

# 青海沙利克山祁连圆柏千年 树轮宽度序列的变化特征

黄 磊, 邵雪梅, 梁尔源, 王丽丽

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 利用功率谱、奇异谱和小波分析等方法对在青海沙利克山建立的两条祁连圆柏 (*Sabina przewalskii* Kom.) 千年树轮宽度序列进行了变化特征的分析, 发现在低频变化上都存在 200 年的最显著周期和百年左右的显著周期; 各种周期存在不同的演变特征, 200 年周期在 15 ~ 17 世纪最为盛行, 百年左右的周期变化自 18 世纪初以来较为突出。15 世纪下半叶是轮宽序列千年来最突出的低值期, 它主要体现了 200 年周期的变化, 而 20 世纪后期的高值区则主要是百年左右周期变化的作用。轮宽序列的低频变化与太阳活动的长期变化之间存在较好的对应关系, 说明祁连圆柏年轮宽度序列所指示的气候低频变化可能受太阳活动的影响。

**关 键 词:** 祁连圆柏; 树轮; 谱分析; 低频变化

**中图分类号:** P467; P468.0 **文章编号:** 1000-0585(2004)03-0365-09

## 1 引 言

在全球气候变化研究中, 要了解年代际和世纪尺度的变化规律, 需要高分辨率的长时间尺度的气候代用资料<sup>[1]</sup>, 树轮资料在过去全球变化研究中起着十分重要的作用<sup>[2]</sup>。政府间气候变化委员会 (IPCC) 2001 年第三次评估报告中所引用的近千年以来北半球温度变化曲线就是以树轮重建资料为主要素材重建的<sup>[3,4]</sup>。树轮资料所具有的年际高分辨率以及在时间上的连续性等特点, 使其在年代尺度至世纪尺度的气候变化规律研究中起到独特的作用。

我国气候记录的器测历史较短, 大多数气候资料的长度仅为 50 年左右, 所包含的气候低频变化信息量尚显不足, 难以满足气候低频变化规律研究的需要。青藏高原东北部的柴达木盆地东缘山区生长着大量千年以上树龄的祁连圆柏, 根据采集于这一地区的祁连圆柏树芯所建立的千年长度年轮宽度序列可以分析其反映的气候低频变化信息。本文分别采用功率谱、奇异谱和小波分析等方法对青海省沙利克山两个样地建立的千年祁连圆柏 (*Sabina przewalskii* Kom.) 的年轮宽度序列进行了变化特征分析, 所揭示的变化特征反映了该地区千年以来气候变化的规律, 有助于气候变化机制问题的研究。

## 2 资料与方法

沙利克山位于青海柴达木盆地东北边缘, 地处干旱区<sup>[5]</sup>, 祁连圆柏仅在海拔 3500 ~

收稿日期: 2003-07-08; 修订日期: 2003-12-05

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-321 和 KZCX1-10-02); 国家重大基础研究发展规划项目 (G1998040811)

作者简介: 黄磊 (1976-), 男, 山东郓城人, 博士生。主要从事气候变化研究。E-mail: huangl@igsrr.ac.cn

4000 m 左右的山区呈带状分布。祁连圆柏树轮样芯用生长锥分别采自沙利克山的南北两侧，其中北坡样点代号为 WL3，南坡样点代号为 WL4。两个样点的样本处理<sup>[6]</sup>和轮宽指数序列的建立<sup>[7]</sup>均按照标准的程序进行。表 1 列出了 WL3 和 WL4 两个样点以及所采用的样本和所建立的轮宽指数序列的基本信息。

