白县与南坡佛坪县气象站1960年—2009年以来逐月平均气温和总降水的平均值进行分析(图2),分析之前,使用Mann-Kendall法对气象数据进行均一性检验^[26]。考虑到气候对植物径向生长的“滞后效应”即树木生长不仅与当年的气候条件有关,也受上年气候因子的影响^[5],因此选取了上年1月至当年12月的月均温和月总降水量以及不同的月份组合与两个样地的RES年表进行分析。

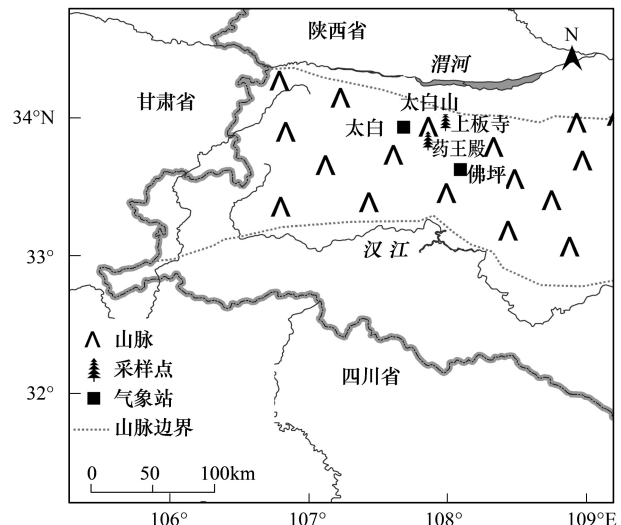


图1 采样点与气象站分布图

Fig.1 Location of tree-ring sampling sites and meteorological stations

相关性分析和多元回归模型分析^[27-28]是研究树木生长与气候因子之间相互关系的常用方法,但是相关分析只考虑单个气候要素与树木生长的关系,树木年轮宽度与气候因子的复杂关系很难得到表达,因此选择进一步结合多元线性回归分析,以描述太白山南、北坡太白红杉上线树轮宽度指数与气候因子之间的关系。

本文利用 Dendroclim2002^[29] 和 SPSS 软件对年表以及气候因子作相关分析和多元线性回归分析。

2 结果与讨论

2.1 年表与序列的基本统计特征

由表 1 可知,太白山南、北坡太白红杉差值年表统计特征值差异明显,平均敏感度代表年轮宽度逐年变化的状况,树木的年轮宽窄变化越大,则树木对环境变化的越敏感度越高^[25],北坡 SBS 差值年表的平均敏感度和标准偏差均高于南坡 YWD,表明北坡太白红杉树木年轮宽度生长对环境更加敏感,受气候因子的限制作用强于南坡。另外,两个采样点树与树间相关系数以及第一向量百分比都较高,表明太白红杉径向生长能够很好地反应气候变化的一致性^[5],北坡 SBS 一阶自相关系数高于南坡 YWD,反映了北坡 SBS 受到上一年气候影响强于南坡 YWD,南坡 YWD 的信噪比大于北坡 SBS,说明南坡 YWD 的太白红杉生长环境所受的干扰相对较少^[30]。

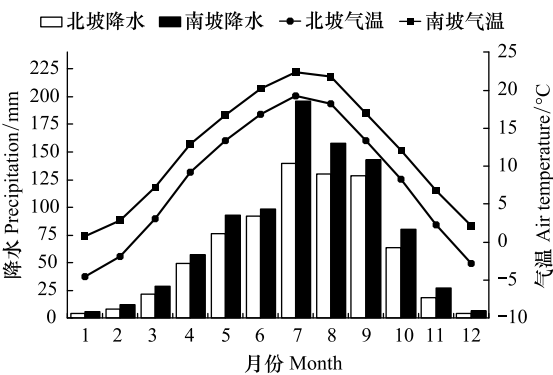


图 2 太白山南、北坡气象站 50 年逐月平均气温和总降水量
Fig. 2 Monthly mean temperature and total precipitation of northern and southern slopes of Mount Taibai in the past 50 years

表 1 SBS(北坡)与 YWD(南坡)树轮宽度序列 RES 年表统计特征

Table 1 Statistical features of tree-ring width residual chronologies for SBS(North aspect) and YWD(South aspect)

