

# 内蒙古阿尔山过去 187 年温度变化的树轮记录

刘 禹<sup>1,2</sup>, 相 楠<sup>2</sup>, 宋慧明<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;  
2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院 环境科学与工程系, 西安 710049; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**相关分析表明,内蒙古阿尔山落叶松树轮宽度指数与5—9月平均温度显著负相关,在此基础上,设计转换方程重建了该地区1822—2008年间5—9月平均温度变化,重建序列的方差解释量达到39.9%。重建温度序列表明,温度低于多年平均值(1822—2008年)的时段有1822—1841年、1893—1906年、1931—1941年和1980—1992年;而温度高于多年平均值的时段有1842—1871年、1880—1892年、1914—1930年、1942—1969年和1993—2003年。对比表明,阿尔山地区的温度重建序列与周边地区几条降水序列存在着高温和少雨的对应关系。

**关键词:**内蒙古阿尔山;落叶松;树木年轮宽度;温度重建

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2012)03-0862-06

## Tree-ring temperature records in Arxan, Inner Mongolia for the past 187 years

LIU Yu<sup>1,2</sup>, XIANG Nan<sup>2</sup>, Song Hui-ming<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Department of Environment Science and Technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The correlation analysis showed that the ring-width chronology was significantly correlated with the mean temperature from May to September in Arxan, Inner Mongolia. Based on the multiple regression model, the May—September mean temperature was reconstructed for Arxan for the past 187 years (1822—2008). The reconstruction can explain 39.9% variance of the observation. The reconstructed temperature series showed four cold intervals (1822—1841, 1893—1906, 1931—1941 and 1980—1992) and five warm intervals (1842—1871, 1880—1892, 1914—1930, 1942—1969 and 1993—2003). The reconstruction of the temperature showed a large regional representativeness after comparing with a nearby tree-ring based temperature series in Weichang. Moreover, the comparison with other tree-ring based precipitation series around the studied site showed that the high temperature period of Arxan corresponded with the dry period of regions in northeastern China.

**Key words:** Arxan; Inner Mongolia; *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.; tree-ring width; temperature reconstruction

我国气象记录资料大多始于1951年以后,时间跨度较短的器测资料一直是过去气候变化研究的瓶颈,日益成熟和高度发展的树轮气候研究正是突破这一瓶颈的有效途径之一。它不仅为历史气候变化

研究提供了科学的技术方法,更重要的是可以准确地重现气候历史变化轨迹和延伸器测记录,在过去气候的重建中发挥了重要作用。

我国北方东亚夏季风活动边缘带(也即北方环

收稿日期:2012-03-31

基金项目:国家自然科学基金(40890051);中国科学院项目(KZCX2-YW-Q1-01,KZZD-EW-04);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金

通讯作者:刘禹,E-mail:liuyu@loess.llqq.ac.cn

境敏感带)是我国气候、生态变化研究的重要区域。近年来,利用树木年轮资料在该区及其邻近地区获得了一些宝贵的研究成果,如利用内蒙古包头地区油松树轮宽度重建了2—7月上旬及6—8月上旬的降水总量,并以此分析了过去260年来东亚季风的强弱变化(刘禹等,2001)。利用树轮资料重建了公元1726年以来贺兰山北部5—7月降水量(Liu et al, 2004)和呼和浩特地区过去370多年来2—7月和2—6月的季节降水(Liu et al, 2007);利用树轮宽度重建浑善达克地区过去150多年以来上年7月到当年6月的全年降水量(Liang et al, 2008),利用重建的降水序列探讨东亚夏季降水的时空分布特点等(Liu et al, 2009, 2010)。由于北方环境敏感带年均降水量较为稀少(200~400 mm/年),目前这一地区的研究成果主要集中于重建降水要素,对于温度变化的研究涉及有限。本文利用采自我国北方东亚夏季风活动边缘带阿尔山地区的兴安落叶松(*Larix gmelinii*(Rupr.)Rupr.)树轮宽度,重建该地区1822年至2008年5—9月平均温度的变化历史,进一步研究了该地区温度变化的特征。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样点概况与样本采集

阿尔山位于内蒙古自治区兴安盟西北部,大兴安岭西南山麓,属中温带大陆性季风气候(刘智明等,2012),常年寒冷湿润,冬长无夏,春秋相连,年平均气温 $-3.2^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量448.8 mm,平均海拔1100 m。该区地处东部季风区与干旱区的干湿过渡带,独特的区位使得该区对气候干湿变化敏感,甚至具有一定的放大作用,能及时、灵敏的将东亚季风的变化记录下来。

