

采用树轮图像分析方法研究历史时期 气候变化的可行性*

刘洪滨¹⁾ 吴祥定¹⁾²⁾ 邵雪梅¹⁾²⁾

1) (中国科学院 地理研究所 北京 100101)
国家计划委员会

2) (中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点开放实验室 西安 710054)

摘 要 本文以川西云杉为例,探讨了采用树轮图像分析方法进行历史时期气候变化研究的可行性。对比分析发现,图像分析得到的年轮宽度序列与宽度仪的测量结果基本相同;而年轮宽度与年轮灰度序列之间不存在明显关系,其差异可能是不同环境因子作用的结果。图像分析得到的川西云杉年轮灰度年表在反映某些气候要素变化上优于年轮宽度年表,并以年轮最小灰度、年轮平均灰度和晚材平均灰度较为突出。川西云杉年轮灰度主要受初春月平均最高气温的影响,且两者为负相关关系。

关键词 气候变化 川西 树木年轮 图像分析

分 类 (中图法) P467, Q948.112 (科图法) 56.458

作为 IGBP 的核心计划之一, PAGES 计划的目标不但是研究过去时间地球上发生的变化,同时要收集数据,为气候模式预报打下基础。树木年轮气候学方法是历史时期气候变化研究中的一个重要而有效的工具^[1]。树木年轮资料具有定年准确、连续性强、分辨率高和分布广泛等特点^[2],因此广泛受到学者们的重视。尤其是在近十几年,树木年轮气候学更是取得了前所未有的进步,分析手段更加趋于多样化。

环境因子的变化会导致树木生长的变化,并反映在树木年轮的生理结构变化上^[3]。随着科学技术的进步,新仪器设备的使用,年轮宽度不再是唯一的数据资料来源,年轮密度及细胞结构分析等正在成为研究中的新焦点^[4,5]。图像分析作为树木年轮学分析的重要手段,是继年轮 X 射线密度分析之后技术上的又一大进步^[6],其结果的分辨率和数据质量与其它方法(X 射线年轮密度和年轮宽度)基本相同^[7]。图像分析把树木年轮对可见光的反射程度作为指标,研究指标变化与气候变化之间的关系。其物质基础是年轮细胞大小和细胞壁厚度受环境因子影响而显示的差异。由于细胞大小和细胞壁厚度会直接影响年轮灰度,从而可以从年轮灰度变化中提取气候变化信息。结果表明,图像分析是一种成功的树木年轮气候学分析方法。

本文在国内首次采用图像分析方法,对中国四川省西部采集到的川西云杉进行气候变化研究的可行性分析,同时与其它方法得到的结果进行对比。

* 国家自然科学基金项目(49475260)资助
收稿日期:1995-11-24,收到修改稿日期:1996-03-27

1 数据资料的采集与图像分析原理

1.1 树轮样本及气候资料

采样时间 1993 年 9 月，地点四川省西部康定县宜代乡思支沟 (101°19'E, 29°29'N)，采样高度 3 810m，坡向向东，坡度 30—50°，局地优势树种川西云杉 (*Picea balfouriana*)，为当年 7 月的伐倒木。树高 30—40 m，胸径 0.8—1.1m，树龄 300—400 年不等。树木生长状况良好，郁闭度 0.2—0.5。采样点地处青藏高原东缘，属高原季风湿润气候区，年平均气温通常在 4.0℃ 以下；降水充沛，年内分布集中。分析中所选用的气象资料为康定气象站的月降水量、月平均气温、月平均最高气温和月平均最低气温四种（见图 1）。

