

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

彭剑峰<sup>1,2</sup>, 勾晓华<sup>1,\*</sup>, 陈发虎<sup>1</sup>, 刘普幸<sup>1,3</sup>, 张 永<sup>1</sup>, 方克艳<sup>1</sup>

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室中德干旱环境研究中心, 兰州 730000 2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004 ;  
3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070 )

**摘要** 利用位于同一坡面的青海云杉树芯样本,建立了 4 个海拔高度的树轮宽度指数年表。分析结果表明年表序列特征值大都因海拔而不同,各年表序列对气候因子的相关性在不同高度也表现出一定的差异。树木生长都与前一年 10 月份月均温显著正相关,与前一年 8 月份和当年 5、6 月份月均温显著负相关;与前一年 9、10 月份和当年 5 月份的降水量都呈显著正相关,但都随海拔升高呈波状变化。树轮宽度指数与不同时段的气温和温暖指数都呈负相关,表明 5~9 月是该地区青海云杉生长较为活跃的季节。响应函数分析结果表明该地区低海拔生长的青海云杉受温度和降水的影响都比高海拔生长的更显著,显然不同于以前研究的森林上下限树木的生长模式。4 a 表主成分中的第一主分量贡献率为 81.071%,表明同一坡面影响树木生长的大环境因子是一致的。第一主分量与气候因子的相关分析同样显示出前一年生长季末和当年生长季初的水热组合是树木生长的主要限制因子,区域模拟也进一步证明了这一点。并认清了同一坡面青海云杉树轮记录的共性和差异,为今后树轮采样和研究提供一定的理论依据。

**关键词** 青海云杉;海拔梯度;树木年轮;气候响应

文章编号:1000-0933 (2007)08-3268-09 中图分类号:P935,Q948 文献标识码:A

Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses  
to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains

PENG Jian-Feng<sup>1,2</sup>, GOU Xiao-Hua<sup>1,\*</sup>, CHEN Fa-Hu<sup>1</sup>, LIU Pu-Xing<sup>1,3</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, FANG Ke-Yan<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Western China's Environment Systems MOE., Lanzhou University, Center for Arid Environment and Paleoclimate Research (CAEP),  
Lanzhou 730000, China

2 College of Environment and planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 Collage of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (8) 3268 ~ 3276.

**Abstract** :Based on tree-ring samples of *Picea crassifolia* at four different elevations along a north-facing slope in the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40671191,90502008);国家自然科学基金创新群体资助项目(40421101);国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-05-0888);高等学校“学科创新引智计划资助项目”(B06026)

收稿日期:2006-05-15;修订日期:2007-04-27

作者简介:彭剑峰(1965~),男,河南南阳人,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

\* 通讯联系人 Corresponding author. E-mail:xhgou@lzu.edu.cn

致谢:感谢中国科学院植物研究所张齐兵研究员、兰州大学侯宗东博士和张永香硕士等参加了野外采样,感谢同德县林业局及江群林场的领导和职工给予采样支持,感谢美国哥伦比亚大学树轮实验室李金豹博士对文章写作给予的帮助。

**Foundation item** :The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40671191,90502008), the innovation team of the National Natural Science Foundation of China (No. 40421101), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-05-0888) and Chinese 111 Project (No. B06026)

**Received date** 2006-05-15 ; **Accepted date** 2007-04-27

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

Anymaqin Mountains , northeastern Tibetan Plateau , we developed four ring-width chronologies. Statistical results showed that characteristics of chronologies are different with the increasing elevation , and the correlations of chronologies in the common interval decreased with the increasing elevation. Meanwhile , correlations between the chronologies of different elevation and the two climatic parameters (temperature and precipitaton ) exhibited distinct difference : tree-rings were significantly and positively correlated with the October mean monthly temperature of precious year , and also were significantly but negatively correlated with prior August and current May and June mean monthly temperatures , respectively. All the correlations were fluctuating with the increasing elevation. Tree-rings were significantly and positively correlated with the September and October precipitation of precious years , but were decreasing along the increasing elevation. Tree-rings were also significantly and positively correlated with the May precipitation of current years , and the correlations were increasing along the increase of the elevation. Furthermore , tree-rings were also negatively correlated with temperatures of different time interval and the warming index , proving that the optimal growing season of *Picea crassifolia* is May-September. The results of response function analyses showed that the influence of temperature and precipitation explained most of the growth variance at the low-elevation site , but much less at the high-elevation site. The results were greatly different from previous studies that tree-rings were significantly and positively correlated with temperature at the upper forest limit , whereas were significantly correlated with precipitation at the lower forest limit. Principal component (PC ) analysis was used to indicate regional variations in radial growth patterns. Of the four chronologies , the first PC explains 81.071% of their total variance. According to the response function analyses , the first PC of the four chronologies showed that moisture and temperature of the last stage of prior year growing season and the initial stage of current year growing season are the most important limiting factors of tree growth. This conclusion was further proved by regional model simulation results. Overall , our results indicated the similarities and discrepancies of *Picea crassifolia* ring-width chronologies on the same slope , and provided some background information for future dendrochronological studies in this area.

