

# 华山树木年轮年表的建立<sup>\*</sup>

邵雪梅 吴祥定<sup>\*\*</sup>

(中国科学院地理研究所树木年轮实验室, 北京 100101)

**提 要** 本文以秦岭东部的华山为例, 论述了建立常规标准化、差值、自回归标准化这三种树木年轮年表的途径, 指出了在半湿润地区利用这种途径建立树木年轮气候学年表的必要性, 并进一步分析了三种年表对气候要素的响应及其差异。在取样环境较复杂的地点, 建立多种年表有利于深入探讨气候要素与树木生长之间的关系, 有推广的价值。

**关键词** 树木年轮 年表 树木年轮气候学 自回归模式 气候

## 1 引言

利用树木年轮宽度的年际间变异重建过去的气候和环境变化, 在全球变化研究(IGBP)中已被广泛应用<sup>[1,2]</sup>。由于重建的精度与可靠性很大程度上取决于树木年轮年表的质量, 尤其是要求年轮定年的准确与最大限度地剔除非气候与环境因子对树木生长的影响, 因此, 人们十分重视树木年轮年表的建立过程。近年来, 在典型的干旱、半干旱和森林上限以外的其它生态环境中取样, 建立树木年轮年表, 获取气候和环境变化信息, 已成为树木年轮气候学研究的新领域之一。

一般说来, 在干旱、半干旱地区或森林上限附近取样, 树木年轮年表的质量比较容易得到保证, 因为在这些环境中, 树木生长较为疏散, 树木间的相互影响不大, 非同步扰动较小。同时, 随着气候变化, 树木年轮中窄轮的分布比较一致, 易于交叉定年<sup>[3]</sup>。而在森林内部或较湿润的地区, 树木年轮宽度的敏感性较差, 窄轮的分布型不明显, 给交叉定年带来一定的困难。此外, 树木生长茂密, 前期生长的持续性和树木之间的相互竞争, 都会产生非同步扰动叠加在气候要素对树木生长的影响上, 使得年表的建立过程较为复杂。

Box-Jenkins 提出的时间序列分析方法<sup>[4]</sup>与应用, 使得在半湿润和湿润环境下建立树木年轮年表的研究有所进展。80 年代初, Meko<sup>[5]</sup>首先应用时间序列模式消除树木生长持续性在气候重建过程中的影响。之后, Cook<sup>[6]</sup>和 Guiot<sup>[7]</sup>提出在年表的建立过程中, 用时间序列模式对树木生长的持续性以及由树木相互竞争产生的非同步扰动进行拟合, 建立不同于常规标准年表<sup>[8]</sup>的新年表。近年来, 国外已开始尝试采用这些新的年表, 重建过去气

\* 国家自然科学基金资助课题。

\*\* 美国亚利桑那大学 M. Hughes 教授和 J. Burns 先生曾参与部分工作, 中科院地理研究所湛绪志、尹训钢和陕西省气象局李兆元等参加野外取样, 在此一并致谢。

来稿日期: 1993 年 4 月; 收到修改稿日期: 1993 年 5 月。

候要素的变化<sup>[2,9]</sup>。

在我国,尚未进行过这类分析。本文则以处于秦岭东部的华山为例,阐述在半湿润和湿润地区树木年轮年表的建立过程,并论及其必要性与潜力。

## 2 资料与方法

华山(34°29'N,110°05'E)位于秦岭东端,地处我国暖温带向北亚热带过渡的半湿润地区的山地,年平均气温为 5.9℃,年降水量为 900mm 左右,日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活跃生长期主要在 5—9 月。在华山几个山峰附近,主要森林树种为华山松、油松、白皮松和铁杉,林间植物多为草本与灌丛。

1990 年 5 月在华山的南峰、中峰和西峰附近,采集了华山松(*Pinus armandi Franch*)的 21 株树标本,计 42 个钻芯。所取样本的树龄一般较长,多为 300—400 年。采样的海拔高度在 1 900—2 000m,地势缓陡不均,坡度变化在 5°—70°之间。森林的郁闭度也变化很大,从 1/10 到 7/10 均有。这批样本既有来自土壤贫瘠的孤树,甚至有的生长在岩石缝隙之间,又有来自立地条件很好、树木间彼此为邻的茂密树林。此外,华山历来为游览胜地,人类对树木生长的影响亦在所难免。由此可见,该地点的取样环境十分复杂。