表 1 WL3 和 WL4 样点、样本及轮宽指数序列的概况

Tab. 1 Characteristics of the sites, samples and chronologies of WL3 and WL4

代号	WL3	WL4
采样地点	青海省乌兰县赛什克乡 牦牛山察汗阿孟	青海省乌兰县赛什克乡 南柯柯村夏日达无
东经	98 13. 22	98 24. 97
北纬	36 14. 70	36 10. 76
高度	3600 ~ 4000 m	3600 ~ 4000 m
坡度	19 °	18 °
坡向	北偏东 15 °	南偏西 25 °
采集时间	2001 年 5 月 31 日、10 月 15 日	2001 年 10 月 16 ~ 17 日
总样本量	43 株树, 98 个样芯	50 株树, 103 个样芯
轮宽指数序列所采用的样本量	40 株树, 86 个样芯	43 株树, 85 个样芯
轮宽指数序列起始年 (A. D.)	781	900
A. D. 1000 时的样本量 (株/ 样芯)	9/ 22	9/ 12
序列相关系数	0. 767	0. 787
平均敏感度	0. 516	0. 477
平均标准差	0. 132	0. 183
树轮宽度序列的统计量		
平均敏感度	0. 3663	0. 3581
平均标准差	0. 3655	0. 3388
一阶自相关系数	0. 3916	0. 3568
共同区间分析		
共同区间时段 (年)	1400 ~ 1899	1400 ~ 1899
所有样芯平均相关系数	0. 484	0. 492
树间相关系数	0. 479	0. 487
树内相关系数	0. 734	0. 790
信噪比	24. 834	33. 227
总体代表性	0. 961	0. 971
第一主成分解释方差量 ( % )	51. 05	51. 81

为了了解序列的周期性变化，采用了功率谱<sup>[8]</sup>方法对轮宽序列进行分析，首先取一定的最大落后时间长度计算序列的落后自相关系数，然后利用落后自相关系数进行粗谱估计。为了消除粗谱估计的小波动，采用了 Tukey - Hamming 窗函数对粗谱进行平滑。对计算出的平滑谱在一定的信度下进行红、白噪音检验以检测出超过置信性水平的主要周期。本文的功率谱计算中取 95 % 的置信区间进行噪音检验，最大落后长度取为 300 年。

功率谱分析所给出的是序列的平均周期，不能详细描述周期振荡随时间的演化特征；奇异谱和小波分析方法都能够研究不同时期内周期振荡的变化情况，因此本文还采用了这两种方法对轮宽序列进行变化特征分析。

奇异谱分析<sup>[9]</sup>方法是对时间序列在嵌套维数 M 下作时间经验正交函数展开，时间序列行向量中蕴涵的波形信号被集中于各个特征向量（列向量）之中，而波形信号的变化特征则被提取到与其相应的时间主分量中。在本文的计算中，对特征值统计信度的检验和对

成对特征向量周期信号统计信度的检验采用 Vautard<sup>[10]</sup>提出的方法进行。嵌套维数  $M$  的选取对计算结果有一定的影响，但当序列隐含显著周期信号时，就有一个较宽的  $M$  值域存在，在这个值域内可以检测到较为稳定的周期信号。本文中我们通过实验取  $M$  为 400 年进行分析。

小波分析方法是近 20 年来发展起来的一种新的数学分析工具，最早由 Morlet 引入<sup>[11]</sup>，它不但可以揭示序列在各种时间尺度上的周期变化特征，而且还能显示出各种周期信号随时间而发生的变化。本文采用复数形式的 Morlet 小波变换，通过不同尺度上小波变换系数的变化分析不同波动的演化情况。

奇异谱分析及小波分析方法近年来在国内的树轮研究中逐步得到应用，如 Hughes 等<sup>[12]</sup>采用奇异谱方法分析了根据华山树木年轮资料重建的我国中北部地区公元 1600 年以来的降水变化特征，刘洪滨等<sup>[13]</sup>采用 Morlet 小波变换分析了根据华山树木年轮资料重建的我国陕西关中及周边地区 500 年来的初夏干燥指数的变化特征等。

## 3 结果与分析

### 3.1 功率谱分析

图 1 为 WL3 和 WL4 两条轮宽序列千年来的变化曲线以及 40 年的滑动平均曲线，图 2 为两条序列的功率谱分析结果。可见 WL3 和 WL4 两个轮宽指数序列的频谱分布特征非常相似，在不同频率的周期变化上两条序列具有较好的一致性，其中在世纪尺度的低频变化上，它们都存在 200 年的最显著周期和 100 ~ 150 年左右的显著周期。

