

新疆沙湾夏季最低气温的重建和分析

喻树龙¹,袁玉江¹,秦莉¹,张同文¹,陈峰¹,尚华明¹,张瑞波¹,蔡新婷²

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 新疆树木年轮生态实验室,中国气象局树木年轮

理化研究重点开放实验室,乌鲁木齐 830002; 2. 乌鲁木齐市气象局, 乌鲁木齐 830001)

摘要:利用相关、响应面和偏相关等方法分析采自奎屯河流域的沙大王东采点的树轮年表与沙湾气象站的气象资料之间的关系发现,沙大王东的树木年轮生长受当年、上年、再上年的6—8月最低气温和上年7—8月降水量的制约,其中上年6—8月最低气温和上年7—8月降水在树木年轮的生长时存在相互影响的关系。利用沙大王东采点的树轮年表重建了1650—2001年的沙湾夏季最低气温。分析452 a的重建气温序列发现,沙湾夏季最低气温冷暖阶段与精河和呼图壁对应较好,存在9个突变年份和2.0~2.4 a、60 a和75 a的周期变化。

关键词:树木年轮;夏季最低气温;沙湾;重建

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2012)03-0868-06

Reconstruction and analysis of the minimum temperature in summer for the Shawan in the Tianshan Mountains

YU Shu-long¹, YUAN Yu-jiang¹, QIN Li¹, ZHANG Tong-wen¹, CHEN Feng¹,
SHANG Hua-ming¹, ZHANG Rui-bo¹, CAI Xin-ting²

(1. Key Laboratory of Tree Ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002, China; 2. Ürümqi Meteorological Bureau, Ürümqi 830002, China)

Abstract: According to single correlation, response face and partial correlation screen indicated that the correlation were significant between tree-ring chronologies of Shadawangdong (SDD) site of Kuitun River and the climatic date of Shawan. As a result, growing of the tree rings was influenced by minimum temperature of the same, the last year, the year before last year in summer and precipitation of the last year in July—August. At the same time, temperature and precipitation were restricted each other. Using tree-ring chronologies, the monthly minimum temperature in the recent 452 a was well reconstructed, and the equation reconstructed was stable by crossing-test. The temperature sequences analyzed find out that in the recent 452 a, the temperature reconstructed has 10 warm periods above its mean and 9 cold periods bellow its mean. The monthly minimum temperature series in the recent 452 a from June to August reconstructed in the Shawan, have significant changing periods of 2.0~2.4 a, 60 a and 75 a. The abrupt changes of temperature occurred 9 times.

Key words: Shawan; tree-ring chronology; the minimum temperature in summer; reconstruction

树木年轮资料具有年代准确、连续性强和分辨率高等特点,长期以来在新疆环境变化研究中得到广泛应用(袁玉江和李江风,1994;袁玉江等,2001,2002,2005;叶伟和袁玉江,1999;张治华等,1996;

收稿日期:2012-07-17

基金项目: 国家自然科学基金重大基金(40890051); 国家自然科学基金(40975056,41071072,41205070); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106013,GYHY201206026); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951001); 新疆维吾尔自治区树木年轮生态重点实验室开放课题项目(XJYS0911-2009-01); 新疆气象局科学技术研究与应用技术开发项目(气候因子对巩乃斯河山区树木年轮密度的影响评估研究)

通讯作者: 喻树龙, E-mail: Yushl@idm.cn

Chen et al, 2010; 张同文等, 2011)。从上个世纪 70 年代起, 科技工作者就开始在天山开展了大量的年轮研究工作, 取得了许多有意义的成果, 利用树木年轮宽度资料对天山东部, 中部的乌鲁木齐河流域 (袁玉江等, 2002)、玛纳斯河流域 (袁玉江等, 2005) 和西部的伊犁地区 (陈津等, 2009; 张瑞波等, 2009; 尚华明等, 2011)、博尔塔拉河流域 (潘娅婷, 2005) 等均有研究。并对位于天山北坡中西部奎屯河流域的降水量 (喻树龙等, 2005) 也进行过重建和分析。本文讨论了树木年轮生长对气候因子的响应关系, 并利用树木年轮年表重建位于奎屯河流域的沙湾夏季最低温度序列, 进而讨论该区域的过去温度变化特征。

