

阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应

彭剑峰^{1,2}, 勾晓华¹, 陈发虎¹, 张永香³, 刘普幸^{1,4}, 张 永¹, 方克艳¹

(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. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

4. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 通过对阿尼玛卿山地 5 个坡面 20 个祁连圆柏树轮宽度标准年表的分析, 发现公共区间内各树木年轮宽度标准年表中的信噪比 SNR 和样本总解释量 EPS 值都较高, 说明年表中都含有较强的环境信息; 树轮宽度年表之间的平均相关为 0.35 (大多达到 95% 的置信程度), 具有较好的区域一致性。聚类分析使树木年轮宽度年表分成东、西两大部分, 而年表的第一主分量显示出: 西部树轮的指数序列明显长于东部即树木生长有自西向东扩展的趋势, 并且东、西区域树木生长变化的特征年变化具有同步性。东、西树轮宽度年表中第一主分量和第二主分量与气候因子的相关和响应都表现出一定的相似性, 但第二主分量对气候因子响应的差异性更显著。西部树木生长 PCI 的主要限制因子是温度, 尤其当年春夏初及前一年秋季温度影响最大, 同样降水也起着重要的作用, 西部树木生长 PC2 的主要限制因子是降水量; 而东部树木生长 PC1 主要受降水的制约, 第二主分量 PC2 的响应分析显示出气候的滞后影响 (树木前期生长) 是非常重要的限制因子。

关键词: 祁连圆柏; 树木年轮宽度年表; 聚类分析; 主成分分析; 气候响应

1 引言

青藏高原地区站点稀少且观测历史较短, 它们尚不能包含气候因子及生态变化过程在长时间尺度上的变化规律。高分辨率的树木年轮记录就成为解决该问题的最有效手段之一。树木年轮资料以其具有定年准确、分辨率高、连续性强、树轮宽度量测精确和地域分布广泛等特点^[1,2], 在全球变化研究中已被广泛应用^[3-6]。

目前, 越来越多的树木年轮气候学家开始将气候要素的重建工作从点向面上转移, 采用众多地点的树木年轮资料着手重建空间上大尺度的气候要素变化, 以探讨较大范围内的气候变化特征和环境演变的差异, Fritts^[7]就这一问题还专门论述了从众多地点的树木年轮资料中重建大尺度气候变化类型的可能性、主要途径和基本方法。而环境或植被的梯度分析可以揭示植被时空分布和动态规律, 当前在国际上利用树木年轮手段研究树木生长水平环境梯度^[8-10]的已经不少, 如 Jacoby 等^[8]在阿拉斯加地区沿南北方向利用白云杉 (white spruce) 分析了本区过去 300 年的气候变化; Macias 等^[12]利用芬诺斯堪迪纳北部东西方向的 21 个赤松 (Scots pine) 采样点, 建立网络并分析了树木生长变化的时空分布, 最后探讨了树轮生长对 NAO 响应的差异。近年来, 我国树轮学者在青藏高原建立了若干

收稿日期: 2006-11-16; 修订日期: 2007-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671191); 国家自然科学基金创新群体基金项目 (40421101) 国家自然科学基金重点项目 (90502008)、教育部“新世纪优秀人才支持计划” (NCET-05-0888) 和高等学校学科创新引智计划 (B06026) 资助 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40671191, No.40421101; Chinese NSFC Innovation Team Project (No.40421101), Program for New Century Excellent Talents in University (No.NCET-05-0888), Chinese 111 Project (No.B06026)]

作者简介: 彭剑峰 (1965-), 男, 河南邓州人, 在读博士, 主要从事环境变化和树木年轮研究。E-mail: jfpeng@lzu.edu.cn

通讯作者: 勾晓华 副教授, E-mail: xhgou@lzu.edu.cn

条上千年甚至超过 2000 年的树轮宽度年表,并较好地指示了千年来的气候变化^[15-24],但利用树轮网络进行区域研究的相对较少。如 Brauning^[25]利用祁连圆柏树轮网络重建了西藏高原近千年的气候变化历史;邵雪梅等^[20]在柴达木盆地东缘山地建立了千年祁连圆柏的树木年轮网络,并重建了过去千年以来的上年 7 月至当年 6 月的年降水量变化历史;而梁尔源等^[26]尝试利用青藏高原东北部的祁连圆柏、内蒙古中部的油松和关中地区的华山松建立的树轮网络,分析了中国中西部 20 世纪 20 年代的干旱事件;其他还有袁玉江等^[27]利用天山西部伊犁地区的 10 个树轮年表重建了 314 年的上年 6 月至当年 5 月的年降水历史;Liu 等^[28]利用额济纳旗胡杨的树轮年表网络分析了近年来胡杨的种群退化可能与地表水下降有关。树轮网络的建立有利于对区域变化响应甚至对全球变化响应的研究。

阿尼玛卿山地位于黄河源自然保护区的核心地带,是黄河上游的主要水源补给区,气候的变化和植被的演替对青藏高原的环境变迁、黄河上下游的水文变化乃至全球气候环境变化都有着非常重要的影响,阿尼玛卿山又是祁连圆柏 (*Juniperus przewalskii*) 分布的最南界限和最高界限(最上界为 4300 m,见于马可河林区,仅零星分布多不成林)^[29],因此是气候变化的敏感区,在全球变化研究中有其特殊性。本研究就是利用阿尼玛卿山地自东向西不同采样点的祁连圆柏树木年轮宽度年表网络,分析其树木生长特征及对气候因子的不同响应,以利于树轮气候学研究的采样点选择,同时也为森林动态研究和森林管理提供一些理论基础,为区域或全球气候变化提供基本的研究方法。

