

不同生境祁连圆柏径向生长对气候变化的响应

郑永宏^{1,2} 梁尔源³ 朱海峰¹ 邵雪梅^{1,3}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所 2 中国科学院研究生院 3 中国科学院青藏高原研究所)

摘要:通过在青海都兰曲什岗地区建立不同生境的祁连圆柏树轮宽度年表及分析,揭示了不同微环境下祁连圆柏的径向生长对气候变化的响应。从标准轮宽年表的统计特征来看,森林中部年表的平均敏感度、标准差以及序列间的相关系数等统计量均高于其他地点,而凹地年表的上述统计量都较低;各序列之间的相关分析表明,无论在高頻变化还是在低频变化上,森林上限年表与其他各采样点的年表均存在较大差异,这种差异在低频变化上尤为明显;采样点轮宽年表与气候资料的相关分析表明,森林中部、下限及水分条件相对较好的凹地,树木径向生长主要与当年6月份降水量之间存在显著的正相关关系,而与同期月平均最高温度之间存在显著的负相关关系。值得提出的是,森林上限祁连圆柏的径向生长与当年7月份温度之间存在极显著的正相关关系。该研究所揭示的不同生境树木生长特性及其对气候响应的差异,一方面对于模拟不同微环境下树木生长对全球变化的响应具有重要意义,另一方面对于利用同一地区的树轮资料重建不同气候要素提供了依据。

关键词:祁连圆柏; 树轮; 不同生境; 降水; 温度

中图分类号:S718.53 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)03-0007-06

ZHENG Yong-hong^{1,2}; LIANG Er-yuan³; ZHU Hai-feng¹; SHAO Xue-mei^{1,3}. Response of radial growth of Qilian juniper to climatic change under different habitats. *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(3) 7-12 [Ch, 32 ref.]

1 Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, P.R.China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, P.R.China;

3 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, P.R.China.

Tree-ring width chronologies of Qilian juniper (*Sabina przewalskii* Kom.) at Qushigang of Dulan County, Qinghai Province are developed and analyzed to reveal the response of tree radial growth to climatic changes under different habitats. The mean sensitivity, standard deviation and correlation of chronology at the middle elevation sites are at the highest level among these sites, while those statistical parameters of chronology at the low elevation sites are at the lowest level. The results of correlation analysis among chronologies show that the chronology at the high elevation sites is quite different at both high and low frequency from other sites, especially the low frequency. The radial growth of Qilian juniper has significantly positive correlation with precipitation in June and significantly negative correlation with temperature in the same time at the middle, low and high elevation sites. It is worthy to be pointed out that radial growth of Qilian juniper has significantly positive correlation with temperature in July at the high elevation sites. The results of this study are important to simulate tree growth and its response to climatic changes under different habitats and they provide the bases for reconstructing different climatic variables at the same region.

Key words *Sabina przewalskii* Kom.; tree ring; different habitats; precipitation; temperature

收稿日期:2007-05-21

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(40671194)、“973”国家重点基础项目(2005CB422002)、中科院地理所知识创新工程(CXIOG-A05-12)。

第一作者:郑永宏,博士。主要研究方向:树轮生态学、树轮气候学。010-64889053 Email:zhengyonghong201@sohu.com 地址:100101 北京安外大屯路甲11号中科院地理所。

责任编辑:邵雪梅,研究员,博士生导师。主要研究方向:树轮气候学、气候变化。电话:010-64856495 Email:shaoxm@igsnrr.ac.cn 地址:同上。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)是青藏高原东北部干旱和半干旱区森林生态系统的重要组成部分^[1],也是我国目前已知的可用来在干旱、半干旱区建立上千年树轮宽序列的唯一天然树种^[2-5],对了解青藏高原东北部过去千年气候变化发挥着重要作用^[3-4,6]。大量的研究揭示树木的生长对气候变化的响应随地形^[7-9]、坡向^[10]与海拔高度^[11-16]等的不同而不同。在柴达木盆地东缘山地千年祁连圆柏的树轮气候学潜力得到广泛认可^[3-6,17-18],目前都认为降水是祁连圆柏生长的主要限制性气候因子^[3-6,17-18],但对于不同微环境下祁连圆柏的径向生长对气候响应的差异的了解仍然不足^[10,19]。值得提出的是,最近对青海省都兰科肖图森林上限^[19]和乌兰哈里哈图东坡上^[10]的研究都发现7月份温度对祁连圆柏生长的影响。因此,对不同微环境下祁连圆柏生长对气候响应的分析有助于从同一地区的不同树轮序列中提取多方面的气候信息。

