

太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建

戴君虎 邵雪梅 崔海亭 葛全胜
刘鸿雁 唐志尧

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要 采用太白山高山林线附近的太白落叶松树木年轮资料,按照树木年轮学要求和方法进行前期处理、交叉定年,建立树轮宽度指数序列。基于气候要素影响当年和次年树木生长的原理,利用多元回归技术探讨了树轮宽度指数与生态气候要素——温暖指数之间的相关关系,重建了太白山地区近 300 年的温暖指数。结果表明:1745~1765 年、1845~1855 年、1880~1900 年以及 1905~1915 年为几个较为明显的冷期;1725~1745 年、1765~1775 年、1800~1810 年、1865~1875 年和 1890~1905 年相对而言属暖期。太白山地区气候的冷暖变化有大约 30~40 年的变化周期。将本项研究结果与国外相关研究对比还说明,太白山地区的气候变化可能具有一定的全球性特征。

关键词 树轮宽度指数 温暖指数 气候变化 太白山

作为一种代用资料,树木年轮有分辨率高、记录连续性好和重建精度较高等特点,是全球变化研究中获取过去气候变化信息的重要方法之一^[1~3]。本文通过对秦岭主峰太白山高山林线附近的树木年轮学分析,重建了该地区过去近 300 年间的生态气候指标——温暖指数,并用该指标指示区域气候变化。由于该时段覆盖小冰期的较大部分,因此对于说明我国北方小冰期的气候变化有比较重要的参考价值。

1 采样及方法

1.1 采样点基本情况

本研究共 154 个树木年轮样本均取自秦岭主峰太白山玉皇池西侧和跑马梁附近。采样点位于高山林线附近,海拔 3 400~3 500 m 之间,属暖温带与北亚热带的交界处,也是湿润区和半湿润区的过渡带。太白山基带的地带性植被为暖温带南部落叶栎林亚地带,取样树种为太白落叶松 (*Larix chinensis*),也是太白山高山林线的优势树种。取样环境和取样树种均符合树木年轮学的要求,是理想的取样点和树木年轮样本种类^[4]。其中,玉皇

* 第一作者简介:戴君虎 男 35 岁 副研究员 自然地理学专业 E-mail: daijh @gsnrr. ac. cn

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KZCX2-314)、中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程前沿项目(批准号:CXI0G-A01-002)和国家自然科学基金项目(批准号:49871080)资助

2002-05-23 收稿,2003-04-20 收修改稿

池附近年降水量和年平均气温分别是 160 mm 和 - 3.2 ,位于山脚的眉县年降水量和年平均气温分别为 609 mm 和 12.7 。

1.2 树轮资料处理

对野外取得的样本进行凉干、固定和打磨等处理,并用骨架示意图进行交叉定年^[4]。

为保证建立准确的树木年轮年表,利用 COFECHA 计算机程序进行交叉定年的质量控制^[5]。首先采用样条函数(spline)对于每个数据序列进行滤波,以减少低频振荡的影响,保证所有序列数值的一致性。使用样条函数进行滤波时,样条函数的步长为 32 年¹⁾。对于滤波后仍然保留低频振荡的样本,再利用自回归模型去除其短波干扰。与此同时,为突出窄轮在整个序列中的作用,分析过程中对于样本序列进行了对数转换,再取距平。以距平序列平均值代表采样点树轮宽度总体变化的主序列(master series),主序列覆盖了所有样本的时间区间。将单个样本序列同主序列比较,以 50 年为一段时间段,每隔 25 年求该时段样本宽度序列同主序列的相关系数,取置信概率为 0.99,相关系数的临界值为 0.3281。并且将该样本序列区间在主序列前后各 10 年的时段上逐步移动计算相关系数,用这些相关系数来检验每个年轮序列是否与主序列在对应年份具有最大的相关性程度。若最大的相关系数没有出现在对应的年份上,就需检查样本、找出问题,并修改出现问题的年代。因此,交叉定年过程可纠正定年错误,也可以对于问题较大的样本予以剔除。本研究的量测和定年结果表明各样本序列与主序列的平均相关系数都超过 0.6,说明所建树轮年表定年准确、具有代表性。