2 研究数据和研究方法

2.1 研究区概况

阿尼玛卿山地位于青海省东南部,属于季风与非季风、半湿润与半干旱、暖带与亚寒带的交界地带,该地区夏季受东南季风系统和西南季风系统的交互作用,冬季受来自蒙古—西伯利亚高压的寒冷气流和高空西风环流的影响,加上青藏高原本身的冷热源及产生的高原季风的加强作用^[30],使研究区内气候环境敏感,生态条件复杂。阿尼玛卿山按照气候区划的指标属于高原亚寒带湿润半湿润气候^[31]。该研究区内年平均气温 0.5~3.9 °C,最暖月平均气温 11.0~14.2 °C,≥0 °C 期间积温 1402.4~2006.0 °C,年降水量 477.4~621.1 mm。四季不分明,仅有冷暖季之别,冷季(10 月至翌年 5 月)长达 8 个月,较干旱,日照强,多大风降雪天气;暖季(6 月至 9 月)4 个月,多雷、雹、雨天气,夏季降水占全年降水量的 56%-62%,冬季降水稀少,夜雨较多,气候明显受到东亚季风的影响。加上垂直高差和地形影响以及阿尼玛卿峰的拦截作用,就水热条件而言,山体东部相对高于西部(温度高约 4 °C 左右,相对湿度高约 18%)^[31]。祁连圆柏在阿尼玛卿山地主要分布在河北林场、羊玉林场和中铁林场三大林区(图 1),林内结构比较简单,一般乔木层为单层纯林;林木低矮,林冠稀疏,树木生长缓慢,材积量小,在一些疏林分布区树龄可达千年以上,主要分布在海拔 3400~3800 m 山地阳坡和半阳坡。

2.2 野外采样和年表建立

本研究选择东西不同区域的 5 个坡面的 20 个采样点(图 1)来分析不同地域气候对祁连圆柏树木径向生长的影响。采样遵循树轮气候学基本原理^[19],按照敏感性原则、生态环境原则和复本原则等^[1],分别在河北林场的东部(HHB)和南部(HBS)、羊玉林场(分别记作 YYA 和 YYC)和中铁林场(DQ)进行采样。除河北林场的东部(HHB)采用 20m×30m 的样方外,其余都采用样带(带内高差一般在 15 m 左右,带间高差大多在 50~100 m 之间)采样,每个坡面除上下限外,森林中部设 2~3 个带,每个带采样至少 20 株树,通常每树在胸径位置的不同方向取两芯。

样品预处理严格按照 Stokes 和 Smiley^[32]阐述的基本方法进行,经晾干,固定后,进

行打磨。在“骨架示意图”法进行初步定年的基础上,对测量后的树轮样本序列值借助计算机程序 COFECHA^[33]和折线图进行验证。最后通过 ARSTAN 程序^[34]采用负指数函数或线性函数拟合去掉树木本身遗传因子产生的生长趋势,对树木之间干扰竞争产生的抑制和释放等的生长趋势利用样条函数去除,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。其中少数样本选择了步长为样芯序列长度 2/3~1/2 的样条函数去趋势^[35],这样既能去掉生长趋势又保留更多的低频变化信息,最终分别建立了三种树轮年表即标准化年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。本文以树轮宽度的标准化年表(STD)作为研究对象。

2.3 气象数据

阿尼玛卿山区采样点附近的 5 个气象站点分别是(图 1,表 1):兴海(XH)、同德(TD)、河南(HN)、玛沁(MQ)和玛多(MD)。各站点 7 月的降水最多,平均温度最高,水热同期(图 2);且各站点 5-9 月的月均温度在 5℃ 以上,月降水在 40 mm 以上(玛多 5 月除外)。从表 1 可知:阿尼玛卿山地降水量从东到西,即沿着河南—玛沁—玛多和河南—同德—兴海的方向都是依次减少,这正是东南夏季风减弱的方向。为了选取能代表区域特征的气象数据,本研究分别对 5 个气象站点的多年月平均气温、多年月平均降水量、年平均气温和年总降水量做相关分析,最终选取距离采样点较近且相互之间相关性较高的同德、兴海和玛沁三气象站;

为了避免气象站由于仪器更新或站点的迁移造成的误差以及气象站点的位置影响,本研究选取了同德、兴海和玛沁

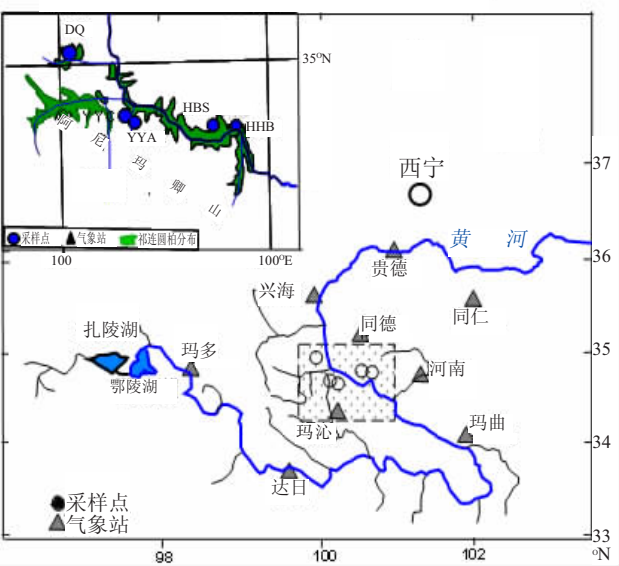


图 1 树木年轮采样点和附近气象站点分布示意图
Fig. 1 Map of tree-ring sampling sites and meteorological stations

表 1 各气象站位置和年均气温和年均降水量 (1959–2001 年)
Tab. 1 Summary of meteorological stations and annual mean temperature and precipitation (1959–2001)

站名	经度	纬度	海拔高度/m	年均气温/℃	年均降水/mm
玛多	98°13'E	34°55'N	4273.2	-3.88	312.2
玛沁	100°15'E	34°28'N	3720.0	-0.53	506.4
河南	101°36'E	34°44'N	3500.0	0.25	583.4
同德	100°39'E	35°16'N	3290.4	0.46	422.0
兴海	99°59'E	35°35'N	3324.3	1.23	350.6