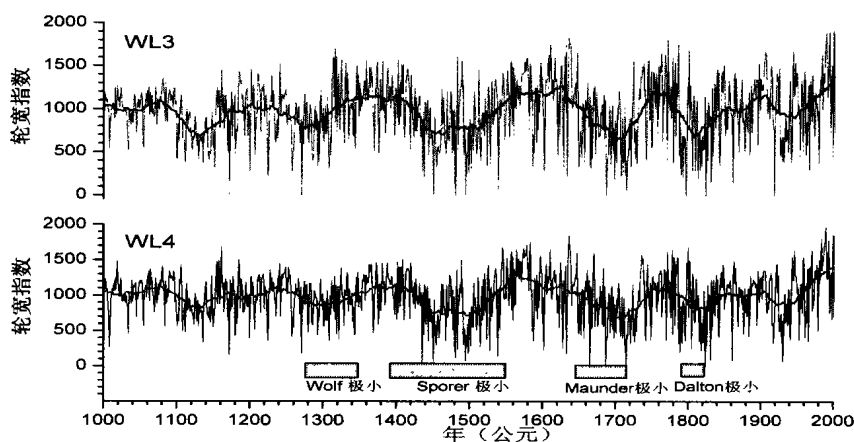


图 1 WL3 和 WL4 千年轮宽序列 (黑粗线为 40 年滑动平均)

Fig. 1 Tree ring-width index of WL3 and WL4 during the last millennium (black line is 40-year smoothing)

### 3.2 奇异谱分析

表 2 给出了奇异谱方法计算得到的明显成对的前 12 个 6 对特征向量，其特征值的信度和特征向量所蕴涵的振荡周期信号的信度都通过了检验。它们表征了轮宽序列变化的主要振荡模态，分别反映了 400、200、133、100、80、33 以及 8.5 年等不同尺度的周期振荡。可见奇异谱方法对 WL3 和 WL4 两条轮宽序列的分析都得到了最显著的 200 年周期，