2 结果与讨论

2.1 树轮年表的建立

建立树轮年表是整个树木年轮学分析的关键。年表的建立和分析由计算机程序 ARSTAN (for AutoRegressive STANdardization)来完成,即通过对样本序列的树轮宽度量测值进行去生长趋势(detrending)和标准化(standardization)处理过程来实现。

本文采用步长为 128 年的样条函数来拟合树木生长趋势;采用商去除树木生长趋势,并以加权平均法将去生长趋势的序列合成无量纲的树轮宽度指数序列,使树木年轮年表尽量多地反映外界环境信息。所建年表长度为 398 年,考虑到样芯复本要求,可靠长度为 277 年(从 1720 年开始算起)。这样,建立了太白山高山林线附近树木年轮的标准化年表(STD)、自回归年表(ARS)和差值年表(RES)(图 1)。

值得注意的是,在上述的 3 类树轮年表中,STD 年表比其他两种年表保留较多的低频信号。同时,鉴于 ARS 年表的复杂性,响应分析和重建过程首先选取 STD 年表和 RES 年表,统计特征及共同区间分析详见表 1 和表 2。

树木年轮学理论^[1]认为,在相同样本量的条件下,上述指标中 r_1 , r_2 , r_3 , SNR , EPS 和

1) Gissino-Mayer H D, Holmes R L, Fritts H C. International Tree-Ring Data Bank Program Library: User's Manual.

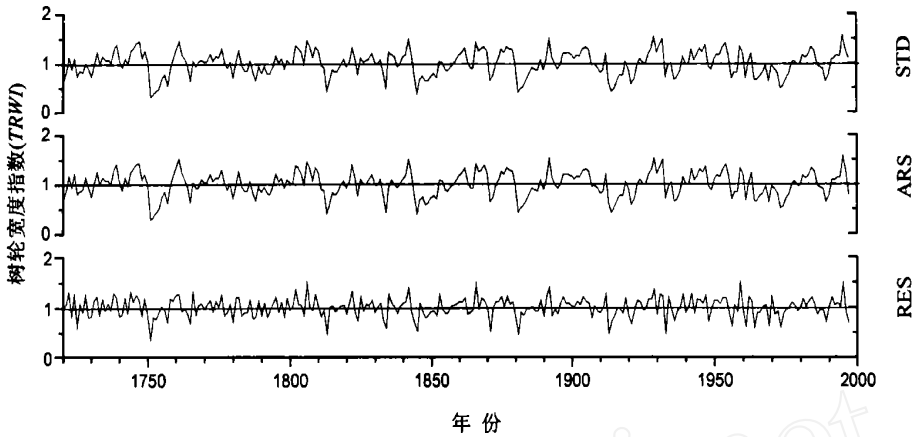


图 1 太白山树木年轮 STD、ARS 和 RES 年表

Fig. 1 Tree-ring Standard, Arstan, Residual chronologies of Mt. Taibai since 1720

表 1 不同类型树轮年表的统计特征分析

Table 1 Statistical character of different tree-ring chronologies

年表类型	年表指数	年表中位值	平均敏感度	均方差	偏度系数	峰度系数	一阶自回归指数
STD	0.9 937	0.9 911	0.2 181	0.2 986	0.2 327	0.6 934	0.6 065
RES	0.9 992	1.0 069	0.2 247	0.1 962	- 0.3 524	0.6 307	0.0 119

表 2 树轮年表共同区间分析一览表

Table 2 Statistical results of chronology of common interval from Mt. Taibai

年表类型	r_1	r_2	r_3	SNR	EPS	PCA ₁ / %	年表指数	均方差
STD	0.572	0.568	0.788	34.143	0.972	58.4	0.987	0.258
RES	0.511	0.507	0.737	26.74	0.964	52.6	0.998	0.194

r_1 , r_2 和 r_3 分别为样本之间的平均相关系数、树与树之间的平均相关系数以及同一棵树不同样本间的平均相关系数; SNR (signal-to-noise ratio) 为信噪比; EPS 为样本量的总体代表性 (agreement with population chronology); PCA₁ 为第一主分解释释总方差的百分比

PCA₁ 统计量的数值越高,所选样本对于群体的代表性越好,环境信息含量也越多。分别比较样本共同区间上 STD 年表和 RES 年表的上述各项指标可知,分析过程采用 STD 年表效果更好。本研究基于 STD 年表进行。