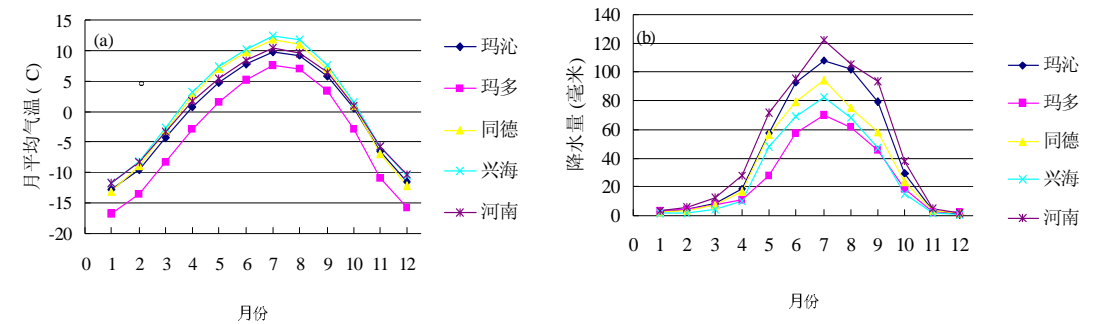


图 2 阿尼玛卿山各气象站气温和降水量年内分配图

Fig. 2 Mean monthly temperature and total monthly precipitation at meteorological stations of the Anyemaqen Mountains

三气象站的数据平均值来代表区域气候特征。

2.4 研究方法

本文利用聚类分析和主成分分析^[36]的分析方法。利用 SPSS 软件提供的聚类分析将5个坡面的不同采样点进行区域层次分类^[37]，再利用主成分分析来归纳出不同区域年表中包含的树木径向生长的共同区域变化特征^[38]；在主成分分析结果中每一个年表的权重或载荷表达了某一采样点与主成分间的生长特征关系：权重越高关系越密切^[39]。主成分分析使用 PCA 软件^[40]，整体区域分析中采用 20 个树木年轮宽度年表的共同区间 1844-2002 年进行分析；对于东西区域年表的分析则采用不同的共同区间，以分析出树木生长的区域差异。

本研究利用树木年轮学分析软件 Dendro2002^[41]和 PRECON^[42]分别对不同区域树木年轮年表的第一、二主分量与气候因子进行简单相关函数和响应函数分析。两种分析方法都选用前一年 7 月到当年 10 月的月平均气温和月降水量，响应分析中显著性检验用 Bootstrap 方法^[43]随机执行 500 次，以分析不同区域树木年轮中记录的信号差异。

3 结果与讨论

3.1 树木年轮年表的特征分析结果

树木年轮标准年表的序列统计特征值及共同区间分析结果如表 2 所示，S.D.代表标准差，M.S.代表树木对气候因子响应的平均敏感度，二者是度量所有样本之间包含共有信息多少的量，代表一阶自相关系数的 A.C 则反映了序列中树木前一年生长对当年的影响，SNR 为信噪比，EPS 为样本对总体的解释信号。由于研究区属于高原亚寒带湿润半湿润气候^[31]，树木生长环境差异不大，其树轮宽度年表的平均敏感度 (M.S.) 普遍不高，只有几处环境相对干燥的采样点偏高。对于公共区间 (1900-2000 年) 的统计指标，除 HHHB 点的 SNR、EPS 统计量的数值较小外，其余 19 个采样点的 SNR、EPS 统计量的数值都较高 (EPS 大于 0.8)，则表明所选样本的群体代表性越好即序列的共性较强，环境信息含量较大，说明受环境因子的影响就较强。

20 个树轮宽度年表之间的平均相关为 0.35，且大多都达到 95%的置信程度。其中最高的相关值为 0.833 ($n = 159$, $p = 0.000$)，是两个距离较近、海拔差别不大、采样环境基本一致的 YYCL 和 YYAH 采样点，而处于同一坡面的 YYCL 和 YYCML 两采样点之间的相关也只有 0.818 ($n = 159$, $p = 0.000$)；年表之间的最低相关值为 -0.179 ($n = 159$, $p = 0.024$)，存在于 YYCH 和 HBSL 之间，YYCH 位于中西部采样点的上限且海拔最高，而 HBSL 位于东部一采样坡面的下限但不是该研究区海拔最低的采样点，二者的水平距离不足 100 km，垂直高差也仅 300 多米。如此大的差异从采样环境上看，主要是因为位于上限的 YYCH 环境相对湿润，而位于下限的 HBSL 相对比较干燥，这与山地降水的分布在一定范围内随海拔升高而逐渐增加有关。

3.2 不同区域树木的生长特征

3.2.1 聚类分析结果 聚类分析的分层结果显示，五个坡面的一些采样点虽然有交叉现象，但整体上仍保持坡面的完整性，由此可以看出影响每一坡面树木生长的大环境因素是基本相同的。5 个坡面 20 个采样点的树木年轮宽度标准年表的聚类分析结果明显地分为东西两大部分：坡面 DQ、YYC 和 YYA 属于一组，位于阿尼玛卿山地西部；坡面 HBS 和 HHHB 属于一组，位于阿尼玛卿山地东部。

3.2.2 主成分分析结果 20 个标准年表在公共区间内 (1844-2002 年) 的主成分分析结果显示有 5 个主要因素影响该地区树木的生长，他们的总解释量为 78.309%，其中载荷最高的第一主分量的解释量为 39.502%，第一、二主分量之和占 54.376% (图 3)。第一主分量都是正值表明影响该区域的主导因子是一致的，第二主分量的载荷明显地分为两部分，

表 2 采样点概况及树轮标准年表的特征值和公共区间的统计指标 (1900–2000 年)

Tab. 2 Summary of sampling sites and characteristics of standard chronologies and statistic results at common interval (1900–2000)