本研究选择青海省都兰县曲什岗地区(qsg)不同地形、海拔高度、坡向上的祁连圆柏为研究对象,利用树木年代学的方法,分析了不同采样点的祁连圆柏的径向生长对气候响应的特点,为进一步挖掘祁连圆柏的气候学潜力提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况及树轮宽度指数序列的建立

本研究所用树轮资料采自青海省都兰县香日德乡曲什岗地区。据都兰气象站气象资料记录(1971—2000年),该地区干燥、少雨、多风,冬季寒冷漫长,夏季凉爽短促;年平均气温3.2℃,气温年较

差大;年平均降水量为193.9 mm,6、7月份是一年中降水最多月份。

采样点设在祁连圆柏纯林内,林木树高约3~10 m,林分稀疏,郁闭度低于0.3;坡向为阳坡或半阳坡,坡度在30°~40°之间。从采样点地表植被覆盖状况来看,本研究采样点较都兰其他采样点^[19]土壤水分条件稍好,森林上限和凹地水分条件更好。

树轮资料分别来自森林上限(qsgu)、中部(qsgm)、下限(qsql)及较低洼的凹地(qsgp),其中qsgm海拔高度并非为上、下限正中间,而是较为接近下限;qsgp由距离很近的3个小凹地组成。qsgu、qsgm、qsql取自同一条沟的同一坡面上;qsgp与上述3个样点在同一条沟,但在沟的另一个坡面上且比较靠近沟口,qsgp的海拔高度比qsql略低。树轮样芯采自胸高部位(1.3 m),一般每棵树采集2个样芯,采样点概况见表1。

按照树木年轮处理的基本程序^[20],将样芯在实验室进行晾干、固定、打磨、交叉定年及宽度量测后,利用折线图对比^[2]和COFECHA^[21]程序对定年准确性和轮宽量测质量进行控制。为消除与树龄相关的生长趋势,同时保存各序列长期气候波动信息,建立轮宽指数序列前进行生长趋势的去除。鉴于负指数函数法会有尾端放大效应以及靠近树木髓心的树轮(树木生长最初几十年)无法拟合等弊端^[22],本研究选择总体曲线法^[22]去除生长趋势。将去除生长趋势的序列以双权重平均法,通过ARSTAN^[23]程序合成标准化树轮宽度指数年表。该年表是一条均值为1的无量纲序列,其值的变化代表轮宽的相对变化。

表1 采样点概况

TABLE 1 Information of sample plots

	采样点			
	qsgu	qsgm	qsql	qsgp
北纬	36°00'38"	36°00'43"	36°00'44"	36°01'08"
东经	98°11'02"	98°11'32"	98°11'36"	98°11'55"
坡向	南	南偏东	南偏东	南偏西
海拔高度/m	4 186	3 900	3 850	3 834
样本量(株/样芯)	23/46	23/45	23/46	23/44
采集时间	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07

1.2 气候资料

采样点附近有两个气象站——都兰气象站(36°18'N, 98°06'E; 海拔3 191.1 m)和香日德气象站(36°04'N, 97°48'E; 海拔2 905.4 m),距采样点分别为32.5 km和35.5 km。鉴于香日德气象站建站时间较晚且与采样点海拔高度差距较大,本研究采用都兰气象站资料,所用气候要素是自建站以来(1954—2004年)的月平均最高气温、月平均气温、月平均最

