

采用树木年轮资料重建山东沂山地区  
200 多年来的湿润指数\*

沈长泗 陈金敏 张志华  
(山东省气象科学研究所 济南 250031) (国家气候中心 北京 100081)

吴祥定 张佩云 王桂岩  
(中国科学院地理研究所 北京 100101) (山东省林业科学研究所 济南 250014)

摘 要 在中国,尤其在中国西北部地区,树轮年表是古气候信息的一个重要来源。由于某种原因,中国东部地区少有树轮研究工作。该文通过运引 ARSTAN 程序,建立并研究了山东境内沂山地区的树轮主年表(1750~1992)。树轮和气候要素的响应面分析得出沂山地区的树轮生长和温度降水呈非线性相关,因此使用传统方法重建单个气候因子是不合理的。通过响应函数和回归分析,5月至8月份的湿润指数( $P/T$ )被确定为重建对象,该湿润指数值代表了温度和降水对树轮生长的共同影响,且相关性很高,远超过信度检验。利用线性回归方法,获得重建湿润指数的预报方程,用树木年轮年表重建了自1750年以来的沂山地区逐年5月~8月湿润指数的变化。分析了沂山地区湿润指数重建的可靠性。

关键词 沂山 树轮 湿润指数 气候重建  
分 类 中图法 P532

1 资料和年表建立

1992 年 10 月,选择了在山东临朐县沂山林场作树轮取样,这一带属暖湿带亚干燥季风区,以距采样点最近的临朐、安丘、沂源三个气象站气候要素的平均为例,年平均气温为 12.12℃,每年平均有 3 个月的气温在 0℃ 以下,1 月平均气温为 -3.3℃,7 月为 25.6℃。平均年总降水量为 668.0 mm,雨量多集中在 5 月~8 月,占全年降水的 70%。采样点附近的详细气候状况如表 1。

表 1 采样点附近县气象站气候基本数据 (1961~1992)

Tab. 1 The characteristics of weather station in the sampling area

台 站	纬 度	经 度	高 度 (m)	年平均温度 (℃)	年总降水量 (mm)	年相对湿度 (%)	年蒸发量 (mm)
临 朐	35°03'	118°21'	87.9	12.4	651.4	68	1 774
安 丘	36°25'	119°10'	63.9	12.1	659.5	69	2 059
沂 源	36°11'	118°09'	304.5	11.9	694.2	63	1 866

\* 山东省自然科学基金资助课题 (Y91E0861)。山东省气象科学研究所的陈艳春同志参加了部分资料整理工作。  
收稿日期: 1996-11-18, 收到修改稿日期: 1997-12-28

这里垂直地带性不很明显, 平原和山脚地区以农作物为主, 山区则多为森林覆盖, 取样地点, 在距临朐、安丘、沂源三个气象站约 50 km 左右的沂山林场古寺分场内 ( $36^{\circ}17'N$ ,  $118^{\circ}40'E$ , 860 m), 那里生长着茂密的油松林, 郁闭度达 0.7。林下为稀疏草本植物, 土壤主要为淡褐色森林土, 土层较厚, 较少岩石裸露, 取样地点在山的阳坡, 坡向为 S, 坡度约为 45 左右。取样地点由于远离城镇和居民点, 交通不利, 树木受人类活动影响甚少, 多为原始林和次生林。所取钻芯样本的树木, 多是树龄较长, 未有明显受损的立木, 树高约 6 m ~ 11 m, 胸径一般在 0.6 m 左右。

在临朐县沂山林场古寺分场所取样本是选择了该地点 12 株树, 每株树 2 个钻芯, 合计 24 个样本, 最长树龄为 258 年。为计算和识别方便, 该地点被记为 YIS, 各个钻芯样本分别记为 01a...12a 和 01b...12b。

依据树木年轮分析的基本程序<sup>[1]</sup>, 首先对钻芯样本进行预处理和初步定年; 尤其是注重采用示意图式的方法将各类窄轮列出, 对各个样本之间的定年进行相互比较, 查找出可能存在的伪年轮和遗失年轮, 然后进行年轮宽度量测, 并运用计算机程序 COFECHA 对交叉定年作检验<sup>[2]</sup>。该程序既可以检查交叉定年和量测有无明显错误, 又可以判断各个序列与主序列之间的差异大小, 为正确选用每个序列进入最终年表提供依据。其中, 编号为 YIS08b 的年轮序列因为它的奇异点过多且与主序列的相关性较差而被剔除, 这样就选用了 23 个样本序列作建立最终年轮年表的分析。

