

天目山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 300 多年的 秋季气候变化

赵兴云^{1, 2}, 王 建¹, 钱君龙³, 姜修洋¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097; 2. 临沂师范学院地理与旅游系, 山东 临沂 276005;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室, 江苏 南京 210008)

摘 要: 对采自浙江天目山地区的柳杉树轮, 交叉定年后, 测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列。用趋势比率法去除大气 $\delta^{13}\text{C}$ 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的影响后, 分析了树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列对气候要素变化的响应。分析发现: 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的高频振荡与该区 9~ 12 月气温及 9 月降水有较好相关性。重点重建了该地区 9 月降水量与平均最高气温两个气候要素 300 多年的气候变化, 其变化模式表现为: 冷- 湿和暖- 干的组合特征。统计结果显示: 重建序列所反映的旱涝频率分布及其冷暖变化与该区的实测记录结果基本一致。表明: 重建序列较好地反映了该区秋季气候变化历史。重建序列所反映的气候变化与我国近 500 a 的气候变化及该区部分史料记载有较好的对应, 并与青藏高原苟鲁错湖泊沉积及新疆阿勒泰地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的气候变化有部分对应, 只是冷暖变化的起止时间有错动, 反映了气候变化的区域差异。周期分析发现: 重建序列含有准 58.82 a、21.28 a、13.70 a、3.23 a、2.63 a、2.33 a、2.07 a 的周期, 这些周期与行星、地心会聚的“力矩效应”变化周期、太阳辐射变化、太阳活动及“准两年振荡”周期相吻合, 表明太阳辐射变化及 ENSO 现象对该区气候变化影响显著, 也反映出天目山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列对太阳活动及大范围的 ENSO 事件的记录能力。

关键词: 树轮; $\delta^{13}\text{C}$; 天目山; 气候变化

中图分类号: P468. 024

文献标识码: A

树木年轮提供年甚至季节的高分辨率气候记录, 已成为古气候研究的重要代用资料^[1- 3]。树木年轮稳定同位素的研究是树轮研究中的新领域, 自 20 世纪 70 年代以来, 已在国际上取得快速发展^[4- 12]。其中树轮稳定碳同位素与气候变化关系的研究进展最为迅速^[13- 17]。我国树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 研究多集中于温带、寒带的一些降水或气温为主导限制因子的地区^[18- 24], 而对亚热带、热带等温暖、湿润地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素关系的研究还仅局限于少数地点。孙谷畴等^[25, 26]、林植芳等^[27]对亚热带人工林与自然林的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行了研究; 孙艳荣等^[28]研究了广东现代樟树 $\delta^{13}\text{C}$ 与厄尔尼诺事件的关系; 钱君龙等^[29]、唐劲松等^[30]、吕军等^[31- 32]

已利用柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建了天目山地区 160 多年的季节降水与温度变化, 而该区更长时间气候要素重建序列尚未见到。本文利用采自天目山的一株 300 多年的古柳杉树轮, 测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 序列后, 分析了该树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与天目山气象站气象要素间的响应关系, 发现该树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列很好地记录了本区秋、冬季气温及秋季降水量的变化, 这与钱君龙等^[29]已做过的研究结论相一致, 这可为亚热带地区利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建秋、冬气温及季节降水提供又一个参考依据。在此基础上, 重点重建了该区 300 多年的秋季降水与最高气温年序列, 并分析了本区秋季气候变化的特征及其周期变化。

收稿日期 (Received date): 2005- 01- 11; 改回日期 (Accepted): 2005- 05- 06。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (No. 49771001)。[Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 49771001).]

作者简介 (Biography): 赵兴云 (1962-), 女, 临沂师范学院自然地理专业副教授, 现为南京师范大学地理科学学院在读博士, 主要在树木年轮与气候变化方面进行研究。[Zhao Xingyun (1962-), Female, Associate Professor of Natural Geography Specialty, Geography of Linyi Teachers' College, Linyi; Doctor, Geography College, Nanjing Normal University, mainly conducting research on tree ring and climate variation.]