2.2 树轮宽度指数与生态气候要素的关系

利用太白气象站的年平均气温 (T) 和年降水量 (P) 等气候资料分别计算出温暖指数 (WI)、寒冷指数 (CI)、湿润指数 (HI) 和生长季积温 (TG) 等一组生态气候指标 (eco-climatic variables)。将 1963 ~ 1996 年之间太白山 STD 年表中的树轮宽度指数 ($TRWI$) 与对应时段的年平均气温、年降水量以及上述计算所得出的各生态气候指标分别做相关分析,结果表明树轮宽度指数 ($TRWI$) 与温暖指数 (WI) 的相关关系最为显著 (图 2)。图 2 为多变量相关系数三角矩阵的直观表达,对角线上的直方图表示各变量的自身统计特征,即分别将其

分布区间划分为 9 等份, 变量在每等份区间的分布频数; 其他小图表示纵坐标为纵向对应变量、横坐标为横向对应变量的一元线性拟合结果。

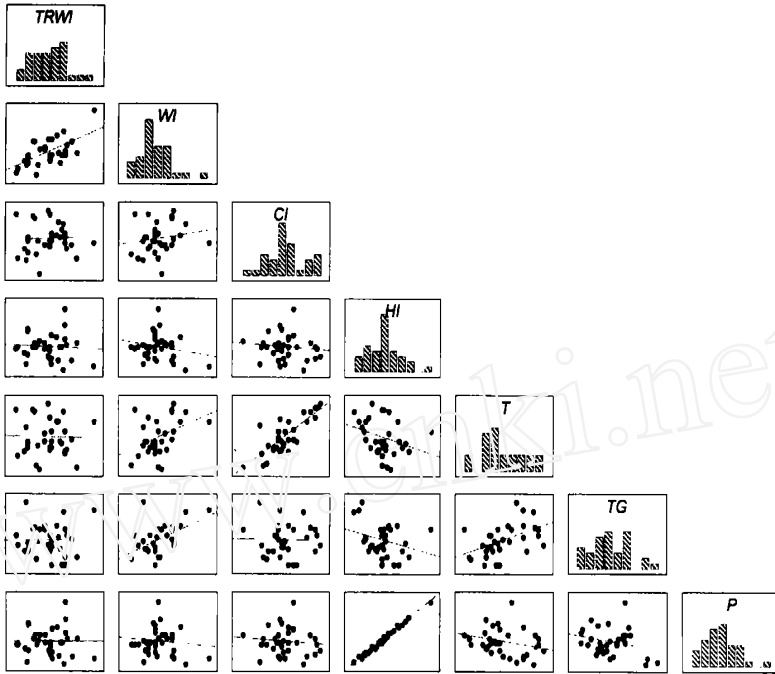


图 2 树轮指数 (STD 年表) 与生态气候要素之间相关关系示意图

Fig. 2 Relationship between tree-ring width index (STD) and eco-climatic variables

其中, 温暖指数 (WI)、寒冷指数 (CI) 和湿润指数 (HI) 可分别用公式 (1) ~ (3) 计算, 各表示一年内月平均气温高于 5 的气温总和、月平均气温低于 5 的气温总和^[6]和年降水量与温暖指数的比值^[7]。由于 STD 年表中的年轮宽度指数 (TRWI) 与温暖指数 (WI) 之间的相关性最为显著, 选温暖指数为生态气候重建的对象。

$$WI = \sum_{i=1}^n (t_i - 5) \quad (1)$$

$$CI = - \sum_{i=1}^n (5 - t_i) \quad (2)$$

$$HI = P / WI \quad (3)$$

式中 t_i —— 平均温度 5 以上第 i 个月的平均温度

n —— 平均温度 > 5 和 < 5 的月数, 因此 WI 和 CI 的单位为 月

STD 年表与 RES 年表除上述自身统计特征差别之外, 计算表明在有气象观测数据覆盖的 1963 ~ 1996 年之间, 两种年表中树轮宽度指数 (TRWI) 与对应年份温暖指数 (WI) 的相关系数分别为 0.61 和 0.55, 这也是本研究采用前者重建温暖指数的一个重要原因。

根据树木年轮学的有关理论, 某年的年轮形成时, 不仅受当年气候要素影响还可能受前两年气候的滞后影响^[1]。换言之, 不仅气候要素影响当年的树轮宽度指数 $TRWI_n$, 也影