将样本带回实验室后,首先按照样本处理的基本程序<sup>[10]</sup>,对钻芯进行了磨平、打光、定年和年轮宽度测量。由于在华山附近尚无其它定年准确的树木年轮年表可供参考,且所取样本的年轮宽度变化的敏感程度不算很高,则着重进行了交叉定年的验证。验证过程分为二步,一是采用计算机程序 COFECHA 对样本序列进行相关检验<sup>[11]</sup>。利用此程序不仅能检查出定年的错误,判断有否较大的量测误差,还能根据序列平均相关系数的指标,指出每个序列与大多数序列变化的差异,为该序列能否进入总年表提供筛选的依据。在具体应用中,我们先采用了步长为 32 年的样条函数滤去样本序列的低频变化,又对序列作了对数转换,以突出窄轮的效应。相关系数的计算时段为 50 年,相邻间隔为 25 年,相关检验的置信区间为 99%。验证的另一步是将样本序列进行折线图比较<sup>[12]</sup>。先将同一株树的二个序列按同一坐标画出折线图,检查它们的变化是否同步。然后,将相关系数高的和相关系数低的序列在滤去低频变化后画在同一坐标上进行对比。通过折线图的比较,不仅能直观地查出定年错误发生的具体年限,还易于发现个别的量测异常值。这样,就可以对定年与宽度量测中出现的问题进行检验,确保年表的质量。

树木年轮表的建立,是通过 ARSTAN 程序完成的<sup>[13]</sup>。它对常规年表建立程序所作的改进在于不仅能去除树木生长中与年龄增长相关连的生长趋势,建立常规的标准化年表(STD),还能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,从而建立一种新的年表称为差值年表(RES)。更有特色的是,它还能估计取样点树木群体所共有的持续性造成的生长量,并将这部分生长量加回到差值年表上,建立另一种新年表,称为自回归标准化年表(ARS)。这两种新年表的建立,是考虑到树木个体特有的持续性是由该树周围的局部小环境变化造成的,象两株相邻树木之间对光照需求的竞争;而树木群体共有的持续性是由取样点较大范围环境变化造成的,包括森林病虫害、火灾、大气污染、大面积间伐,以及气温或降水的持续性变化。由于所建年表是用来研究过去气候或

环境变化,于是在建立年表过程中,应去除树木个体特有的,而保留群体共有的持续性。

考虑到华山取样地点位于半湿润地区,样本群体中包含了树木之间的竞争、人类活动影响等非同步扰动,我们除了建立常规的标准化年表以外,还尝试了建立另外两种新的年表。

华山年表建立的第一步,是对 42 个钻蕊进行筛选。根据交叉年验证的结果,将相关性差、年代过短和含太多奇异点的个别序列,从总体序列中除去。结果 34 个样本序列被选中用来建立年表。第二步是采用常规的曲线拟合样本序列中与树龄相关联的生长趋势,并作订正,得到去趋势序列。经过试用不同的曲线,反复对比,最后我们选用了步长为 250 年的样条函数拟合了大部分样本序列,用负指数函数拟合了其余 6 个具典型半干旱环境特征的样本序列。订正方法是取样本序列和与其对应的生长曲线的商。第三步是对订正后的去趋势序列拟合树木群体共有的和个体特有的持续性生长量。我们采用了 Box-Jenkins 的回归模式<sup>[4]</sup>,先拟合了树木群体共有的持续性生长量,包括计算群体自相关系数、判别自回归模式的阶数和计算自回归模式的系数<sup>[6]</sup>。而个体特有的持续性生长量的拟合是在群体自回归模式阶数的基础上,计算每个去趋势序列的自回归模式的系数,将去趋势序列与其对应的个体持续生长量取商,就得到差值序列。