低气温、月降水量共4种要素,并采用Mann-Kendall方法^[24]和Double-mass analysis方法^[25]对其均一性进行检验。

1.3 公共区间分析和相关分析

对各样点轮宽指数序列进行公共区间分析,所取公共时段为1641—1955年。在所用到的年表统计特征中,平均敏感度^[26]是度量相邻年轮之间轮宽变化情况的指标,用以说明树木生长对外界环境变

化的敏感程度;信噪比^[27]是指气候信号(气候方差)与非气候因素造成的噪音(非气候方差)的比值;样本总体代表性^[28]是指N条时间序列的均值与总体之间的相关程度,是一个表示子集序列对总体代表程度的统计量。

为了检查不同时间尺度上各序列间的一致性,利用相关分析方法分别对各原始序列、各原始序列一阶差分别进行分析。此外,分别计算原始序列5、10、15、21、25、31年滑动平均后各序列间的相关(相关系数从高频到低频呈下降趋势;本文只列出31年滑动平均后相关分析结果)。

本文利用相关分析方法分析了各个样点树木径向生长对前一年7月至当年9月4种气候要素(月平均最高气温、月平均气温、月平均最低气温、月降水量)的响应,以揭示不同微环境下树木生长与气候要素之间的关系。另外,为揭示年际间(高频变化)树木径向生长变化的驱动因子,对树轮宽度序列和各气候要素分别计算一阶差后再进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 树轮宽度序列

表2为各样点原始轮宽数据统计量。结果表明,径向年均生长量最大的是qsgp,其次是qsqu,最低为qsgm和qsql;从缺轮百分率看,从高到低依次为qsgm、qsql、qsqu、qsgp;从平均树龄看,从大到小依次为qsgm、qsql、qsqu、qsgp;从平均敏感度^[26]看,qsgm最高、qsgp最低。这些结果说明,凹地和上限的树木径向生长较快,而下限和接近下限地方(qsgm)的树木生长相对较差;qsgm的大树龄、高敏感度特征使其成为研究气候要素变化的最有潜力的采样点。

图1为各采样点轮宽指数组序列,各序列始自总体信号强度^[28](Eps, expressed population signal)大于0.85的年份。表3列出了它们的统计特征及公共

区间(1641—1955年)的分析结果。qsgm的多项统计特征(平均敏感度^[26]、平均标准差、序列间相关系数、信噪比^[27]、样本总体代表性^[28]、第一主成分解释方差量)较其他样点高,qsgp多项统计特征(序列间相关系数、信噪比、样本总体代表性、第一主成分解释方差量)较低。

表2 各样点交叉定年统计量

TABLE 2 Cross date statistics for sample plots

	采样点			
	qsqu	qsgm	qsql	qsgp
多年平均生长量/mm	0.285	0.245	0.245	0.350
年最大生长量/mm	1.455	1.710	1.500	2.070
标准差	0.267	0.261	0.241	0.332
一阶自相关	0.741	0.729	0.757	0.765
平均敏感度	0.278	0.354	0.303	0.268
缺轮百分率/%	0.270	1.090	0.440	0.240
序列起止年	874—2004	847—2006	971—2004	1241—2006
平均树龄/a	488	579	553	436

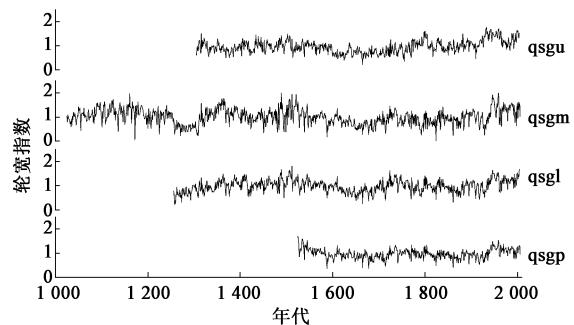


图1 曲什岗各样点树轮宽度标准年表

FIGURE 1 Standard chronologies of tree-ring width for sample plots at Qushigang (qsg)

2.2 序列间的关系

表4为各样点在1641—1955年公共区间内原序列、原序列一阶差以及原序列31年滑动平均后序列间的相关系数。对于原序列,qsgm、qsql、qsgp三者之间具有极其显著的相关关系,而它们与qsqu的相