1 样品采集与处理

本实验用样品为 1997- 05- 11 采自浙江西天目山林区的柳杉 (*Cryptomeria Fortunei Hooibrenkex Otto et Dietr.* 简称 CF) 树木圆盘 (台风刮倒)。采集地点为倒挂莲花 (30° 20′ 00″ N, 119° 25′ 58″ E, 海拔 1 090 m) 附近, 阳坡。样品采集按国际树轮数据库 (International Tree-Ring Data Bank) 标准进行, 经交叉定年, 树龄为 329 a (1622~ 1990 年)。

柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 组成序列的分析流程^[33]是: (1) 逐年逐轮分别雕刻木质样品各 2 g 左右 (雕刻时段为 1685~ 1985 年), 在 70~ 80 °C 下干燥 3 d, 磨至 30~ 60 目; (2) 经过抽提、氯化、漂白、碱洗等过程, 提取 α -纤维素; (3) 将提取的 α -纤维素与 CuO、Pt 真空密封于小石英管中高温燃烧, 制备供质谱分析用的 CO₂ 气体, 并将制备的 CO₂ 气体在 MAT-252 型质谱仪上测定其 ¹³C/¹²C 比值, 通过换算以 $\delta^{13}\text{C}$ CPDB 表示, 简称为 $\delta^{13}\text{C}$ ^[34], 单位为 (‰), 分析误差 ≤0. 1 ‰。其表达式为:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ (‰)} = [(\delta^{13}\text{C}_{\text{Sample}}/\delta^{13}\text{C}_{\text{Standard}})^{-1}] \times 1000$$

(1)

$\delta^{13}\text{C}$ 的测定结果如图 1。

2 结果分析

从柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的时间序列谱可以看出: 工

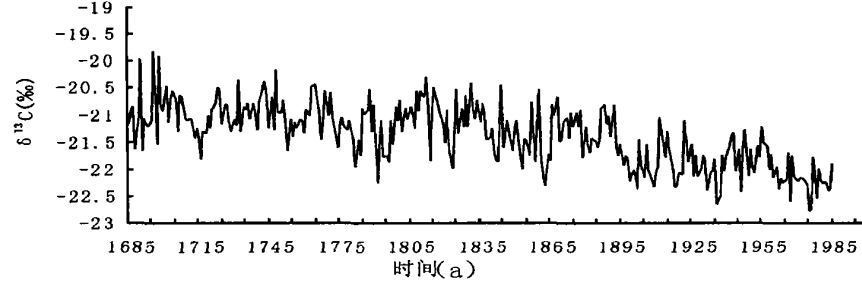


图 1 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 组成年序列
Fig. 1 Time series of the $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings at Tianmu Mountain

表 1 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 特征统计量

Table 1 The statistical characteristics of the $\delta^{13}\text{C}$ of tree rings at Tianmu Mountain

样本	自相关系数	样本数	最大值 (‰)	最小值 (‰)	平均值 (‰)	方差	标准差	变异系数	偏度	峰度
柳杉	一阶 二阶	0. 59 0. 52	301	- 19. 83- 22. 78-	21. 37	0. 32	0. 57	0. 03	- 0. 09	- 0. 47

业革命前, 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列波动下降趋势不太明显, 工业革命后, 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 下降趋势特别明显, 这与工业革命以来, 特别是 20 世纪以来, 大量化石燃料 CO₂ (其 $\delta^{13}\text{C}_r$ 很低, 约- 26 ‰) 排放大气, 致使大气 CO₂ 浓度持续升高, 相应的大气 $\delta^{13}\text{C}_a$ 持续降低的趋势相一致^[35]。这种下降趋势正是全球大气 CO₂ 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 变化在天目山地区树木生长中的反映。柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的特征统计量见表 1。

经分析检验: 该柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列与时间呈非线性关系, 且二次多项式关系优于其它曲线关系, 所以, 本文采用二项式拟合与趋势比率法^[36]消除大气 $\delta^{13}\text{C}_a$ 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 测定结果的影响。拟合方程为:

$$\delta^{13}\text{C} = - 69. 722 + 0. 057 Y - 1. 678 \times 10^{-5} Y^2$$

($r = 0. 84, p < 0. 001$)

(2)