响第二年、甚至第三年的树轮宽度指数 $TRWI_{(n+1)}$ 和 $TRWI_{(n+2)}$ ^[8]。在本研究中,气候指标系指生态气候要素——温暖指数(WI)。而且,当年的树轮指数和下一年的树轮指数之间不存在显著相关关系。因此,可以建立温暖指数与 STD 年表中当年的树轮宽度指数 $TRWI_n$ 和第二年的树轮宽度指数 $TRWI_{(n+1)}$ 之间的多元回归关系,可得函数关系式:

$$WI = 58.17 + 0.57 TRWI_n + 0.07 TRWI_{(n+1)} \quad (4)$$

该式通过置信概率为 0.975 的 F 检验,相关关系较为显著。

温暖指数较早被原作者^[6]应用于研究世界生态气候区划上,后来也较多地应用于讨论植物分布和气候要素的关系。事实表明,温暖指数实际上是一种简化了的有效积温。由于它由各月平均气温求得,资料来源比积温的广泛且容易得多^[9]。在高山林线附近的应用更说明区域植物生长中所体现出的有效积温法则,即在植物生长发育过程中,需要从环境摄取一定的热量才能完成其特定阶段的发育^[10]。植物生长和温暖指数之间这种密切关系,既保证了通过树轮资料重建气候要素的可靠性,同时也使重建结果具有较为明显的生态学意义。

2.3 太白山近 300 年生态气候要素的重建

根据公式(4),重建了近 300 年来太白山的温暖指数。重建结果见图 3。将气象观测数据覆盖区间(1963~1996 年)温暖指数的实际数值与重建结果相比较,结果证明本研究对于温暖指数的重建是精确可靠的,可以作为讨论区域气候变化的重要证据。

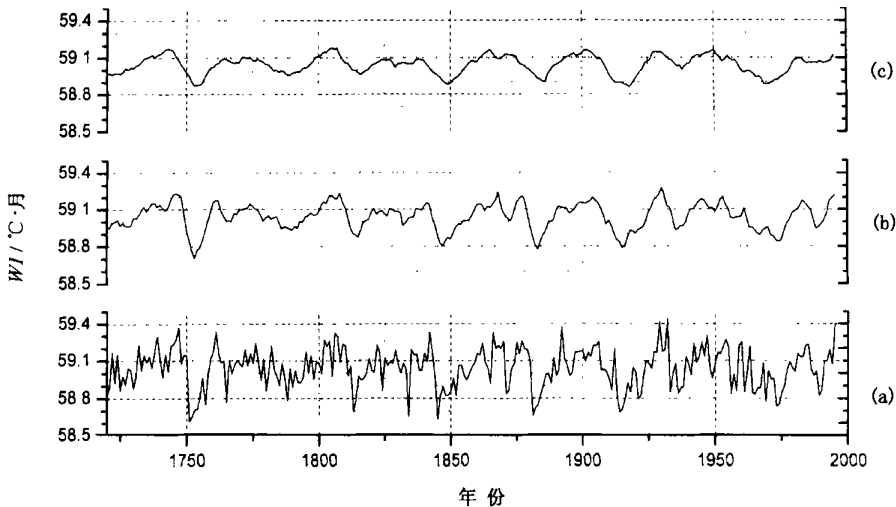


图 3 太白山附近地区 1720~1997 年温暖指数的重建结果

(a) 原始重建结果 (b) 步长为 5 年的移动平均平滑结果 (c) 步长为 10 年的移动平均平滑结果

Fig. 3 Reconstructed warm index in the adjacent areas of Mt. Taibai from 1720 to 1997

由于时间跨度不十分长,去生长趋势时可能去掉部分低频变化信息,重建结果可主要说明生态气候指标的年代际变化,但是仍包含部分低频变化信息,可以得出下列主要结论:

(1) 重建区间由两部分组成, 20 世纪中叶以前的部分属于小冰期, 其间的重建结果可以用来说明小冰期的气候变化; 之后的部分可说明近代气候的变化。由于一般学者倾向于认为中国的小冰期始于 1450s^[11], 因此研究时段也覆盖了中国小冰期的较大部分。