表3 轮宽指数组序列统计特征及公共区间(1641—1955年)分析结果

TABLE 3 Statistics of tree-ring width indices and results of common interval analyses (1641—1955)

各序 列统 计量		qsqu	qsgm	qsql	qsgp
	均值	1.045	1.057	0.967	1.104
公共 区间 分析 结果	平均敏感度	0.194	0.249	0.204	0.187
	平均标准差	0.327	0.389	0.260	0.388
	一阶自相关系数	0.689	0.685	0.596	0.638
	SSS(年/样芯)	1 309/8	967/6	1 118/8	1 504/111
	样本量(株/样芯)	16/29	15/28	18/34	21/36
	所有样芯平均相关系数	0.35	0.433	0.364	0.253
	树间相关系数	0.336	0.421	0.356	0.243
	树内相关系数	0.773	0.759	0.644	0.701
	信噪比	15.644	21.357	19.477	12.224
	样本总体代表性	0.94	0.955	0.951	0.924
	第一主成分解释方差量/%	40.1	47.1	39.3	28.7

注:SSS为Subsample Signal Strength,子样本信号强度^[28],表示样本对理论序列的代表性为85%时的最早年份和样本量。<http://www.cnki.net>

关关系均明显下降;各序列一阶差后,序列间相关均有所升高,qsgu仍与其他样点存在明显差异;31年滑动平均后,各序列间的相关性明显降低,其中qsgu与qsgl、qsgp之间以及qsgm与qsgp之间相关系数的下降都较明显。

表4 轮宽序列在公共区间(1641—1955年)不同时间尺度上的相关分析($P<0.001$)

TABLE 4 Correlation analyses of ringwidth series in different time scales of common interval(1641—1955)($P<0.001$)

	qsgm	qsgl	qsgp	计算方法
qsgu	0.412	0.439	0.477	
qsgm		0.872	0.784	原序列
qsgl			0.854	
qsgu	0.585	0.661	0.673	
qsgm		0.900	0.874	原序列一阶差
qsgl			0.907	
qsgu	0.406	0.227	0.320	
qsgm		0.774	0.454	原序列 31 年滑动平均
qsgl			0.743	

2.3 树木径向生长与气候变化之间的关系

图2为各采样点轮宽序列与都兰气象站4种气候要素的相关分析结果。由图2可知,qsgm、qsgl、qsgp轮宽指数与6月份降水量都具有显著正相关关系,而与同期的月均最高气温和月均气温之间存在显著的负相关关系;与其他年表不同的是,qsgu年表与前一年7、11月份及当年7月份3种气温要素之间均存在显著的正相关关系。此外,qsgu年表还与上年9月份的月平均温度之间存在显著的正相关关系。上述结果表明,4个采样点上祁连圆柏的径向生长对气候要素的响应呈现两种不同的模式。

图3为轮宽序列和气候资料分别一阶差之后相关分析结果,qsgm、qsgl、qsgp年表与生长季当年夏季各气候要素的相关关系与一阶差之间较为相似,而它们与前一年9月份的月均最低气温、降水以及前一年10月份各温度要素的相关系数有所升高;对于qsgu,年表与生长季前一年10、11月份以及生长季当年2、7月份各温度要素相关较高。这些结果表明,在高频变化上,qsgm、qsgl、qsgp树木径向生长除了受当年夏季各气候要素的年际变化影响外,前一年9月份月均最低气温、降水以及前一年10月份各气温要素的年际变化对其也有很大影响;而对于qsgu样点,各温度要素是树木生长的主要限制性气候因子。