式中 $\delta^{13}\text{C}$ 代表柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的拟合序列值, Y 代表年。

用实测的柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列值与拟合序列值相除, 以消除大气 $\delta^{13}\text{C}_a$ 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 测定结果的影响, 得到树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的高频变化部分, 即树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的残差, 本文称之为比值序列 (图 2)。

由图 2 可以看出: 消除大气 $\delta^{13}\text{C}_a$ 影响后的柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列变化平稳, 无变化趋势存在。这说明用二项式拟合与趋势比率法去除的低频变化基本上包含了大气 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的影响, 所以, 比值序列所保留的是由气候因素变化引起的高频变化信息。

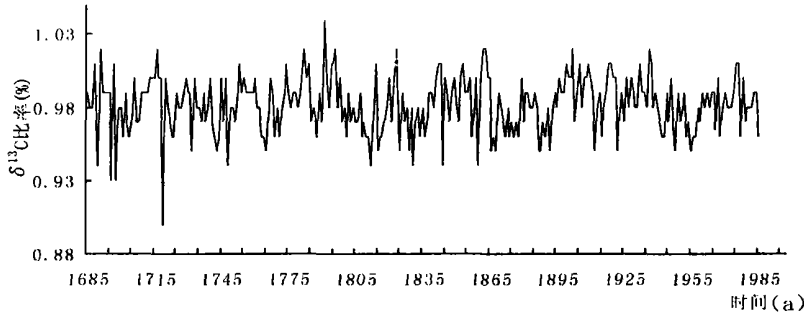


图 2 用二项式与趋势比率法 (Falker 法) 消除大气 CO₂ 影响后的天目山柳杉树轮

Fig. 2 The $\delta^{13}\text{C}$ time series of CF tree rings after obviating the influence of the $\delta^{13}\text{C}$ variation in atmospheric CO₂ by using the Falker's method

3 与气候要素的相关分析

3.1 气象记录

选择距采样点最近的天目山气象站 (30°10' N, 119°13' E) 资料, 分析柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气温、降水的关系。选择距采样点约 80 km 的杭州气象站 (30°14' N, 120°10' E) 资料作为参考资料。天目山气象站有连续 41 a 的资料 (1956~ 1996 年), 杭州气象站有连续 46 a 的资料 (1951~ 1996 年)。采用滑动 t- 检验与 Cramer's s 法^[37] 对天目山气象站的气象记录进行检验, 结果表明: 该站记录的年均气

温与年总降水量分布较均匀, 在 $\alpha=0.01$ 的显著水平上 ($t_{\alpha}=0.01=\pm 2.88$) 无明显突变 (图 3、4), 所以, 该站气象资料符合本文研究需要。表 2 为天目山气象站 1956~ 1996 年间累年日均气温值与累年月平均降水量及其标准差。

3.2 对气候要素的响应分析

由表 1 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的自相关系数知, 树轮生长存在较明显的滞后效应, 即当年的树木生长会受到前一年甚至前二年的气象要素的影响。对天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列与天目山气象站当年及前一年的各月平均气温、平均最高气温、平均最低气温及月总降水量分别求相关, 结果如表 3。表中 r_0 、 r_{-1} 分别表示树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列与当年及前一年各气象要素的相关系数。

相关分析发现: (1) 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与多数月的降水相关不显著, 但是与 9 月当年降水及前一年 3 月降水相关性显著, 说明 9 月的降水对树木当年秋季生长影响显著, 3 月降水的滞后效应明显。(2) 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的相关性好于降水, 特别是对当年春 (4 月)、秋 (9~ 11 月)、冬 (12 月) 季的温度响应显著, 且滞后效应明显。春、秋季气温变化对树木早、晚材的生长影响显著, 冬温高低主要影响树木的生理代谢, 并对树木来年生长产生影响。

天目山属亚热带季风性湿润气候, 全年降水量丰富。3~ 6 月为第一雨季 (其中 3~ 5 月春雨, 6~ 7 月上旬为梅雨), 降水量约占全年降水量的 48%; 9 月秋雨为第二雨季 (主要是台风雨), 雨量约占全年降水量的 12%^[38]。全年降水能满足树木生长的需要, 所以, 降水不是该区树木生长的限制因子, 这可能正是树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与该区多数月相关