为作生长量订正, 去除树木自身生长趋势, 并将部分树木之间非一致性扰动滤掉, 采用了样条函数对各个样本序列进行曲线拟合, 其中样条函数的步长选用 48 年 ~ 80 年, 在建立该地点的最终树轮年表时, 采用了 ARSTAN 程序<sup>[3]</sup>, 除建立常规的标准化年表 (STD) 以外, 还建立了差值年表 (RES) 和自回归标准化年表 (ARS)。Cook (1985) 最早提出这三种年表的建立<sup>[4]</sup>, 是为了去掉树木个体特有的和由前期生理条件对后期生长造成的持续性影响, 并可估计取样点树木群体所共有的持续性造成的生长量, 这在美国东部的树木年轮分析时, 已被较多采用。近来在我国华山和秦岭地区亦尝试采用此途径建立三种年表, 效果较佳<sup>[5]</sup>。临朐县沂山林场古寺分场所建这三种年表的部分统计结果 (表 2), 其中包括它们各自的平均值 (m)、一阶自相关系数 (ac)、平均敏感度 (ms) 和标准差 (SD)。从平均值来看, 它们都是一致的, 标准差也较为接近。但是, RES 年表的一阶自相关系数最小, STD 次之, 而 ARS 最大。它们的平均敏感度以 RES 为最大, ARS 次之, 而 STD 最小, 这大体表明 RES 年表保留的高频振荡信息比其它二种年表为多。

为进一步比较 RES 与 STD 序列之间的差异, 分别计算了 2 株树 23 个序列之间在它们共同区间 127 年 (1866 ~ 1992) 的相关系数和其它统计量 (表 3), 其中  $r_1$  为所有序列之间的平均相关系数;  $r_2$  为树与树之间的平均相关系数;  $r_3$  为每株树二个钻芯序列之间的平均相关系数; SNR 代表信噪比;  $PC_1$  是第一主分量解释总方差的百分比; EPS 是样本对总体的解释信号。显然除相关系数  $r_1$  外, 无论  $r_2$  和  $r_3$ , 还是其它各种统计量, 差值序列比去趋势序列都要高, 说明差值序列中高频振荡的同步性较强, 更能代表总体序列的变化, 这正是树木年轮气候学所要求的。因此, 在深入分析树木生长对气候要素的响应, 以及用来重建过去气候变化时, 都应选用 YIS 的差值年表。

表 2 YIS 三种年表的统计特征  
Tab. 2 Statistic Characteristics of the chronologies of YIS

年表	m	a. c	MS	SD
STD	1. 000	0. 379	0. 245	0. 281
RES	1. 000	0. 083	0. 267	0. 257
ARS	1. 001	0. 435	0. 251	0. 300

从图 1 可以看出随着降水的增多, 树木生长加速。这和树木对水分的要求是相一致的, 当降水量低于一定值时, 温度(5 月~8 月)和树木轮宽的生长呈现明显的负相关性, 而且降水越少时这种负相关性越显著。因此可以这样认为, 在沂山地区, 油松的生长对水分的要求非常敏感, 当温度满足树木生长的情况下, 温度对油松生长的作用间接表现为温度升高, 增加林区的蒸发量, 降低森林的土壤含水量, 从而抑制油松的生长。这种影响在降水稀少的情况下更为明显。当降水处于某一适可的情况下, 温度对油松生长的影响不明显, 这表明就树木生理学本身对温度的正需求和温度的增高而导致森林土壤含水量的降低所产生的负影响, 在某种情况下相互持平。当降水高于某一值时, 随着温度的上升, 树木的生长达到某一最高值, 而后随温度的增加树轮宽有变窄的趋势。可见沂山地区油松的生长明显受制于生长期的温度和降水, 而这两个气候因子, 在某种程度上可以认为是通过对土壤含水量的制约, 而直接影响树木的生长速度。这给我们一个启示, 利用沂山树木年轮序列来重建过去土壤湿度的变化, 较单纯地重建温度和降水的变化在树木生理学上意义更为明确。