特征参数 Statistic characteristics	北坡年表 SBS	南坡年表 YWD
平均敏感度 Mean sensitivity	0.2164	0.1933
标准差 Standard deviation	0.189	0.1791
一阶自相关系数 Auto-correlation order 1	0.0468	0.0029
第一主成分所占方差量 Variance in first Eigen-vector	48.67%	38.80%
信噪比 Signal to noise ratio	1.194	4.731
树间相关系数 Correlation between trees	0.454	0.345
样本总体代表性 Expressed population signal	0.947	0.934

通过分析图 3 和图 4,发现北坡 SBS 样地的太白红杉年龄比南坡 YWD 样地相对要大,但是两者的大多数样本都超过了 50 年,SBS 和 YWD 宽度指数序列具有相似的波动状况,峰值和谷值的时间基本重合,反映太白山南北坡具有相似的气候变化过程,SBS 宽度指数序列的波动幅度明显比 YWD 大,表明年轮在 SBS 处对外界环境变暖的反应比 YWD 更为敏感,这一点与年表统计值的对比结果一致。

根据上述分析可知北坡 SBS 和南坡 YWD 年表都含有较多的气候信息,适合做树木气候学分析,但在空间尺度上,两个坡向的年表特征有所差异,北坡 SBS 采样点的太白红杉径向生长对气候变化的响应更为敏感。

2.2 年轮年表与单月气候因子相关分析

如图 5 所示,太白山南坡和北坡两个采样点的树轮宽度指数与气候要素的相关性表现出相对一致的特点:南、北坡两个采样点太白红杉的树轮宽度指数均与当年 2、3、5、6 月的气温呈正相关,与 7 月和 8 月的气温均呈负相关,其中,北坡 SBS 与 2 月和 6 月气温的相关性显著,南坡 YWD 与 5、6 月气温的相关系数较高,但均未达到显著性水平,表明南、北坡太白红杉径向生长皆对初春的气温比较敏感,这与以往研究认为初春温度是