**Key Words :** *Picea crassifolia* ; elevational gradient ; tree-rings ; climatic response

树木生长一方面受树木本身的遗传因子影响 ,另一方面受外界环境条件的支配 ,在外界环境因子中气候要素的影响又往往是变化最大、最敏感的 ,因此树木年轮就可能成为外部气候要素变化的记录器。海拔作为树木生长的一个重要生态因子 ,它往往造成热量和水分重新分配 ,使树木生长的环境条件更为复杂。利用树轮手段对不同海拔树木生长的研究一般仅局限于森林的上下限 ,早期关于海拔梯度的树木年轮研究主要以调查树木生长为主 ,如 Fowells<sup>[1]</sup>研究树木开始生长的日期和生长季的长短 ,Daubenmire<sup>[2]</sup>研究不同海拔的年轮宽度变化 ,随着树木年轮研究的发展 ,不同海拔高度上影响树木生长的环境要素研究愈来愈被重视 ,高海拔森林成为树轮气候学研究非常重要的地域<sup>[3]</sup>。目前 ,在区域范围内不同海拔的树木年轮指标对气候要素响应的研究已不少<sup>[4~8]</sup> ,但在小尺度同一坡面范围内的不同海拔的树木年轮对气候因子的研究还几乎没有。

阿尼玛卿山地位于青藏高原东北部 ,黄河环绕 ,沟谷幽深 ,相对高差在 300 ~ 800 m 之间 ,呈现典型的高山峡谷地貌特征 ,具有明显的垂直地带性 ,这里宽幅的森林带是研究同一坡面不同海拔树木年轮对气候因子响应的理想场所。本文利用高原地区同一坡面上不同海拔生长的树木年轮对气候因子的响应来研究不同海拔对树木生长的影响差异 ,以及区分不同的海拔高度影响树木生长的气候要素 ,为本地区今后的树木年轮学采样及其它方面的研究奠定基础。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

江群林场位于青海省同德县城西南方向大约 50 km 处 ,坐落于阿尼玛卿山地东北部 ,隶属于黄河上段涵养林区。采样点位于江群林场场部 (麦秀镇)西约 3 km 的加日儿沟南岸 ,地理坐标为 100°19'9.1"E ,35°03'48"N ,东西走向 ,沟谷较为开阔 ,阴坡 (北坡)有森林发布 ,主要树种为青海云杉 (*Picea crassifolia*) ,坡面高差较

大 林相有一定差异 ,低海拔云杉林中有零星桦树等分布 ,向上较高海拔为云杉纯林 ,山顶偶有柏树 ,灌木也稀少 ,整个山坡土层较厚 ,林下稀草分布 ,都有伐桩。

采样遵循一定的采样策略<sup>[9]</sup> ,样本未受火灾、虫害等干扰 ,采集树龄长短不同、小生境不同的样本等 ;按照敏感性原则、生态环境原则和复本原则等<sup>[10]</sup> ,每个采样点都在 20 株树以上 ,每树用生长锥在胸径位置的不同方向取 1~2 芯作为样本 ,样本树多为树龄较长的健康树。这样 ,在同一个坡面上按不同的海拔自上而下依次分为 4 个采样带 :TJQH、TJQMH、TJQML、TJQL (如表 1)。

表 1 江群林场青海云杉不同海拔梯度采样概况和交叉定年结果  
Table 1 Site information and results of datecrossing of *Picea crassifolia* along elevational gradient from Jiangqun area in Anymaqing Mountains

采样点 Sampling sites	海拔高度 (m) Elevation	样本数 (tree) Sample numbers	年表时段 Time-span	<i>r</i>	M	A. C	M. S.	缺轮率 (%) Missing rate
TJQH	3370~3445	35 (29)	1880~2002	0.685	2.97	0.817	0.245	0.155
TJQMH	3300~3350	26 (20)	1874~2002	0.725	2.38	0.759	0.277	0.547
TJQML	3250~3270	31 (21)	1821~2002	0.701	2.25	0.752	0.274	0.254
TJQL	3120~3160	30 (20)	1851~2002	0.764	2.39	0.713	0.328	0.113

*r* 代表样本序列间主序列间的平均相关系数 Mean correlation coefficient ; *M* 代表平均年轮宽度 Mean ring-width ; A. C. 代表一阶自相关系数 order 1 autocorrelation coefficient ; M. S. 代表平均敏感度 Mean sensitivity.

1.2 建立年表

样品带回实验室进行处理 ,其基本过程是按照 Stokes 和 Smiley 的方法<sup>[11]</sup>进行晾干、固定、磨平打光、测量树轮宽度 ,最后利用 COFECHA 程序<sup>[12]</sup>对交叉定年和测量结果进行检验。树轮宽度年表的建立就是通过 ARSTAN 程序<sup>[13]</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 ,最后得出 3 种不同形式的年表。本文利用标准年表 (STD ,如图 1)进行相关的研究。