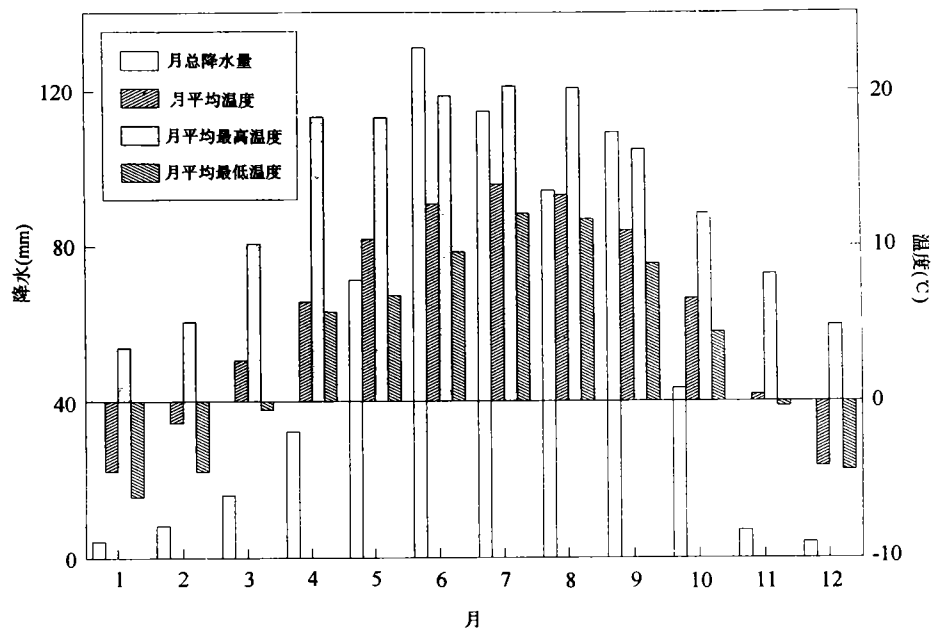


图 1 川西康定气象站气候要素年内分布 (1952—1992)
Fig. 1 Climate forctors in Kangding area, Sichuan Province (1952—1992)

1.2 图像分析基本原理

选用 IMAGE1/AT 图像分析系统获取树木年轮样本参数，整个图像处理过程由控制程序 I1.EXE 完成。首先将正方形的年轮图像分解成 512（水平方向）×480（垂直方向）个象元。设水平和垂直方向的放大率分别为 M_x 和 M_y 。每个象元的反射光强度取值范围是 0（黑色）—255（白色），称之为灰度。采用平面坐标 x （水平方向） y （垂直方向），象元 $P(x, y)$ 的灰度值表示为 $G_p(x, y)$ ，这一过程被称为数字化过程。将数字化的图像显示在监视器上。由于年轮的早晚材细胞大小和细胞壁厚度有明显不同（早材细胞大，细胞壁薄；而晚材细胞小，细胞壁厚），使反射光强弱发生变化产生不同的灰度值，因而在监视器上可以分辨出细胞的轮廓。由电脑控制得到每个年轮的起始位置 $P_1(x_1, y_1)$ 和终止位置 P_2

(x_2, y_2)), 并将年轮内灰度下降最为剧烈的地方选定为早晚材分界点 $P_3(x_3, y_3)$ 。

1.3 图像分析基本步骤

1) 调整年轮样本方向, 使年轮生长方向与 x 轴方向平行; 调整图像显示灰度, 使在监视器上所显示的年轮灰度变化范围加大, 提高分辨率; 调整图像放大倍数, 得到 M_x 和 M_y ;

2) 在监视器上固定图像, 然后将图像存入磁盘。调入所存图形文件, 扫描宽度定为 21, 并以 $\bar{G}_p(x, y) = \frac{\sum_{i=-10}^{10} G_p(x, y+i)}{21}$ 代替 $G_p(x, y)$ 作为 $P(x, y)$ 点灰度值;

3) 选取 P_1, P_2, P_3 三个控制点, 对年轮进行扫描, 控制程序自动将扫描结果以 ASCII 码方式存入磁盘上的一个指定文件。为使结果具有更好的代表性, 选择年轮的三个不同地方测量, 得到一个年轮的三条不同灰度序列;

4) 将同年轮的三条灰度序列的序列长度、早晚材分界点订正到三条序列的平均值上。至此得到多种年轮宽度和灰度参数 (见表 1)。

表 1 图像分析所得年轮参数

Tab. 1 Tree ring parameters from image analysis

量测参数	宽度参数			灰度参数						
	年轮宽度	早材宽度	晚材宽度	最大灰度	最小灰度	灰度比	灰度差	年轮灰度	早材灰度	晚材灰度
	TRW	ERW	LRW	MAX	MIN	RDF	ADF	MTG	MTE	MTL

注: 灰度比=最小灰度/最大灰度, 灰度差=最大灰度-最小灰度

2 分析与讨论

2.1 样本的准备

根据要求将采集到的样本进行凉干、粘贴、打磨等预处理, 并对样本进行交叉定年。然后在年轮宽度量测仪上进行年轮宽度测量, 使用 COFECHA 程序对序列进行相关检验^[8], 去掉同大多数序列变化趋势相异的序列, 舍弃异常年轮样本。最后选取 11 棵树 20 个样本作为分析对象, 按照图像分析的基本步骤进行年轮的灰度测量。选取 1950—1992 年为研究时段。