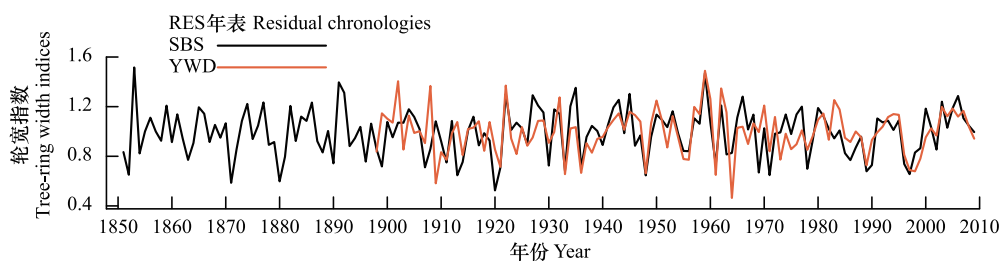


图3 SBS与YWD树轮宽度RES年表比较

Fig.3 Comparison of the residual chronology between SBS and YWD

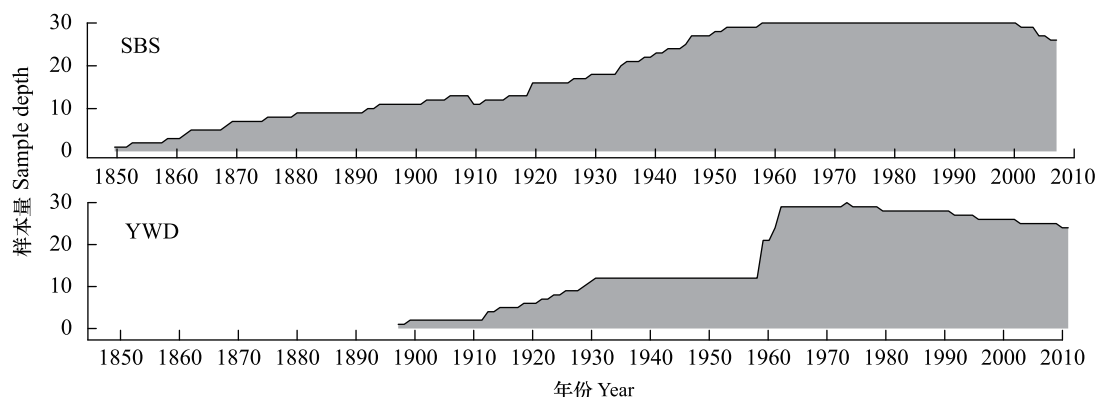


图4 SBS与YWD样本量示意图

Fig.4 Sample depth of SBS and YWD

亚高山地区树木径向生长的主要气候因子的观点一致,因为生长季前期的高温有助于减少冬季植物的睡眠水平,提升土壤和树叶的温度,并能加快根系和发芽速率,提早树木形成层细胞的分裂,从而产生较宽年轮,而随着气温升高,温度不再是限制树木生长的主要因子,所以相关性下降或者表现为不显著^[31-32];两个采样点的树轮宽度指数均与上年6月份和当年7、8、9月的降水呈正相关,与当年3、4、5、6月的降水量呈负相关,原因可能是相对于温度而言,降水对树木年轮的滞后影响要大一些^[33-34],上年6月降水丰富,土壤水分状况良好,使树木落叶减少且有利于树木进行光合作用并积累养分,有助在当年形成较宽轮^[35]。同时,气候变化对亚高山森林的影响主要依赖于冬季积雪的积累厚度和春季雪融化的速度^[36],3月—6月降水过多会造成温度下降,光合作用速率降低,不易于积雪融化,因此限制了植物的径向生长,与树轮宽度指数的相关关系呈负相关。

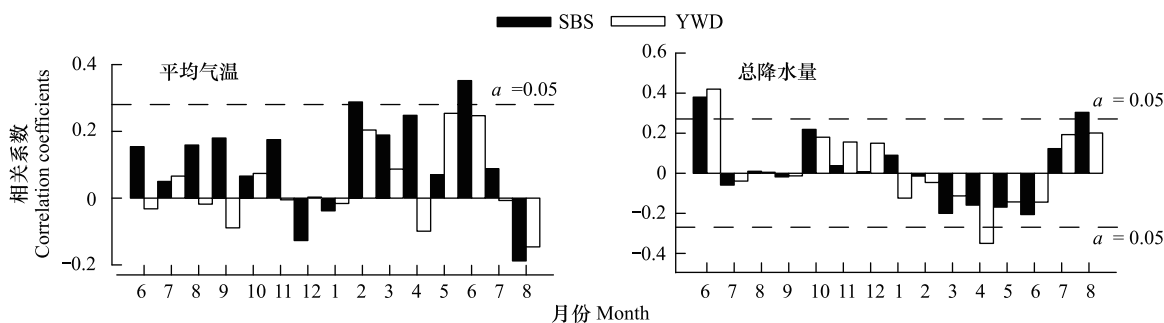


图5 太白山林线南、北坡太白红杉与逐月平均气温(上图)和总降水量(下图)相关分析结果

Fig.5 Correlations of tree-ring width and residual chronologies with variables in *Larix chinensis* of forest margin in southern and northern slopes from Mt.Taibai

分别位于太白山的北坡(阴坡)和南坡(阳坡)的两个采样点由于地理位置和环境状况的差异使得两个采样点太白红杉树轮宽度指数与气候要素的相关性也表现出了一定的差异性:北坡树轮宽度指数与温度的相关性更强,与当年2月和7月的气温有显著相关性,虽然南坡太白红杉树轮宽度与当年逐月气温的相关性与北坡有相似的规律,但是相关系数相对比较小,没有通过显著性检验的月份,从区域气候角度来看,太白山地区属于我国典型的季风气候区,但是海拔高,温度低,年均温7℃左右,而降水比较丰富,达到700mm^[13],温度成为该地区太白红杉生长的主要限制因子,温度较高有助于山顶冰雪的融化和光合作用对有机质的积累,从而促进树轮宽度增长^[37],YWD、SBS采样点分别位于太白山南、北两侧,南坡温度相对较高,温度对植物径向生长的限制作用较北坡弱,因此,太白山北坡树木径向生长受气温的限制性比南坡强,这与刘禹等^[19],对秦岭南北坡巴山冷杉对气候变化响应研究的结论一致。