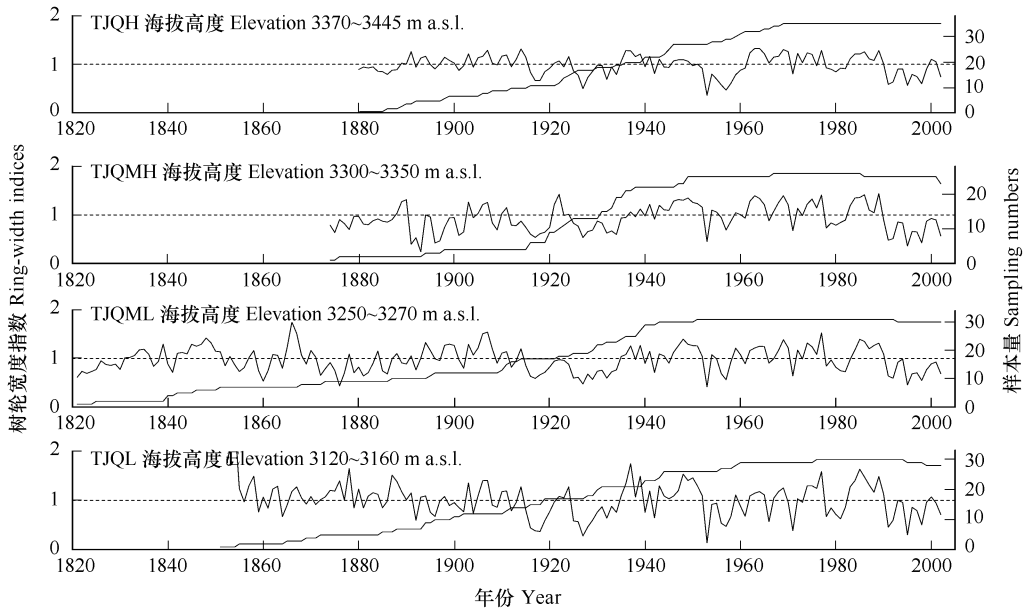


图 1 江群采样点不同海拔青海云杉的树轮宽度指数标准年表 (STD )

Fig. 1 Standard ring-width index series of *Picea crassifolia* along elevational gradient from Jiangqun area in Anymaqing Mountains

1.3 气候数据的选择

选取距采样点最近的同德县气象站 (3289.4 mhb )1959~2001 年的器测资料。该站多年平均气温为 0.45℃ ,多年平均降水量为 422.0 mm。本研究所选的气候要素为前一年的 7 月份至当年的 10 月份共 16 个月的

月平均气温和月总降水量和有生长意义的不同时段 的组合以及生态学指标 :温暖指数 (WI) \ 寒冷指数 (CI) 和湿润指数 (HI) <sup>[4~17]</sup>。温暖指数 WI 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 CI 是采用月平均气温低于 5 ℃ 的总和来表示 ;湿润指数 HI 则是年降水量与温暖指数的比值。

1.4 研究方法

本文利用相关函数软件 SPSS <sup>[8]</sup> 计算年表间的相关 ,目的是想通过树木年轮宽度年表之间的关系揭示不同海拔树木之间的生长异同和影响树木生长因子的差异。利用主成分分析 <sup>[9]</sup> 可能归纳出各年表包含的树木径向生长的共同区域变化特征 <sup>[6]</sup> ,同时也分析不同海拔树木生长过程中影响因子的异同 ;利用年表的权重或载荷来表达采样点与主成分间的生长特征关系 ;权重越高关系越密切 <sup>[20]</sup>。利用 PCA 软件 <sup>[21]</sup> 对 4 个树轮宽度年表在 1880 ~ 2002 年的共同区间上进行主成分分析。

分别选取树木年轮学专业软件 Dendro2002 <sup>[22]</sup> 和 PRECON 应用程序 <sup>[23]</sup> 对树木年轮宽度指数与气候因子的关系进行简单相关函数和响应函数分析 ,以寻求不同海拔树木生长的限制因子以及气候因子及其前期生长对树木年轮形成和发展的贡献 ,都选用了同德气象站前一年 7 月份到当年 10 月份的月平均气温和月降水量分别对不同海拔采样点的树木年轮宽度指数进行相关分析和响应分析 ,显著性检验用 Bootstrap 方法 <sup>[24]</sup> 随机执行 500 次 ,以分析不同海拔树木年轮中记录的信号差异。

2 结果与讨论

2.1 树木年轮原始序列结果在不同海拔高度上的差异

不同海拔 4 个高度的青海云杉 ,它们的树轮宽度序列特征值在海拔梯度上表现出了一定的规律性 (表 1) : (1) 平均相关系数  $r$  在 0.685 ~ 0.764 之间 ,平均敏感度 M. S. 在 0.245 ~ 0.328 之间 ,都表现出从低到高递减趋势 ; (2) 平均轮宽  $M$  高海拔 (上限) 大于低海拔 (下限) 大于森林中部 ,表明森林中部相互竞争和相互干扰使树木生长受到抑制 ,同时也说明上限树木生长的环境条件优越于其它位置 ; (3) 一阶自相关系数 A. C. 值在 0.713 ~ 0.817 之间 ,说明这一地区前一年的树轮生长强烈地影响着下一年的树轮生长 ,并且海拔越高影响越大。

2.2 不同海拔树木年轮年表序列结果的对比

表 2 明显可以看出 ,各采样点标准年表样本间和树与树间的相关系数 ( $r_1$ 、 $r_2$ ) 、信噪比 (SNR) 、样本量的总体解释信号 (EPS) 和第一主分量 (PCA<sub>1</sub>) 在不同海拔都有较高的数值 ,表明各海拔生长的树木都含有较多的环境信息 ,但反映环境变化的树轮年表平均敏感度 (M. S. ) 和标准差 (S. D. ) 则随海拔升高呈降低 → 升高 → 降低的波状趋势。这与祁连山青海云杉的叶长、干重和气孔密度随海拔变化的趋势基本一致 <sup>[25]</sup> ,显然这是青海云杉对不同海拔气候适应的结果 ,高海拔树木生长对气候变化的敏感性虽然在一定程度上降低 ,但由于坡面长度和海拔高差较小的缘故 ,使敏感性的变化不像祁连山中部 <sup>[8]</sup> 那么突出。