1 资料与数据

位于天山北坡中西部的奎屯河流域发源于依连哈比尔尕山北坡, 东邻安集海河, 西接托斯特沟流域, 河长 71 km, 年径流量 $6.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。天山北坡中西部属温带大陆性半干旱气候, 原始森林主要集中在海拔 1800 ~ 2700 m 的中山带迎风坡, 垂直地带性比较明显, 树种以天山云杉 (*Picea Schrenkiana* var *Tianschanica*) 为主, 林内植被有草类和灌木, 土壤为黑褐色森林土, 该采点位置如图 1。本文采用的沙大王东采点 (SDD) 的树轮年表采样时间是 2003 年, 采点位于奎屯河支流沙大王河东部的森林上树线, 平均海拔高度在 2634 m, 坡向为北坡, 共采集 28 棵树 56 个样芯。依据树木年轮学的基本原理和研究步骤 (Fritts, 1991) 获取树轮宽度数据和进行交叉定年, 最终采用国际年轮库 ARSTAN 年表研制程序 (Cook and Holmes, 1986) 完成树轮年表的研制。年表的具体特征参数见表 1。所用气象资料为奎屯河中下游的沙湾气象站 (44° 03' N, 85° 37' E, 海拔 552.2 m) 的常规观测资料 (自建站以来未曾迁站), 气象资料包括该气象站 1961 年至 2002 年共 42 a 的月平均气温, 月平均最高气温, 月平均最低气温和降水量。

2 响应分析

考虑到气候因子对树木生长的滞后效应, 利用树木年轮当年 (t)、次年 (t+1) 和再次年 (t+2) 标准化年表与气候资料进行相关分析。结果发现, 在温度因子中, 沙湾 6—8 月最低气温与沙大王东采点当年, 次年 (t+1) 和再次年 (t+2) 均有正相关关系, 其中当年 (t) 的相关系数最大, 为 0.558, 达 0.0001 的显著水平, 次年和再次年分别为 0.390 和 0.457, 均达到了 0.05 以上的显著水平。在降水因子中, 沙湾 7—8 月降水量与沙大王东采点次年年表相关显著, 为 0.610, 达 0.00002 的显著水平, 而与当年和再次年年表无明显的相关性。从相关分析可以看出, 6—8 月的最低气温和 7—8 月降水量对沙大王东采点的树木年轮生长有明显的滞后影响, 同时当年夏季较低的最低气温, 造成树木的生长季短, 不利于当年的树木生长, 而生长季较低的最低气温和较少的降水量导致树木体内的营养物质积累不足, 进而造成来年 and 第三年光合作用减弱, 从而形成偏窄轮, 呈现明显的滞后效应。

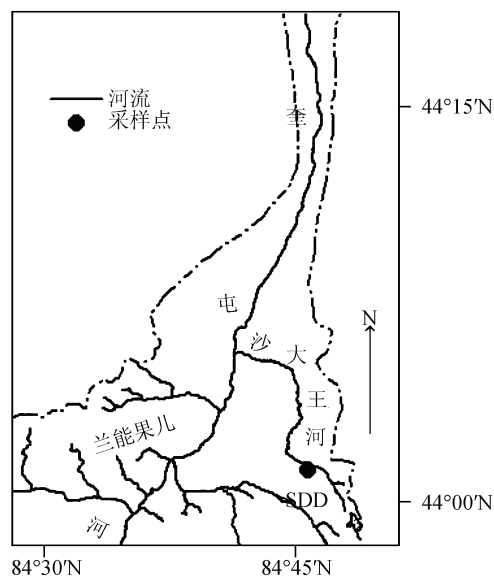


图 1 采样位置示意图

Fig. 1 The location of tree-ring sampling site in Shawan

表 1 沙大王东采点标准年表的主要特征参数

Table 1 Main feature coefficients of tree-ring standard chronologies

采点代号	时段	R	AC	MS	SD	RT	SR	AUP
SDD	1439—2003	0.665	0.482	0.174	0.212	0.368	14.532	0.936