3 讨论

一般来说,在半干旱地区树木径向生长的平均宽度,随着向森林下限靠近而减小^[26],但Fritts等在美国亚利桑那州旧金山山脉对不同海拔高度的树

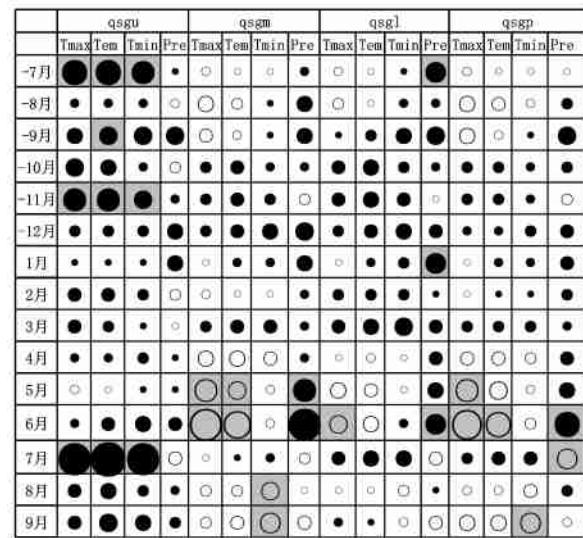


图2 qsg 各采样点标准轮宽序列与都兰气象站4种气候要素的相关分析结果

FIGURE 2 Correlation analyses of four climate variables from Dulan Weather Station and standard ringwidth series of sample plots at qsg

注:负号(—)为前一年的月份,实心圆为正相关系数,空心圆为负相关系数,阴影标注的方格为大于95%的置信区间。最小圆为相关系数绝对值在0~0.05,相关系数每隔0.05增加一级。Tmax为月均最高气温,Tem为月均气温,Tmin为月均最低气温,Pre为月降水量。下图同。

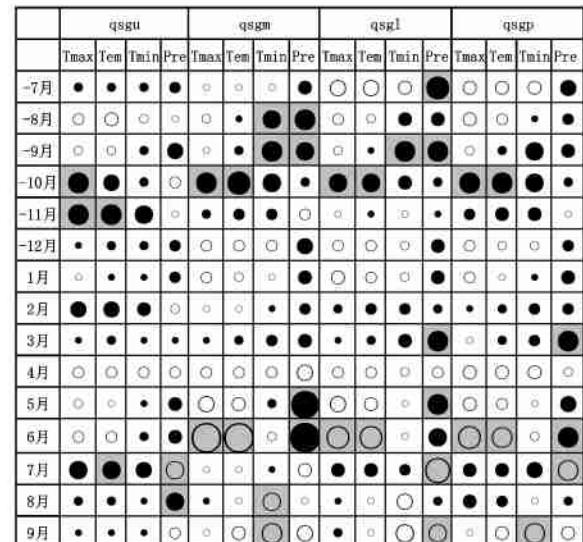


图3 qsg 各采样点标准轮宽序列与都兰气象站4种气候要素分别一阶差后相关分析结果

FIGURE 3 First-difference correlation analyses of standard ringwidth series at qsg and four climate variables from Dulan Weather Station

轮资料研究发现,在半干旱区自森林中部至森林下限,样点的位置(引起水分条件变化)和树木的年龄结构同时影响着轮宽的变化规律。而本研究的结果也说明这一点,如qsgp、qsgu由于其较好的水分条件和较短的树龄,具有较高的平均轮宽。

树轮年表统计特征指示了不同采样点微环境的差异。与qsgu和qsgp相比,qsgm和qsgl树轮年表具

有较高的平均敏感度和较高的树轮序列间的相关系数。祁连山中部青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)^[30]及都兰祁连圆柏^[19]的研究也发现森林下限轮宽序列较上限轮宽序列有更高的平均敏感度。对乌兰青海云杉及祁连圆柏^[10]的研究发现,与东坡相比,西坡上树木的生长具有更高的平均敏感度。上述不同采样点上树木生长敏感度的差异都反映了不同采样点水分条件的差异。我们的研究也反映了qsgu、qsgp比qsgm、qsgl样点具有较好的水分条件。原序列一阶差、原序列、原序列31年滑动平均后各序列间的相关分析表明,不同微环境下树轮年表的一致性主要体现在高频变化上,而在低频变化上差异较大。另一方面,无论在高频还是低频变化上,qsgm、qsgl、qsgp具有较强的一致性,而qsgu与这3个样点具有明显的不同,这暗示了森林上限祁连圆柏径向生长的限制性气候因子可能与其他3个样点存在差异,与气候要素的相关分析也揭示了这一点。