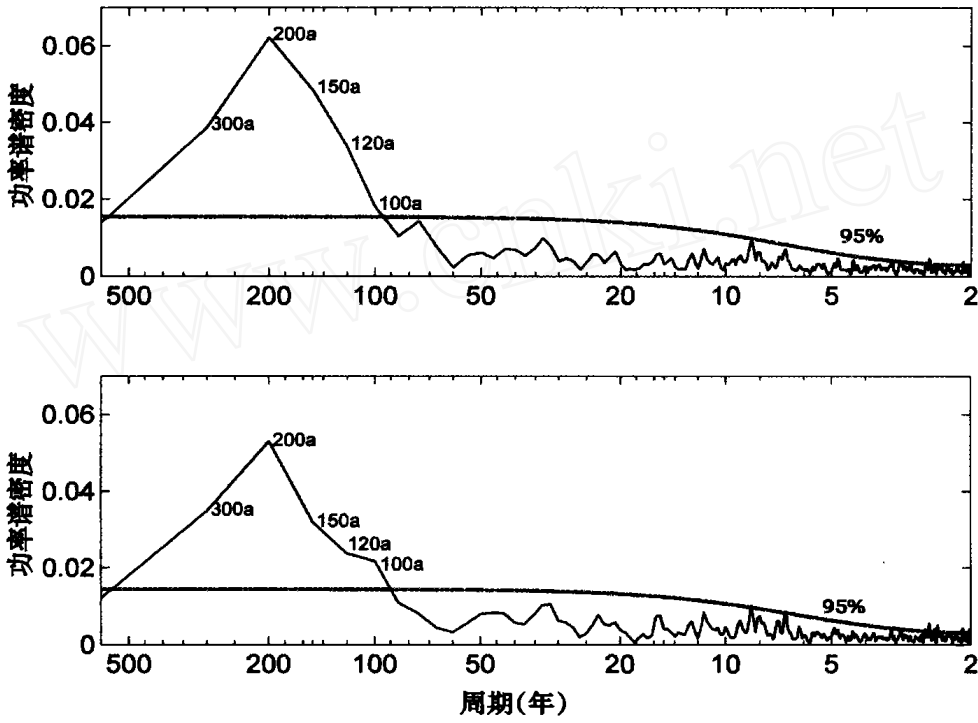


图 2 WL3 和 WL4 轮宽轮宽指数序列的功率谱分析

Fig. 2 Power spectrum analysis for chronologies of WL3 and WL4

表 2 WL3 和 WL4 轮宽序列的奇异谱分析结果

Tab. 2 Singular spectrum analysis for chronologies of WL3 and WL4

特征向量		WL3		WL4	
序号	振荡周期 (年)	累计方差解释量 %	振荡周期 (年)	累计方差解释量 %	
1	200	4.34	200	4.83	
2	200	8.56	200	9.39	
3	133	11.19	100	11.60	
4	133	13.79	100	13.71	
5	400	16.11	400	15.34	
6	400	17.97	400	16.68	
7	80	19.12	33.33	17.58	
8	80	20.21	33.33	18.49	
9	33.33	21.00	8.51	19.36	
10	33.33	21.78	8.51	20.22	
11	8.51	22.50	80	21.06	
12	8.51	23.22	80	21.86	

但在次显著的周期变化上两条序列存在一定的差异，其中 WL3 序列表现为 133 年的周期振荡，而 WL4 序列则为 100 年长度。两条序列的第 5 到第 12 特征向量所体现的周期振荡除了顺序上有些变化外，周期长度都是相同的。前 4 对特征向量能够解释两条序列大约 20 % 的总方差。

根据明显成对的特征向量进行序列重建，可以从主要周期振荡分量的重建序列 (Rcs) 中分析该周期振荡在时间上的演化。图 3 和图 4 分别为根据前 4 对特征向量对 WL3 和 WL4 进行的分量重建序列，从图中可见重建的分量序列都表现出周期振荡在长期变化上

的阶段性特征。重建分量序列的振幅变化表征了周期信号的强弱, 可见 WL3 序列 133 年和 WL4 序列 100 年的周期振荡都表现出明显的前期振幅小后期振幅大的特点, 而且它们都是从 17 世纪初以来振幅逐渐变大。WL3 序列 133 年周期的振幅在 19 世纪已经达到最大, 而 WL4 序列 100 年周期振荡则到 20 世纪下半叶才达到最大。WL3 序列 80 年的周期变化较为平稳; WL4 序列 33 年周期变化则从 14 世纪初以来振幅逐渐加大, 在 18 世纪内振幅达到最大, 进入 20 世纪后振幅又有下降的趋势, 呈现出两端小中间大的特点。

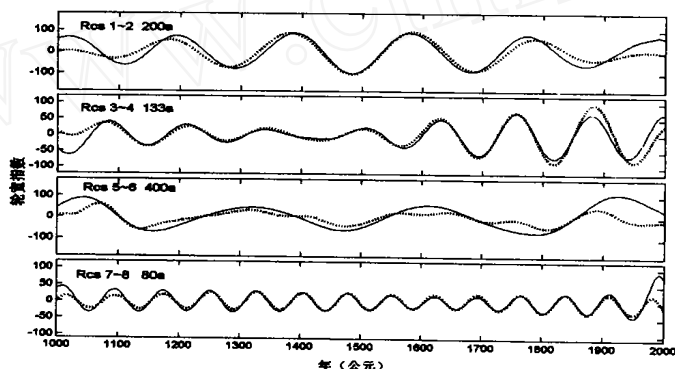


图 3 WL3 轮宽轮宽指数序列前 4 对特征向量重建的主分量

Fig. 3 Reconstructed components of four paired eigenvectors of SSA for chronology of WL3