2.2 年表间的相关分析

比较由两种方法得到的年轮宽度序列间的差异, 见表 2。其中, ID. 为样本序列 (K80 为年轮宽度仪测量的年轮宽度序列); Mean 为平均量测参数; S. D. 为平均标准差; M. S. 为平均敏感度; r_1 为样本个体与总体的平均相关系数; r_2 为不同样本间的平均相关系数; r_3 为不同树木间样本的平均相关系数; r_4 为同一树木不同样本之间的平均相关系数; SNR 为信噪比; EPS 为样本个体对总体的解释信号; PC1 为第一主分量所占方差的百分比。

两套系统得到的年轮宽度资料 (K80 和 TRW) 几近相同, 两组序列间的平均离差仅为 0.029cm, 约占年轮平均宽度的 3%, 对应年轮宽度序列之间平均相关系数为 0.977, 说明从图像分析系统上得到的年轮参数是可信的, 二者在分辨率和质量上基本相同。

表 2 川西云杉树木年轮参数资料统计
Tab. 2 Statistics of tree ring parameters

ID.	Mean	S. D.	M. S.	a. c.	r1	r2	r3	r4	SNR	EPS	PC1 (%)
K80	0.94	0.282	0.177	0.621	0.493	0.315	0.300	0.619	4.714	0.825	36.76
TRW	0.92	0.280	0.171	0.657	0.514	0.339	0.323	0.672	5.237	0.840	38.96
ERW	0.69	0.190	0.178	0.583	0.531	0.345	0.328	0.680	5.365	0.843	39.08
LRW	0.23	0.115	0.336	0.460	0.543	0.342	0.332	0.563	5.455	0.845	38.66
MAX	1.76	0.086	0.044	0.258	0.117	0.011	0.008	0.068	0.093	0.085	18.55
MIN	0.62	0.142	0.200	0.453	0.245	0.101	0.098	0.164	1.191	0.544	31.46
RDF	3.50	0.803	0.201	0.432	0.235	0.099	0.093	0.211	1.127	0.530	30.56
ADF	1.13	0.146	0.115	0.337	0.191	0.089	0.082	0.243	0.979	0.495	26.82
MTG	1.42	0.105	0.070	0.261	0.396	0.144	0.138	0.276	1.756	0.637	22.61
MTE	1.61	0.084	0.045	0.294	0.180	0.036	0.033	0.108	0.373	0.271	18.62
MTL	0.81	0.133	0.141	0.404	0.268	0.096	0.090	0.206	1.093	0.522	27.82

注：为进行序列间高频变化的一致性分析，表中宽度序列皆采用步长为 24 年的样条函数进行滤波。

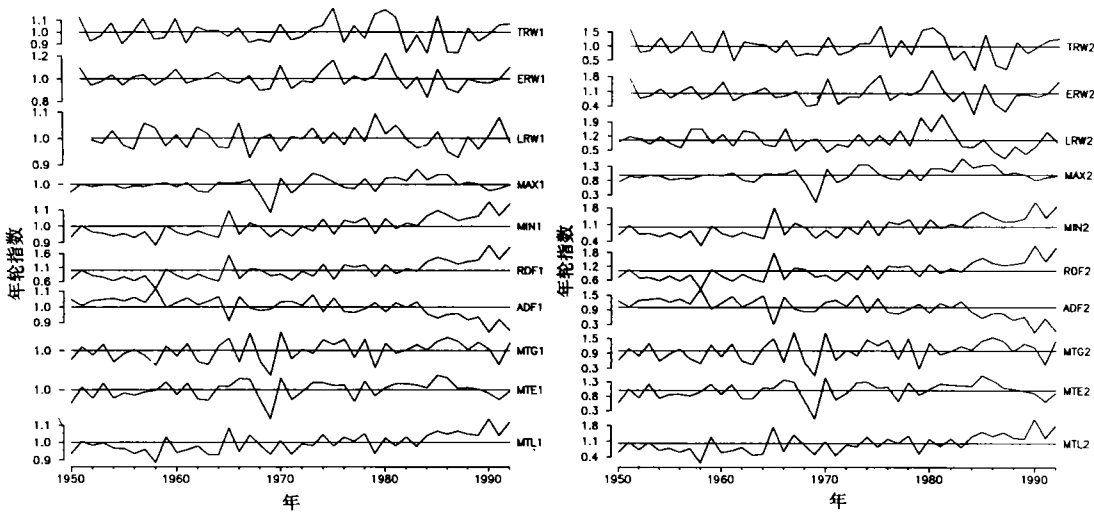
灰度序列同宽度序列相比，在各样本序列变化趋势的一致性上有一定差距，主要表现在：样本间的相关系数较小，远未达到 95%置信水平；信噪比低，如 ADF 和 MTE 分别只有 0.979 和 0.373，而 MAX 仅为 0.093，平均来看只相当于宽度序列的 1/5；样本个体对总体的解释上也存在着一定的差距，灰度序列中以 MTG 为最高，但也只相当于宽度序列的 75%左右；第一主分量所占总方差的百分比与宽度序列较为接近，其中以 MIN 为最高为 31.46。总之，灰度序列在样本间变化的一致性上与宽度序列存在着一定的差距，其中以 MAX 和 MTE 最差，因此认为这两种年轮参数序列不适于进行气候变化分析。