年表与气候要素的相关分析表明,qsgm、qsgl、qsgp与qsgu具有明显不同。前者的共同特征是树木径向生长与6月份降水显著正相关,与同期月平均最高气温显著负相关,一般情况下,这说明土壤水分以及蒸发、蒸腾作用影响上述3个样点的树木生长。这与先前诸多研究结果^[3-6, 17-18]具有较强一致性。而后者树木径向生长与生长季前一年7、11月份以及生长季当年7月份温度的显著正相关说明了温度影响上限树木生长。这种影响在前期的都兰^[19]和乌兰树轮研究中^[10]都有发现,但在本研究中最为显著。考虑到qsgu较其他研究^[10, 19]上限样点具有更高的海拔高度,这恰说明海拔高度是影响树种分布的一个关键因素,和纬度一样体现在温度变化上,在森林上限温度成为树木径向生长的主要限制性气候因子^[15-16]。

前面已述,与原序列相比,各年表一阶差序列间相关系数都有所提高。这可能是由于研究区温度、降水在高频变化上一致性较强,而在低频变化上一致性较差所致。对比各年表一阶差序列与气候要素的相关分析结果,可以发现,4个样点一阶差序列均表现出对前一年10月份温度的正相关,这表明各年表高频变化上的共性可能缘自于树木径向生长对前一年10月份温度的响应。这是因为在适宜气候条件下,10月份光合作用仍会进行,而这时候生长过程基本结束,糖分被贮存下来,第2年生长季开始的时候得以利用^[31];此外,秋季适宜的气候条件促进叶、嫩枝、芽的成熟,使其在冬季有足够的气候抵抗能力^[32]。另一方面,可以看出,qsgm、qsgl、qsgp3个样点一阶差序列表现出对生长季当年5、6月份降

水较强的正相关和对同期温度的负相关,这解释了这3个样点之间在高频变化上一致性更强的原因。

综上,无论是年表间一致性还是与气候要素的关系,qsgu与其他3个样点均存在明显差异。qsgu较其他样点最明显的特征是处于森林上限,具有最高的海拔高度,这表明在该区森林上限以下某一高度存在一高度阈值,这一高度处的水热组合恰好达到树木径向生长对气候响应发生转变的阈值。

4 结 论

本研究基于青海都兰曲什岗地区不同地形、不同海拔高度、不同坡向祁连圆柏轮宽指数序列,通过各序列之间以及与气候要素进行比较分析,得到以下主要结论:

1) 森林上限树轮宽度指数序列的变化同其他3个样点有比较大的差异。这种差异在低频变化上较大,在高频变化上较小。

2) 不同海拔高度树木径向生长对气候的响应不同。在森林上限,树木径向生长主要正响应7月份温度变化,对生长季前一年7、11月份温度变化也有较明显正响应;其他各样点树木径向生长,包括水分条件相对较好的凹地,主要正响应6月份降水的变化,与同期温度变化的关系相反。

3) 4个样点树木径向生长在高频变化上的共性可能缘自于树木径向生长对生长季前一年10月份温度的正响应。

4) 在柴达木盆地东缘山地水分条件相对较好的地区,通过合理采样,有从森林上限轮宽变化中提取温度变化信号的潜力。

致谢 对海西州林业部门以及国家气候中心黄磊的大力支持表示感谢,张永香、李雁等参加野外取样。

参 考 文 献

- [1] 青海森林编辑委员会. 青海森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993; 230.
- The Editing Committee of Forest in Qinghai. Forest in Qinghai [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993; 230.
- [2] 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[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 90-100.
- SHAO X M, FANG X Q, LIU H B, et al. Dating the 1 000-year-old Qilian juniper in mountains along the eastern margin of the Qaidam Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 90-100.
- [3] ZHANG Q B, CHENG G D, YAO T D, et al. A 2 326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1 739-1 742.
- [4] LIU Y, AN Z S, MA H Z, et al. Precipitation variation in the northeastern Tibetan Plateau recorded by the tree rings since 850 AD and its relevance to the Northern Hemisphere temperature [J]. Science in China Series (Earth Sciences), 2006, 49(4): 408-420.