南坡YWD轮宽指数仅与当年4月份降水的相关系数达到显著性水平,且为负相关,北坡SBS轮宽指数则仅与当年8月份的降水有较高的正相关,此结果与南北坡的位置差异有密切关系,由于4月份太白山南坡温度高于北坡(图2),导致南坡的积雪融化较快,此时降水过多就会造成温度下降、光照减少,植物光合作用速率也会随之下降,不利于植物营养物质的积累,容易产生窄轮^[38-39],而北坡温度较低,积雪融化稍迟于南坡,因此在该月份降水没有对北坡树木的径向生长产生显著的限制作用,康永祥等^[15],在对太白山不同海拔太白红杉的研究中也发现南坡3100米处采样点树轮宽度指数序列与4月降水量显著负相关。8月份接近生长季末期,秋冬季的降水量比较丰富,树木体内就可以储存足够的水分供生长所需,同时也可促进生长季后期光合作用产物的积累和植物后期生长^[40],南坡的降水相对于北坡更充足(图2),导致该月份的降水对北坡太白红杉有比较明显的促进作用,对南坡太白红杉的生长影响则不明显。

可见,太白山地区南、北坡树木径向生长都主要受到春季气温的制约,并且前一年6月的降水对该地区太白红杉的“滞后效应”都十分明显,但是由于南、北坡位置的差异,温度、降水以及积雪消融的时间皆有所差异,导致两个坡向的树轮宽度指数受降水限制的月份有所不同,北坡太白红杉径向生长对气候变化的敏感性较南坡更强。

2.3 年轮年表与气候因子月份组合的相关分析

由于季节的气候状况对树木生长的影响有更好的代表性,并考虑太白红杉生长习性和该地区气候特点,进一步对单月气候因子进行月份组合^[41](表2),发现北坡SBS与当年2—6月和前一年1—6月平均气温的

表2 太白山林线南、北坡太白红杉 RES 年表与气候要素月份组合分析结果

Table 2 Correlations between tree-ring residual chronology and seasonal climate variables in *Larix chinensis* of forest margin in southern and northern slopes of Mount Taibai

气候因子 Climate factors	月份组合 Seasonal combination	SBS	YWD
平均气温 Mean air temperature	C2—C6	0.357 **	0.202
	C5—C6	0.247	0.308 *
	P1—P4	0.401 **	0.139
	P1—P5	0.366 **	0.129
	P1—P6	0.351 **	0.109
平均总降水量 Total mean precipitation	C1—C4	-0.222	-0.390 **
	C2—C4	-0.238	-0.382 **
	C3—C4	-0.242	-0.383 **
	P1—P6	0.318 *	0.191
	P2—P6	0.324 *	0.188
	P3—P6	0.298 *	0.160
	P4—P6	0.308 *	0.200

* 代表达到 0.05 显著性水平, ** 代表达到 0.01 显著性水平;C 代表当年,P 代表前一年,字母后数字代表月份

相关性均达到了 0.01 的极显著水平(0.401),南坡 YWD 仅与当年 5—6 月气温的相关性达到了 0.05 的显著性水平(0.308)且与前一年气温的相关性较低;北坡 SBS 与当年 1—4 月的降水相关性较低,但与前一年 1—6 月平均降水量的相关性通过了显著性检验($P<0.05$),南坡 YWD 与当年 1—4 月的平均降水量呈显著的负相关($P<0.01$)达到 0.390,但却与前一年月份组合的降水量相关性较差。

综上所述,南、北坡太白红杉对不同月份组合气候因子的响应差异相对与单月因子分析的结果更明显,结果与年表统计结果、单月气候因子的响应结果比较一致;太白山北坡太白红杉的生长主要受春夏生长季气温的影响,且对前一年 1—6 月降水的“滞后效应”比南坡明显,南坡太白红杉在生长过程中主要受到夏季气温的促进以及冬春冷湿季节降水的抑制,受“滞后效应”影响相对较小。

2.4 年轮年表与气候因子的多元线性逐步回归分析

相关分析完成后,选取前一年 1 月至当年 12 月,24 个月的平均气温和总降水量,共 48 个气候因子作为研究对象与树轮宽度指数进行线性回归模型的建立,首先对所有气候因子进行标准化处理,统一所有气候因子间的量纲,随后再与 SBS 和 YWD 两个采样点的树轮宽度指数分别进行逐步回归分析,逐步回归分析结果如表 2、3 所示。