通过比较，鉴于图像分析方法得到的数据资料的可靠性，以下分析将采用图像分析得到的年轮参数序列。由于树木年龄较长，所选取的时段又是树木生长的最后一段，距树木生长的起始年代较远，因此在得到年表之前未对年轮宽度序列进行去趋势订正。

采用 ARSTAN 程序^[9]完成川西云杉树木年轮年表的建立。其中采用两条途径：1) 用各参数序列中的数据除以该序列的平均值，将得到的同一年的数据采用双权重平均方法^[10]，以消除异常极值的干扰，得到十种年表，总记为 CHN1（见图 2a），各年表的序列平均值近似为 1；2) 对各参数序列进行统计意义上的标准化处理，同样采用双权重平均方法，得到另十种年表，总记为 CHN2（见图 2b），各年表的序列平均值近似为 0。年表的统计特征见表 3。可见，两组年表在变化趋势上极为相近，但由于计算过程不同，年表 CHN2 的变幅较大。

分别计算两组年表内部各年表之间的相关系数，结果见表 4。两组年表所表现出来的相关分析结果相似，再次确认两种方法在建立树木年轮年表时并无本质差别。

CHN1 年表为例，除 MTG 同 LRW 之间有较大的相关系数外，宽度参数与灰度参数之间的关系并不很明显。由于不同环境因素影响树木生长的机制不同，树木在多种生理特征上与不同的气候要素所表现出来的关系会有较大差异。



a. CHN1—未对组成年表的序列进行标准化处理；b. CHN2—已对组成年表的序列进行标准化处理)

图 2 十种年轮参数建立的年表 (1950—1992)

Fig. 2 Chronologies of 10 kinds of tree ring parameters (1950—1992)

(a. CHN1—Nonstandardized; b. CHN2—Standardized)

表 3 两种年表的统计特征比较

Tab. 3 Statistical characters of Nonstandardized and Standardized chronologies

年轮参数	敏感度	标准差	自相关系数	年轮参数	敏感度	标准差	自相关系数
TRW1	0.0877	0.1261	0.6241	TRW2	0.5661	0.4713	0.5546
ERW1	0.0704	0.0901	0.4988	ERW2	0.5702	0.5082	0.4335
LRW1	0.0469	0.0427	0.1943	LRW2	0.5531	0.4564	0.1466
MAX1	0.0179	0.0204	0.1999	MAX2	0.2393	0.2464	0.2498
MIN1	0.0521	0.0604	0.3646	MIN2	0.4015	0.4019	0.2627
RDF1	0.2930	0.3378	0.3796	RDF2	0.3898	0.4052	0.2722
ADF1	0.0491	0.0591	0.3599	ADF2	0.4506	0.3852	0.2764
MTG1	0.0577	0.0435	-0.2930	MTG2	0.6986	0.4280	-0.3155
MTE1	0.0238	0.0229	-0.0156	MTE2	0.3389	0.2888	0.0186
MTL1	0.0550	0.0554	0.1756	MTL2	0.4654	0.4044	0.0980