研究用样本采集于阿尔山的南沟(NG)林场(图1)( $47^{\circ}09'N$ ,  $120^{\circ}35'E$ ,海拔1222~1400 m),兴安落叶松(*Larix gmelinii*(Rupr.)Rupr.)为优势树种。采样点森林茂密,土壤肥沃,树间距离较小。采集样本时,尽量避开那些可能受到各种干扰以及发生病虫害的树木,并可能在林缘和森林上限采集样本。每棵树用生长锥尽量从不同方向钻取两个芯,共采集兴安落叶松29棵,得到57个样芯。在实验室,对样本进行干燥、固定、磨光、交叉定年、年轮宽度测量(精度为0.001 mm),用COFECHA计算机程序(Holmes, 1983)进行交叉定年质量控制,剔除奇异点较多或与主程序相关较差的序列,最终进入总年表有48个样芯。

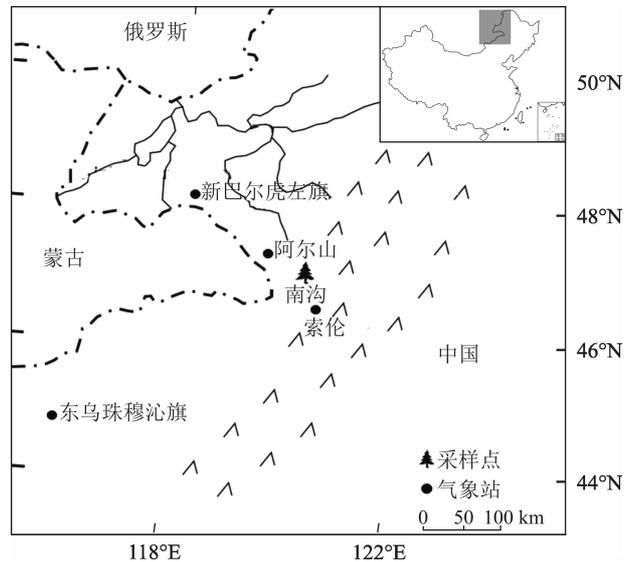


图1 采样点及气象站示意图

Fig. 1 Map of the sampling site and meteorological stations

### 1.2 年表的建立

使用ARSTAN程序(Cook et al, 1985)建立树轮宽度年表。以负指数函数或直线法滤除树木本身生长趋势,最终建立了南沟树轮宽度的3种年表,即标准化年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。年表的可靠起始年代以子样本信号强度(Sub-sample Signal Strength, SSS)大于0.85的年代来确定,对应的可靠年表时段为1822—2008年。由于STD年表保留有较多的低频信息,本文只对STD年表进行分析,采样点STD年表的统计特征见表1。

表1 标准化树轮年表的特征参数及公共区间(1822—2008)特征量

Table 1 Statistical characteristics of the standard chronology (common period 1822—2008 AD)

统计量	STD年表
平均指数(Mean)	0.99
平均敏感度(M. S.)	0.20
标准差(S. D.)	0.29
序列平均相关( $r_1$ )	0.29
平均树间相关( $r_2$ )	0.28
平均树内相关( $r_3$ )	0.72
信噪比(SNR)	13.89
样本总体代表性(EPS)	0.93
第一主成分方差解释量(PC1)	65.1%
SSS > 0.85 (子样本信号强度)	1822—2008年

### 1.3 气候资料的选用及相关函数分析

采样点周围有阿尔山( $119^{\circ}57'E$ ,  $47^{\circ}10'N$ ,海拔1027.4 m)、东乌珠穆沁旗( $116^{\circ}58'E$ ,  $45^{\circ}31'N$ ,海拔

838.7 m)、索伦(121°13'E, 46°36'N, 海拔550.18 m)和新巴尔虎左旗(118°16'E, 48°13'N, 海拔642.0 m)四个气象站,四站的多年月均降水及温度变化对比(图2)表明,该地区降水主要集中在夏季,降水量和温度最高的月份均出现在7月,有明显的雨热同期的特征。因为树轮年表与索伦气象站相关系数明显高于其他站,本文最终选取索伦站来进行树木对气候的响应分析。