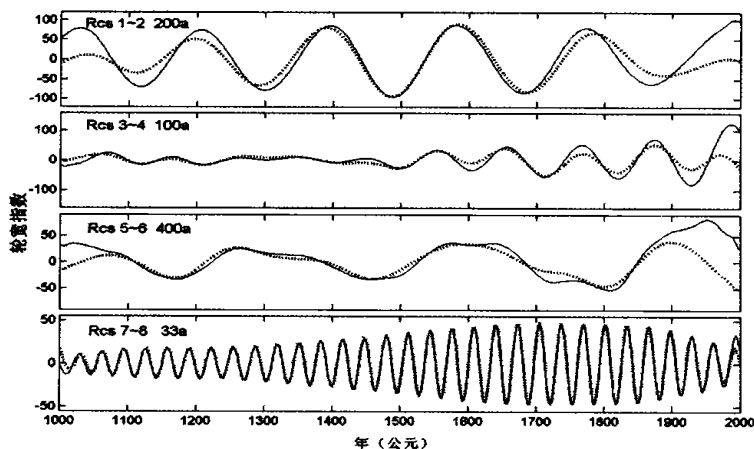


图 4 WL4 轮宽轮宽指数序列前 4 对特征向量重建的主分量

Fig. 4 Reconstructed components of four paired eigenvectors of SSA for chronology of WL4

### 3.3 小波分析

图 5 和图 6 分别展示了 WL3 和 WL4 序列采用 Morlet 小波变换得到的小波系数 (实部) 的分布。由图可见, 两条序列都表现出最显著的 200 年尺度的周期变化, 其中以 15 ~ 17 世纪最为强盛。它们主要的不同点在于 WL3 序列从 18 世纪开始出现了 120 ~ 130 年尺度的显著周期波动, 而 WL4 序列在这一时期出现了 110 年左右的显著振荡周期。从图中还可以看出, WL3 序列 120 ~ 130 年尺度的周期振荡在 19 世纪最为强盛, 而 WL4 序列 110 年尺度的周期变化到 20 世纪才达到最强, 这和奇异谱分析的结果非常一致。