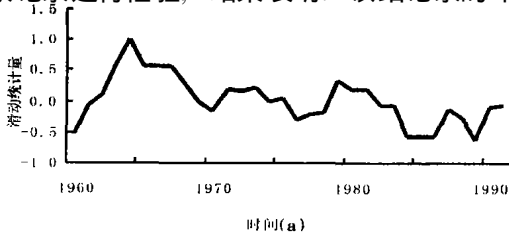


图 3 天目山年均气温等级滑动 t- 统计量曲线

Fig. 3 The moving t- statistic curve of average temperature at Tianmu Mountain

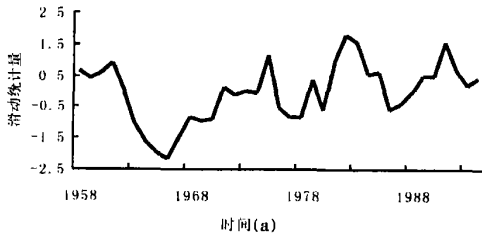


图 4 天目山年总降水量 Cramer's s 法滑动 t- 统计量曲线

Fig. 4 The moving t- statistic curve of total precipitation by using Cramer's s method at Tianmu Mountain

表 2 天目山气象站 1956~ 1996 年间累年月均气温与月平均降水量

Table 2 The average temperature and the average precipitation/mm from 1956~ 1996 at Tianmu Mountain weather station

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
累年月平均气温 (℃)	- 2. 51	- 1. 45	2. 91	8. 84	12. 99	16. 5	19. 9	19. 11	14. 94	9. 84	4. 94	0. 11
标准差	1. 57	2. 12	1. 6	1. 23	1. 04	0. 90	0. 85	0. 85	1. 17	1. 03	1. 53	1. 74
累年月均最高气温 (℃)	1. 7	2. 8	7. 3	13. 4	17. 0	20. 0	23. 7	22. 8	18. 5	14. 0	9. 2	4. 4
标准差	1. 58	2. 35	1. 87	1. 31	1. 14	0. 89	1. 33	1. 38	1. 23	1. 0	1. 53	1. 75
累年月均最低气温 (℃)	- 5. 9	- 4. 8	- 7. 0	5. 3	9. 9	13. 9	17. 4	16. 6	12. 5	7. 0	1. 6	- 3. 4
标准差	1. 5	2. 06	1. 54	1. 33	1. 03	0. 99	0. 74	0. 65	1. 18	1. 16	1. 67	1. 77
累年月均降水量 (mm)	59. 9	79. 5	14. 7	147. 6	197. 8	268. 5	198. 4	220. 7	184. 8	97. 1	65. 8	45. 7
标准差	29. 0	43. 4	62. 9	44. 2	73. 7	122. 7	91. 6	98. 5	97. 7	75. 5	47. 8	30. 9

表 3 天目山气象站原始气象记录与柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列间的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between the meteorologic records at Tianmu Mountain weather station and the $\delta^{13}\text{C}$ series of tree rings

月	月平均气温 (℃)		月平均最高气温 (℃)		月平均最低气温 (℃)		月降水量 (mm)	
	r_0	r_{-1}	r_0	r_{-1}	r_0	r_{-1}	r_0	r_{-1}
1	0. 00	0. 09	0. 00	0. 06	0. 00	0. 12	- 0. 18	0. 09
2	0. 20	0. 02	0. 22	0. 11	0. 20	0. 02	0. 05	0. 17
3	- 0. 20	0. 23	- 0. 16	0. 26	- 0. 17	0. 27	- 0. 05	- 0. 42
4	- 0. 23	0. 36	0. 28	<u>0. 34</u>	- 0. 16	0. 37	- 0. 16	0. 15
5	0. 15	0. 12	0. 08	0. 16	0. 11	0. 07	- 0. 17	0. 03
6	0. 04	<u>- 0. 34</u>	0. 02	- 0. 27	- 0. 02	<u>- 0. 33</u>	- 0. 02	0. 20
7	- 0. 07	- 0. 20	0. 00	- 0. 23	- 0. 12	- 0. 17	- 0. 05	0. 12
8	0. 22	- 0. 16	0. 19	- 0. 12	0. 12	- 0. 17	0. 03	- 0. 05
9	0. 29	0. 36	0. 39	0. 28	0. 23	<u>0. 33</u>	- 0. 40	0. 18
10	- 0. 12	0. 47	- 0. 28	<u>0. 33</u>	- 0. 08	0. 44	0. 29	0. 24
11	- 0. 20	0. 08	- 0. 45	0. 07	- 0. 15	0. 11	0. 16	0. 15
12	- 0. 38	0. 10	- 0. 35	0. 05	- 0. 39	0. 13	- 0. 17	0. 28