表 3 线性回归分析模型 R^2 方和标准估计误差
Table 3 R^2 and the standard error of estimate of linear regression analysis models

SBS			YWD		
模型 Model	R^2	标准估计误差 Standard error of estimate	模型 Model	R^2	标准估计误差 Standard error of estimate
1	0.143	0.16555	1	0.134	0.165644
2	0.344	0.146397	2	0.259	0.154848
3	0.431	0.137783	3	0.351	0.146455
4	0.498	0.130816	4	0.412	0.14099
5	0.558	0.124156	5	0.471	0.135198
6	0.606	0.11862	6	0.538	0.127869
7	0.648	0.113366	7	0.593	0.12142
8	0.689	0.107876	8	0.64	0.115607
9	0.728	0.102171	9	0.677	0.110841
10	0.759	0.097492	—	—	—

逐步回归方程判定系数 R^2 (表 3)可反映各因子拟合逐步回归方程的可信度,逐步回归分析结果显示:当置信区间达到 95%时,两个样点处进入模型拟合的因子数分别为 10 和 9,其 R^2 随着进入模型因子数的增加而增大,标准化误差系数逐渐减小;当拟合因子达到 9 时,SBS 样点 R^2 为 0.728,大于 YWD 样点处 R^2 ,其值为 0.677,SBS 标准化误差系数为 0.102,小于 YWD 样点处标准化误差系数,其值 0.111,说明 SBS 样点树轮宽度指数对气候因子之间拟合度优于 YWD 样点,并且这与年表特征分析中信噪比、样本总体解释量、样本间相关系数和第一分量方差的变化趋势基本一致。

为了更好得对比南北坡树轮宽度指数与气候因子的转换方程,本文以列表的形式进行表示(表 4),其中 B 为各显著因子的系数,t 为各因子的贡献值,Sig 为显著性值。

由表 4 可知:两个样点多元回归模型中,均包含了降水和气温因子,说明太白山南北坡太白红杉均受到了降水和气温因子的综合影响。由 SBS 样点逐步回归模型分析结果可知:当年 8 月的气温对模型拟合贡献最高,其 t 值为 6.034,前一年 5 月降水贡献位居第二,t 值为 5.491,两者显著性检验均达到 0.05 水平(Sig=0.000),进入模型贡献最小的气候因子为当年 9 月温度值。YWD 样点逐步回归分析结果显示:前一年 8 月的气温因子对模型拟合贡献最高($t=4.712$),当年 4 月降水因子对模型拟合贡献位居第二($|t|=3.930$),两者显著性检验均达到 0.05 水平(Sig=0.000),贡献最小值为当年 10 月的温度因子($|t|=2.145$)。SBS 气温因子对回

归模型的贡献值比 YWD 气温因子对回归模型的贡献值大,说明北坡 SBS 样地处树轮宽度指数对气温因子更敏感,这与相关分析所得的结果一致。另外,两样地回归模型中气温因子贡献最大值均大于降水因子的贡献最大值,SBS 处气温因子最大贡献值为 $T_8(t=6.034) > P_{-5}(t=5.491)$,YWD 处气温因子最大贡献值为 $T_{-8}(t=4.712) > P_4(|t|=3.930)$,表明太白山地区太白红杉径向生长对气温因子的响应较降水因子敏感,气温因子的变化更易引起太白红杉树轮宽度的变化^[28]。

表 4 线性回归模型显著因子的系数、贡献值和显著性表

Table 4 Coefficients, contribution value and the significance of the significant factors of the linear regression models

显著因子 Significant factors	SBS			显著因子 Significant factors	YWD		
	B	t	Sig		B	t	Sig
常量 Constant	1.001	70.939	0.000	常量 Constant	1.006	62.920	0.000
T_8	0.086	6.034	0.000	P_4	-0.061	-3.930	0.000
P_{-5}	0.170	5.491	0.000	T_{-8}	0.076	4.712	0.000
P_{-10}	0.051	3.706	0.001	P_8	0.050	3.216	0.003
P_{11}	-0.042	-2.938	0.006	P_{-11}	-0.050	-3.126	0.003
P_1	-0.043	-3.121	0.003	P_{-10}	0.048	3.060	0.004
T_7	0.041	2.933	0.006	P_{-5}	0.106	3.131	0.003
P_{-11}	-0.037	-2.679	0.011	T_{12}	0.042	2.588	0.013
P_{12}	-0.035	-2.491	0.017	P_{-9}	-0.037	-2.401	0.021
P_5	-0.035	-2.501	0.017	T_{10}	-0.033	-2.145	0.038
T_9	-0.030	-2.221	0.032	—	—	—	—