表 2 江群青海云杉标准年表 STD 的基本统计量和共同区间 (1940 ~ 2002 年) 分析结果  
Table 2 Standard chronologies statistics and results of common interval analysis of tree ~ ring data of *Picea crassifolia* along elevational gradient from Jiangqun area in Anymaqing Mountains

采样点 Sampling sites	Mean	M. S.	S. D.	$S$	$K$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	SNR	EPS	PCA1%
TJQH	0.991	0.162	0.183	-0.522	0.359	0.56	0.56	0.69	26.8	0.964	58.5
TJQMH	0.988	0.232	0.265	-0.060	0.789	0.59	0.58	0.81	22.2	0.957	61.5
TJQML	0.991	0.201	0.203	-0.007	-0.154	0.57	0.57	0.76	26.4	0.964	60.2
TJQL	0.986	0.255	0.246	-0.109	0.026	0.53	0.53	0.80	21.3	0.955	56.4

Mean 为平均指数 Mean indices ; M. S. 为平均敏感度 Mean sensitivity ; S. D. 为标准差 Standard deviation ;  $S$  为偏度系数 Skewness ;  $K$  为峰度系数 Kurtosis ;  $r_1$  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 Expressed population signal ; PCA<sub>1</sub> 代表第一主分量所占总方差量的百分比 Variance in first eigenvector

2.3 不同海拔树轮年表间的统计分析结果

4 个树木年轮标准年表之间表现出很高的一致性,最低的相关也达到 0.637 (超过 99% 相关检验)。主成分分析结果发现第一主成分的贡献率占 81.071% ,表明同一坡面不同海拔影响树木生长的主导因子是一致的,其它的主成分贡献率都低于 10% ,说明单个小生境因子的影响相对较小 (表 3)。但从不同主成分的载荷 (特征向量)来看,第二、三、四主成分的差别很大,表明不同海拔影响树木生长的小生境要素比较复杂。从载荷的变化规律来看,第三主成分的载荷表现出的变化规律与海拔高度的变化有一定的联系。

表 3 江群 4 个树木年轮宽度 STD 年表的主成分分析 (1880 ~ 2002 年)  
Table 3 Principal components analysis of four standard rind-width chronologies from Jiangqun area (1880 ~ 2002 )

主成分 Principal components	特征值 Eigenvalue	贡献率 (%) Variance	累计贡献率 (%) Cumulative	特征向量 Eigenvectors			
				TJQH	TJQMH	TJQML	TJQL
PC1	3.2428	81.071	81.071	0.493	0.476	0.517	0.513
PC2	0.3698	9.245	90.316	-0.582	0.802	-0.120	-0.065
PC3	0.2116	5.289	95.605	0.619	0.355	-0.279	-0.643
PC4	0.1758	4.395	100.000	0.189	0.064	-0.801	0.565

第一主分量如图 4 (仅见 1960 ~ 2000 年区间)所示,反映了区域树木生长规律,其中代表高生长的年份 ( $PCA1 \geq 3$ )有 (1907 )1977 ,1985 ~ 1986 ,1989 ,代表低生长的年份 ( $PCA1 \leq -3$ )的有 (1917 ~ 1918 ,1927 ~ 1928 ,1953 ,1957 )1991 ,1995 和 1998 (尤以 1953 年最低为 -4.81)。这些低生长年份正是交叉定年中使用的特征年,表明不同海拔树轮宽度年表中的高频变化是一致的 (图 1);由图 1 还可以明显看出,树木生长的特征年轮 (窄年轮)指数值随海拔升高呈现增大的趋势,这显然与在一定范围内降水随海拔升高而增多有关。这一结果与 LaMarche<sup>[26]</sup>和 Hughes<sup>[27]</sup>的研究基本一致,即高频变化 (2 ~ 7 a 频率)大多受降水的制约。

2.4 不同海拔青海云杉树轮年表与月均温和月降水量的相关分析和响应分析

2.4.1 研究区的共同特征

反映区域特征的第一主分量与月均温和月降水量的简单相关分析结果如图 2 所示,青海云杉都与前一年 9、10 月份的降水和 10 月份从的气温呈显著正相关,表明生长季末丰富的降水和较高的气温有利于树木光合作用以延长其生长季时间,同时为下一年的树木生长积累能量,在一定程度上将决定翌年树木的生长量<sup>[28]</sup>,这与内蒙古白扦的生长相似<sup>[29]</sup>;与当年 5、6 月份的气温显著负相关和 5 月份降水显著正相关,这说明生长季初期温度的升高往往会造成蒸发量加大,从而引起土壤水分的不足而影响树木的生长,5 月份充足的降水则弥补了高温下水分的蒸发损失,有利于树木的生长,这一点与华山的华山松<sup>[30~31]</sup>、内蒙古的白扦<sup>[29]</sup>和呼和浩特附近的油松<sup>[32]</sup>的研究结果基本一致。由此可以看出,前一年的生长季末 (尤其 10 月份)和当年生长季初期 (主要在 5 月份)的水热组合是树木生长的重要限制因子。

