

doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2013.04.001

吉尔吉斯斯坦西天山上下林线树轮对气候的响应差异

张瑞波¹, 尚华明¹, 魏文寿¹, 何清¹, 袁玉江¹, 张同文¹, Ermenbaev Bakytbek², 赵勇¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所; 中国气象局树轮年轮理化研究重点开放实验室; 新疆树木年轮生态实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 吉尔吉斯斯坦科学院水问题与水能研究所, 吉尔吉斯斯坦 比什凯克 720033)

摘要: 利用2012年10月采自吉尔吉斯斯坦西天山 chon-kyzyl-suu 附近的森林上线和下线两个采样点的雪岭云杉树轮样本, 建立了上下线树轮宽度年表, 结合近百年 CRU 气温和降水资料, 分析该地区森林上下线树轮对气候响应的异同。结果表明, 森林上线树轮宽度年表一致性较好, 尤其是窄轮出现年份基本相同; 对气温响应方面, 森林上线树轮年表与春季尤其是4—5月平均温度显著负相关; 而森林下线树轮年表与夏季尤其是6—7月平均气温显著负相关。降水方面, 树轮年表与上年7月到当年6月降水相关最好, 森林下线年表与上年7月到当年6月的降水量相关系数超过0.61; 上线也达到了0.49。降水可能是吉尔吉斯斯坦西天山北坡森林下线树木径向生长的主要限制性因子。空间相关分析表明, 树轮年表能较好地代表西天山大部分区域上年7月到当年6月的降水量。

关键词: 西天山; 树木年轮; 天山云杉; 气候响应

中图分类号: P467

文献标识码: B

文章编号: 1002-0799(2013)04-0001-06

IPCC 第4次评估报告指出: 最近 100 a(1906—2005 年) 全球平均地表温度上升了 0.74 °C(0.56~0.92 °C), 全球变暖成为不争的事实, 在全球变暖的大背景下, 区域气候变化仍存在很大的不确定性。亚洲中部干旱区是全球最大的非地带性干旱区, 横亘于亚欧大陆中部的天山山脉东西绵延 2500 km, 主要横跨中国和吉尔吉斯斯坦边界, 总面积约 100 万 km²; 天山山区具有典型的大陆性山地气候特征, 受西风环流和北大西洋涛动的影响^[1-2]。西天山地处中国、吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦交界, 生态环境脆弱,

是中亚气候区的一部分, 这决定了该区域在全球变化研究中的特殊地位。陈发虎等^[3-5]研究发现, 全新世和近千年亚洲中部干旱区和我国东部季风区的湿度(降水)变化存在错位相现象, 据此提出了亚洲中部西风环流控制区气候变化的“西风模式”^[6]。陈发虎等^[7]依据 CRU 1930—2009 年的 0.5°×0.5°网格点的月均降水量序列分析了中亚干旱区近 80 a 来的降水变化特征及其区域差异。结果发现, 近 80 a 来主要受西风环流控制的中亚干旱区年降水量整体上表现出增加趋势。那么近百年甚至近几百年该地区降水如何变化? 由于该区域气象台站稀疏, 气象观测不连续, 仪器设备陈旧, 观测场不够规范, 数据精确度不高, 限制了人们对其长期气候变化历史规律的认识, 需要寻找过去气候变化的替代资料。同时该地区历史文献记录匮乏, 其它代用资料(冰芯、湖泊沉积、黄土等)也受到时空分辨率的限制, 难以准确地反映该区过去气候年际和年代际变化特征。所幸的是, 西天山海拔 1 700~3 200 m 分布着大量的雪岭云杉原始森林, 国内外过去的研究证明, 生

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-04-11

基金项目: 国家国际科技合作项目(2010DFA92720-14); 国家科技支撑计划项目(2012BAC23B01); 国家自然科学基金(41071072, 41271098, 41275120, 41205070); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206014, GYHY201106013)共同资助。