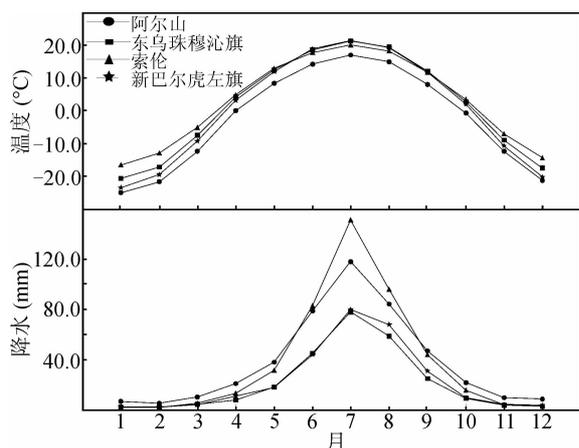


图2 采样点附近四个气象站多年平均气温与降水分布图  
Fig.2 Monthly total precipitation and mean temperature for the meteorological stations around sampling site

## 2 气候响应分析及转换方程

### 2.1 树轮对气候的响应分析

树木的生长不仅受到当年的气候及环境因素的影响,其生长前期的各种外界影响也对其生长起到了至关重要的作用,因此我们选取索伦站上年7月到当年9月的气象资料与树轮 STD 年表进行相关分析(图3),计算时段为1958—2008年。结果表明,每个月的月降水量与阿尔山树轮年表相关系数均较低,说明降水对于阿尔山树木的生长影响极小。而树轮年表与温度有着明确的负相关关系,尤其是与7月平均温度相关最显著,达到了-0.53,月份组合之后发现轮宽指数与5—9月的平均温度相关最显著,达到了-0.49( $p < 0.001$ ),5—9月为阿尔山地区树木的生长旺季,在此时段内,过高的温度容易造成土壤水分蒸发加剧,树木的蒸腾作用也会相应加强,这样造成树木体内的水分胁迫,限制树木的生理代谢活动,最终限制树木生长,这种响应关系在黄土高原地区的树轮研究中也有明确体现(Liu et al, 2008; Song and Liu, 2011; 蔡秋芳等, 2010)。

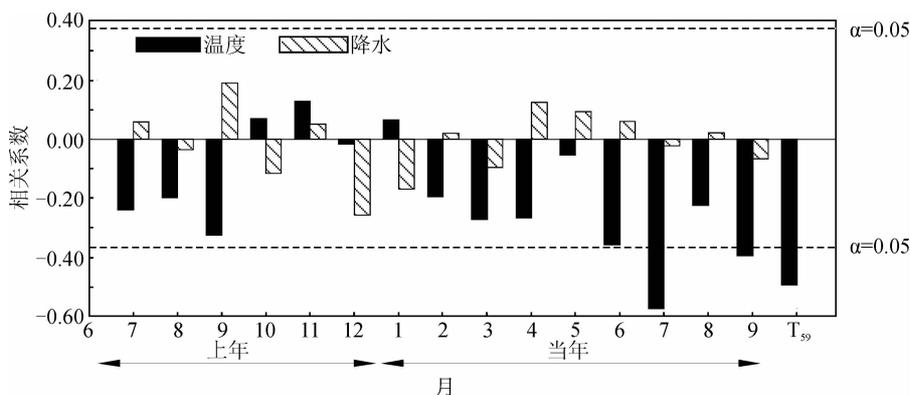


图3 树轮宽度年表年表(STD)与气象资料的相关关系  
Fig.3 The correlations between STD chronology and climate data

### 2.2 转换方程

从树木生理学角度来看,树木生长往往受到上一年气候的滞后影响(Fritts, 1976),而STD年表的一阶自相关系数较高,表明t年的气候因素很可能影响了t+1年的年轮宽度,所以本文采用多元回归技术进行建模。在把5—9月平均温度与当年 $W_t$ 值和下一年 $W_{t+1}$ 值作多元回归后,复相关系数为0.63,设计的温度重建方程如下:

$$T_{59} = -0.779W_{t-1} - 1.193W_{t+1} + 18.067 \quad (1)$$

( $N = 51$ ;  $r = 0.63$ ;  $R^2 = 39.9\%$ ;  $R_{adj}^2 = 37.4\%$ ;  $F = 15.96$ ;  $p < 0.001$ ;  $SE = 0.60$ ;  $t = 52.51$ ;  $D/W = 1.62$ )

公式(1)中, $T_{59}$ 为当年5—9月温度平均值, $W_t$ 为t年STD年表值, $W_{t+1}$ 为t+1年的STD年表值。方程(1)能够解释器测时段阿尔山地区5—9月平均气温方差变化的39.9%,调整自由度之后方差解