2 树木生长对气候的响应

为探讨临朐县沂山林场古寺分场树木生长状况对气候要素变化的响应, 首先采用响应函数<sup>[6]</sup>, 分析 RES 年表与临朐、安丘、沂源三个气象站的平均气温和降水的关系, 考虑到树木的生长期和气象资料的长短, 所选用的气候要素(月平均气温与月降水量)是从当年的 8 月至年初的 1 月(8 个月), 16 个因子, 时间从 1961 年至 1992 年(32 年), 响应函数计算结果见图 2, 复相关系数为 0. 785, 总方差解释量为 61. 62%, *F* 为 5. 45, *p* 为 0. 000 8。图中各因

表 3 YIS 标准化序列与差值序列的统计量  
Tab. 3 Statistic characteristics of the standard and the residual series

序 列	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	SNR	PC <sub>1</sub>	EPS
去趋势 (STD)	0. 441	0. 399	0. 402	3. 467	47. 03	0. 861
差 值 (RES)	0. 422	0. 423	0. 487	4. 231	48. 55	0. 874

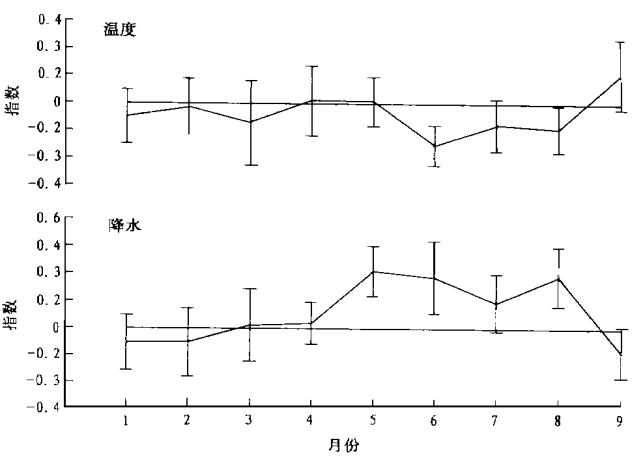


图 1 树轮指数和温度 (5 月~8 月)、降水 (5 月~8 月) 的响应面

Fig. 1 Response surface related tree growth indices to temperature (May-August) and precipitation (May-August)

子的竖线表示 0.95 置信限。

对各月因子响应的计算结果表明, 树木对气温的响应多为负值, 尤其是决定树木生长的 6 月~8 月均为达到显著水平的负响应, 而树木对降水的响应 3~8 均为正值, 且 5 月~8 月都为显著因子。在生长季开始之前, 气温与降水对树木生长的影响不大, 表现为负响应, 树木生长主要是同时受降水与气温的影响。在生长季内, 至少从 5 月至 8 月, 降水越多气温越低, 对树木生长越有利。归结起来, 树木生长量  $G$  就是气温 ( $T$ ) 和降水 ( $P$ ) 变化的函数:  $G=f(T, P)$ 。

本文利用响应面函数来分析树木生长期的温度和降水对沂山油松生长的影响, 响应面函数<sup>[7]</sup>是将树木生长作为多个气候因子的多项式函数, 因此更能客观地表达树木生长和气候因子之间的相互联系, 其函数关系可表达为:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_i = & \beta_0 + \beta_1 \bar{T}_i + \beta_2 \bar{P}_i + \beta_3 \bar{T}_i^2 \\ & + \beta_4 \bar{P}_i^2 + \beta_5 \bar{T}_i \bar{P}_i + \beta_6 \bar{T}_i^3 + \beta_7 \bar{P}_i^3 + \beta_8 \bar{T}_i^2 \bar{P}_i + \beta_9 \bar{T}_i \bar{P}_i^2 + \alpha \end{aligned}$$

式中  $\bar{Y}_i$  表示树木年轮宽度,  $T, P$  分别为该年生长期的平均温度和降水。

根据植物的生理生长特征, 树木在满足一定的温度和湿度条件下开始生长, 作为生长初期的早材生长量在树木轮宽中所占的比例要高于晚材生长量。春夏两季早材生长期的温度和降水对每年的树木轮宽生长具有决定性作用。因此本文选择 5 月~8 月的温度和降水两个气候因子同树木生长作响应面函数分析来判断温度和降水在树木生长过程中的作用。