2.4.2 研究区内不同海拔树木生长对气候因子的响应

树轮宽度 STD 年表与同德气象站月均温的相关数值 (表 4)可以看出,树轮指数与前一年的 10 月份均温的显著正相关有从低海拔向高海拔减弱趋势,而与前一年的 8 月份均温都有较高的负相关,都与当年的 5、6 月份均温显著负相关。显然前一年 10 月份和当年 5 月份均温的限制作用在研究区内树木生长的低海拔大于高海拔,而当年 6 月份均温的限制作用则高海拔强于低海拔。

树轮宽度 STD 年表与同德月降水量的相关 (表 4)表明:前一年 9 月和 10 月份的降水量明显与树木年轮宽度呈显著正相关,但随海拔升高相关值存在差异,除下限的树木年轮宽度与 6 月份降水量显著相关外,其他高度都与 5 月份降水显著正相关且随海拔的升高呈增强趋势,从这一点上说 5 月份降水的影响作用在上限更强一些,这与天山东部巴里坤森林上限生长的西伯利亚落叶松相似<sup>[33]</sup>。

青海云杉的生长与不同时段的气温和温暖指数都成负相关,尤其春、夏季均温,5 ~ 9 月份均温和温暖指数特别显著,说明生性喜温凉的云杉,在气温高、太阳辐射强和空气相对湿度低的条件下,树木失水较多,气孔

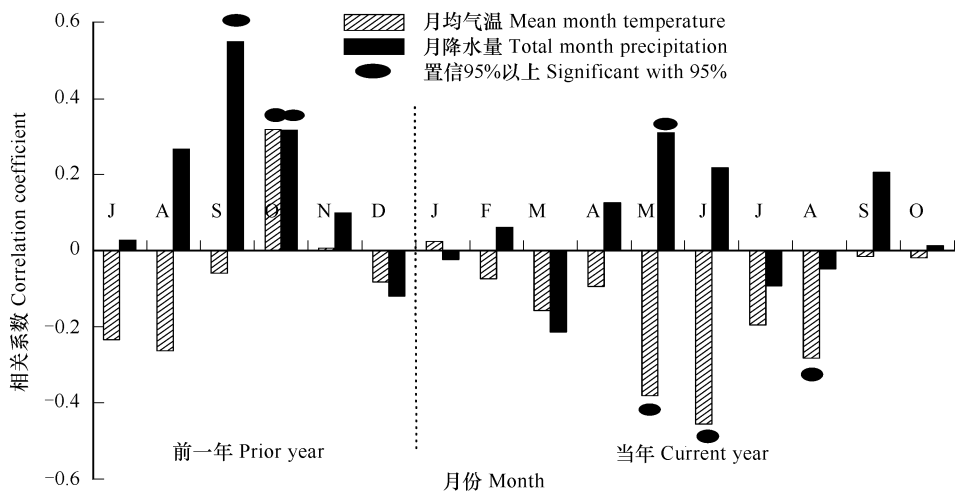


图2 第一主分量与月均温和月降水量的简单相关分析结果

Fig. 2 Correlation analysis between first principal component data and mean monthly temperature and total monthly precipitation

部分关闭引起光合作用能力下降<sup>[34]</sup>,在生理上起到生长抑制作用。当然春末夏初的高温往往会造成地面水分蒸发旺盛,使树木生长初期出现生理缺水现象,从而形成窄轮。温暖指数实际上是一种简化了的有效积温<sup>[15]</sup>,树轮宽度与温暖指数和5~9月份均温的相关数值基本相同,从而也证明了5~9月份就是本研究点青海云杉的活跃生长季即树木的高生长期,这与同德县志上注明的江群一带的农作物生长季一般始于4月3~10日终于9月4~10日基本对应。青海云杉生长的海拔高度比作物高,生长季自然要比作物生长季开始晚些,但生长季的结束也比作物晚些,这与青海云杉作为常绿树种的生理特征有关。这一点可用康兴成<sup>[35]</sup>“高海拔地区柏树的生长季主要在夏秋季”来解释。

表4 江群不同海拔青海云杉采样点 STD 年表与同德气象站月均温和月降水量的相关分析

Table 4 Correlation analysis between standard chronologies and mean monthly temperature and total monthly precipitation of Tongde weather station along elevational gradient in Jiangqun area