注: 表中 R 为各序列与主序列相关系数平均值, AC 为平均一阶自相关系数, MS 为平均敏感度, SD 为平均标准差, RT 为树间平均相关系数, SR 为信噪比, AUP 为样本对总体的解释量。

为进一步分析树木年轮宽度生长对温度和降水量的响应关系,采用响应面和偏相关方法进行分析。响应面函数是将树木生长作为因变量,气候因子作为自变量的多项式函数。利用与沙大王东采点相关显著的沙湾气象站当年(t),上年($t-1$)和再上年($t-2$)6—8月平均最低气温及上年($t-1$)7—8月降水量资料进行逐步剔除回归计算分析,发现上年($t-1$)6—8月最低气温和上年($t-1$)7—8月降水进入了响应函数,复相关系数为0.723,方差解释量达52.3%,这可能是因为第二年树木年轮生长同时受到上年的最低气温和降水的影响。我们将年轮生长宽度、上年($t-1$)6—8月最低气温和上年($t-1$)7—8月降水量3个因素进行的三维空间面网格化计算,然后绘制成图,形成一个三维趋势面图(图2)。从图中可以看出,无论气温偏高或偏低时,降水量与年轮指数有较好的线性关系,年轮宽度始终随着降水量的增加而增加。而降水量较低时,在一定范围内,较低的最低气温时年轮停止生长,而随着温度的升高,年轮宽度也随之增加。在降水量较高时,年轮生长随着气温的升高而增加,而当气温升到一定范围后,树木年轮也出现了停止生长的现象。从响应面函数来看,在沙大王东采点,树木年轮生长对上年($t-1$)降水呈显著的线性响应关系,而上年($t-1$)最低气温对树木年轮生长的影响更复杂。利用7—8月降水量作为控制序列,将6—8月最低气温与沙大王东采点年表进行偏相关分析,发现沙大王东年表次年($t+1$)和再次年($t+2$)与最低气温的相关系数有显著的增加,说明6—8月最低气温在当年对树木年轮生长的影响较为固定,而对次年生长的影响则受到当年降水的制约。以6—8月最低气温作为控制序列,7—8月降水量与树木年轮次年($t+1$)生长的复相关关系较单相关更显著,相关系数增加了0.058,而与当年(t)呈较弱的相关关系,与再次年($t+2$)则无明显的相关关系。

从响应面和偏相关分析可以看出,沙大王东采点的树木年轮的生长受当年、上年、再上年的6—8月最低气温和上年7—8月降水量的制约,其中上年6—8月最低气温和上年7—8月降水在树木年轮生长时存在相互影响的关系。

3 沙湾夏季最低气温重建及检验

利用沙大王东采点的当年、次年和再次年标准化年表进行逐步剔除回归分析,重建沙湾的6—8月最低气温,转换方程为:

$$T = 15.272 + 2.177 \times SDD_t + 1.329 \times SDD_{t+2}$$

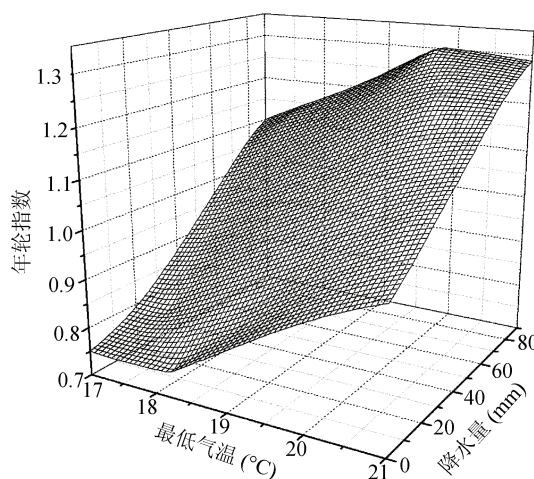


图2 树木年轮与气候要素响应面分析图
Fig. 2 Response surface function of tree-ring chronology and climate factor of Shawan meteorological station