作者简介: 张瑞波(1983-), 男, 助理研究员, 主要从事气候变化与环境、树木年轮气候学研究。E-mail: river0511@163.com

通讯作者: 袁玉江(1955-), 男, 研究员, 主要从事气候与环境、年轮气候与年轮水文应用气候研究。E-mail: yuanyuj5502@sina.com

长在干旱半干旱山地环境的该树种的树木年轮生长对气候响应敏感,适合用于气候重建工作。而树木年轮由于具有空间分布广、时间序列长、分辨率高、定年准确、环境变化指示意义明确且可定量等优势而成为研究过去气候变化的首选代用资料之一,在揭示气候变化规律及机理研究中发挥了重要作用^[9]。树木生长对气候变化的响应机制是气候重建的基础,在不同的气候或环境背景下,树轮宽度对气候变化的响应不同,其响应随着地形或海拔等因素的变化而变化^[9]。本研究计划利用2012年采自西天山吉尔吉斯斯坦境内的雪岭云杉上下线树轮样本,建立树轮年表,结合CRU网格点资料分析西天山上下线树轮对气候的响应,探讨该地区树轮重建过去气候变化的潜力,为重建该地区过去几百年气候场,分析过去几百年气候变化特征提供依据。

1 数据收集与研究方法

1.1 采样区概况与样本获取

地处中亚干旱区的吉尔吉斯斯坦位于天山北坡西部,由于山区地形复杂以及受伊塞克湖的影响,吉尔吉斯斯坦的气候呈多样性,研究区属于高山气候带(从2 000~2 200 m至3 000~3 500 m),其气候特点是夏季凉爽,冬季寒冷。树木年轮样本于2012年10月采自吉尔吉斯斯坦西天山chon-kyzyl-suu(KZE 78°11'E, 42°10'N),海拔从2 650~2 890 m,接近森林上线,坡向为ENE,坡度为20°~60°之间,依照树木年轮气候研究树轮采样规范^[10],在此处共采集了27棵树的50个样芯;采点chon-kyzyl-suu下线(KZX 78°08'E, 42°15'N),海拔2 200~2 220 m,坡向为N,坡度为15°左右,在此处共采集了20棵树

的40个样芯,树种为雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey)(图1)。

1.2 气象数据

本研究选取的气温和降水资料来自英国East Anglia大学的Climatic Research Unit(简称CRU)1901年1月至2002年12月的高分辨率全球逐月格点数据集(CRU TS 2.1),空间相关分析所用数据集为CRU TS 3.1(1901年1月至2009年12月),二者数据处理方法相同^[7],其网格距均为0.5°×0.5°。CRU数据集有以下优点:在资料的重建过程中包含了严格的时间均一性检验,时间尺度更长,空间分辨率更高,该数据集被大量运用于气候变化研究中^[11-12]。响应分析和重建所采用的数据为距离采样点最近的CRU格点(78.0°E, 42.0°N)1901—2002年的月平均温度和月总降水量。

1.3 研究方法

将采回的树轮样本在实验室按照树木年代学的基本原理和研究步骤^[13],对钻芯样本进行干燥、固定、磨平、打光、交叉定年,并用精度为0.001 mm的轮宽测量仪和MeasureJ2X程序进行轮宽测量并将数据传入计算机,用国际年轮库的COFECHA交叉定年质量控制程序进行交叉定年检验,确保每一生长年具有准确的日历年龄,在交叉定年过程中,由于钻芯的质量和年轮测量中的误差,使部分钻芯难以交叉定年,另外,舍弃同一棵树的2个序列和整体的相关性不好的序列,KZX样点最终有37个序列用于建立年表,而KZE样点最终有40个序列用于建立年表。

采用国际年轮库ARSTAN年表研制程序,将轮宽序列标准化为年轮指数序列,采用样条函数去趋势方法完成树轮年表的建立。这一过程中消除了:(1)树木生长中与年龄增长相关联的生长趋势;(2)部分树木之间的非一致性扰动,排除其中非气候信号。最终研制出了3种树轮年表(即标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)),以增加在气候重建时的年表可选择性。

2 结果与讨论

单从径向生长和树龄来看,森林上线的生长缓慢,树龄大,最长树龄达400 a以上,而位于森林下线的树木胸径大,生长迅速,树龄较短。最长也不过130 a。一致性方面,虽然森林下线树木径向生长要远远快于森林上线,但是宽窄变化和极端窄年上对应较好(图2),典型的1884—1885年,1894—1895