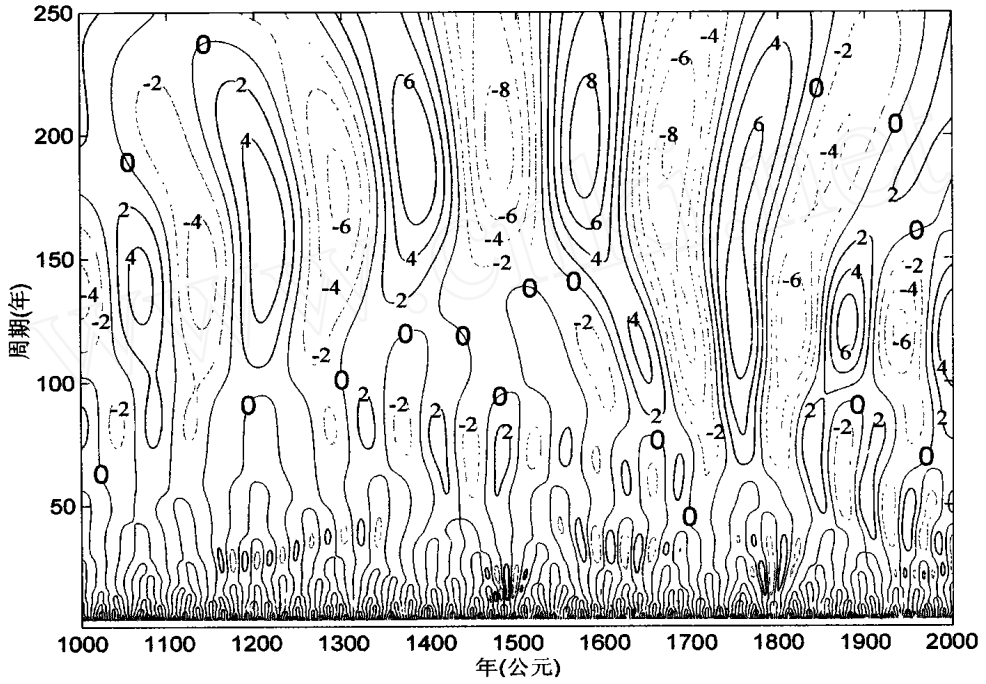


图 5 WL3 轮宽指数序列的 Morlet 小波系数

Fig. 5 Morlet wavelet coefficient distributions for chronology of WL3

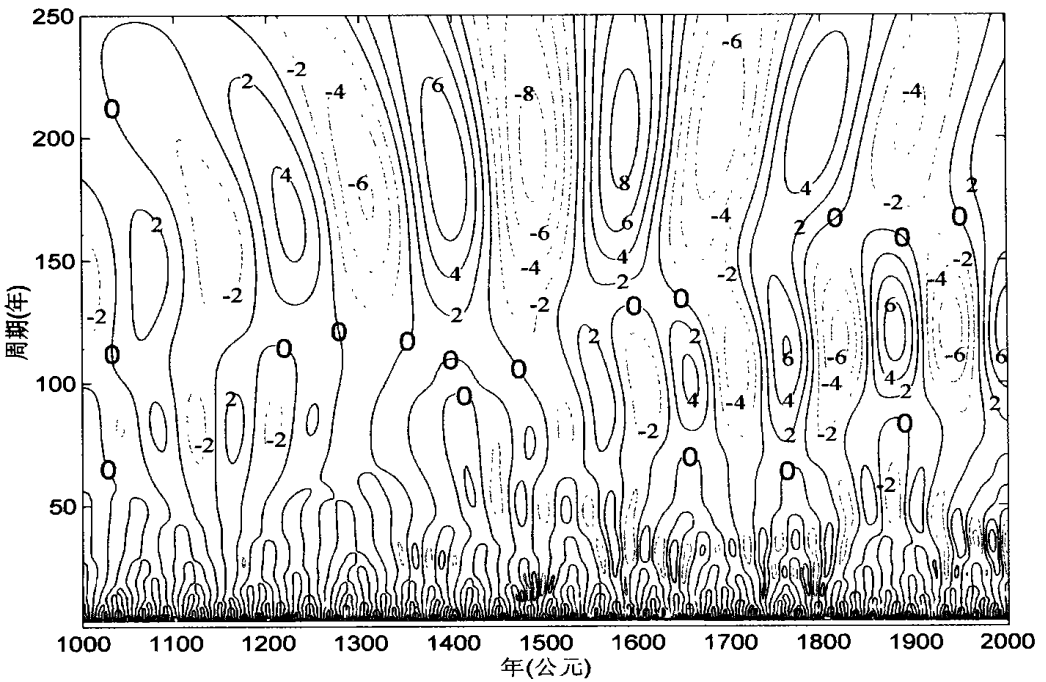


图 6 WL4 轮宽指数序列的 Morlet 小波系数

Fig. 6 Morlet wavelet coefficient distributions for chronology of WL4

由于我们这里所分析的两条树轮宽度序列所反映的是湿度状况, 因此通过小波系数的变化可以分析千年来各种尺度上干湿状况的演变规律。从图 5 和图 6 可以看出: 200 年尺度的周期变化的最大正振幅出现在 16 世纪末期, 最大负振幅出现在 15 世纪下半叶, 其次是 18 世纪初; 在百年尺度的周期变化上, 较大的正振幅分别出现在 19 世纪后期和 20 世纪后期, 而 19 世纪前期和 20 世纪前期对应的是较大的负振幅; 200 年和百年尺度上的周期变化都同时表现为较大负振幅的时期是在 18 世纪初。由于负振幅所对应的是降水量较少的干旱期, 正振幅对应的是降水量较多的湿润期, 因此可以推知 15 世纪下半叶的干旱主要受 200 年尺度周期波动的影响, 20 世纪后期的湿润则主要是百年尺度周期的贡献, 而 18 世纪初的干旱则是受两种尺度周期变化的共同影响造成的。

## 4 讨论

对比三种不同方法的分析结果, 可以看到它们都得出了最显著的 200 年周期和百年左右的显著周期, 揭示了相同的低频变化特征。但功率谱方法仅能够识别出频域上所隐含的周期信号, 而奇异谱和小波分析方法则能够得到不同尺度周期变化的演化过程, 并且这两种方法得到的演变特征非常一致。