在以轮宽指数与气候因子作响应面函数分析时, 首先须考虑气候上的一致性, 在选择气象台站资料时, 力求气象站点和采样点同属一个气候区。因此我们选择了距采样点较近的临朐、安丘、沂源三个气象站的平均气候资料和沂山树木年表的差值指数资料, 来作响应面函数的计算分析。响应面函数的分布见图 2,  $x$  轴和  $y$  轴的值分别为标准化的 (5 月~8 月) 降水和温度,  $z$  轴的响应面值则代表树轮指数对气候要素温度和降水的响应。

### 3 气候重建

通过响应面函数的计算分析, 可以认为沂山树木年轮生长并非简单地与气候因子存在着线性关系, 而是复杂地受制于温度和降水的共同影响, 这种影响可以理解为主要通过对土壤含水量的制约而形成的。考虑到这些因素, 本文选用湿润指数 ( $MI$ ) 作为重建的对象,

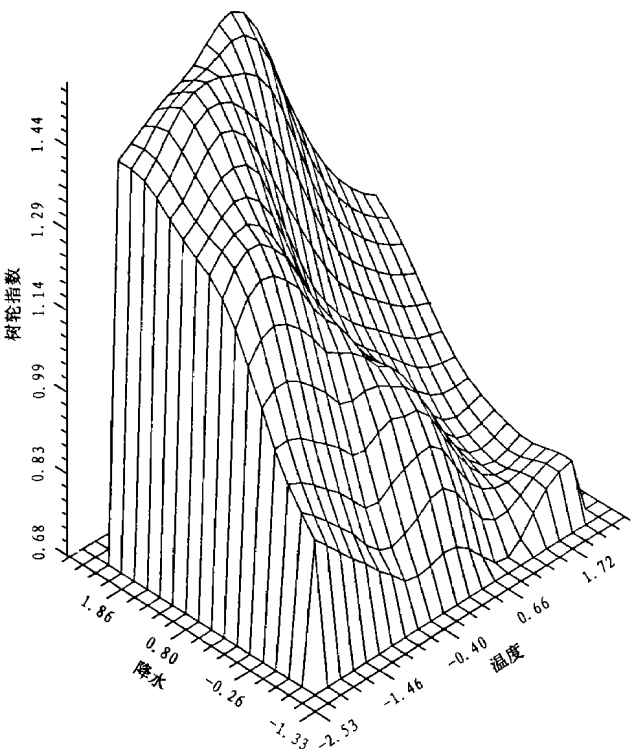


图 2 树轮指数对温度和降水的响应函数

Fig. 2 Response function of tree ring with temperature and Precipitation

这里湿润指数定义为:

$$MI = P/T$$

式中  $P$  与  $T$  分别为同一期间降水和气温的平均值。

在统计学上, 因子间相互制约相关的程度是通过相关系数的计算而获得的, 经过筛选计算轮宽指数和湿润指数之间的相关性, 发现 5 月~8 月的  $MI$  值与树木年轮指数值 ( $RW$ ) 关系最好。二者之间存在着明显的正相关, 这种关系的植物生理学解释是明显的, 即土壤水分的不足阻碍树木根系对土壤养分的吸收, 抑制树木躯干养分物质的输送, 同时水分的供给不足, 制约树木细胞的活力, 从而影响树木形成层细胞分裂的速度, 使轮宽变窄。

通过以上的计算和分析, 作者认为沂山油松的树轮指数对 5 月~8 月份湿润指数值 ( $MI$ ) 有着明显的响应关系, 为选择湿润指数作为重建对象提供了理论依据, 本文利用线性回归求取转移函数的方法, 获得重建湿润指数的预报方程, 由于气象观测资料仅 32 年, 在确定由树轮指数重建湿润指数的转换函数时, 取  $n=32$  较为准确, 转换方程为:

$$Y = 14.81X + 5.65$$

式中  $Y$  为湿润指数的预报值 (图 3 中虚线),  $X$  为轮宽指数, 该方程的相关系数平方值  $r^2 = 0.62$ , 达到 0.01 信度水平;  $F$  值为 46.4,  $p$  值为 0.000 1, 远通过显著性水平检验。