采样点序号		海拔 高度 /m	经度/纬度	坡 向	序 列 长/年	样 本 量/个	SSS>0.8 起始年 (芯)	标准年表 STD			公共区间	
								MS	SD	AC	1900 - 2000 年 SNR	EPS
中 铁 DQ	1 DQH	3755	100°04'05"E	东	572	50	1551 (12)	0.128	0.179	0.601	10.221	0.911
	2 DQMH	3665	35°00'05"N		707	44	1329 (9)	0.150	0.219	0.647	11.012	0.917
	3 DQML	3602			686	44	1355 (6)	0.141	0.213	0.646	18.403	0.948
	4 DQL	3525			917	34	1178 (7)	0.220	0.276	0.537	7.530	0.883
羊 玉	5 YYCH	3845	100°20'10"E	南	388	26	1836 (8)	0.136	0.209	0.641	5.682	0.850
	6 YYCMH	3710	34°48'01"N		317	25	1745 (7)	0.134	0.139	0.235	8.835	0.898
YYC	7 YYCML	3625		东	479	41	1578 (5)	0.179	0.188	0.328	16.581	0.943
	8 YYCL	3400			613	42	1456 (5)	0.313	0.299	0.353	11.170	0.918
羊 玉	9 YYAH	3480	100°20'20.5"E	南	618	22	1399 (4)	0.318	0.311	0.368	9.661	0.906
	10 YYAM	3430	34°47'13"N		535	19	1472 (5)	0.170	0.205	0.502	4.082	0.803
YYA	11 YYAL	3390			394	20	1740 (7)	0.138	0.197	0.584	5.140	0.837
河 北 南	12 HBSH	3730	100°43'33"E	西	198	29	1849 (8)	0.136	0.182	0.567	5.542	0.847
	13 HBSMH	3650	34°43'32"N		227	32	1802 (9)	0.108	0.162	0.598	7.912	0.888
	14 HBSML	3580			262	27	1811 (9)	0.108	0.162	0.662	7.043	0.876
HBS	15 HBSL	3520			507	35	1740 (10)	0.173	0.190	0.331	9.242	0.902
河 北 东	16 HHHBH	3580	100°49'56"E	南	210	24	1827 (7)	0.169	0.198	0.387	3.856	0.794
	17 HHBMH	3500	34°42'42"N		216	33	1800 (4)	0.250	0.255	0.365	18.625	0.949
	18 HHBM	3430			212	30	1798 (5)	0.172	0.181	0.270	13.615	0.932
HHB	19 HHBML	3360			188	23	1860 (7)	0.173	0.204	0.435	8.356	0.893
	20 HHBL	3300			161	34	1853 (4)	0.150	0.199	0.552	16.548	0.943

正值部分 (1-11 序号年表) 都是西部生长的树木年轮年表, 而负值部分 (12-20 序号年表) 则是东部的树轮年表, 这与聚类分析结果是一致的。基于这些差异, 本文分别就第一、二主分量对气候因子的响应做对比。

对阿尼玛卿山地东西不同区域采样点的年表进行主成分分析, 发现东西区域年表的主分量的载荷和方差 (总解释量) 结果大体相当 (表 3)。西部 11 个年表的前三个主成分的总解释量为 76.105%, 其中第一主分量占 50.161%, 而东部 9 个年表的前三个主成分的总解释量为 79.852%, 其中第一主分量占 54.238%。显然, 东西各区域树木生长的第一主分量都高于整个区域的第一主分量 (39.502%), 这正是区域差异的表现。

阿尼玛卿山地东西区域的树轮年表第一主分量曲线 (图 4) 表现出两点显著差异: 西部树木年轮的指数序列明显长于东部, 即西部整体树龄老于东部, 说明树木生长有自西向东扩展的趋势; 东西树木生长变化的高频 (特征年) 基本一致但也存在一定的差异性。从第一主分量的极端值 (> 4 或 < -4 的数值) 分布可以发现, 在相同时段内, 无论东部还是西部, 负极端值出现的次数都比正极端值多, 且负极端数值强度大, 表明灾害性事件

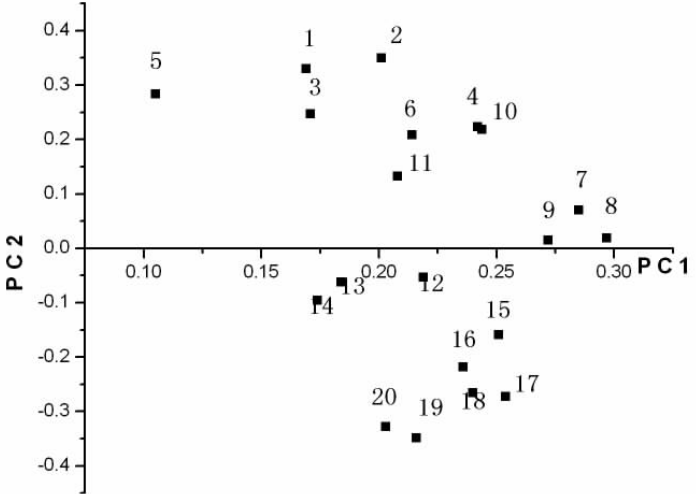


图 3 树木年轮宽度年表的主分量 (PC1 和 PC2) 分布图

Fig. 3 Distribution of PC1 and PC2 from 20 ring-width standard chronologies

影响较大;但东西部负极端值分布也存在一定的互补性,东部的负极端较大的年份,西部也出现但数值一般都较小 (> -4),而西部负极端较大的年份东部一般都较小。表明在大多数情况下,阿尼玛卿山地灾害事件的发生具有普遍性,但灾害破坏程度在山地东西区域存在着一定差异。

3.3 树木生长对气候因子的响应分析

3.3.1 阿尼玛卿东西区域年表 PC1 对气候因子的响应差异 本研究重点分析阿尼玛卿山地东西区域树木年轮宽度标准年表的第一、二主分量与气候因子的相关来探讨树木生长对气候因子的响应差异。为了更好地分析树木生长与气候因子的关系,本文采用五种气候因子与年表做相关关系分析 (图 5)。