将去趋势序列与差值序列分别合并成常规的标准化年表和差值年表时,通常是采用算术平均的方法。由于此方法对个别远离群体的极值较为敏感,故本文采用了双权重平均法<sup>[14]</sup>代替算术平均法,合并序列。这样可以强调众多序列的同步变化,减少个别非同步变化对年表值的影响。建立起差值年表以后,用已拟合的群体自回归模式计算出群体共有的持续性生长量,再加回到差值年表上,便得到自回归标准化年表。

### 3 分析与讨论

为了便于对华山树木年轮年表的质量进行评价,计算了年轮样本序列筛选前后的若干基本统计量(表 1)。其中,N 为样本序列数;M 为年轮宽度平均值(mm);S. D. 为标准差;M. S. 为平均敏感度;r 为高频转换后序列的平均相关系数;a. c. 为一阶自相关系数。从表 1 中可以看出,筛选后各项统计量均有所改变,特别是标准差与一阶自相关系数的减小,平均敏感度与平均相关系数的增大,表明筛选后样本中所含气候变化信息有所增加。在仍然保证大样本量的前提下,筛选无疑是有助于提高年轮年表质量的。

表 1 华山树木年轮样本的基本概况

Tab. 1 Sample statistics for Huashan tree-ring data

统计量	N	M	S. D.	M. S.	r	a. c.
全部	42	0.74	0.521	0.260	0.623	0.826
筛选后	34	0.69	0.473	0.309	0.647	0.804

比较华山的三种年表:STD、RES 与 ARS(图 1),大体可以认为,它们在高频变化的位相和振幅上比较接近一致,但在低频变化中,STD 的振幅较大,RES 为最小,ARS 居中。这说明 STD 保留较多的低频振荡信息,ARS 保留的低频振荡信息较 STD 要少,但比

RES 为多。表 2 具体列出这三种年表的若干统计量参数,其中 Mid. 为年表序列的中位数;其余符号含义同表 1。从所列这些统计量来看,STD 年表的一阶自相关系数与标准差较大,平均敏感度较小,恰好与 RES 年表形成较大反差。这就定量地说明了 RES 年表保留的高频振荡信息远比 STD 为多。

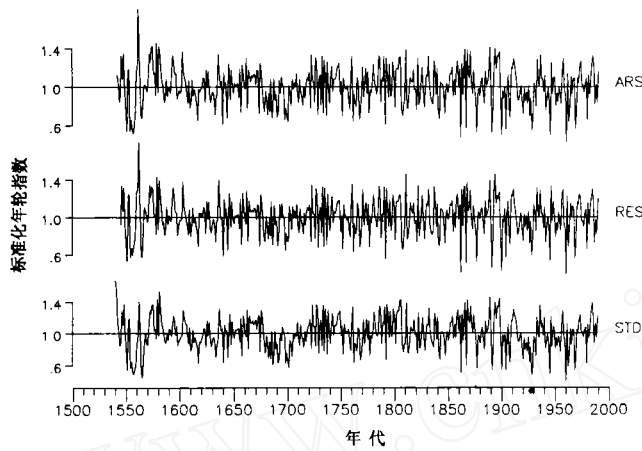


图 1 华山的三种树木年轮宽度年表

Fig. 1 Three ring-width chronologies for Huashan site

表 2 华山三种年轮年表的统计量

Tab. 2 Chronologies statistics for Huashan site

年 表	Mean	Mid.	M. S.	S. D.	a. c.
STD	1. 0000	1. 0007	0. 2076	0. 2156	0. 2493
RES	1. 0018	1. 0104	0. 2197	0. 1927	—0. 0278
ARS	1. 0004	1. 0094	0. 2088	0. 2024	0. 1582

为了进一步说明 RES 年表中所含的高频变化代表气候变化的信息,分别计算了组成 RES 年表与 STD 年表中 17 株树共 25 个序列之间 314 年(1676—1989)共同区间的相关系数与信噪比(SNR)等统计量<sup>[8]</sup>(表 3)。A 表示所有序列的平均相关系数;B 为树与树之间的平均相关系数;C 为同一株树中两个钻芯序列的平均相关系数;SNR 则是通常用来衡量年表中气候信息与其它噪音的比值;PC1 是第一个主分量解释总方差的百分比;EPS 是样本对总体的解释信号。比较去趋势序列与差值序列的这些统计量,不难看出差值序列的各项统计量均比去趋势序列要高得多。这说明去趋势序列中较多的低频振荡是非同