注: 黑体数字表示超过了 $\alpha=0.05$ 的置信水平, 带下划线的数字表示超过了 $\alpha=0.1$ 的置信水平

性不显著的原因。但另据统计: 天目山地区在降水比较集中的春季与初夏, 月均雨日高达 15.9~ 16 d, 月均雾日达 15.9~ 17.4 d; 海拔 1 100 m 高度上年均雨日 (降水量 ≥ 0.1 mm 日数) 约为 179.9 d, 年平均雾日约为 176.6 d^[38]。该区柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与当年多数月降水的负相关关系, 可能正是这种多雨雾天气特征的反映。因为: 多雨月, 阴雨天较多, 有效日照时间减少, 植物接受的太阳辐射减少, 光合作用速率降低, 导致树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 较低。8 月该区为副高控制, 雨量多, 但光照强, 温度高, 蒸发大, 为相对干季, 水分胁迫可导致气孔关闭, 导通度降低, 从而引起植物光合作用所固定的 $\delta^{13}\text{C}$ 增大。10~ 11 月, 降水较少, 天气晴朗, 但此时的气温已较低, 光合作用明显减弱, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。

天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的相关性好于降水。从全年看, 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与 8 月以前的各月气温相关性较差, 而与 9 月后各月气温的相关性显著提高。说明在天目山地区秋、冬季温度是树木生

长的限制因子。进入秋、冬季后, 随着温度的降低, 光合作用减弱或停止, 树木生长也因而减慢或停止。冬季温度的高低变化, 对树木的呼吸作用和生理代谢影响很大。当冬季温度偏高时, 树木的呼吸与生理代谢加强, 细胞内部 CO_2 分压增大, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。当冬季温度偏低时, 情况刚好相反。所以, 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录该地区秋、冬季气温的变化。钱君龙等^[29]已对亚热带地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与冬季温度关系作过研究, 也认为温湿地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录冬季气温的变化。

3.3 气候要素重建

根据上述相关性分析, 分别设计转移函数对相关性较好的 9 月降水量及最高气温进行重建 (对冬季的温度重建另文论述)。转换函数如下

$$R_9=4.186\times10^5-8.208\times10^4Y+4.038\times10^5Y^2, (r=0.43, \alpha=0.05)$$

(3)

$$R_9=-1.614\times10^3+3.299\times10^3Y-1.492\times10^3Y^2, (r=0.39, \alpha=0.05)$$

(4)

式中 R_9 、 T_9 分别代表 9 月的降水量与平均最高

气温重建值, Y 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列值。重建序列如图 5、6。经检验重建序列在 $\alpha=0.001$ 的显著性水平上无突变发生(图略)。

根据杭州站 46 a 气象资料及天目山气象站 41 a 观测资料分析: 浙江秋季(9~11 月)降水占全年降水量的 21.96%, 其中, 9 月降水占秋季降水量的 55.32%, 10 月占 26.28%, 11 月占 18.40%。天目山地区秋季(9~11 月)降水占全年降水量的 20.23%, 其中, 9 月降水占秋季降水量的 53.3%, 10 月降水占秋季降水量的 27.6%, 11 月降水占秋季降水量的 19.1%。按旱涝等级分级标准^[39]对浙江及天目山地区 9 月及秋季降水作旱涝等级计算, 其频率百分比如表 4。对比发现: 两站记录的 9 月及秋季降水出现的旱涝频率分布基本一致。重建降水序列统计显示: 300 多年来, 该地区有 23 a 大涝, 79 a 偏涝, 60 a 正常, 111 a 偏旱, 28 a 大旱。其中大涝与偏涝年占 33.89%, 正常年占 19.93%, 大旱与偏旱年占 46.18%, 与实测资料统计的旱涝频率分布基本一致。所以, 天目山地区 9 月降水重建序列可以作为该地区秋季降水的代用资料, 重建序列较好地反映了该区秋季降水的变化特点。