宽度序列之间的相关性较好,以 TRW 同 ERW 之间的相关系数为最大为 0.847。显然,年轮的早材宽度会在很大的程度上影响整个年轮的宽度。

按灰度参数序列间的相关特征将所有七个序列分成两组:MAX、MTG、MTE 和 MIN、RDF、ADF、MTL,同组序列间相关性较好,而异组序列间相关性较差。在 1 组中以 MAX 同 MTE 的关系为最好为 0.856;在 2 组中各序列间,相关系数的绝对值都在 0.880 以上。其中以 RDF 同 MIN 的关系为最好达 0.991。

表 4 年表间相关分析结果

Tab. 4 The correlation coefficient analysis results of the chronologies

	TRW	ERW	LRW	MAX	MIN	RDF	ADF	MTG	MTE	MTL
TRW		0.861	0.605	0.022	-0.115	-0.105	0.083	-0.218	-0.061	-0.178
ERW	0.847		0.291	0.254	0.015	0.002	0.037	0.202	0.179	-0.005
LRW	0.603	0.170		-0.159	-0.331	-0.318	0.288	-0.652	-0.240	-0.436
MAX	0.099	0.292	-0.253		0.288	0.172	0.057	0.634	0.859	0.303
MIN	-0.067	0.051	-0.211	0.277		0.990	-0.918	0.530	0.272	0.951
RDF	-0.092	0.009	-0.203	0.164	0.991		-0.962	0.462	0.161	0.938
ADF	0.074	0.010	0.149	0.049	-0.936	-0.970		-0.301	0.057	-0.859
MTG	-0.145	0.253	-0.729	0.663	0.506	0.438	-0.303		0.747	0.646
MTE	-0.010	0.202	-0.351	0.856	0.277	0.177	0.015	0.768		0.366
MTL	-0.129	0.036	-0.327	0.295	0.954	0.941	-0.880	0.607	0.351	

注：表中左下部分为 CHN1 年表间相关系数；右上部分为 CHN2 年表间相关系数。

由于 MTG 同 MAX、MIN、MTE 和 MTL 都保持一定的相关关系，可见，它们的变化将直接影响到年轮的 MTG。

2.3 年表与气候变化间的相关关系

为了解各参数年表同气候要素变化的关系，分别计算了与四种气候要素（月降水量、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温）之间的相关系数（限于篇幅，计算结果略）。由于在采样点附近没有相应的气象站，而康定气象站与采样地点又有一定的距离，因此计算结果并不很理想。但由于两地同属一个气候区域，影响局地气候变化的要素相似，因此认为可以借用康定气象站的气候资料来进行相应的初步分析。而从分析结果上看也是可行的。

分析计算结果发现，两组年表在与气候要素的关系上表现较为一致。宽度序列年表同气候要素的关系远不如灰度年表明显，灰度年表在气候变化的重建上具有更大的利用价值。

宽度年表与月降水量间的关系较灰度年表好。其中 TRW 与年降水量间存在较强的正相关关系，相关系数为 0.421。在灰度年表同各气候要素间的相关比较中不难发现，当年月平均最高气温（特别是 3、4 月份）与年表的关系较另外三种气候要素明显，月平均气温与月最低气温的结果相似，而与月降水量的关系最差。因此可以认为，控制川西云杉年轮灰度变化的主要气候因子是当年 3、4 月份的月平均最高气温。与之关系最为密切的年表为 MIN、RDF、ADF、MTG 和 MTL，它们之间的相关系数分别为-0.575，-0.556、0.525、-0.514 和 -0.584。由于局地气温偏低，温度升高将会有利于树木的生长，使树木生长的速度加快，从而导致年轮密度较低，灰度值较大，反之则年轮密度较高，灰度值较低。初春的气温对晚材灰度的作用表现得更为直接。MIN 和 MTL 对 3、4、7、9 月份的月平均最高气温也表现出较强的负相关关系。

3 结论

通过以上的分析,总结出如下结论:

1) 由于图像分析方法的采用,可以得到更多的树木年轮参数序列,从而在树木年轮中提取出更多的气候变化信息;

2) 采用年轮宽度测量仪和图像分析系统两种不同的途径得到的年轮宽度序列基本相同,说明图像分析结果在树木年轮气候学分析中是可信的;

3) 不同的气候要素对树木生长将产生不同的影响,其现象之一是:树木年轮在宽度和灰度上存在着不同的年变化,二者在变化趋势上无显著关系;