T、P 分别代表气温和降水,数字代表当年的月份,而负值代表前一年,如 T_5 代表当年 5 月的气温,而 P_{-2} 代表前一年 2 月份的降水;B 表示回归系数,t 为统计量,Sig 为显著性

3 结论

本文基于树木年代学方法对太白山森林上线相同海拔不同坡向太白红杉对气候响应的差异进行了对比以探究不同坡向植被对气候变化响应的差异,得到了以下结论:

(1) 太白山南北坡森林上线 3100 米至 3200 米处太白红杉树轮宽度对气候变化的响应都比较敏感,但是由于坡向的差异,北坡(阴坡)太白红杉对气候的响应的敏感度较南坡(阳坡)强。

(2) 太白山南、北坡树木生长都主要受到初春至夏季气温的限制,但是北坡相对于南坡更敏感。南、北坡太白红杉的树轮宽度指数都与前一年 6 月份的降水呈显著正相关关系,北坡太白红杉受前一年 2—6 月平均降水量的“滞后效应”明显,南坡则受当年 1—4 月平均降水的限制作用尤为显著,南坡对当年降水变化响应的敏感性较北坡强。

(3) 南、北坡树轮宽度指数与气候因子的回归模型有较好的拟合度,并揭示出南、北坡太白红杉的生长过程均受到了气温和降水的综合影响,但树木生长对气温因子的敏感性较降水因子强,气温因子的变化更易引起树轮宽度的变化。

(4) 太白山位于秦岭中部,是秦岭的最高点和分水岭,同时,太白红杉位于这一带森林的最上限,特殊的地理位置使得该地区植被在不同坡向上对气候变化的响应存在天然的差异性,虽然本文研究不足以揭示我国南北地区植被对气候响应的差异,但是却在对于不同坡向亚高山林线植被对气候变化的响应研究有一定的代表性。

致谢:感谢宝鸡文理学院地理与环境学院周旗老师领导下的陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室为本次实验提供了 LINTAB 树轮分析仪和实验室,以及包光老师在对年轮样品的处理及分析过程中给予的极大技术帮助。

参考文献 (References):