表 3 华山标准化序列与差值序列的统计量

Tab. 3 Statistics of common interval analysis (1676-1989) for de-trend series and residual series for Huashan site

序 列	A	B	C	SNR	PC1	EPS
去趋势序列	0. 257	0. 250	0. 514	5. 679	29. 54	0. 850
差值序列	0. 410	0. 404	0. 634	11. 507	43. 67	0. 920

步的,而差值序列中的高频振荡是同步的,并且差值序列比去趋势序列更能代表总体的

变化。由于只有气候要素年际间的高频变化才能产生采样点样本群体的这种同步变化<sup>[8]</sup>,由差值序列构成的差值年表(RES)的高频振荡就代表了气候变化的信息。

为了更直接地了解这三种年表与气候要素之间的相关性,分别计算了各个年表与华山气象站月平均气温及月降水量之间的相关系数。在相关分析之前,为确定仪器记录的资料代表了自然界的自然变化,而非由更换仪器等人为要素引起的变化,先对华山站的气候资料进行了均一性检验。一是采用 Mann-Kandell 方法<sup>[15]</sup>,对序列是否存在突变点进行了检验,另外还运用双重量分析(Double-mass analysis)<sup>[16]</sup>检查序列是否有非随机趋势变化。与华山站作比较的对照站选用了离华山不远的西安、镇安的佛坪等站。检验结果表明,华山站的气温与降水资料是相对均一的,代表了自然界的主要气候变化。

表 4 华山三种树木年轮年表与月平均气温的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between three ring-width chronologies and monthly mean temperature for Huashan site

年表	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
STD	-.010	.140	.047	-.093	-.282	-.226	.362 *	-.087	-.549 *	-.173	.225	-.210
RES	-.054	.106	.084	-.174	-.293	-.147	.310 *	-.053	-.479 *	-.094	.249	-.280
ARS	-.034	.138	.034	-.133	-.280	-.174	-.363 *	-.103	-.523 *	-.121	.271	-.260

表 5 华山三种树木年轮年表与月降水量的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients between three ring-width chronologies and monthly precipitation for Huashan site

年表	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
STD	-.061	-.368 *	-.142	.047	.019	-.146	.062	.410 *	.507 *	.175	-.082	-.154
RES	-.082	-.275	-.192	.078	.037	-.138	.074	.428 *	.533 *	.154	-.094	-.186
ARS	-.076	-.313 *	-.148	.088	.009	-.145	.089	.426 *	.532 *	.163	-.100	-.150

在列出华山三种树木年轮年表与气温及降水的相关系数(表 4、5)中,\*表示该值超过了 99%相关检验的置信区间。显然,与三种年表相关均达显著水平的气候要素为:4 月与 6 月的气温,5 月和 6 月的降水。树木年轮宽度指数与 4 月温度的正相关,说明了生长季长短对树木年轮生长的显著影响。华山一带树木活跃生长期平均为 5—9 月,若是 4 月份气温偏高,无疑会使生长季提前,树木形成层细胞分裂开始早,有利于延长生长季,产生较宽的年轮。随着 5 月的温度明显升高,温度不再是限制树木生长的主要因子。而此时,雨季还没到来,由局地气旋活动引起的少量降雨对土壤水份的补给往往不足以满足树木生长的需要,因而,土壤含水量成了树木生长过程的限制因子。降水越少,土壤含水量越低,树木可利用的水分越少,树木生长过程即细胞的分裂、增大、成熟、再分裂……等也就越慢,也就产生窄轮,形成年轮宽度指数与 5 月降水的正相关关系。到 6 月,气温进一步升高,土壤含水量除了受气旋降水补给的控制外,还受蒸发的控制。气温越高,蒸发越强,树木可利用的水分也就越少,这样也就形成了树木年轮宽度指数与 6 月的降水量正相关,而与 6 月的气温负相关的关系。7 月时,尽管高气温还会造成强烈的蒸发和树木蒸腾,但