释量为 37.4%, Durbin-Watson (D/W) 值表明回归方程的一阶残差序列不存在自相关, 回归模型可靠。

由于气象资料较短, 我们采用 Jackknife 和 Bootstrap (Mosteller et al, 1977; Efron, 1979) 对

重建方程的稳定性进行检验(表 2)。结果显示, 各项统计量与回归方程的统计量十分接近, 说明重建方程的稳定可靠。图 4 中实测序列与重建序列也有着较为一致的变化趋势, 进一步证明了重建的可靠性。

表 2 校验期的 Bootstrap 和 Jackknife 检验结果  
Table 2 Verification results of the Bootstrap and Jackknife methods

统计量	建模期 (1958—2008)	校验期(1958—2008)	
		Jackknife 均值(取值范围)	Bootstrap 均值(取值范围)
$r$	0.63	0.63(0.59, 0.66)	0.63(0.35, 0.76)
$R^2$	39.9%	40%(35%, 44%)	40%(12%, 58%)
$R^2_{adj}$	37.4%	37%(32%, 41%)	37%(8%, 57%)
SE	0.60	0.60(0.57, 0.60)	0.59(0.40, 0.70)
$t$	52.51	51.98(49.71, 54.55)	52.84(41.97, 65.18)
$F$	15.96	15.74(12.41, 18.06)	16.95(3.33, 33.64)
$p$	0.0001	0.0001	0.0001(0.0001, 0.044)
Durbin-Watson	1.62	1.63(1.59, 1.72)	1.57(1.15, 1.73)

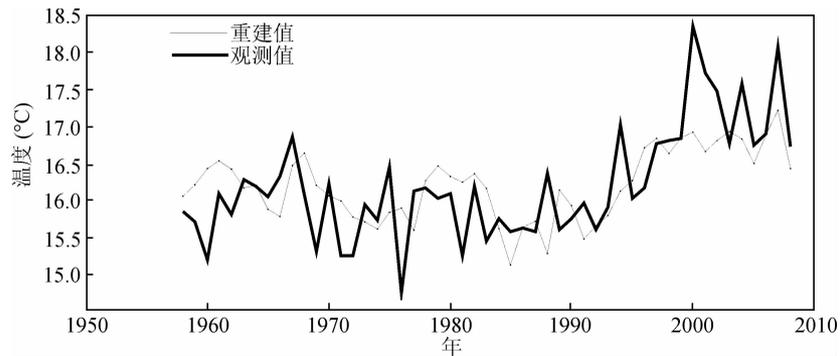


图 4 阿尔山地区 5—9 月平均温度重建值与观测值对比

Fig. 4 Observed value for May—September temperature vs. values predicted from tree-ring reconstruction

### 3 重建及结果分析

根据转换方程(1)重建了阿尔山地区 1822—2008 年 5—9 月的平均温度(图 5)。该序列多年均值(Mean)为 16.0℃, 标准差( $\sigma$ )为 0.45℃。从图 5 可以看出, 在重建期间内温度值低于 Mean - 1 $\sigma$ (本文定义为 5—9 月低温年)的有 35 年, 高于 Mean + 1 $\sigma$ (本文定义为 5—9 月高温年)的有 38 年, 其余 113 年 5—9 月平均温度在均值附近波动。在对重建结果进行 11 年滑动平均后, 重建序列中的冷期和暖期在年代际尺度上表现的比较明显, 其中 1840s 后期至 1890s 是重建历史中持续时间最长的一个暖期, 经过一段短暂的低温时段后, 20 世纪 20—30 年

代是一个显著的暖期, 这个暖期与华北地区在此时期的大旱事件相对应(Liang et al, 2006)。而后降温, 之后气温又开始回升, 在 50 年代达到一个较高值, 在 80 年代中至 90 年代初一个持续时间较短的低温时段之后, 90 年代开始快速剧烈的升温。利用近 50 年的观测资料对东北地区夏季气温研究表明(杨素英和王谦谦, 2003), 东北夏季普遍增暖, 增暖最强中心在海拉尔和阿尔山附近。另外, 阿尔山 5—9 月平均温度重建与围场地区(刘禹等, 2009)基于树轮重建的 5—6 月平均温度有着大致相同的变化趋势, 尽管时段略有差异, 但一些显著的低温高温时段, 如 1900s—1910s、1920s—1930s 的高温期和 1893—1901 年的低温期均两个重建序列中同步出现。