- [1] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 65-75.
- [2] Fritts H C, Swetnam T W. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, 1989, 19: 111-188.
- [3] Rigling A, Waldner P O, Forster T, Bräker O U, Pouttu A. Ecological interpretation of tree-ring width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(1): 18-31.
- [4] Copenheaver C A, Abrams M D. Dendroecology in young stands: case studies from jack pine in northern lower michigan. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182(1/3): 247-257.
- [5] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- [6] Kienast F, Schweingruber F H, Bräker O U, Schär E. Tree-ring studies on conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(7): 683-696.
- [7] Villalba R, Boninsegna J A, Veblen T T, Schmelzer A, Rubulis S. Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of Northern Patagonia. *Climatic Change*, 1997, 36(3/4): 425-454.
- [8] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 81-90.
- [9] Villalba R, Veblen T T, Ogden J. Climatic influences on the growth of subalpine trees in the Colorado Front Range. *Ecology*, 1994, 75(5): 1450-1462.
- [10] Liu H Y, Tang Z Y, Dai J H, Tang Y X, Cui H T. Larch timberline and its development in north China. *Mountain Research and Development*, 2002, 22(4): 359-367.
- [11] 狄维忠, 仲铭锦. 陕西省国家珍稀、濒危保护植物的分布规律. *西北大学学报: 自然科学版*, 1989, 19(1): 63-68.
- [12] 张文辉, 王延平, 康永祥, 刘祥君. 太白红杉种群结构与环境的关系. *生态学报*, 2004, 24(1): 41-47.
- [13] 杨文峰, 李兆元, 吴素良, 董亚非, 吴祥定, 尹训刚, 湛绪志. 秦岭太白山树木年轮对气候变化的响应分析. *陕西气象*, 1993, (5): 9-11.
- [14] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. *地理学报*, 1994, 49(2): 174-181.
- [15] 康永祥, 刘婧辉, 代拴发, 何晓军. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(12): 141-147.
- [16] 康永祥, 刘婧辉, 孙菲菲, 代拴发, 何小军. 太白山高山林线区太白红杉林年轮宽度对气候变化的响应. *东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 11-13, 44-44.
- [17] 王婷, 沈连峰, 叶永忠, 高海强, 徐萌. 伏牛山华山松径向生长对气候变化的响应. *河南科学*, 2010, 28(12): 1549-1551.
- [18] Dang H S, Jiang M X, Zhang Q F, Zhang Y J. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1/3): 143-150.
- [19] Liu Y, Linderholm H W, Song H M, Cai Q F, Tian Q H, Sun J Y, Chen D L, Simelton E, Seftigen K, Tian H, Wang R Y, Bao G, An Z S. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China. *Boreas*, 2009, 38(2): 285-291.
- [20] 刘禹, 刘娜, 宋慧明, 蔡秋芳, 包光, 王伟平. 以树轮宽度重建秦岭中段分水岭地区 1-7 月平均气温. *气候变化研究进展*, 2009, 5(5): 260-265.
- [21] 任毅, 刘明时, 田联会, 田先华, 李智军. 太白山自然保护区生物多样性研究与管理. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [22] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago, USA: the University of Chicago Press, 1968.
- [23] Holmes R L. *Dendrochronology Program Library Users manual*. Laboratory of Tree-Ring Research, Tucson: University of Arizona, 1994.
- [24] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization[D]. Tucson: University of Arizona, 1985.
- [25] Cook E R, Shiyatov S, Mazepa V. Estimation of the Mean Chronology // Cook E R, Kairiukstis L A (Eds.). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990: 123-132.
- [26] Fritts H C. *Reconstructing Large-Scale Climatic Patterns from Tree-Ring Data: T Diagnostic Analysis*. Tucson, AZ: The Arizona University Press, 1991.
- [27] 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.
- [28] 张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 何清, 袁玉江, 张同文, Bakytbek E, 赵勇. 吉尔吉斯斯坦西天山上下林线树轮对气候的响应差异. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(4): 1-6.

- [29] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [30] Fritts H C, Shatz D J. Selecting and characterizing tree-ring chronologies for dendroclimatic analysis. *Tree-Ring Bulletin*, 1975, 35: 31-46.
- [31] Yoo S J, Wright B D. Persistence of growth variation in tree-ring chronologies. *Forest Science*, 2000, 46(4): 507-520.
- [32] 刘洪滨, 邵雪梅. 秦岭南坡佛坪 1789 年以来 1—4 月平均温度重建. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 188-196.
- [33] Lara A, Aravena J C, Villalba R, Franke W A, Luckman B H, Wilson R J S. Dendroclimatology of high-elevation *Nothofagus pumilio* forests at their northern distribution limit in the central Andes of Chile. *Canadian Journal of Forest Research*. 2001, 31(6): 925-936.
- [34] 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.
- [35] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps. *Tree-Ring Bulletin*, 1993, 53: 1-11.
- [36] Larsen C P S, MacDonald G M. Relations between tree-ring widths, climate, and annual area burned in the boreal forest of Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25(11): 1746-1755.
- [37] Peterson D W, Peterson D L. Effects of climate on radial growth of subalpine conifers in the North Cascade Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(9): 1921-1932.
- [38] Fritts H C, Dean J S. Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from the Chaco Canyon area, southwestern United States. *Tree Ring Bulletin*, 1992, 52: 31-58.
- [39] Wimmer R, Grabner M. Effects of climate on vertical resin duct density and radial growth of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *Trees*, 1997, 11(5): 271-276.
- [40] Brantley C G, Day Jr J W, Lane R R, Hyfield E, Day J N, Ko J Y. Primary production, nutrient dynamics, and accretion of a coastal freshwater forested wetland assimilation system in Louisiana. *Ecological Engineering*, 2008, 34(1): 7-22.
- [41] 董志鹏, 郑怀舟, 方克艳, 严容, 郑立伟, 杨玉盛. 福建三明马尾松树轮宽度对气候变化的响应. *亚热带资源与环境学报*, 2014, 9(1): 1-7.