雨季来临后,季风带来的大量降水足以补充土壤水分,满足树木生长的需要。此时,无论是气温还是土壤水分对树木生长过程的限制比前期要弱得多,年轮宽度指数的变化与降水和气温的关系也不会象 5、6 月时那样显著。可见,计算出的年轮生长与气候要素的相关性,是具有生理学意义的。

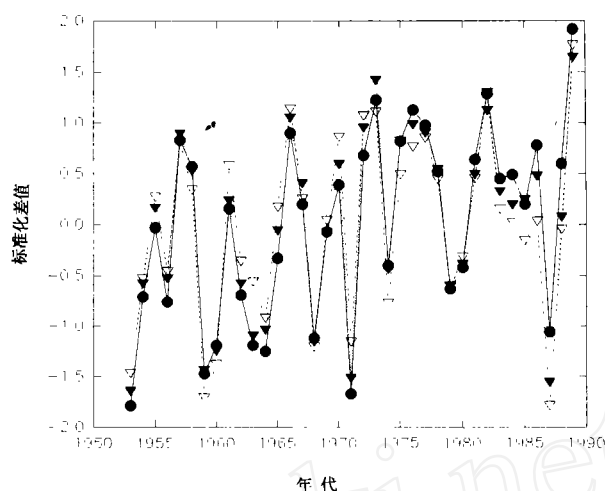
为比较华山这三种年表对 5、6 月降水的响应,计算了 5、6 月降水量与三种年表(STD、RES 和 ARS)的相关系数,它们分别为 0.558、0.607、0.591。这表明 RES 年表对该时期降水的响应似较其它两种年表,尤其比 STD 年表为佳。对 5、6 月降水量和三种年表值均作正态标准化处理后,给出各个年表与 5、6 月降水的差值分布(图 2)。

图中的零值线代表 5、6 月降水量,带有三种不同符号的折线分别表示各年表的变化。凡是各符号越远离零值线,表明与 5、6 月实际降水量的差值越大;离零值线越近,则越接近实际降水量。显然,它们距离零值线的相对偏差不尽一致。为进一步说明它们之间的差异,以偏离零值线的相对远近,将这三种年表在同一年份的差值分布,划分为远(F)、中(M)、近(S)三个等级,并统计出各个等级出现的频次与百分率(表 6)。在统计的 37 年资料中,偏差距离近的(S)以 RES 年为最,达 22 年,占 59.5%;其次为 STD,最少为 ARS,分别为 10 年和 5 年,百分率各为 27.0%和 13.5%。在偏差距离中等的(M)各年表值中,以 ARS 为最多,共 26 年,占 70.3%之多。从偏差距离较远的(F)等级来看,STD 年表为最,20 年,达 54.1%之多。总的说来,从它们与 5、6 月降水量的偏差等级统计结果可以看出,RES 年表与 5、6 月降水量的平均偏差较 STD 年表要小些。如果我们选用其中一个年表去重建华山 5、6 月份降水量的话,RES 年表显然比 STD 年表更为合适。

表 6 华山三种年表与 5、6 月降水量差值等级统计

Tab. 6 Frequency distribution and percentage of three classes

年 表	S		M		F		合计	
	频次	百分比	频次	百分比	频次	百分比	频次	百分比
STD	10	27.0	7	18.0	20	54.1	37	100.0
RES	22	59.5	4	10.8	11	29.7	37	100.0
ARS	5	13.5	26	70.3	6	16.2	37	100.0



(实心圆为 STD,空心三角为 RES,实心三角为 ARS)

图 2 华山三种年表与 5、6 月降水量的差值分布

Fig. 2 Departure of three ring-width chronologies from May and June precipitation

## 4 结束语

本文以华山为例,论述了在我国半湿润地区建立新的树木年轮年表的途径,分析了三种年表对气候要素的响应及差异。通过本文可以看出,在半湿润地区及较为复杂的采样环境中,应采用 ARSTAN 程序建立除常规的标准化年表以外的其它两种年表。这三种树木年轮年表的建立有利于深入分析树木生长与气候要素之间的关系,为利用树木年轮资料重建过去气候提供更多的选择。对华山采样点而言,新的差值年表比常规的标准化年表含更多的气候要素变化信息,并更能代表树木总体的变化。可见,建立除常规的标准化年表以外的新年表具有推广的价值。