式中: T 为沙湾6—8月最低气温, SDD_t 、 SDD_{t+2} 为沙大王东采点当年、再次年标准化年表。

该方程的复相关系数为0.586,方差解释量达34.4%, F 检验值为9.959,达到0.0003的显著水平。用逐一剔除法(李江风等,2000),从误差缩减值、乘积平均数、相关系数与符号检验四个方面对重建方程做交叉检验。交叉检验所得的误差缩减值 Re 为0.178,乘积平均数检验值为4.65,其显著性水平达0.001;相关系数为0.446,显著性水平为0.001,由此可见,此重建方程具有较好的稳定性,最低气温重建结果是可靠的。而一阶差相关系数为0.11,没有达到了0.05的显著水平;高频符号检验(19/40)与低频符号检验(25/41)都未达到了0.05的显著性水平,说明重建方程在高低频信息上均有一定的损失,其中高频变化上损失较多。依据该方程,同时考虑子样本信号强度大于85%的标准截取树轮年表,本文重建了1550—2001年沙湾夏季最低气温序列,其中1961—2001年沙湾夏季最低气温重建值与实测值的对比如图3所示。

4 沙湾夏季最低气温变化特征

4.1 冷暖阶段

将重建序列进行11年滑动平均(图4),发现沙湾6—8月最低大概经历了9个偏暖阶段(灰色区域)和8个偏冷阶段(白色区域),偏暖阶段为1550—1567年、1602—1624年、1631—1651年、1668—1701年、1730—1765年、1784—1819年、1870—1887年、1930—1944年、1987—2001年。与周边的精河5—8月平均气温冷暖阶段(喻树龙等,2007)、呼图壁5—6月

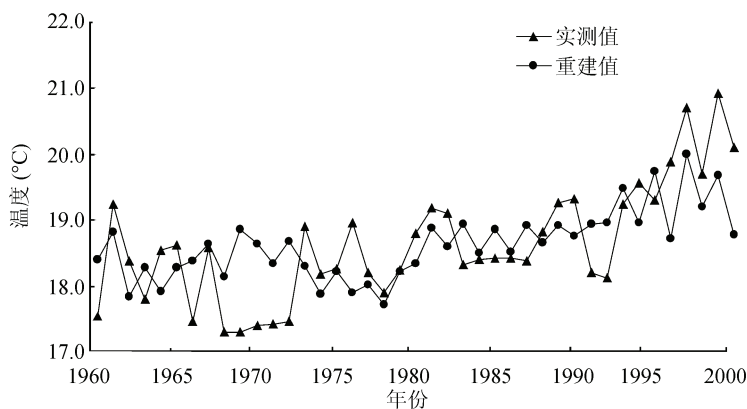


图3 沙湾夏季最低气温实测值和重建值比较

Fig. 3 Comparison between curves of temperature reconstruction and observational data

最高气温冷暖阶段(陈峰等,2009)及我国小冰期冷期(王绍武等,1998)进行相互印证。结果发现,沙湾6—8月最低气温与精河和呼图壁的偏冷阶段均对应较好(图5),1702—1729年、1820—1869年、1888—1929年、1945—1986年等偏冷阶段在三个地区同时出现,相互之间虽略有出入,但总体的一致性较高,说明在18世纪初、19世纪中期、19世纪末至20世纪初及20世纪中期这4个阶段是这一区域共同的偏冷期。沙湾夏季最低气温与中国小冰期的最

后2次冷期却没有对应关系(图5),但沙湾出现的1652—1667年、1888—1829年2个冷期与新疆等中国周边地区出现的17世纪中、18世纪末到19世纪初及19世纪末到20世纪初3个冷期中的2个冷期对应,在这些冷暖阶段中,1652—1667年,1820—1869年2个偏冷阶段与青藏高原的几个冷事件较为同步,如1650—1700年,1800—1850年,与小冰期期间中国西部发生的最后2次冰川前进相匹配(杨保,2003)。