从序列的低频变化上可以发现 (图 1), 在过去的 1000 年里, 轮宽序列的低值区主要发生在 12 世纪上半叶、13 世纪末~14 世纪初、15 世纪下半叶~16 世纪初、17 世纪下半叶~18 世纪初、18 世纪末~19 世纪初以及 20 世纪的二三十年代等, 其中以 15 世纪下半叶和 18 世纪初最为显著; 轮宽序列的高值区则以 16 世纪下半叶~17 世纪初和 20 世纪后期较为显著。对比轮宽序列和太阳活动的变化, 可以发现轮宽序列的低值区和太阳活动的几个不活跃期非常吻合, 而轮宽序列的高值区则和太阳活动的活跃期大致对应。图 1 在轮宽序列的下方给出了千年以来的四个太阳活动极小期<sup>[14]</sup>, 可见 1280~1350 年间的 Wolf 极小、1390~1550 年间的 Sporer 极小、1645~1715 年间的 Maunder 极小和 1795~1823 年的 Dalton 极小期在对应的轮宽序列的变化上都表现为低值区, 20 世纪初的低值区也与太阳活动的现代极小期相对应。两条轮宽序列在 20 世纪后期都为高值区, 这一时期太阳活动也非常活跃, 处于现代极大期。这种二者之间较好的对应关系暗示了树轮采样点及其周边地区的气候变化可能在低频上受太阳活动的影响。

同时, 用不同方法得到的各种周期与太阳活动的变化周期<sup>[15]</sup>非常接近, 如最显著的 200 年周期振荡与太阳活动 200 年左右的 Suess 周期一致, 奇异谱得到的 80 年周期则与太阳活动的 80~90 年 Gleissberg 周期一致, 而 133、100 和 33 年长度的周期也都是太阳活动的 11 年 Schwabe 周期和 22 年 Hale 周期的倍数, 进一步说明树轮轮宽序列所指示的气候变化与太阳活动存在一定的关系。

在其他一些利用气候代用资料以及气候观测资料进行的研究中也发现了与本文一致的周期, 如 Neftel 等<sup>[16]</sup>对树轮的放射性碳同位素数据分析发现超过 99 % 置信度的最显著周期是 200 年; Stuiver<sup>[17]</sup>对俄罗斯冬季的严寒指数进行的谱分析表明最显著周期是 126~141 年; Hodell 等<sup>[18]</sup>通过对玛雅干旱频率的研究不仅发现了 95 % 置信度水平下 208 年最显著周期的存在, 同时还发现存在着 125 年和 100 年的周期; Cook 等<sup>[19]</sup>对澳大利亚塔斯

Shao X M, Huang L, Fang X, *et al.* A dendroclimatic study of Qilian Juniper in the northeast Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. In: *Dendrochronology, Environmental Change and Human History*. 6th International Conference on Dendrochronology, Quebec City, Canada, August 22nd-27th, 2002.

马尼亚岛上根据树轮资料重建的 3000 年长度的温度序列分析也发现了 200 年长度的最显著周期。这些研究与本文得到的结果较为一致,说明这些不同地区的气候在百年尺度低频变化上存在的相似规律可能都受到太阳活动的影响。

## 5 结 论

功率谱、奇异谱和小波分析三种方法对沙利克山树轮轮宽序列的分析得到了较为一致的结果,两个样地的序列在低频变化上都存在 200 年的最显著周期和百年左右的显著变化周期。

不同长度的周期具有不同的演变特征,其中 200 年周期在 15~17 世纪最显著,百年左右的周期在 18 世纪之后开始盛行。轮宽序列 15 世纪下半叶的显著低值主要是 200 年尺度周期变化的贡献,20 世纪后期的高值则主要受百年尺度的周期变化的影响。