## 参 考 文 献

- 1 Fritts H C. Reconstruction Large-scale Climatic Patterns from Tree-Ring Data. Tucson, U S A: The University of Arizona Press, 1991.
- 2 Cook E R, Bird T, Peterson M et al. Climate change in Tasmania inferred from a 1089-year tree-ring chronology of Huon Pine. *Science*, 1991, **253**: 1266-1268.
- 3 吴祥定, 孙力, 程志刚. 若干西藏高原上树木年轮年表的建立. *科学通报*, 1988(8): 616--619.
- 4 Box G E P, Jenkins G M. Time Series Analysis: forecasting and control. San Francisco, USA: Holden-Day, 1970.
- 5 Meko D M. Applications of Box-Jenkins Methods of Time Series Analysis to the Reconstruction of Drought from Tree Rings. PH. D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson, AZ. U S A, 1981.
- 6 Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization. PH. D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1985.
- 7 Guiot J. Standardization and selection of the chronologies by the ARMA analysis. In: Kairiukstis L, Bednars Z, Feliksik E (eds). Method of Dendrochronology-I. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis and Warsaw, Poland: Polish Academy of Sciences-Systems Research Institute, 1987, 97-105.
- 8 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976.
- 9 Hughes M K, Brown P M. Drought frequency in central California since 101 BC recorded in Giant Sequoia tree rings. *Climate Dynamics*, 1992, **6**: 161-167.
- 10 Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Chicago, USA: Univ. of Chicago Press, 1968.
- 11 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, **43**: 69-75.
- 12 吴祥定, 孙力, 程志刚等. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社 1990.
- 13 Cook E R, Holmes R L. Users Manual for Program ARSTAN, Laboratory of Tree-Ring Research. Univ. of Arizona, Tucson, USA 1986.
- 14 Mosteller F, Tukey G W. Data Analysis and Regression, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1977.
- 15 Mann H B. Non-parametric test against trend. *Econometrika*, 1945, **13**: 245-259.
- 16 Kohler M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1949, **30**: 188-189.

## TREE-RING CHRONOLOGIES FOR PINUS ARMANDI FRANCH FROM HUASHAN, CHINA

Shao Xuemei Wu Xiangding

(*Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

**Key words** tree-ring, chronology, dendroclimatology, autoregressive model, climate

### Abstract

The Huashan peaks at the eastern extreme of the Qinling Mountains are located in semi-humid area in China. Well replicated tree-ring increment cores were sampled for *Pinus armandi* Franch from the Huashan peaks in 1990. Since most of trees sampled grow in stands where there is competition for sunlight, water, and nutrients and Huashan peaks have been a scenic spot, effects of competition and release from competition with neighboring trees and human disturbances may exist in ring width variations. In order to minimize these non-climatic disturbances from tree-ring data, other two ring-width chronologies called autoregressive standard chronology (ARS) and residual chronology (RES) have been developed besides the general standard chronology (STD).

Comparison of chronology statistics among these three chronologies indicates that their phases and amplitudes of high-frequency variation are quite similar, while the amplitudes of low-frequency variation are different. With the highest first-order autocorrelation coefficient and the lowest mean sensitivity among these three chronologies, STD contains more low-frequency fluctuations. By contrast with STD, RES reflects the high-frequency variations. Common interval analysis on de-trended series and residual series for AD 1676-1989 (17 trees 25 radii) implies RES contains more climatic signal than STD does. Correlation analysis between chronologies and May and June precipitation observed on Huashan Meteorological station also indicates that RES can represent the climatic variations better than STD does.

In conclusion, the residual chronology contains more information on climate change than the original standard chronology. Thus, for semi-humid area where there is competition developing new chronologies would benefit dendroclimatic study in China.

### 作者简介

邵雪梅,女,1957年生,博士后,1992年5月于美国亚利桑那大学获博士学位。现在中国科学院地理研究所博士后站,主要从事树木年轮气候学与气候变化研究。已发表“利用北美西部树木年轮资料重建过去气候”等论文。