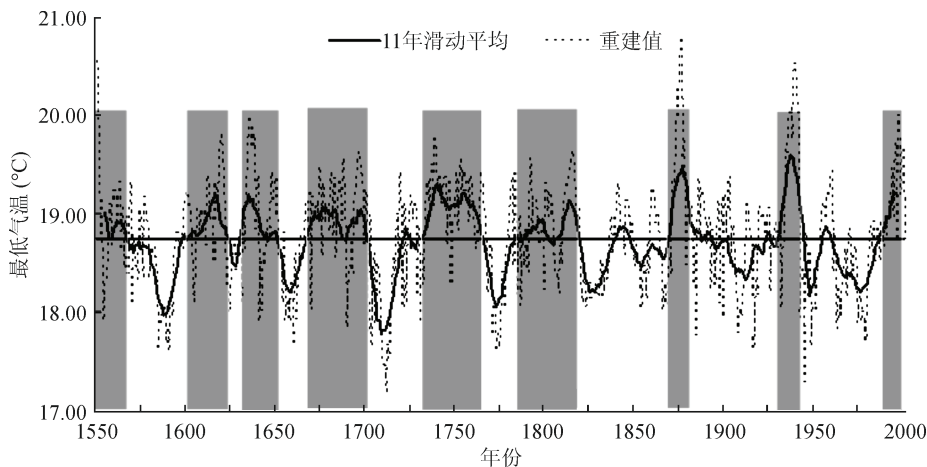


图4 沙湾夏季最低气温重建序列(虚线)及11年滑动平均曲线(实线)

Fig. 4 Reconstructed (dashed line) and the 11-year running average curve (solid line) of the minimum temperature in summer

4.2 突变分析

本文采用滑动T检验法对重建得到的气候要素序列进行突变检验(李江风等,2000),取步长为20 a、25 a、30 a、35 a和40 a。以 $\alpha=0.01$ 作为判别突变的显著水平,选出其发生年份较为接近的最强突变年,发现沙湾在1597年、1700年、1733年、1765

年、1819年、1858年、1891年、1920年和1944年前后发生过突变,这些突变年份中,1597年、1733年、1858年和1920年前后的突变是由冷到暖的突变,1700年、1765年、1819年、1891年和1944年前后是由暖转冷。其中1858年、1920年前后的突变点在精河5—8月的平均气温(喻树龙等,2007)中有出

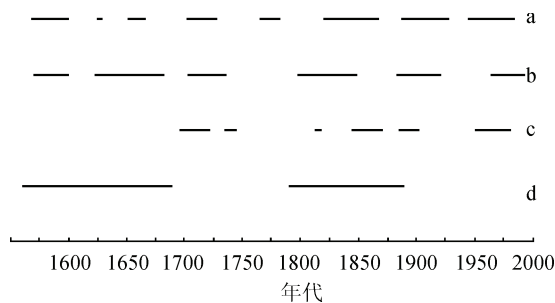


图5 沙湾(a)、精河(b)、呼图壁(c)与小冰期(d)冷暖阶段比较

Fig. 5 Comparison of warmer periods and colder periods in the Shanwan, Jinghe, Hutubi and Little ice age

现,与我国近百年气温变化的突变年份1920年一致(刘莉红和郑祖光,2003),与在古里雅冰芯记录的年代际(10 a)尺度的温度突变点(杨梅学和姚檀栋,2002)和北半球气温在1921年发生的突变相一致(符淙斌和王强,1991,1992;魏凤英和曹鸿兴,1995)。而1944年的突变点则对应在20世纪40年代末50年代初中国气温发生的一次较为明显的突变现象(魏凤英和曹鸿兴,1995)。

4.3 周期分析

对452 a的沙湾夏季最低气温进行功率谱分析(魏凤英,2007),以了解在长时间范围内该地区夏季温度变化的周期性。结果表明,该区域夏季最低气温具有2.0~2.4 a、60 a和75 a的较显著周期。而2.0~2.4 a的周期特征与“准两年脉动(QBO)”(钱维宏等,1998)和青藏高原气温2~3 a的短周期(时兴合等,2006)十分接近。