轮宽序列的低频变化与太阳活动的长期变化之间存在着较好的对应关系,说明轮宽序列所指示的气候变化可能受太阳活动变化的影响。

## 参考文献:

- [1] Bradley R S. Past global changes and their significance for the future. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 391~402.
- [2] 邵雪梅. 树轮年代学研究进展. *第四纪研究*, 1997, **17**(3): 265~271.
- [3] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperature during the last millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geography Research Letter*, 1999, **26**: 759~762.
- [4] Houghton J T, Ding Y, Griggs D, *et al.* *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: The Press Syndicate of Cambridge University, 2001.
- [5] Zheng Du. The system of physico-geographical regions of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Science in China (Series D)*, 1996, **39**(4): 410~417.
- [6] 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木盆地东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析. *地理学报*, 2003, **58**(1): 90~100.
- [7] Cook E R, Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, **41**: 45~53.
- [8] 胡基福. *气象统计分析与预报*. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1996.
- [9] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Physica D*, 1989, **35**: 395~424.
- [10] Vautard R, Yiou P, Ghil M. Singular-spectrum analysis: a toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D*, 1992, **58**: 95~126.
- [11] Morlet G A, Fourgeau I, Gard, D. Wave propagation and sampling theory. *Geophysics*, 1982, **47**: 203~236.
- [12] Hughes M K, Wu X D, Shao X M. A preliminary reconstruction of rainfall in North-central China since A.D. 1600 from tree-ring density and width. *Quaternary Research*, 1994, **42**: 88~94.
- [13] 刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊. 中国陕西关中及周边地区 500 年来初夏干燥指数序列的重建. *第四纪研究*, 2002, **22**(3): 220~229.
- [14] Beer J, Mende W, Stellmacher R. The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 403~415.
- [15] Rind D. The sun's role in climate variations. *Science*, 2002, **296**: 673~677.
- [16] Neftel A, Oeschger H, Suess H E. Secular non-random variations of cosmogenic carbon-14 in the terrestrial atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, **56**: 127~147.
- [17] Stuiver M. Solar Variability and climate change during the last millennium. *Nature*, 1980, **286**: 868~871.
- [18] Hodell D A, Brenner M, Curtis J H, *et al.* Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science*, 2001, **292**: 1367~1370.



- [19] Cook E R, Buckley B M, D'Arrigo R D. Inter-decadal climate oscillations in the Tasmanian sector of the southern hemisphere: evidence from tree rings over the past three millennia. In: Jones P D. (Eds.). Climate Variations and forcing mechanisms of the last 2000 years. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 141 ~ 160.

## Characteristics of millennial tree-ring width variations of Qilian juniper in Shalike Mountain, Qinghai

HUANG Lei, SHAO Xue-mei, LIANG Er-yuan, WANG Li-li

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Qilian juniper (*Sabina przewalskii* Kom.) growing in the mountainous area of the eastern part of Qaidam Basin is sensitive to climate change. It can reach one millennial years old and the tree-ring width chronology can be used to reconstruct climate change over the past 1000 years. Power spectrum analysis, Singular Spectrum Analysis (SSA) and wavelet analysis were utilized to trace the variations recorded in two standard tree-ring width chronologies (WL3 and WL4) of Qilian juniper in Shalike Mountain, Qinghai, China.

The power spectrum of the series showed low frequency periodicity of 200 years are most statistically significant at the 95 % confidence level for both chronologies. Analysis of the power spectrum of both series also showed evidently that low frequency variations of century-scale are present in the chronologies. It was found that the most important cycle was 200 years for both chronologies by SSA, cycle of 133 years for WL3 and 100 years for WL4 are also identified by this method. The reconstructed components of paired eigenvectors of SSA showed that different scale cycles had different behaviors over the past 1000 years.

Wavelet analysis can provide information on the amplitude of periodic signals and their variations with time. The Morlet wavelet coefficient distributions indicated that the 200 years cycle was most prevailing from the 15th to the 17th century for both chronologies, the century-scale cycles were pronounced since the 18th century. The prominent low value of the ring-width in the second half of 15th century is affected by the cycle of 200 years, the high value in the late 20th century is the contribution of century-scale periodicities.

One possible explanation of the low frequencies in the ring-width data might be related to the fluctuations of the solar-activity. Narrow ring-width seems to occur during quiet solar periods such as the Wolf, Spörer, Maunder and Dalton solar minima, suggesting that the low variation of the climate indicated by tree-ring width may be affected by the long term change in solar activity.

**Key words:** Qilian Juniper; tree-ring; spectrum analysis; low frequency