	月均温 Mean month temperature				月降水量 Total month precipitation			
	TJQH	TJQMH	TJQML	TJQL	TJQH	TJQMH	TJQML	TJQL
JUL	-0.151	-0.205	-0.269	-0.274	-0.059	-0.001	0.045	0.127
AUG	<b>-0.246 *</b>	-0.227	<b>-0.312</b>	-0.235	0.240	0.266	0.277	0.253
SEP	0.033	-0.040	-0.130	-0.088	<b>0.494</b>	<b>0.564</b>	<b>0.490</b>	<b>0.562</b>
OCT	<b>0.277 *</b>	<b>0.294</b>	<b>0.250</b>	<b>0.410</b>	<b>0.326</b>	<b>0.333</b>	<b>0.269</b>	<b>0.298</b>
May	<b>-0.337 *</b>	<b>-0.399</b>	<b>-0.350</b>	<b>-0.395</b>	<b>0.343</b>	<b>0.326</b>	<b>0.268</b>	0.263
Jun	<b>-0.450</b>	<b>-0.467</b>	<b>-0.418</b>	<b>-0.414</b>	0.078	0.228	0.151	<b>0.388</b>
Jul	-0.040	-0.204	-0.195	<b>-0.313</b>	-0.096	-0.037	-0.143	-0.080
Aug	-0.197	<b>-0.299</b>	-0.231	<b>-0.363</b>	0.013	0.020	-0.077	-0.135
Sep	0.016	0.004	-0.027	-0.057	0.231	0.242	0.106	0.216
Oct	0.011	-0.025	-0.099	0.038	0.011	0.028	0.003	0.013
春 Spring	<b>-0.301</b>	<b>-0.339</b>	-0.253	<b>-0.309</b>	<b>0.283</b>	<b>0.291</b>	0.229	<b>0.264</b>
夏 Summer	<b>-0.297</b>	<b>-0.417</b>	<b>-0.348</b>	<b>-0.464</b>	-0.038	0.095	-0.027	0.089
May-Sep	<b>-0.280</b>	<b>-0.422</b>	<b>-0.382</b>	<b>-0.479</b>	0.179	<b>0.292</b>	0.122	0.253
WI/ HI	<b>-0.285</b>	<b>-0.423</b>	<b>-0.378</b>	<b>-0.478</b>	<b>0.281</b>	<b>0.433</b>	<b>0.285</b>	<b>0.464</b>

“黑体字” \* 表示此值超过 95% 相关检验的置信区间; JUL 等标注为前一年, May 等标注为当年; WI (温暖指数) 和 HI (湿润指数) 分别对应 在月均温和月降水相关之列

除了夏季降水呈微弱的负相关外,不同时段降水及湿润指数都表现为正相关。春季降水和湿润指数基本

上都呈显著正相关,其表现因海拔而异.春季降水的相关随海拔升高呈增强趋势,而湿润指数则呈波状递减.春季的降水有利于促进树木的萌芽及前期生长,在树木年轮的结构中树木早期生长形成的早材占年轮宽度的比重很大,所以春季丰富的降水往往促使树木形成宽轮.

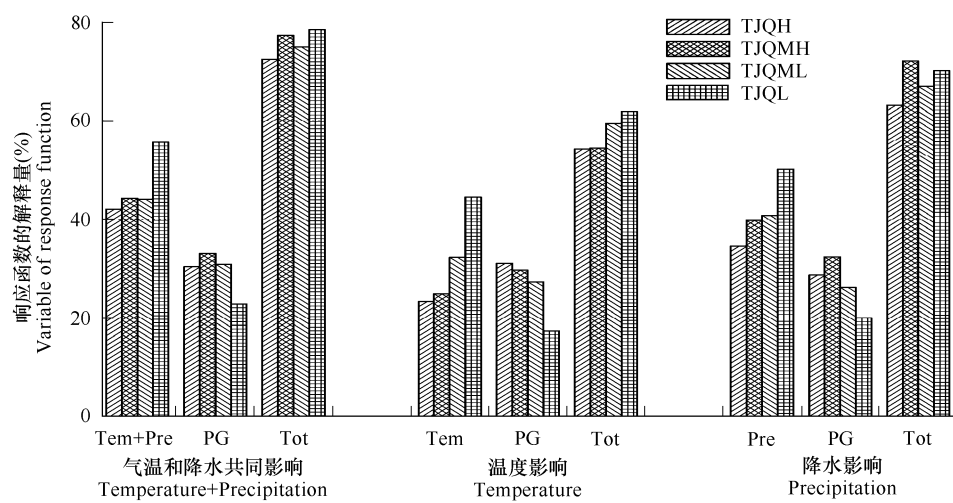


图3 月均温和月降水量对不同海拔树轮径向生长的响应分析

Fig. 3 Response analysis between tree-ring radial growth of different elevation and mean monthly temperature and total monthly precipitation of Tongde weather station  
Tem + Pre : 温度和降水的共同影响 ; PG : 影响因子的前期生长 ; Tot : 影响因子的总解释量 ; Tem : 月均温 ; Pre : 月总降水量 Tem + Pre : temperature and precipitation together ; PG : Prior Growth ; Tot : Total variable ; Tem : mean month temperature ; Pre : total month precipitation

响应函数分析的结果(图3)表明,随海拔升高月均温和月降水量综合或单因子对树木径向生长的解释量都是逐渐递减,前期生长的解释量都较大且呈上升趋势,表明该林带的上限受气温和降水的限制作用均低于下限,显然与通常认为的森林上限受气温限制下限受降水的限制不一致。这也表明前人在森林上下限的研究结果与生长在同一坡面的森林上下限结果是有一定差异的,这可能是因为前人的研究<sup>[8]</sup>往往是针对区域森林分布的上下限,其研究中森林的分布有足够大的垂直空间,但小地形和小气候的干扰也比较大。因此,对于生长在同一坡面上的云杉来说,其影响因子存在着一定的差异,采样时对采样点的布控一定要考虑高差因子,但一般情况下一个坡面生长的云杉林作为一个采样点还是可行的。