根据天目山气象观测资料分析: 该区 9 月平均最高气温为 18.5℃, 高于秋季(9~11 月)平均

最高气温 13.9℃, 也高于 10 月(14℃)、11 月(9.2℃)平均最高气温。重建 9 月 300 多年的平均最高气温, 其累年平均最高气温为 18.6℃, 高于现代观测值 0.1℃。

表 4 杭州气象站与天目山气象站记录的 9 月及秋季降水量的旱涝等级频率百分比

Table 4 The percent of drought-waterlogging classes on precipitation in autumn and in September recorded by the weather station at Hangzhou and at Tianmu Mountain

站点		杭州站		天目山站	
时间		秋季	9 月	秋季	9 月
旱涝等级	1- 大涝	17.1	14.6	14.6	14.6
	2- 涝	14.6	19.5	14.6	12.2
	3- 正常	26.8	26.8	26.8	24.4
	4- 旱	34.2	29.3	41.6	41.6
	5- 大旱	7.3	9.8	2.4	7.3

图 7 为重建的 9 月降水量与平均最高气温 31 a 滑动平均对比图, 两个序列的负相关性对应明显。该区 300 多年的气候变化表现出冷-湿和暖-干的组合特征。其组合变化可大体分为 5 个阶段, 如表 5 所示。

300 多年来, 该树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列对小冰期内的第二次暖波动、第三次冷期及 20 世纪的暖期有较

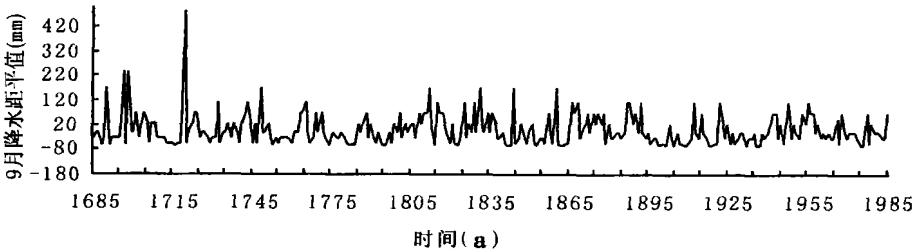


图 5 根据柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列重建天目山地区 9 月降水量

Fig. 5 The precipitation reconstructed in September by the $\delta^{13}\text{C}$ series of tree rings at Tianmu Mountain

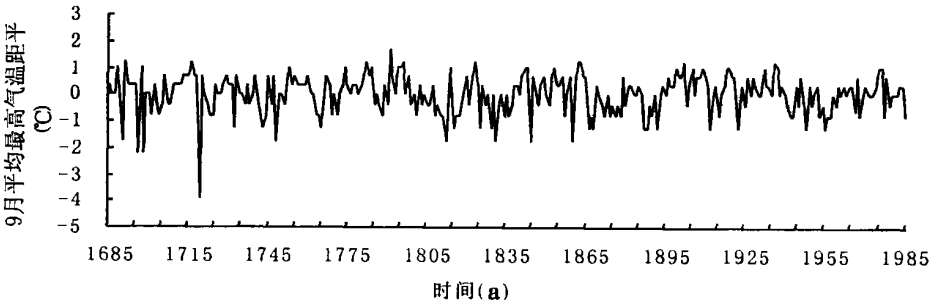


图 6 根据柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 比值序列重建天目山地区 9 月平均最高气温

Fig. 6 The highest air temperature reconstructed in September by the $\delta^{13}\text{C}$ series of tree rings at Tianmu Mountain