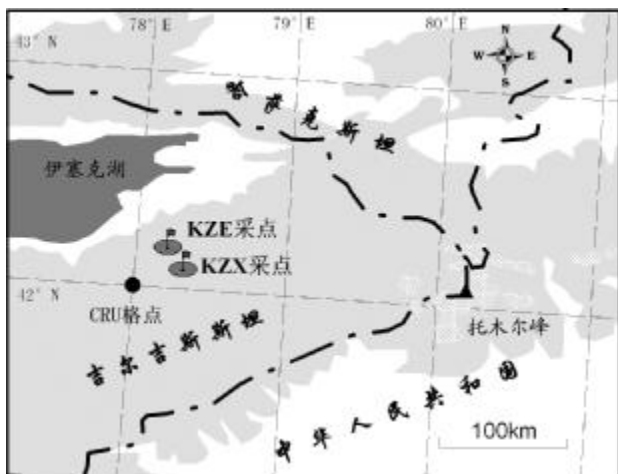


图1 树轮采点和CRU格点分布图

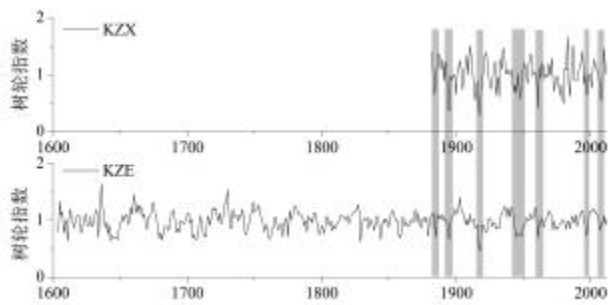


图2 吉尔吉斯斯坦西天山森林上下线树轮宽度
标准化年表对比

年,1917年,1943—1949年,1961年,1997—1998年,2007—2008年的低值年相对应,而这些窄轮也出现在中国境内的天山北坡的树轮年表中,这表明这些年份窄轮的形成可能是由较大尺度的气候原因所致。

树木年轮学理论认为: R_1, R_2, R_3, SNR, ESP 和 PCA_1 统计量的数值越大,则表明所选样本对于群体的代表性越好,即序列的共性越强(表1),整个分析中的环境信息含量越大^[14-16]。比较发现,位于森林下线的KZX树轮年表的平均敏感度、标准差、树间相关、树内相关、信噪比、样本对整体的代表性以及第一特征向量百分比均远远大于森林上线的KZE年表。因此KZX年表可能含有更多的气候信息,对气候的响应可能更为敏感。

表1 吉尔吉斯斯坦西天山森林上下线树轮宽度
标准化年表主要特征参数对比

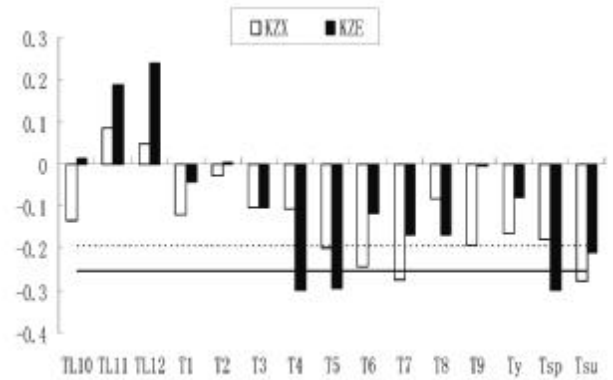
年表号	长度	SSS>0.85	M.S.	一阶	R_1	R_2	R_3	SNR	ESP	PCA_1
KZE	409	1756—2012	0.120	0.563	0.293	0.280	0.652	5.442	0.845	33.18
KZX	131	1886—2012	0.263	0.331	0.615	0.609	0.818	26.47	0.964	63.70

注:M.S.、 R_1 、 R_2 和 R_3 分别代表平均敏感度、样本之间的平均相关系数、树与树之间的平均相关系数和同一棵树不同样本之间的平均相关系数,SNR 为信噪比,ESP 为样本量对总体的代表性, PCA_1 代表第一特征向量百分比

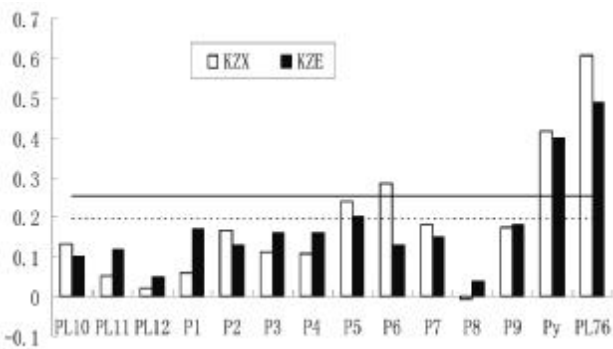
2.1 树轮对气候的响应

在利用树木年轮进行古气候研究的过程中,当年轮年表确定以后,年表与气候要素间的相关性分析是衡量该年表能否反映气候信息的关键^[16]。将CRU 上年10月至当年9月单月和所有顺序组合的降水量和平均气温与KZE和KZX年表进行单相关普查,得到最佳相关时段及相关系数(图3)。从该图可以得出以下结论:(1)树轮对温度响应方面,位于森林下线树木径向生长和夏季平均气温显著负相