参考文献

- 陈峰,袁玉江,魏文寿,等. 2009. 呼图壁河流域过去313a春季平均最高气温序列及其特征分析[J]. *中国沙漠*, 29(1): 162-167. [Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Yu S L, et al. 2009. Series of spring mean maximum temperature in the Hutubi River basin and analysis of its variations during the last 313 years[J]. *Journal of Desert Research*, 29(1): 162-167.]
- 陈津,王丽丽,朱海峰,等. 2009. 用天山雪岭云杉年轮最大密度重建新疆伊犁地区春夏季平均最高气温变化[J]. *科学通报*, 54(9): 1295-1302. [Chen J, Wang L L, Zhu H F, et al. 2009. Reconstructing mean maximum temperature of growing season from the maximum density of the Schrenk spruce in Yili, Xinjiang, China[J]. *China Science Bulletin*, 54(9): 1295-1302.]
- 符淙斌,王强. 1991. 南亚夏季风长期变化中的突变现象

- 及其与全球迅速增暖的同步性[J]. *中国科学(B辑)*, 6: 666-672. [Fu C B, Wang Q. 1991. The abrupt change phenomena of the southern Asian monsoon secular variation and its synchronization with global warming[J]. *Science in China(Series B)*, 6: 666-672.]
- 符淙斌,王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 16(4): 482-493. [Fu C B, Wang Q. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 16(4): 482-493.]
- 李江凤,袁玉江,由希尧,等. 2000. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 51-124. [Li J F, Yuan Y J, You X Y, et al. 2000. Dendrohydrology research and application[M]. Beijing: Science Press, 51-124.]
- 刘莉红,郑祖光. 2003. 近百余年我国气温变化的突变点分析[J]. *南京气象学院学报*, 26(3): 378-383. [Liu L H, Zheng Z G. 2003. Analysis on the abrupt change points of Chinese temperature in the last 120 years[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 26(3): 378-383.]
- 潘娅婷,袁玉江,喻树龙,等. 2005. 用树木年轮重建博尔塔拉河流域的降水量序列[J]. *新疆气象*, 28(6): 1-3. [Pan Y T, Yuan Y J, Yu S L, et al. 2005. Reconstruction of precipitation in the recent 394 a from tree-rings in the basin of Boertala River[J]. *Xinjiang Meteorolog*, 28(6): 1-3.]
- 钱维宏,朱亚芬,叶谦. 1998. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率[J]. *科学通报*, 43(10): 1098-1102. [Qian W H, Zhu Y F, Ye Q. 1998. The equatorial eastern Pacific SST anomaly of annual and decadal variability[J]. *China Science Bulletin*, 43(10): 1098-1102.]
- 尚华明,魏文寿,袁玉江,等. 2011. 树木年轮记录的新疆新源350a来温度变化[J]. *干旱区资源与环境*, 25(9): 187-190. [Shang H M, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2011. Variations of temperature during last 350 years at Xinyuan recorded by tree-ring[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(9): 187-190.]
- 时兴合,李栋梁,赵燕宁,等. 2006. 青藏铁路沿线1373年以来气温和地温的变化研究[J]. *中国沙漠*, 26(6): 959-962. [Shi X H, Li D L, Zhao Y N, et al. 2006. Change on temperature along Qinghai-Xizang railway since year 1373[J]. *Journal of Desert Research*, 26(6): 959-962.]
- 王绍武,叶瑾琳,龚道溢. 1998. 中国小冰期的气候[J]. *第四纪研究*, (1): 54-64. [Wang S W, Ye J L, Gong D Y. 1998. Climate in China during the little ice age[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 54-64.]
- 魏凤英,曹鸿兴. 1995. 中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究[J]. *大气科学*, 19(2): 140-148.