4) 由图像分析方法得到的灰度序列组成的年表与某些气候要素的关系,比由宽度序列组成的年表更为明显,其中尤其以年轮最小灰度、年轮平均灰度和晚材平均灰度较为突出。因此灰度序列在历史时期气候变化重建中将会占有重要的地位;

5) 对川西云杉的年轮灰度变化起主要作用的是每年初春的气温,二者之间呈负相关关系。

致 谢 中国科学院国家计划委员会地理研究所树木年轮实验室的尹训钢同志参加了全部野外采样工作。文中图像分析所需数据的读取工作在中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室进行,其间多次受到黄土室树木年轮实验室刘禹同志的热情帮助与指点。在此对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Bradley, R. S. and P. D. Jones. Climate since A. D. 1500: Introduction. Climate Since A. D. 1500. Published by Routledge. London. Edited by R. S. Bradley and P. D. Jones. 1995. 1—16.
- 2 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.
- 3 Fritts HC. Tree Ring and Climate. Academic Press, London. 1976.
- 4 Schweingruber, *et al.*. The X-ray Technique as Applied to Dendroclimatology. Tree-Ring Bulletin. 1978. 38: 61—91.
- 5 Jagels, R. and F. W. Telewski. Computer Aided Image Analysis of Tree Ring. Methods of Dendrochronology. International Institute for Applied Systems Analysis, Netherlands. Edited by E. R. Cook and L. A. Kairiukstis. 1990. 76—93.
- 6 Parker ML. X-ray densitometry and image analysis as methods in dendrochronology in Canada and the United States. Methods of Dendrochronology. 1. Proceedings of the Task Force Meeting on Methodology of Dendrochronology: East/West Approaches. June 1986, Krakow, Poland. 1987. 57—67.
- 7 Thetford RD, *et al.*. An image analysis for determining densitometric and ring-width time series. Canadian Journal of Forest Research. 1991. 21: 1544—1549.
- 8 Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin. 1983. 43: 69—75.
- 9 Holmes RL. Program ARSTAN (Version B—1992). Laboratory of Tree Ring Research. University of Arizona. USA. 1992. 30.
- 10 Mosteller F. and GW. Tukey. Data Analysis and Regression. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley. 1977.

A PRELIMINARY STUDY ON CLIMATE CHANGE RESEARCH DURING HISTORICAL TIME USING IMAGE ANALYSIS OF TREE RING IN KANGDING AREA, SICHUAN PROVINCE

Liu Hongbin¹⁾ Wu Xiangding¹⁾²⁾ Shao Xuemei¹⁾²⁾

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

2) (Xi'an Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of sciences, Xi'an 710054)

Abstract

In this paper, We concentrate on the study of the possibility of the usage of tree ring Image Analysis in the climate change research during historical time in Kangding area of Sichuan Province, with *Picea balfouriana* sampled from West Sichuan Province. Image analysis is a new method used in dendroclimatology with the reflected brightness (defined as Gray Value) as climate change indicators. There are ten different parameters, which include three ring width series and seven gray value series, got from image analysis. Twenty samples of eleven trees are selected by correlation analysis to be used in chronologies. The research period is 1950—1992, there is almost no difference between the ring width series derived from image analysis and from ring width measurement instrument. So the series from image analysis can be used in the coming research. The relationship between the series of gray value parameters is not as close as that of the series of ring width parameters. Ten chronologies is built. Divide the seven Gray Value chronologies into two parts: on is the Maximum Gray Value, Early Wood Gray Value and Tree Ring Gray Value; the other is Minimum Gray Value, Ratio Between Maximum and Minimum Gray Value, Difference Between maximum and Minimum Gray Value and later wood gray value. Relationship between the chronologies in part is closer than that of different parts. Four monthly averaged climate factors (precipitation, temperature, maximum temperature and minimum temperature) are used in the analysis to discover the relationship between the chronologies and climate change. It is shown that changes in ring width chronologies are closer to that of yearly precipitation, and the correlation coefficient is 0.42. Changes in gray value chronologies are closer to that of monthly averaged temperature parameters, especially the relationship between the March-april maximum averaged temperature and the minimum gray value, gray value ratio, gray value difference, three ring gray value and later wood gray value. The correlation coefficients between is -0.58 , -0.56 , 0.53 , -0.51 and -0.58 , respectively. So, we can see that more useful data are derived from image analysis, and more information on the climate change during the historical time will be derived from the analysis of these data.

Key words Climate change, Tree ring, Image analysis