(2) 研究时段内的 1745~1765 年、1845~1855 年、1880~1900 年以及 1905~1915 年为几个较为明显的冷期; 1725~1745 年、1765~1775 年、1800~1810 年、1865~1875 年和 1890~1905 年相对来说应属暖期。其中的冷期基本可与历史时期陕西境内各地方志资料中记载的寒害灾害相吻合^[12]。

(3) 其间有几个比较明显的转折点, 变冷分别出现在 1750 年、1845 年和 1880 年附近; 转暖的有 1760 年、1805 年和 1930 年前后等。

(4) 利用移动平均手段, 分别以 5 年和 10 年为步长对近几百年以来太白山地区温暖指数的重建曲线进行平滑处理, 滤去高频变化(见图 3), 结果说明太白山气候的冷暖变化有 30~40 年的周期性特征。

(5) 与前人小冰期气候变化的研究成果相比, 本研究多个时段内的变化规律都与之相吻合(图 4a)。比如, 竺可桢^[13]提到的 1840~1890 年之间冷期的主要部分, 童国榜等^[14]的对太白山孢粉记录的分析结果也明确指出这个冷期的存在。

(6) 1880~1990 年之间部分与王绍武等^[15]对同期西北地区平均气温距平变化趋势的重建结果非常近似。其中, 王绍武^[16]提出的 20 世纪暖期(1920s~1940s)也在本研究中得到很好的印证。

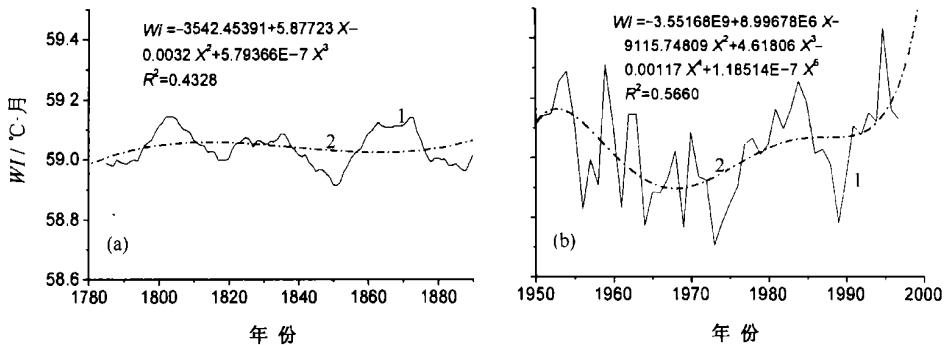


图 4 1780~1890 年之间(a)和最近 40 多年来(b)区域气候变化趋势

1. 重建曲线 2. 拟合曲线

Fig. 4 Trend of climate change from 1780 to 1890(a) and that of the last 40 years(b)

(7) 20 世纪以来, 温暖指数(WI)总体趋于升高, 以近三、四十年以来为最明显。对近半个世纪以来温暖指数(WI)的重建值进行分段分析, 拟合出温暖指数(WI)随时间的变化规律。结果表明, 近年来的气候变暖趋势非常明显(图 4b)。尤其是在 20 世纪中叶以后的几十年间, 区域温暖指数(WI)持续上升, 充分说明了气候变暖在加速, 值得密切关注。

(8) 全球对比。将本研究的温暖指数重建结果与 J. Overpeck 等^[17]人利用多种资料重建环北极地区过去 400 年气候的集成研究进行对比, 可以发现具体细节上虽然有差异, 但是绝大多数的转折点都有较好的对应关系。这也说明太白山的气候变化不仅仅具有区域

特征,可能还有一定的全球性意义。

3 结论

树木年轮取样点位于高山林线位置,该部位植物生长对气候变化的响应比较灵敏,环境受人为活动的影响较小。因此,采用树木年轮宽度的变化能够比较客观地说明气温等环境因子的变化。