好的反映。1685~ 1799 年对应于小冰期内的第二次暖波动, 其间存在从 1710~ 1750 年的冷波动; 1800~ 1899 年与小冰期第三次冷期对应; 1900 年以后与 20 世纪暖期变化一致, 其间存在 1941~ 1970 年的短期冷波动。天目山柳杉树轮记录的气候变化与我国近 500 a 的气候变化有较好的对应^[40], 并与青藏高原苟鲁错湖泊沉积及新疆阿勒泰地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的气候变化有部分对应^[41, 42], 但所记录的冷、暖变化的起止时间有错动, 反映了气候变化的区域差异。

据史料记载^[40]: 1690 年、1790 年、1845 年、1871 年、1877 年冬季洞庭湖、淮河、汉水等结冰, 而重建序列中上述各年的 9 月均出现低温, 分别为 16.9℃、18.2℃、16.9℃、18.2℃、17.4℃, 分别低于平均最高气温 1.7℃、0.4℃、1.7℃、0.4℃、1.2℃。1949~ 1978 年发生在 7~ 9 月的

严重干旱有 1961 年、1967 年、1971 年和 1978 年, 重建序列中该 4 a 降水量均低于多年平均降水量 184.4 mm, 尤其是 1967 年和 1978 年, 重建降水量仅为 160 mm, 最高气温却达 19.3℃; 1955 年冬季, 洞庭湖、汉水、淮河结冰, 同年 9 月的最高气温仅为 17.4℃, 低于多年平均最高气温 1.2℃。可见, 重建序列反映的气候变化情况与实际气候变化有较好的一致性。

谱分析表明: 重建序列中含有 58.82 a、21.28 a、13.70 a、3.23 a、2.63 a、2.33 a 和 2.07 a 的准周期振荡。其中, 58.82 a 和 21.28 a 两种周期通过了 99% 的置信度 (图 8)。天文计算发现^[43]: 行星、地心会聚的“力矩效应”存在着相当稳定的准 60 a 周期变化, 这种变化可使地球冬夏公转半径与公转速度发生改变, 从而对千年和百年尺度的气候变化产生重要影响。58.82 a 的准周期振荡与

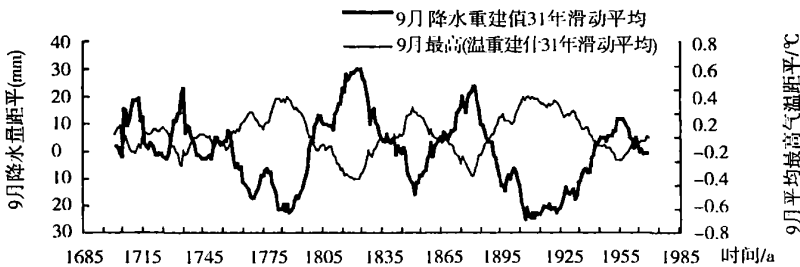


图 7 天目山地区 9 月降水量与平均最高气温重建序列比较

Fig. 7 Reconstructed series comparison of the average precipitation and the highest air temperature in September at Tianmu Mountain

表 5 重建天目山地区 9 月降水与平均最高气温的温湿组合及旱涝等级年数统计

Table 5 The warm-wet combination of the reconstructed average precipitation and the highest air temperature in September and the statistic of drought-waterlogging classes at Tianmu Mountain

时段	平均最高气温(℃)	平均降水量(mm)	大涝(a)	偏涝(a)	正常(a)	偏旱(a)	大旱(a)	备注
1685~ 1799 (高温少雨期)	18.7	210.1	7	26	23	50	10	有连续 11 a 与 5 a 的干旱
1800~ 1899 (低温多雨期)	18.4	222.7	12	32	17	26	8	
1900~ 1940 (高温少雨期)	18.9	187.8	2	4	9	22	8	
1941~ 1970 (低温多雨期)	18.4	224.7	2	14	5	9	0	
1971~ 1985 (高温少雨期)	18.7	200.0	0	3	6	4	2	
平均与合计	18.6	212.2	23	79	60	111	28	