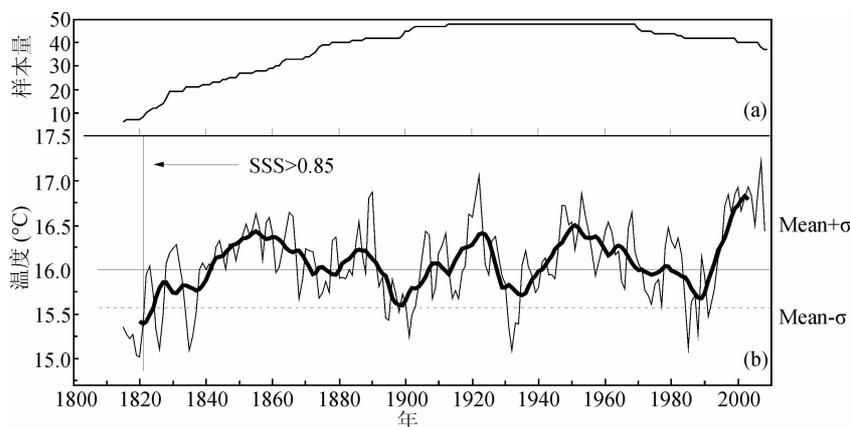


图5 样本量(a)和阿尔山1822—2008年( $SSS > 0.85$ )当年5—9月平均温度重建(b)  
其中细实线为重建值,粗平滑线为11年滑动平均,水平实线为多年平均值

Fig. 5 Sampling depth and the May—September temperature reconstruction for Arxan (1822—2008 AD)  
(Thin line was the reconstructed temperature; bold line was the 11-year moving average curve; horizontal line was average temperature from 1822 to 2008)

在某种程度上,我国干旱地区经常存在着高温和少雨的对应关系,一些极端干旱事件往往与过去温度重建序列中的高温时段相对应。例如,重建序列中1890,1906,1920,1951和2003等分别对应着基于树轮重建的海拉尔地区(Liu et al, 2010)的少雨年份。重建序列11a滑动平均后,这种对应关系在年代际尺度上表现的更加明显。例如在温度偏高时期(高于均值)1842—1871、1880—1892、1914—1930、1942—1969、1993—2003年,研究区周边的三条树轮降水序列均表现出干旱或降水减少(Liu et al, 2010; Peterson 2001);而温度偏低时期(低于平均值)1822—1841年、1893—1906年、1931—1941年和1980—1992年则相反。历史记载(张德二, 2004;曾早早等,2009)的1875—1878年(光绪初年)、1923—1930(民国时期)发生的几次持续3年以上、覆盖中国北方地区的严重干旱事件与阿尔山的几个高温时段都有很好的对应关系。其中1923—1930年间的高温是阿尔山地区过去二百余年较为严重的一次高温事件,平均温度达到了 $17^{\circ}\text{C}$ 。在2000年的时候阿尔山地区的温度达到了 $16.9^{\circ}\text{C}$ ,有资料称,当年内蒙古赤峰市周边地区发生了6条河水的断流以及34座水库的干涸(魏甦生, 2009)。

#### 4 结论

(1)本文依据现代树木年轮气候学方法,对采自内蒙古阿尔山地区的兴安落叶松树轮样本进行了交叉定年,并建立了该地区的树轮宽度年表。树轮

年表与气候要素的相关分析分析表明,影响阿尔山地区树轮生长的主要气候因子为5—9月平均气温。在此基础上,本文设计转换方程,重建了研究区1822—2008年5月到9月的平均温度变化历史。各项统计检验结果表明重建可靠。

(2)重建序列11年滑动之后,温度偏高的时段有1842—1871年、1880—1892、1914—1930年、1942—1969年和1993—2003年。在这些高温时段,研究区附近的树轮降水序列均表现出干旱或降水减少;而温度偏低时期(1822—1841年、1893—1906年、1931—1941年和1980—1992年)则相反。

致谢:感谢包光在野外采样中给予的帮助。

#### 参考文献

- 蔡秋芳,刘禹,包光,等. 2010. 树轮记录的吕梁山地区公元1836年以来5~7月平均气温变化[J]. *科学通报*, 55(20): 2033—2039. [Cai Q F, Liu Y, Bao G, et al. 2010. Tree-ring-based May—July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(26): 3008—3014.]
- 刘禹,蔡秋芳,马利民,等. 2001. 树轮降水记录及东亚夏季季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例[J]. *地学前缘*, 8(1): 91—97. [Liu Y, Cai Q F, Ma L M, et al. 2001. Tree ring precipitation records from Baotou and the East Asia summer monsoon variations for the last 254 years [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 91—97.]
- 刘禹,田华,宋慧明,等. 2009. 油松年轮记录的河北围场公元1884年以来5~6月平均温度[J]. *第四纪研究*, 29(5): 896—904. [Liu Y, Tian H, Song H M, et