温暖指数的重建结果较好地反映了研究时段内区域的气候变化,并与国内外同类研究相吻合。结果表明太白山地区的气候变化可能同时具有区域和全球意义。

本文利用树木年轮资料重建了一种生态气候参数,为植物生态学研究提供新的线索。这与国外学者利用高海拔地区假山毛榉(*Nothofagus pumilio*)树木年轮资料恢复春末积雪覆盖时间的工作相类似^[18]。但是,对高山带的植物生长而言,温暖指数是一个类似于活动积温的环境因子,能够比较精确地反映区域气候的冷暖变化。但是它却不能完全替代平均气温等传统气候统计概念。所以,区域平均气温的变化还值得进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976. 207 ~ 245
- 2 Becker A. Predicting global change impact on mountain hydrology and ecology. *IGBP Report*, 1997, **43**: 5 ~ 10
- 3 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. *第四纪研究*, 1997, (3): 265 ~ 270
- 4 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990. 77 ~ 92
- 5 Holmes R L. Computer-assist quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, **43**: 69 ~ 78
- 6 Yim Y, Kira T. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula (Distribution of some indices of thermal climate). *Japanese Journal of Ecology*, 1975, **25**(2): 77 ~ 88
- 7 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用. *生态学杂志*, 1985, **3**(3): 215 ~ 222
- 8 刘禹, 马利民. 树木年轮宽度资料对近 376 年呼和浩特季节降水的重建. *科学通报*, 1999, **44**(18): 1 986 ~ 1 992
- 9 方精云. 吉良与生态学的发展. *生态学杂志*, 1995, **14**(2): 70 ~ 75
- 10 蔡晓明, 尚玉昌. 普通生态学. 北京: 北京大学出版社, 1995. 80 ~ 96
- 11 王绍武, 王日升. 中国的小冰河期. *科学通报*, 1990, **35**(10): 769 ~ 772
- 12 张波, 冯风, 张纶等. 中国农业自然灾害史料集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994. 429 ~ 476
- 13 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 见:《竺可桢文集》编辑小组. 竺可桢文集. 北京: 科学出版社, 1979. 475 ~ 498
- 14 童国榜, 张俊牌, 范淑贤等. 秦岭太白山顶近年来的环境变化. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, **16**(4): 95 ~ 103
- 15 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. *第四纪研究*, 1998, (1): 53 ~ 62
- 16 王绍武. 小冰期气候的研究. *第四纪研究*, 1995, (3): 202 ~ 212
- 17 Overpeck J, Hughen K, Hardy D *et al.* Arctic environmental change of the last four centuries. *Science*, 1997, **278**: 1 251 ~ 1 256
- 18 Villalba R, Boninsegna J, Veblen T *et al.* Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of Northern Patagonia. *Climatic Change*, 1997, **36**: 425 ~ 454

RECONSTRUCTION OF PAST ECO-CLIMATE BY TREE-RING WIDTH INDEX OF LARIX CHINENSIS ON MT. TAIBAI

Dai Junhu Shao Xuemei Cui Haiting
Ge Quansheng Liu Hongyan Tang Zhiyao

(Institute of Geography and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;
Peking University, Beijing 100871)

Abstract

Tree-ring increment cores of *Larix chinensis* were sampled from alpine timberline at an altitude of about 3 400m to 3 500m, on Mt. Taibai, located in Shaanxi Province.

The natural conditions there are very harsh with an average annual temperature of -3.2 and annual precipitation of 160 mm, which is quite different from places at the foot of the mountain with average annual temperature and annual precipitation of 12.7 and 609 mm respectively. Plants at this transitional zone are very sensitive to climate change, and it is very ideal sampling places, and the tree species is also very ideal. According to the discipline of dendrochronology, the relationship between tree-ring width index ($TRWI$, in STD chronology) and climate variables were studied. It was found that warmth index (WI) is closely correlated with tree-ring width index, not only chronology of the selected year's ($TRWI_n$), but also the chronology of last year's ($TRWI_{(n+1)}$). As a result, the WI in the last 300 years were reconstructed by the following formula:

$$WI = 58.17 + 0.57 TRWI_n + 0.07 TRWI_{(n+1)}$$

The results show that climate during periods of 1745 ~ 1765, 1845 ~ 1855, 1880 ~ 1900, and 1905 ~ 1915 were cold periods; but that during periods of 1725 ~ 1745, 1765 ~ 1775, 1800 ~ 1810, 1865 ~ 1875 and 1890 ~ 1905 were relatively warmer than normal years.

These results are in good agreement with many other studies upon the Little Ice Age climate, and can be of great value to studies on climate change during Little Ice Age in China.

Moreover, a 30 to 40 years' cycle was found in temperature changes in the region.

Finally, the comparison between this study and Overpeck's results shows that the climate change in the adjacent areas of Mt. Taibai is in phase with the global climatic changes.

Key words tree-ring width index, warmth index, climate change, Mt. Taibai