西部树木年轮标准年表的第一主分量与气候因子的相关分析结果 (图 5a) 显示,树木生长与当年 5 月的平均气温呈显著的负相关,与当年 5 月和前一年 8-10 月的降水呈显著的正相关,表明 5 月气温的回升往往导致土壤蒸发旺盛,这时的降水可以缓解水分的不足利于树木的生长^[44];阿尼玛卿山地西部降水量明显少于东部,前一年 8-10 月充足的降水利于秋冬季节保持土壤水分,供下一年树木生长需要。平均高温和蒸发量对树木生长的影响较为一致,主要反映在两个时期:当年的 4-6 月和前一年的 8-10 月,这两个时期的高温蒸发旺盛易引起树木生长过程中水分的不足,抑制树木生长;低温的影响主要在

表 3 阿尼玛卿山地东西区域各年表的主成分分析结果
(公共区间如表)

Tab. 3 Principal component analysis of chronologies in the eastern and western Anyemaqen Mountains						
	11 个西部年表 (1686-2002 年)			9 个东部年表 (1844-2004 年)		
主成分	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
载荷	5.518	1.734	1.120	4.881	1.379	0.926
总解释量	50.161	15.763	10.182	54.238	15.323	10.291
累积解释量	50.161	65.924	76.105	54.238	69.561	79.852

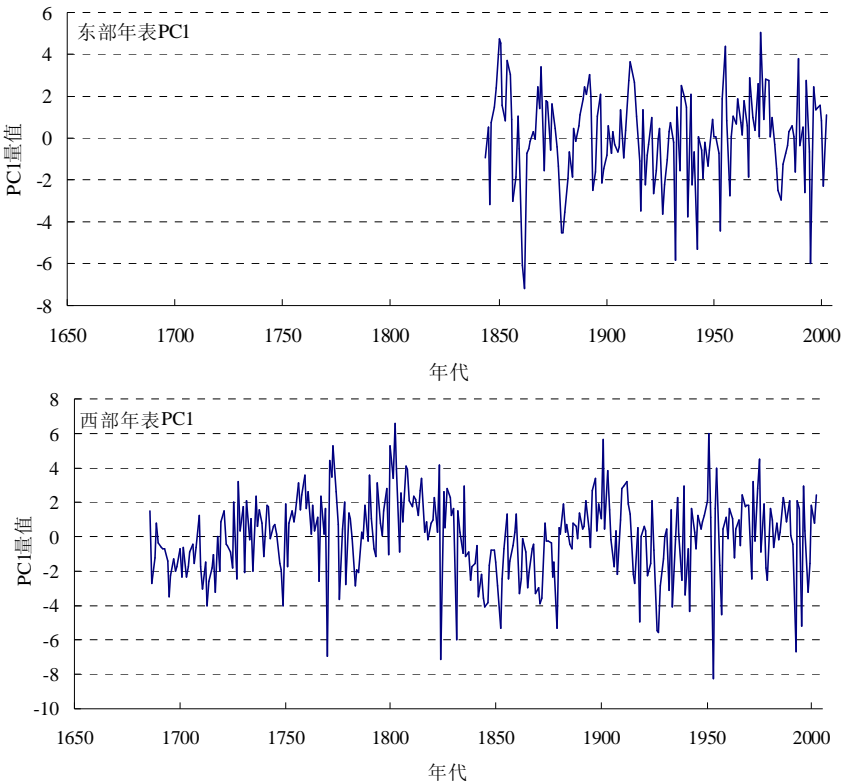


图 4 阿尼玛卿山地东西两地树木年轮宽度年表 PC1 的差异
Fig. 4 Different PC1 from standard ring-width chronologies in the Anyemaqen Mountains

冬季的 1-2 月，在未突破低温限制的阈域之内，低温抑制呼吸作用的进行，使冬季处于休眠状态的树木消耗大大减少，相应有利于营养物质的积存，形成较宽的树木年轮。

同样东部树木生长与气候因子的相关也表现出一定的规律 (图 5b)：5 月平均气温对树木生长的影响最大；当年 5 月和前一年 8、10 月的降水量呈显著正相关，当年 9 月的降水显著负相关；高温和蒸发主要反映在当年的 5 月和前一年的 10 月，都是显著的负相关；而低温影响也主要表现在当年 9 月，这说明 9 月的低温和多雨不仅影响到光合作用的效率，而且也相应地缩短了树木的生长期。

从图 5 的对比发现，反映树木生长区域环境特征的第一主分量与区域气候因子的相关在阿尼玛卿山地东西两地虽有差异，但差异不突出，这与区域主成分分析结果一致。

响应分析的结果发现气候对树木生长的影响都很大，但东西差异显著：西部气候解释量高达 74.5%，其中温度对树木生长的解释量最高，达 57.8%，降水解释量也达 46.1%，表明温度因素是影响树木生长的主要限制因子，降水也起着非常重要的作用；而东部气候解释量也高达 68.4%，其中降水为树木生长的主要限制因子，解释量达到 49.4%但温度的解释量仅有 18.7%。第一主分量主要反映影响树木生长的共同因子，它们对气候的响应在一定程度上反映了树木生长的区域差异。

3.3.2 阿尼玛卿东西区域年表 PC2 对气候因子的响应差异 第一主分量反映了影响树木生长的区域环境因子，而第二主分量则反映第一主分量之外的其他环境因子。因此，有必要对阿尼玛卿东、西区域的树轮年表第二主分量与气候因子的关系做出相关和响应分析。西部树木生长的第二主分量与气候因子的关系显然比东部更密切 (图 6)。平均气温的影响比东部显著，尤其当年的 6-8 月更为突出；月总降水量的影响差异较大，西部前一年 8、9 月和当年 6 月影响显著，东部当年 8 月影响最大；月平均最高气温和蒸发量的影响，西部前一年 9-11 月和当年的 5-8 月都是正相关，东部的前一年 10 月和当年 10 月的影响较大 (负相关)，仅前一年 12 月的蒸发量为较高的正相关；月平均最低气温的大多为负相关，而西部的 7-8 月为显著正相关，东部仅 8 月较高。这说明生长季的较大温差有利于营养物质的积累，形成较宽年轮。