2.5 年表间第一主分量与环境因子关系的模拟

由于同一坡面上不同海拔生长的树木与环境因子之间存在一定的差异,本研究尝试利用多元回归模型<sup>[6]</sup>来描述年表间第一主分量与影响显著的环境因子间的关系。最优方程为: $I = 2.025 + 0.032 T_{p10} - 0.043 T_5 - 0.025 T_6 + 0.002 T_8 + 0.004 P_{p9} + 0.002 P_{p10} + 0.001 P_5$ ,其中I代表不同海拔4个树轮标准年表的第一主分量值, $T_{p10}$ 、 $P_{p9}$ 、 $P_{p10}$ 分别代表上一年9月或10月份的月均温度和月降水量, $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_8$ 、 $P_5$ 则表示当年5、6、8月份的月均温度和当年5月份降水量,方程的 $R^2 = 49.5\%$   $R_{adj} = 39.1\%$   $F$ 检验的 $F$ 值为4.762,达到0.01的置信度水平。如图4所示,模拟值与实测值比较吻合,同时也证明这几个环境因子与树木生长的关系密切。

3 结论

树木年轮原始序列和年表序列的特征值大都随海拔的变化而不同,表明树木年轮中所含的环境信息量都因海拔而不同。树木年轮标准年表之间的相关表现出很高的一致性,但随海拔的升高年表间相关有减小的趋势。第一主分量的贡献率为81.071%,表明不同海拔响应树木生长的主导因子是一致的,第一主分量对气候因子的相关也显示出研究区内前一年生长季末和当年生长季初期的水热组合是树木生长的重要限制因子。

树轮生长与前一年的10月份月均温呈显著的正相关,与前一年的8月份和当年的5、6月份均温呈显著

负相关,且随海拔升高呈波状递减趋势(6月份递增趋势)树木年轮宽度与前一年9、10月份和当年5月份的降水量都呈显著正相关,仅前一年10月份和当年5月份降水的显著正相关在高海拔稍大一些。模拟的结果也证明影响青海云杉生长的因子是复杂的,其中前一年9、10月份和当年5、6月份的气温和降水量是该地区树木年轮生长的重要限制因子。树轮宽度与不同时段的气温和温暖指数都呈负相关,同时也证明了5~9月份就是该地区青海云杉较为活跃的生长季。

通过不同海拔树轮宽度年表与气候因子的响应分析发现,月均温和月降水量对树木年轮指数的方差解释量都是低海拔最高,高海拔最低,随海拔升高呈递减趋势,而前期生长的滞后影响则相反,表明同一坡面低海拔生长的青海云杉受温度和降水的影响都比较大,显然与通常研究的“森林上限受气温限制下限受降水限制”不一致,与天山东部西伯利亚落叶松(同一沟谷的上下限)的生长特征也不相似<sup>[37]</sup>。这一研究结果表明,生长在同一坡面有限高差范围内的青海云杉,其对气候因子的响应结果虽因海拔高度而不同,但其共性显然高于差异性,今后进行树木年轮学研究时可以作为采样点来考虑。

References :

[1] Fowells H A. The period of seasonal growth of ponderosa pine and associated species. J. Forest ,1941 ,39 :601—608.

[2] Daubenmire R F. Radial growth of trees at different altitudes. Bot Gaz ,1946 ,107 :462—467.

[3] Tessier L ,Guibal F ,Schweingruber F H. Research Strategies in Dendroecology and Dendroclimatology in Mountain Environments. Climatic Change ,1997 ,36 :499—517.

[4] Buckley B M ,Cook E R ,Peterson M J ,et al. A Changing Temperature Response with Elevation for *Lagarostrobos franklinii* in Tasmania , Australia. Climatic Change ,1997 ,36 :477—498.

[5] Splechtna B E ,Dobry J ,Klinka K. Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook. ) Nutt. ) in relation to elevation and climatic fluctuations. Annals of Forest Science ,2000 ,57 :89—100.

[6] Zhang Q B ,Hebda R J. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia , Canada. Canadian Journal of Forest Research ,2004 ,34 :1946—1954.

[7] Wang Y J ,Chen F H and Gou X H. Study on the response relationship between tree ring and climate factors and climate reconstruction in the middle region of Qilian Mountains. Journal of Desert Research ,2001 ,21 ( 2 ) :135—140.

[8] 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.

[9] Shao X M ,Fang X Q ,Liu 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.

[10] Wu X D. Tree-ring and climate change. Beijing : Meteorology Press ,1990. 65—75.

[11] Stokes M A ,Smiley T L. An Introduction to Tree Ring Dating. Chicago :the University of Chicago Press ,1968.

[12] Holmes R L ,Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin ,1983 ,43 :69—75.

[13] Cook E R ,Holmes R L ,Users manual for ARSTAN. Laboratory of Tree-ring Research ,University of Arizona ,Tucson ,1986.

[14] Fang J Y. Arrangement of East-Asian vegetation-climate types on coordinates of temperature and precipitation. Acta Ecologica Sinica ,1994 ,14 ( 3 ) :290—294.

[15] Fang J Y. Kira Tatsuo and development of Ecology. Chinese Journal of Ecology ,1995 ,14 ( 2 ) :70—75.