树轮气候学上, 验证重建可靠性的传统手段是取某一时段的实测资料作为独立验证期, 用其余的实测资料作为校准期。通过对实测数据和统计结果的数据比较分析, 来判断重建的可靠性。本文考虑到实测资料仅 32 年 (1961~1992), 用传统的验证手段可能增加统计上的不稳定性, 因此采用依次选用 1961 年~1992 年中任一年的资料作为独立验证数据, 而其余 31 年的资料作为校准数据的方法, 采取逐一剔除法, 经过 32 次的循环计算发现, 湿润指数的实测数据和验证结果的趋势和数值非常一致, 缩减误差值  $RE$  是普遍用于验证重建精确性的一个统计量<sup>[8]</sup>, 其表达式为:

$$RE = 1.0 - \left\{ \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 / \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right\}$$

式中  $\hat{Y}_i$  和  $Y_i$  分别为观测值和估计值与非独立资料平均的偏差,  $RE$  的值在 0 和 1 之间, 一般认为  $RE$  值大于等于 0.3 通过验证, 计算得的  $RE$  值为 0.58, 远大于 0.3, 亦证实了重建结果的可靠性。

最终重建的 243 年 (1750~1992) 5 月~8 月份的湿润指数序列如图 5 所示, 其中粗实线为经过低通滤波 (设定为滑动间隔  $m$  等于 5 的二项系数滑动) 后的湿润指数值。由图 4 可以看出, 该地的湿润状况一直有所变化, 有时起伏还较大, 平均值约为 20.5, 而最大值与最小值分别为 32.0 以上和 9.0 以下, 最近几十年湿润指数的变化幅度较大。

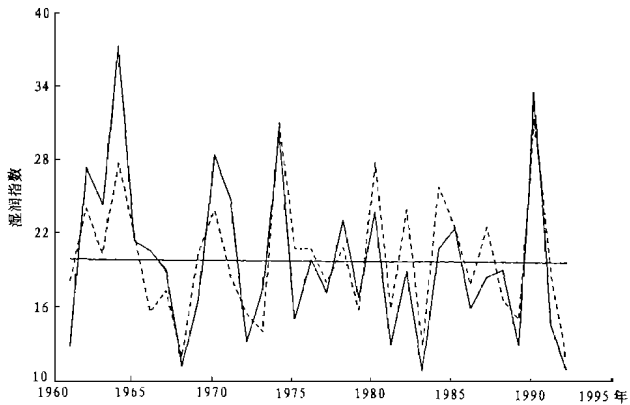


图 3 湿润指数重建值 (虚线) 与  
实测值 (实线) 比较

Fig. 3 Comparison between reconstructed and  
observed moisture index

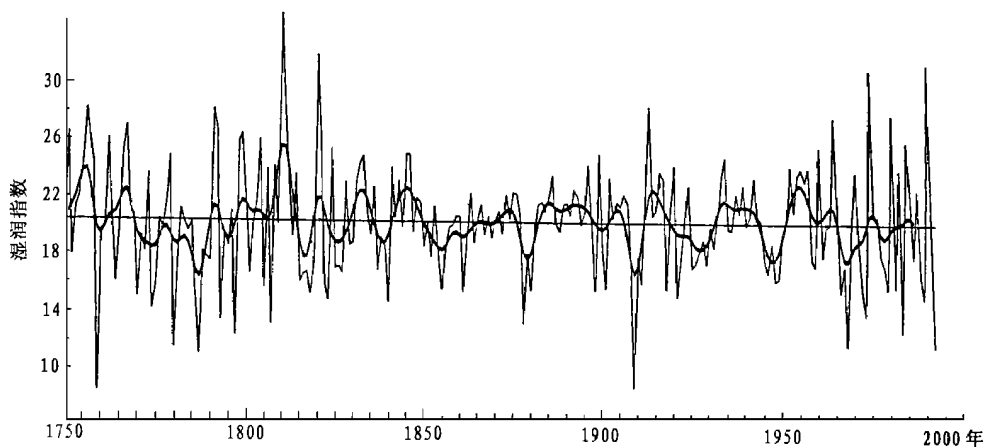


图 4 沂山地区湿润指数重建值 (1750~1992)

Fig. 4 Reconstructed yearly moisture index in the Yishan area

为了分析沂山地区湿润指数重建的可靠性, 作者取山东境内有气象观测记录最长的济南站 (1919~1992) 做对比分析, 在有气象观测记录的公共期间内 (1961~1992), 将 5 月~8 月份济南和临朐、安丘、沂源三地平均的湿润指数做相关分析; 结果相关系数仅 0.2, 通不过显著性检验。这说明湿润指数的地域性差异较大, 单纯地用它作检验是不合理的。作者在沂山地区历史文献记载整编的旱涝等级资料中<sup>[9]</sup>, 从 1750 年~1960 年间, 选取了 32 个干旱年份和重建的湿润指数值做比较, 相互吻合年份为 24 年, 占 75%, 说明湿润指数值较小时, 所反映的干旱年份地域性和一致性较好。