- al. 2009. Tree ring based reconstruction of the May ~ June mean temperature since A. D. 1884 in Weichang, Hebei province, China [J]. *Quaternary Science*, 29 (5): 896-904. ]
- 刘智明,杜金方,青德孟. 2012. 阿尔山近40年气候特征分析[J]. *北京农业*, (6): 207-208. [ Liu Z M, Du J F, Qing D M. 2012. Nearly 40 years Arxan climate characteristics analysis [J]. *Beijing Agriculture*, (6): 207-208. ]
- 魏牲生. 2009. 中国历史上的干旱[J]. *知识就是力量*, (4): 16-18. [ Wei S S. 2009. The drought in Chinese history [J]. *Knowledge is Power*, (4): 16-18. ]
- 杨素英,王谦谦. 2003. 近50a东北地区夏季气温异常的空变化特征[J]. *南京气象学院学报*, 26(5): 653-660. [ Yang S Y, Wang Q Q. 2003. Spatial/temporal variations of summer temperature in Northeast China in recent 50 years [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 26 (5): 653-660. ]
- 曾早早,方修琦,叶瑜,等. 2009. 中国近300年来3次大旱灾的灾情及原因比较[J]. *灾害学*, 4(2): 116-122. [ Zeng Z Z, Fang X Q, Ye Y, et al. 2009. Comparison of disaster situation and causes of three extreme droughts in China over the past 300 years [J]. *Journal of Catastrophology*, 4(2): 116-122. ]
- 张德二. 2004. 中国历史气候记录揭示千年干湿变化和重大干旱事件[J]. *科技导报*, (8): 47-50. [ Zhang D E. 2004. Variation of dry-wet climate and severe drought events as revealed in the climate records of China over the past 1000 years [J]. *Science & Technology Review*, (8): 47-50. ]
- Cook E R. 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization [D]. Tucson: University of Arizona.
- Efron B. 1979. Bootstrap methods: Another look at the jackknife [J]. *The Annals of Statistics*, 7: 1-26.
- Fritts H C. 1976. *Tree Rings and Climate* [M]. New York: Academic Press, 1-553
- Holmes R L. 1983. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, (43): 69-78.
- Liang E Y, Eckstein D, Liu H Y. 2008. Climate-growth relationships of relict *Pinus tabulaeformis* at the northern limit of its natural distribution in northern China [J]. *Journal of Vegetation Science*, 19: 393-406.
- Liang E Y, Liu X H, Yuan Y J, et al. 2006. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China [J]. *Climatic Change*, 79: 403-432.
- Liu Y, Tian H, et al. 2010. Tree ring precipitation reconstruction in the Chifeng-Weichang region, China, and East Asian summer monsoon variation since A. D. 1777 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 115, D06103, doi: 10.1029/2009JD012330.
- Liu Y, Bao G, Song H M, et al. 2009. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 282(1-4): 81-87.
- Liu Y, Linderholm H W, Song H M, et al. 2008. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China [J]. *Boreas*, 38: 285-291.
- Liu Y, Shi J F, Shishov V, et al. 2004. Reconstruction of May-July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A. D. 1726 from tree-ring late-wood widths [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 405-409.
- Liu Y, Sun J Y, Yang Y K, et al. 2007. Tree-ring-derived precipitation records from Inner Mongolia, China, since A. D. 1627 [J]. *Tree-ring Research*, 63(1): 3-14.
- Mosteller F, Tukey J W. 1977. *Data Analysis and Regression. A Second Course in Statistics* [M]. Addison-Wesley, Reading, MA., 1-588.
- Peterson N, Jacoby G C, D'Arrigo R D, et al. 2001. Hydrometeorological reconstructions for Northeastern Mongolia derived from Tree Rings; AD 1651-1995 [J]. *Journal of Climate*, 14: 872-881.
- Song H M, Liu Y. 2011. PDSI variations at Kongtong Mountain, China, inferred from a 283-year *Pinus tabulaeformis* ring-width chronology [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116, D22111, doi: 10.1029/2011JD016220.