关,而森林上线的树木径向生长与春季气温显著负相关,森林上线的树轮宽度与4月和5月的单相关均超过99%的信度检验。这是因为,森林下线整体温度较高,而夏季生长季的高温必然抑制树木生长,而在森林上线整体气温偏低,如果生长季前期的春季平均温度过低,将会推迟森林上线积雪的融化,为生长季储存足够的水分,使生长季树轮细胞快速分裂,春材加宽,造成当年年轮偏宽。这一结果与位于天山北坡西部的博尔塔拉河流域树轮对夏季气温响应显著^[17]一致。(2)树轮对降水响应方面,生长季及生长季前期的降水均与树轮宽度正相关,上年7月到当年6月的降水与树木径向生长相关最好,最高单相关为森林下线年轮指数与上年7月到当年6月降水量达0.61。Schulman 等对北美西部树木年轮的研究发现,干旱和半干旱地区针叶树年轮宽度同生长季以前的春季、冬季、秋季和夏季的气候状况有密



树轮年表与温度相关



树轮年表与降水量相关

图3 吉尔吉斯斯坦西天山森林上下线树轮宽度
标准化年表和CRU气象资料相关性

(实线代表超过99%信度检验,虚线代表超过95%信度检验, $T_{L10}-T_9$ 为上年10月到当年9月单月平均气温, T_y 代表年平均气温, T_{sp} 代表春季气温, T_{su} 代表夏季气温; $P_{L10}-P_9$ 代表为上年10月到当年9月单月降水量, P_y 为年降水量, P_{L76} 为上年7月到当年6月的降水总量)

切关系^[18]。相对于温度而言,降水量对年轮生长具有更为明显的滞后效应,如前一年比较湿润,树木在体内有足够多的养分,即使当年偏旱,树木仍能形成中等宽度的年轮^[19]。位于吉尔吉斯斯坦南部的我国新疆阿克苏河流域树轮对宽度响应研究结果也表明^[20],树轮宽度与生长季前期降水量相关最好。这也与众多学者对天山山区雪岭云杉树轮宽度对气候响应分析得出的树轮宽度对降水尤其是生长季前期及生长季降水响应最为敏感的结论一致^[21-30]。(3)降水可能是该地区树木生长的主要限制性因子,降水对森林下线树轮径向生长起决定性作用。

2.2 气候重建潜力评估

为了评估吉尔吉斯斯坦西天山北坡树轮年表重建过去百年降水的潜力,本研究将树轮宽度年表与 CRU 较大范围上年 7 月到当年 6 月降水资料做了相关分析,结果表明(图 4),树轮年表能较好地代表西天山大部分区域上年 7 月到当年 6 月的降水量,尤其是西天山北坡吉尔吉斯斯坦境内。

将距离采样点最近的吉尔吉斯斯坦 CRU 格点的 1901—2002 年上年 7 月到当年 6 月的降水量与 2 个标准化年表序列进行逐步回归分析,最终得到转换函数:

$$P_{L7-6}=1\ 222.0-724.9\times KZE+821.9\times KZX \quad (1)$$

式中: P_{L7-6} 为该地区上年 7 月到当年 6 月的总降水量重建值, KZE 和 KZX 分别为森林上线和森林下线标准化年表序列。

该转换函数的复相关系数是 0.646, 方差解释

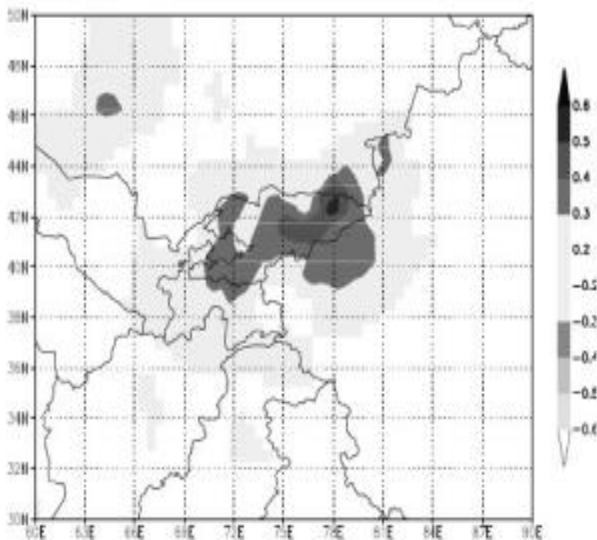


图 4 树轮宽度与 CRU 上年 7 月到当年 6 月降水量的空间相关

量为 41.8%, 调整自由度后的解释方差 $R_{adj}^2=0.406$, $F_{2,97}=34.83$, 超过 0.000 1 的极显著水平, 由该方程可以重建出 1886—2012 年吉尔吉斯斯坦西天山北坡上年 7 月到当年 6 月的降水量(图 5)。

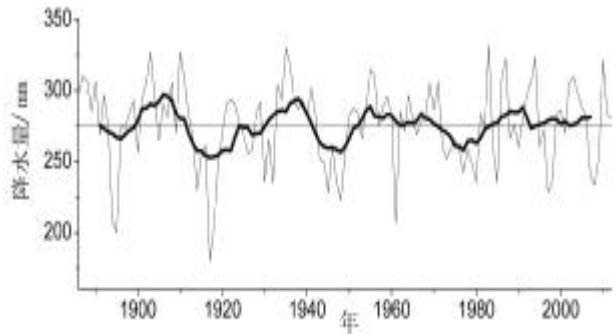


图 5 吉尔吉斯斯坦西天山地区降水量的重建序列

3 结论

吉尔吉斯斯坦西天山北坡树轮宽度标准化年表对气温响应方面,森林上线树轮年表与春季尤其是 4—5 月份平均温度显著负相关;而森林下线树轮年表与夏季尤其是 6—7 月平均气温显著负相关。降水方面,树轮年表与上年 7 月到当年 6 月降水相关最好,森林下线年表与上年 7 月到当年 6 月的降水量相关系数超过 0.61, 上线也达到了 0.49。与中国境内雪岭云杉对气候响应基本相同,位于吉尔吉斯斯坦的西天山北坡树轮宽度同样对降水的响应更为敏感,尤其在森林下线。降水可能是该地区树木生长的主要限制性因子,降水对森林下线树轮径向生长起决定性作用。

空间相关分析表明,树轮年表能较好地代表西天山大部分区域上年 7 月到当年 6 月的降水量,尤其是西天山北坡吉尔吉斯斯坦境内。利用吉尔吉斯斯坦西天山北坡树轮宽度标准化年表可较好的重建该地区上年 7 月到当年 6 月的降水量。

致谢:本研究树轮野外采样得到了吉尔吉斯斯坦科学院水问题和水能研究所所长 Mamatkanov Diushen 院士, Satylkanov Rysbek 主任及吉尔吉斯斯坦孔子学院院长王哲教授的帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Rogers J C, Van L H. The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part II: Some oceanic and atmospheric effects in middle and high latitudes [J]. Monthly Weather Review, 1979, 107: 509 - 519.
- [2] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia

- [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21: 535 - 556.
- [3] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 351-364.
- [4] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Vegetation response to Holocene climate change in monsoon-influenced region of China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 97: 242-256.
- [5] Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 1055-1068.
- [6] 陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论[J]. *地质前缘*, 2009, 16: 23-32.
- [7] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(11): 1647-1657.
- [8] Mann, M.E, Bradley, R.S, Hughes, M.K, Global -scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries[J]. *Nature*, 1998, 392: 779-787.
- [9] 段建平, 王丽丽, 徐岩, 等. 贡嘎山东坡不同海拔高度树轮宽度对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2010, 29(11): 1940-1949.
- [10] 喻树龙, 袁玉江, 魏文寿, 等. 用于气候分析的树轮宽度资料获取技术方法与质量控制 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(1): 49-55.
- [11] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 222-233.
- [12] Xu H M, Taylor R G, Kingston D G, et al. Hydrological modeling of river Xiangxi using SWAT2005: A comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations. *Quaternary International*, 2010, 226: 54-59.
- [13] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of dendrochronology* [M]. The Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 1-200.
- [14] 张瑞波, 喻树龙, 袁玉江, 等. 新疆伊犁乌孙山北坡树轮灰度年表的建立及气候意义[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2009, 3(1): 14-19.
- [15] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 新疆伊犁霍城地区树轮年表的建立及气候意义[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(5): 716-722.
- [16] 勾晓华, 邵雪梅, 王亚军, 等. 祁连山东部地区树木年轮年表建立[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 234-237.
- [17] 潘雅婷, 袁玉江, 喻树龙. 博尔塔拉河流域过去 461a 夏季温度的重建和分析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 159-164.
- [18] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990, 171-172.
- [19] 李江风, 袁玉江, 由希尧, 等. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 115, 186-245.
- [20] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 1396—2005 年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 27-33.
- [21] 袁玉江, 叶玮, 董光荣, 等. 天山西部伊犁地区 314a 降水的重建与分析[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 121-127.
- [22] Yuan, Y.J, Li, J.F, Zhang, J.B, 348 year precipitation reconstruction from tree-rings for the North Slope of the middle Tianshan Mountains[J]. *Acta Meteorologica Sinica* 2001, 15(1): 95-104.
- [23] 袁玉江, 李江风, 胡汝骥, 等. 用树木年轮重建天山中部近 350a 来的降水量[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(1): 34-40.
- [24] 袁玉江, 邵雪梅, 李江风, 等. 夏干萨特树轮年表中降水信息的探讨与 326 年降水重建 [J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2048-2053.
- [25] Yuan, Y.J, Jin, L.Y, Shao, X.M., et al. Variations of the spring precipitation day numbers reconstructed from tree rings in the Urumqi River drainage, Tianshan Mts. over the last 370 years[J]. *Chinese Science Bulletin* 2003, 48(14): 1507-1510.
- [26] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235a 气候变化及降水趋势预测[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 803-808.
- [27] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 等. 树木年轮记录的天山北坡中部过去 338a 降水变化[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1535-1540.
- [28] 秦莉, 史玉光, 袁玉江, 等. 天山中部北坡头屯河流域树轮宽度年表特征分析及与气候要素的相关性初探[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(1): 16-20.
- [29] 蔺甲, 袁玉江, 魏文寿, 等. 博州中东部树轮宽度年表特征及其气候响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(1): 39-46.
- [30] Zhang, T.W, Yuan, Y.J, Liu, Y, et al. A tree ring based precipitation reconstruction for the Baluntai region on the southern slope of the central Tien Shan Mountains, China, since A.D.1464 [J]. *Quaternary International* 2012, 283: 55-62.

Differences of Tree-ring Response to Climate Between Upper and Lower Treeline in the Western Tianshan Mountains of Kyrgyzstan

ZHANG Ruibo¹, SHANG Huangming¹, WEI Wenshou¹, HE Qing¹, YUAN Yujiang¹,
ZHANG Tongwen¹, Ermenbaev Bakytbek², ZHAO Yong¹

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Urumqi 830002, China; 2. Institute of Water Problem and Hydropower of National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek 720033, Kyrgyzstan)

Abstract In this study, we develop two tree-ring width chronologies using the Schrenk spruce tree-ring samples that was collected from the upper and lower treeline at Chon-Kyzyl-Suu in the western Tianshan Mountains in Kyrgyzstan, and analyze similarities and differences of tree-ring response to climate between upper and lower treeline using temperature and precipitation data from the Climatic Research Unit ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$). The result showed that the tree-ring chronologies have a good consistency between upper and lower treeline. For tree-ring width chronological response to temperature, there is a good negative correlation between tree-ring width index for upper treeline and the temperature in spring (especially in April and May), and between tree-ring width index for lower treeline and the temperature in summer (especially in June and July). For the precipitation, the best correlation between tree-ring width chronologies in lower treeline and precipitation from preceding July to current June ($r=0.61, p<0.000\ 001$), and the correlation also reached 0.49 between tree-ring width chronologies in upper treeline and precipitation from preceding July to current June. The precipitation may be a major limit factor for tree growth in the area and plays a decisive role in lower treeline. The spatial correlation analysis showed that the tree-ring chronologies are a good representative to precipitation from preceding July to current June in the western Tianshan Mountains, especially for the northern slope of Tianshan Mountains in Kyrgyzstan.

Key words west Tianshan ; tree-ring; schrenk spruce; climate response