依据对沂山林场古寺分场油松树木年轮变化的分析, 可得到如下几点结论: (1) 该地树木年轮变化可用来建立三种年轮年表, 其中以差值年表 (RES) 所包含的气候信息为多。(2) 该地树木生长对生长季的温度和降水变化响应较为敏感。(3) 可用差值年表重建该地最近 240 多年来的湿润指数的逐年变化。(4) 该地干湿状况变化与历史文献记载大体接近。

## 参 考 文 献

- 1 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976. 567
- 2 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating admeasurement: Tree-ring Bull, 1983, **43** 69~75
- 3 Holmes R L. program ARSTAN (version B- 1992). Laboratory of Tree Ring Research. University of Arizona, Tucson. USA, 1992, 30
- 4 Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization. Ph. D. Dissertation. Univ. of Arizona. Tucson, USA, 1985, 171
- 5 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. 地理学报, 1994, **49**(2) 174~181
- 6 Guet J et al. Response Function in Climate from Tree-Rings. Cambridge University Press, 1982, 38~50
- 7 Lisa J, Graumlich, Linda B. Brubaker. Reconstruction of Annual Temperature (1590~1979) for Longmire Washington. Derived from Tree-Ring. Quaternary Research, 1986, **25** 223~234
- 8 吴祥定等. 树木年轮与气候变化. 气象出版社, 1990.
- 9 中央气象局气象科学研究院. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京 地图出版社, 1980.

UTLIZING TREE RING CHRONOLOGIES TO  
RECONSTRUCT 200 YEARS MOISTURE INDEX  
IN YISHAN, SHANDONG PROVINCE

Shen Changsi      Chen Jinmin

Zhang Zhihua

(Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031)      (National Climate Center, Beijing 100081)

Wu Xiangding

Zhang Peiyun      Wang Guiyan

(Institute of Geography, CAS, Beijing 100101)      (Shandong Forestry Institute, Jinan 250014)

Abstract

Tree ring chronologies are a major source of paleoclimatic information in China, especially in Northwest China. For some reasons, there are seldom studies about the tree ring in eastern China. In this paper the major tree ring chronology (1750 ~ 1992) in Yishan, Shandong Province, was analyzed by running program ARSTAN. The response surfaces of tree ring and climate indicate that growth of tree ring in Yishan mountain is nonlinear correlated with precipitation and temperature. It is unreasonable to reconstruct climatic variables separately using traditional methods. The reconstructed moisture index ( $P/T$ ) during May to August, in which both temperature and precipitation influence the tree-ring growth, was estimated from response function and regression model. The relationship between tree ring and moisture index (May to August) is obvious. The predictive equation ( $Y= 14.81X+ 5.65$ ) was obtained from a linear regression model, where  $Y$  is predicted value of moisture index,  $X$  is tree ring width index. As a result, the local moisture index in 1750 AD at Yishan, Shandong Province, was reconstructed based on tree ring chronologies.

For verification of the reliability of the reconstructed moisture index in Yishan area, the dry years were selected from document data, which were used to compare with the years with the small reconstructed moisture index. From 1750 to 1960, there are 32 dry years in document data, which were coincided with the 24 small moisture index years (1758, 1768, 1774, 1778, 1786, 1805, 1814, 1825, 1837, 1838, 1856, 1860, 1876, 1877, 1878, 1899, 1907, 1917, 1920, 1925, 1927, 1948, 1952, 1959). There are 75 percent correct predictions, which indicates that the reconstructed results were reliable.

**Key words**    Yishan, tree ring chronologies, moisture index, climate reconstruction

作 者 简 介

沈长泗, 男, 1936 年 4 月生。1961 年毕业于南京大学气象系, 现为山东省气象科学研究所高级工程师。从事天气预报和气象灾害研究工作, 主持过“有限元方法在数值天气预报上的应用”课题, 曾在《科学通报》、《大气科学》上发表论文多篇。著有《山东省自然灾害防御》(合著)、《气象信息与最优经济决策导论》等。