响应分析的结果同样显示出树木生长的差异。西部气候总解释量高达 81.8%，其中

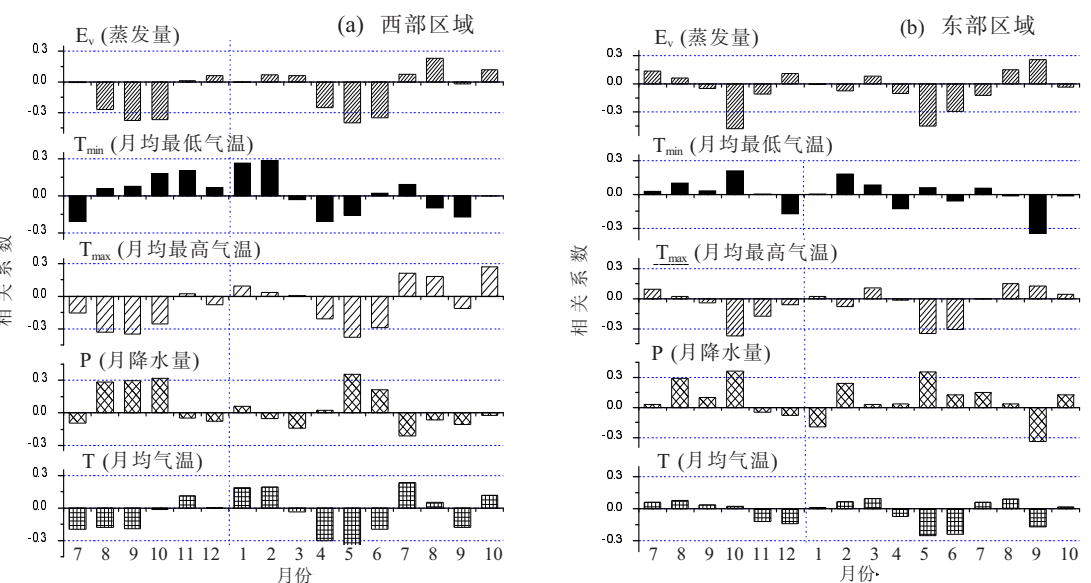


图 5 阿尼玛卿东西区域树轮宽度年表的第一主分量与气候因子的相关分析
Fig. 5 Correlations between PC1 of standard ring-width chronologies and climatic factors from the eastern and western Anyemaqen Mountains

前期生长的解释量占 27.3%; 温度对树木生长的解释量高达 54.3% (前期生长的解释量 16.6%), 降水解释量最高达 59.4% (前期生长的解释量 18.4%), 表明在第二主分量的响应结果中降水因素是影响树木生长的主要限制因子, 温度同样是非常主要的制约因子。而东部气候解释量也高达 59.2%, 其中前期生长的解释量占 38.8% 高于当年气候解释量 (20.4%); 温度和降水解释量差别不大, 分别为 40.3% 和 40.2%, 前期生长的解释量分别占 29.4% 和 26.4% 均高于当年气候解释量 (10.8% 和 13.8%), 显然东部地区树木的生长受气候因子影响也较大, 其中前期生长是主要的限制因子。

3.3.3 阿尼玛卿东西区域不同主成分对气候响应的关系 阿尼玛卿山地位于季风的边缘区, 是一列东南—西北走向的山脉, 地势西高东低, 夏季风可沿着河流谷地自东南向西北深入内地。该地区属于高原亚寒带湿润半湿润气候, 夏季降水占全年降水量的 56% -62%, 冬季降水稀少, 气候明显受到东亚季风的影响; 加上垂直高差和地形影响, 使阿尼玛卿山地东西两地的气温、降水以及湿度有较大的差异 (东部比西部温度高 4 ℃ 左右, 相对湿度高约 18%)^[31], 前面不同气象站点气候数据的分析也证明了这一点。这些差异相应地导致树木生长季长度的不同, 进而影响树木年轮径向生长的空间差异^[45]和树木生长对气候因子的不同响应。从第一、二主分量与气候因子的相关分析中可以看出: 反映大环境因素的年表第一主分量与气候因子的相关共性较多, 但也存在一定的差异; 而反映大环境因素之外的第二主分量对气候因子的响应结果则更清楚地表现出东西区域树木生长对气候响应的差异。

西部区域树木生长较强地受气温和降水共同影响, 并且具有较好的互补性: 当温度能满足树木生长时降水的限制作用就较弱 (第一主分量分析), 反之当温度不能很好地满足树木生长时降水的限制作用就较强 (第二主分量结果)。东部地区相对来说海拔较低, 较高的温度可以满足树木生长的需要, 因此降水对树木生长来说就有较强的限制作用; 但当温度不能满足树木生长时, 树木的前期生长就会影响到下一年的年轮生长 (第二主分量分析结果)。