[16] Xu W D. Heat index of Kira Tatsuo and applications in vegetation of China. Chinese Journal of Ecology ,1985 ,3 ( 3 ) :215—222.

[17] 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

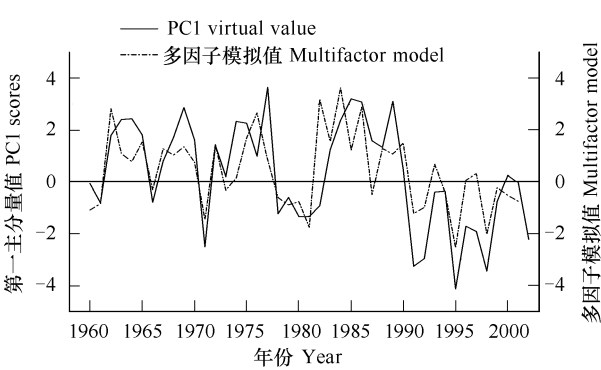


图4 4个海拔高度树木年轮宽度标准年表的第一主分量及主要影响因子的模拟值

Fig.4 The first principal component value of four standard chronologies in different elevations and simulation value of main limiting factors in research area



Sciences ,2003 23 (4) :428—435.

[18] Lu W D , Zhu Y L , Sha J , *et al.* SPSS for Windows. Beijing : Publishing House of Electronics Industry ,1997. 206—213.

[19] Xu J H. Mathematical methods in contemporary geography (second ). Beijing : Higher Education Press ,2002. 84—93.

[20] Legendre P , Legendre L. Numerical ecology. Elsevier Science B. V. , Amsterdam ,1998.

[21] Grissino-Mayer H D , Holmes R L , Fritts H C eds. The international tree-ring data bank program library , user's manual , version 2. International tree-ring data bank , Tucson , Ariz , 1996.

[22] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho ? Arctic , Antarctic , and Alpine Research ,2000 32 :111—116.

[23] Fritts H C. Quick help for precon now called Preconk version 5.11. The University of Arizona , Tucson , Arizona , 1996.

[24] Guiot J. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin ,1991 51 :39—41.

[25] Qiang W Y , Wang X L , Chen T , *et al.* Variations of stomatal density and carbon isotope values of *Picea crassifolia* at different altitudes in the qilian Mountains. Trees ,2003 ,17 :258—262.

[26] LaMarche V C Jr. Frequency-dependent relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendroclimatic implications. Tree-Ring Bull ,1974 ,34 :1—20.

[27] Hughes M , Funkhouser G. Frequency-dependent climate signal in upper and lower forest border tree rings in the mountains of the Great Basin. Climatic Change ,2003 ,59 :233—244.

[28] Fritts H C. Tree ring and climate. London : Academic Press , 1976.

[29] 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.

[30] Shao X M , Wu X D. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* Franch from Huashan , China. Acta Geographica Sinica ,49 (2) :174—181.

[31] Hughes M K , Wu X D , Shao X M , *et al.* A preliminary reconstruction of rainfall in North-Central China since A. D. 1600 from tree-ring density and width. Quaternary Research ,1994 ,42 :88—99.

[32] Liu Y , Ma L M. Reconstruction of 376a seasonal precipitation of Huhehaote from tree ring-width. Chinese Science Bulletin ,1999 44 (18) :1986—1992.

[33] Peng J F , Gou X H , Chen F H , *et al.* Climatic records of tree-ring width in *Picea schrenkiana* Fisch and *Larix sibirica* Ledb. Ecology and Environment 2005 ,14 (4) :460—465.

[34] Cao Y Z , Song Z W. Plant Physiology. Lanzhou : the University of Lanzhou Press ,1998. 375—383.

[35] Kang X C , Zhang Q H. The growing period of Cypress in high elevation area of the Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology ,2001 ,23 (2) :149—155.

[36] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in internal Alps. Tree-Ring Bulletin ,1993 ,53 :1—11.

[37] Peng J F , Gou X H , Chen F H , *et al.* The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledb to climatic change in eastern Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica ,2006 ,26 (8) :2723—2731.

参考文献：

[7] 王亚军 陈发虎 勾晓华 ,等. 祁连山中部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建 ,中国沙漠 2001 21 (2) :135~140.

[8] 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变化的初步分析 ,生态学报 2004 24 (1) :172~176.

[9] 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.

[10] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京 :气象出版社 ,1990. 65~75.

[14] 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.

[15] 方精云. 吉良 竜夫与生态学的发展. 生态学杂志 ,1995 ,14 (2) 70~75.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京 :高等教育出版社 2002. 84~93.

[28] 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.

[32] 刘禹 马利民. 树轮宽度对近 376 年呼和浩特季节降水的重建. 科学通报 ,1999 44 (18) :1986~1992.

[33] 彭剑峰 勾晓华 陈发虎 ,等. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录. 生态环境 2005 ,14 (4) :460~465.

[34] 曹仪植 宋占午. 植物地理学. 兰州 :兰州大学出版社 ,1998. 375~383.

[35] 康兴成 张其花. 青藏高原高海拔地区柏树生长季节的探讨. 冰川冻土 2001 23 (2) :149~155.

[37] 彭剑峰 勾晓华 陈发虎 ,等. 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. 生态学报 2006 ,26 (8) :2723~2731.