- [Wei F Y, Cao H X. 1995. Detection of abrupt changes and trend prediction of the air temperature in China, the Northern Hemisphere and the Globe [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 19(2): 140–148.]
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社. [Wei F Y. 2007. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorology Press.]
- 杨保. 2003. 青藏高原地区过去 2000 年来的气候变化[J]. *地球科学进展*, 18(2): 285–291. [Yang B. 2003. Climate history of the Tibetan plateau during the last two millennia[J]. *Advance in Earth Sciences*, 18(2): 85–291.]
- 杨梅学, 姚檀栋. 2002. 近 300 a 来古里雅冰芯记录的气候突变事件[J]. *冰川冻土*, 24(6): 717–722. [Yang M X, Yao T D. 2002. Abrupt climate change events recorded in the Guliya ice core in the past 300 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(6): 717–722.]
- 叶玮, 袁玉江. 1999. 新疆伊犁地区现代气候特征与 300a 来的干湿变化规律[J]. *中国沙漠*, 19(2): 97–103. [Ye W, Yuan Y J. 1999. The modern climatic characteristics and dry-wet fluctuations in the past 300 years in Yili area, Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 19(2): 97–103.]
- 喻树龙, 袁玉江, 何清, 等. 2007. 1468—2001 年新疆精河 5—8 月平均气温的重建[J]. *冰川冻土*, 29(3): 374–480. [Yu S L, Yuan Y J, He Q, et al. 2007. Reconstruction and analysis of temperature series from A. D. 1468—2001 in the Jinghe, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(3): 374–480.]
- 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 等. 2005. 用树木年轮重建天山北坡中西部 7~8 月 379 a 的降水量[J]. *冰川冻土*, 27(3): 404–410. [Yu S L, Yuan Y J, Jing H L, et al. 2005a. Utilizing tree-ring chronologies to reconstruct 378a precipitation from July to August at midwestern of north slope in Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(3): 404–410.]
- 袁玉江, 李江风, 胡汝骥, 等. 2001. 用树木年轮重建天山中部近 350a 来的降水量[J]. *冰川冻土*, 23(1): 34–40. [Yuan Y J, Li J F, Hu R J, et al. 2001. Precipitation reconstruction in the recent 350 a from tree-rings in the middle of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23(1): 34–40.]
- 袁玉江, 李江风. 1994. 天山东端树轮年表的响应函数[J]. *干旱区研究*, 11(1): 27–34. [Yuan Y J, Li J F. 1994. The response functions of tree-ring chronologies in the east end of Tianshan Mountain [J]. *Arid Zone Research*, 11(1): 27–34.]
- 袁玉江, 邵雪梅, 李江风, 等. 2002. 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*, 22(12): 2048–2053. [Yuan Y J, Shao X M, Li J F, et al. 2002. Discussion of precipitation information in Xiagansate tree-ring chronology and 326 year precipitation reconstruction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 22(12): 2048–2053.]
- 袁玉江, 喻树龙, 穆桂金, 等. 2005. 天山北坡玛纳斯河 355 a 来年径流量的重建与分析[J]. *冰川冻土*, 27(3): 411–417. [Yuan Y J, Yu S L, Mu G J, et al. 2005. Reconstruction and analysis of the 355 a runoff of the Manas River on the north slopes of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(3): 411–417.]
- 张瑞波, 喻树龙, 袁玉江, 等. 2009. 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*, 3(1): 14–19. [Zhang R B, Yu S L, Yuan Y J, et al. 2009. Development of the tree-ring grey chronology and climate significance in northern slope of Wusun Mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 3(1): 14–19.]
- 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 2011. 利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴仑台地区过去 645 年来的降水变化[J]. *地理科学*, 31(2): 251–256. [Zhang T W, Wang L L, Yuan Y J, et al. 2011. A 645-year precipitation reconstruction in Baluntai region on southern slope of mid-Tianshan Mountains based on tree-ring width [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31(2): 251–256.]
- 张治华, 吴祥定, 李骥. 1996. 利用树木年轮资料重建新获东天山 300 多年来干旱日数的变化[J]. *应用气象学报*, 7(1): 53–60. [Zhang Z H, Wu X D, Li J. 1996. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 300-year drought days in eastern Tianshan Mountains[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 7(1): 53–60.]
- Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2010. hronology development and climate response analysis of Schrenk spruce (*Picea Schrenkiana*) tree-ring parameters in the Urumqi river basin, China [J]. *Geochronometria*, 36: 17–22.
- Cook E R, Holmes R L. 1986. Users manual for ARSTAN[M]// Holmes R L, Admas R K, Fritts H C. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. Chronology Series 6, Tucson: University of Arizona, 50–65.
- Fritts H C. 1976. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 258–340.