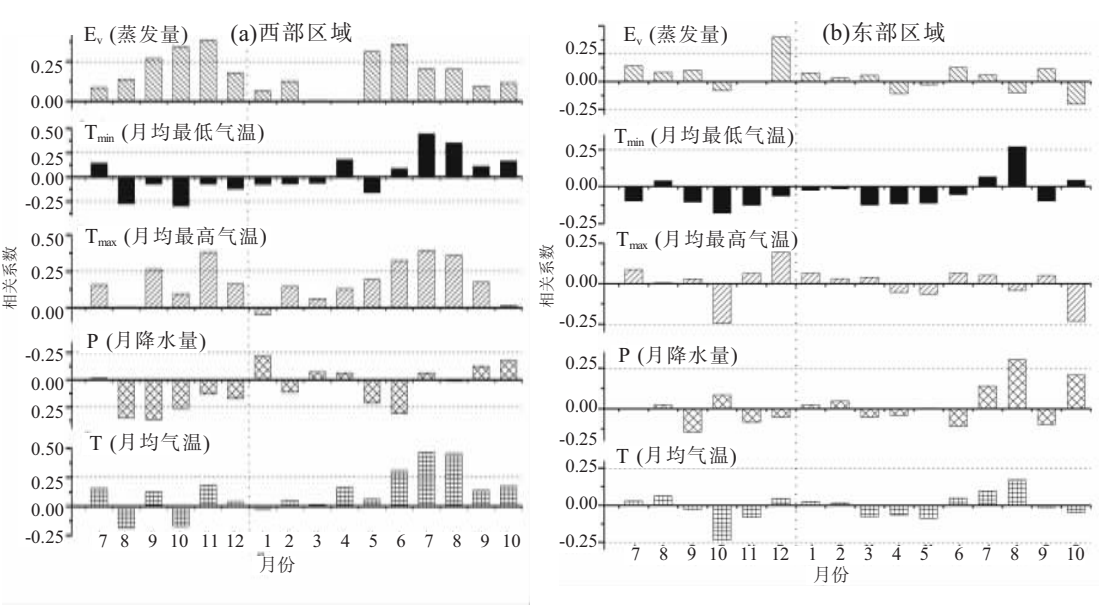


图 6 阿尼玛卿东西区域树轮宽度年表的第二主分量与气候因子的相关分析

Fig. 6 Correlations between PC2 of standard ring-width chronologies and climatic factors from the eastern and western Anyemaqen Mountains

4 结 论

(1) 采样点树木年轮宽度年表中的 SNR、EPS 统计量的数值都较高 (EPS 大于 0.8), 说明受环境因子的影响较强; 20 个树轮宽度年表之间的平均相关为 0.35, 且大多都达到 95% 的置信程度。

(2) 聚类分析的结果把 5 个坡面 20 个树木年轮宽度年表分成东西两大部分, 而东西区域的第一主分量显示出西部树木年轮的指数序列明显长于东部, 即树木生长有自西向东扩展趋势以及东西树木生长变化具有同步性。

(3) 东西部年表中第一主分量和第二主分量与气候因子的相关和响应都表现出相似的差异性: 西部树木生长受气候的影响明显强于东部, 但第二主分量对气候因子响应的差异性更显著。西部树木生长 PC1 的主要限制因子是温度, 尤其当年春末夏初及前一年秋季温度, 西部树木生长 PC2 的主要限制因子是降水量, 二者在一定条件表现出一定的互补性; 东部树木生长 PC1 主要受降水制约, 第二主分量 PC2 的响应分析显示气候滞后影响 (树木前期生长) 非常重要。

致谢: 感谢中国科学院植物所张齐兵研究员, 兰州大学侯宗东博士和李金豹博士等参加了野外采样, 感谢玛沁、同德和兴海县林业局的领导和职工在野外采样中给予的支持。

参考文献 (References)

- [1] Wu Xiangding. Tree Ring and Climate Change. Beijing: China Meteorological Press, 1990. [吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.]
- [2] Shao Xuemei. Advancements in dendrochronology. Quaternary Sciences, 1997, 3: 265-271. [邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. 第四纪研究, 1997, 3: 265-271.]
- [3] Cook E R, Cole J. Predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change. Climatic Change, 1991, 19: 271-282.
- [4] Jacoby G C, D'Arrigo R D. Mongolian tree ring and 20th-century warming. Science, 1996, 273: 771-773.
- [5] D'Arrigo R, Jacoby G C, Pederson N et al. Mongolian tree rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature. The Holocene, 2000, 10(6): 669-672.
- [6] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 295: 2250-2253.
- [7] Fritts H C. Reconstruction large scale climate patterns from tree-ring data, Tucson, USA. The University of Arizona Press, 1991.
- [8] Jacoby, G C, Wiles G C, D'Arrigo R D. Alaskan dendroclimatic variations for the past 300 years along a north-south transect. In: Dean J S, Meko D M (eds.), Tree Rings, Environment and Humanity, Radiocarbon, 1996, 235-248.
- [9] Rigling A, Braker O, Schneider G et al. Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within the Erico-Pinien in the Valais (Switzerland). Plant Ecology, 2002, 163: 105-121.
- [10] Rolland C. Decreasing teleconnections with inter-site distance in monthly climatic data and tree-ring width networks in a mountainous alpine area. Theoretical and Applied Climatology, 2002, 71: 63-75.
- [11] Esper J, Schweingruber F H. Large-scale treeline changes recorded in Siberia. Geophysical Research Letters, 2004, VOL. 31, L06202, doi: 10.1029/2003GL019178.
- [12] Macias M, Timonen M, Kirchhefer A J et al. Growth variability of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) along a west-east gradient across northern Fennoscandia. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2004, 36 (4): 565-574.
- [13] Frank D, Esper J. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. Dendrochronologia, 2005, 22: 107-121.
- [14] Lara A, Villalba R, Wolodarsky-Franke A et al. Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35°40'-55°S) in the Chilean Andes. Journal of Biogeography, 2005, 32(5): 879-893.
- [15] Kang Xingcheng, Graumlich L J, Sheppard P R. Reconstructing a 1835a tree-ring chronology in Dulan area, Qinghai province and its preliminary analysis. Science Bulletin, 1997, 42(10): 1089-1091. [康兴成, Graumlich L J, Sheppard P R. 青海都兰地区 1835a 年轮序列的建立和初步分析. 科学通报, 1997, 42(10): 1089-1091.]
- [16] Zhang Qibin, Cheng Guodong, Yao Tandong et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the

- northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739, doi: 10.1029/2003GL017425.
- [17] Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei et al. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(4): 521-529. [刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(1): 89-95.]
- [18] Liu Hongbin, Shao Xuemei, Huang Lei et al. Statistical characteristics of annual precipitation variation during the past 1000 years in Delingha, Qinghai province, China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 176-183. [刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊等. 青海省海西州德令哈地区近千年年来降水量变化特征分析. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 176-183.]
- [19] Shao Xuemei, Fang Xiuqi, Liu Hongbin 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. [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.]
- [20] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin et al. Past precipitation variations during the last 1000a in Delingha area, Qinghai province, as recorded in tree-ring index. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(2): 145-153. [邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(2): 145-153.]
- [21] Shao Xuemei, Liang Eryuan, Huang Lei et al. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the northeastern Qaidam Basin. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 122-126. [邵雪梅, 梁尔源, 黄磊等. 柴达木盆地东部过去 1437a 的降水变化重建. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 122-126.]
- [22] Huang Lei, Shao Xuemei, Liang Eryuan et al. Characteristics of millennial tree-ring width variations of Qilian juniper in Shalike Mountain, Qinghai. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 365-373. [黄磊, 邵雪梅, 梁尔源等. 青海沙利克山祁连圆柏千年树轮宽度序列的变化特征. *地理研究*, 2004, 23(3): 365-373.]
- [23] Huang Lei, Shao Xuemei, Liu Hongbin et al. Abrupt changes of precipitation in Delingha region, Qinghai for the last 1000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 713-719. [黄磊, 邵雪梅, 刘洪滨等. 青海德令哈地区千年来降水量的突变分析. *地理学报*, 2006, 61(7): 713-719.]
- [24] Liu Yu, An Zhisheng, Ma Haizhou 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. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(4): 408-420. [刘禹, 安芷生, 马海州等. 青海都兰地区公元 850 年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(5): 461-471.]
- [25] Bräuning A. Climate history of the Tibetan Plateau during the last 1000 years derived from a network of Juniper chronologies. *Dendrochronologia*, 2001, 19: 127-137.
- [26] Liang Eryuan, Shao Xuemei, Huang Lei et al. The 1920s drought recorded by tree ring in central-western China. *Progress in Natural Sciences*, 2004, 14(4): 469-474. [梁尔源, 邵雪梅, 黄磊等. 中国中西部地区树木年轮对 20 世纪 20 年代干旱灾害的指示. *自然科学进展*, 2004, 14(4): 469-474.]
- [27] Yuan Yujiang, Ye Wei, Dong Guangrong. Reconstruction and discussion of 314a precipitation in Yili prefecture, western Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 121-127. [袁玉江, 叶玮, 董光荣. 天山西部伊犁地区 314a 降水的重建与分析. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 121-127.]
- [28] Liu Puxing, Peng Jianfeng, Chen Fahu. Hydrological response of *Populus euphratica* Olve. radial growth in Ejinaa Banner, Inner Mongolia. *J. Integr. Plant Biol.*, 2007, 49(2): 150-156.
- [29] Editorial Committee for Qinghai Forest. *Forest in Qinghai Province*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993. 230-442. [青海森林编辑部. 青海森林. 北京: 中国森林出版社, 1993. 230-442.]
- [30] Dai Jiaxi. *Climate in Qinghai-Tibetan Plateau*. Beijing: China Meteorological Press, 1970. [戴加洗. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1970.]
- [31] Zhou Xingmin, Wang Zhibin, Du Qing et al. *Vegetation in Qinghai Province*. Xining: Qinghai People's Press, 1987. 124. [周兴民, 王质彬, 杜庆等编著. 青海植被. 西宁: 青海人民出版社, 1987. 124.]
- [32] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago: the University of Chicago Press, 1968.
- [33] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-75.
- [34] Cook E R. Users manual for ARSTAN. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson, 1986.
- [35] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1990.
- [36] Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography (2nd edn.)*. Beijing: Higher Education Press, 2002. 84-93. [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.]
- [37] Lu Wendai, Zhu Yili, Sha Jie et al. *SPSS for Windows*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. 206-213. [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.]
- [38] Zhang QB, Hebda RJ. 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.

- [39] Legendre P, Legendre L. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1998.
- [40] 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.
- [41] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho? Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2000, 32: 111-116.
- [42] Fritts H.C. Quick help for PRECONK Version 5.17. Dendrochronological Modelling, Tucson, Arizona, 1998.
- [43] Guiot J. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin, 1991, 51: 39-41.
- [44] Gou Xiaohua, Yang Meixue, Peng Jianfeng et al. Maximum temperature reconstruction for Animaqin Mountains over past 830a based on tree-ring records. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 991-998. [勾晓华, 杨梅学, 彭剑峰 等. 树轮记录的阿尼玛卿山区过去 830 年夏半年最高温变化. 第四纪研究, 2006, 26(6): 991-998.]
- [45] White TL. Drought tolerance of southwestern Oregon Douglas-fir. Forest Science, 1987, 33: 283-293.

Horizontal Variations of Climatic Response of Qilian Juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anyemaqen Mountains

PENG Jianfeng¹, GOU Xiaohua¹, CHEN Fahu¹, ZHANG Yongxian^{2,3},
LIU Puxing^{1,4}, ZHANG Yong¹, FANG Keyan¹

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

2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, 475004, China

3. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;

4. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A spatiotemporal patterns analysis of a network with 20 Qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) tree ring-width chronologies from 5 slopes along a west-east gradient in the Anyemaqen Mountains on the northeastern Qinghai-Tibetn Plateau was performed by means of chronology statistics. Higher SNR and EPS values implied the more climatic information in these chronologies. Most correlations among standard chronologies taken in pairs are significant, with the mean correlation coefficient for all sites being 0.35, indicating that environment condition was consistency. The result of Hierarchical Cluster Analysis showed two well-defined groups at large, corresponding to the two groups, the eastern and the western. Scatter plots of component loadings indicated that stands growing in a similar climate environment are most important on variability of radial growth. The first component of chronologies in east-west regions implied that the center of Qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) growing transplants eastwards along the Anyemaqen Mountains and the eigenvalues (narrow years) tree-growth in the western and the eastern Anyemaqen were synchronous. Correlation between the first principal component (PC1) and the second principal component (PC2) and the climatic factors revealed similarity and differences in radial growth along the west-east gradient in the study area, nevertheless the difference of PC2 is more prominent. Temperature was the main limiting factor to tree growth PC1 in the western Anyemaqen, especially the impact of current late spring and early summer the most significant, and Precipitation was very importance to tree growth, but precipitation was mainly limiting factor of tree growth PC2. Temperature and precipitation held definite commutative.

Key words: Qilian juniper; ring-width chronology; cluster analysis; principal component analysis; climatic response