- [5] ZHANG Q B, QIU H Y. A millenium-long tree-ring chronology of *Sabina przewalskii* on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Dendrochronologia*, 2007, 24: 91-95.
- [6] SHAO X M, HUANG L, LIU H B, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1 000 years in Delingha, Qinghai [J]. *Science in China Series (Earth Sciences)*, 2005, 48(7): 939-949.
- [7] OBERHUBER W, KOFLER W. Topographic influences on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at small spatial scales [J]. *Plant Ecology*, 2000, 146(2): 231-240.
- [8] BELLINGHAM P J, TANNER E V J. The influence of topography on tree growth, mortality, and recruitment in a tropical montane forest [J]. *Biotropica*, 2000, 32(3): 378-384.
- [9] LI M H, YANG J. Effects of microsite on growth of *Pinus cembra* in the subalpine zone of the Austrian alps [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(4): 319-325.
- [10] LIANG E Y, SHAO X M, ECKSTEIN D, et al. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236: 268-277.
- [11] BUCKLEY B M, COOK E R, PETERSON M J, et al. A changing temperature response with elevation for *Lagarostrobos franklinii* in Tasmania, Australia [J]. *Climatic Change*, 1997, 36(3-4): 477-498.
- [12] ZHANG Q B, HEBDA R J. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 2004, 34(9): 1 946-1 954.
- [13] LAMARCHE V C. Frequency-dependent relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendrochronological implications [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1974, 34: 1-20.
- [14] SPLECHTNA B E, DOBRY J, KLINKA K. Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) in relation to elevation and climatic fluctuations [J]. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(2): 89-100.
- [15] PAULSEN J, WEBER U M, KORNER C. Tree growth near treeline: Abrupt or gradual reduction with altitude? [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2000, 32(1): 14-20.
- [16] MAKINEN H, NOJD P, KAHLE H P, et al. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(3): 243-259.
- [17] 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 等. 柴达木盆地东北部过去 1437a 的降水变化重建[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 122-126.
- SHAO X M, LIANG E Y, HUANG L, et al. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the northeastern Qaidam Basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 122-126.
- [18] SHEPPARD P R, TARASOV P E, GRAUMLICH L J, et al. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China [J]. *Climate Dynamics*, 2004, 23(7-8): 869-881.
- [19] 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 [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(3): 278-285.
- [20] STOKES M A, SMILEY T L. *An introduction to tree-ring dating* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968: 1-73.
- [21] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [22] XU Y, SHAO X M. Standardization of Qilian juniper ring-width series in the eastern margin of the Qaidam Basin [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(2): 175-186.
- [23] COOK E R, PETERS K. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, 41: 45-53.
- [24] MANN H B. Non-parametric test of randomness against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [25] KOHLER M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustment [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1949, 30: 188-189.
- [26] FRITTS H C. *Tree Rings and Climate* [M]. London: Academic Press, 1976: 257-300.
- [27] HUGHES M K, KELLY P M, PILCHER J R, et al. *Climate from tree rings* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982: 25-27.
- [28] WIGLEY T M L, BRIFFA K R, JONES P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23: 201-213.
- [29] FRITTS H C, SMITH D G, CARDIS J W, et al. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona [J]. *Ecology*, 1965, 46(4): 393-401.
- [30] GOU X H, CHEN F H, YANG M X, et al. Climatic response of thick leaf spruce (*Picea crassifolia*) tree-ring width at different elevations over Qilian Mountains-northwestern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(4): 513-524.
- [31] PFEIFER K, KOFLER W, OBERHUBER W. Climate related causes of distinct radial growth reductions in *Pinus cembra* during the last 200 yr [J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2005, 14(3): 211-220.
- [32] BAIG M N, TRANQUILLINI W. The effects of wind and temperature on cuticular transpiration of *Picea abies* and *Pinus cembra* and their significance in dessication damage at the alpine treeline [J]. *Oecologia*, 1980, 47: 252-256.

(责任编辑 赵 劲)