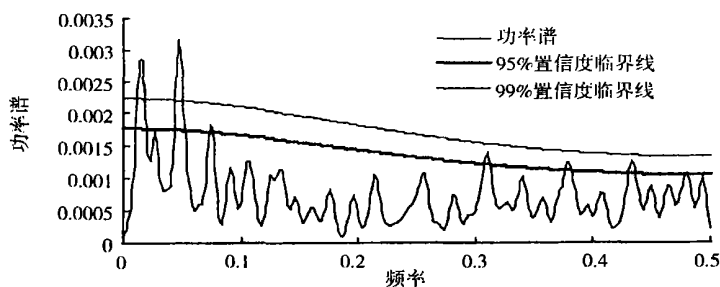


图 8 重建序列功率谱分析

Fig. 8 The spectrum analysis of reconstruction series

这种 60 a 周期变化相吻合。21.28 a 和 13.70 a 的准周期振荡分别接近于太阳辐射的 22 a 双黑子周期 (海尔周期) 和太阳黑子 11 a 活动周期。在树轮记录中发现与太阳活动的海尔周期和太阳黑子活动周期相应的 21.28 a 和 13.70 a 准周期, 表明太阳活动影响大气系统中热量的交换与分配, 进而对树轮同位素的分馏系统产生影响。所以, 树轮同位素的变化记录了太阳活动对气候变化的影响。3.23 a、2.63 a、2.33 a 和 2.07 a 的准周期振荡与 2~4 a 的厄尔尼诺周期吻合。表明天目山地区树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对大范围的 ENSO 事件具有较强的记录能力。

4 结论

天目山地区柳杉树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化有与全球其它地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化相一致的下降趋势, 其高频振荡对该区域气候要素变化的响应显著, 对冬季气温的响应尤其明显, 该区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 组成较好地记录了亚热带季风活动与冬季气温的变化。重建的天目山地区 9 月 300 多年的降水与平均最高气温, 较好地反演了该地区秋季降水与最高气温的变化历史。300 多年的气候冷暖变化反映了树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对我国小冰期的两次暖事件与一次冷事件的记录, 冷暖期出现的时间与我国近 500 a 气候变化及部分史料记载有较好的对应。周期分析表明: 天目山地区树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列很好地记录了太阳活动变化及大范围的 ENSO 事件对该区气候变化的影响。

致谢: 特别感谢中国科学院地理研究所邵雪梅研究员对树样定年所做的指导。

参考文献 (References):

[1] Damesin C S, Rambal S and Joffre R. Seasonal and annual changes in leaf $\delta^{13}\text{C}$ in woody co-occurring Mediterranean oaks: relations to leaf

growth and drought progression [J]. *Functional Ecology*. 1998, **12**: 778~785.

[2] Leavitt S W, Long A. Seasonal stable carbon isotope variability in tree rings: possible paleoenvironmental signals [J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience)*. 1991, **87**: 59~70.

[3] White J W C, Cials P. A high-resolution record of atmospheric CO_2 content from carbon isotopes in peat [J]. *Nature*. 1994, **367** (13): 153~156.

[4] Ramesh R, Bhattacharya S K and Gopalan K. Climatic correlations in the stable isotope records of silver fir (*Abies pindrow*) trees from Kashmir, India [J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 1986, **79**: 66~74.

[5] Damesin C S, Rambal S and Joffre R. Between tree variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Quercus ilex* among Mediterranean habitats with different water availability [J]. *Ecologia*. 1997, **111**: 26~35.

[6] Anderson W T, Bernasconi S W, Mekenzie J, et al. Oxygen and carbon isotopic record of climatic variability in tree ring cellulose (*Picea abies*): An example from central Switzerland (1935-1995) [J]. *Jour. Geophys. Res.* 1998, **103** (D24): 31625~31635.

[7] Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios and climatic change [J]. *Nature*. 1987, **295**: 28~31.

[8] McCarroll D, Pawellek F. Stable isotope ratios of latewood cellulose in *Pinus sylvestris* from northern Finland: variability and signal strength [J]. *Holocene*. 1998, **8**: 675~684.

[9] Lipp I, Trimborn P, Fritz P., et al. Stable isotopes in tree ring cellulose and climate change [J]. *Tellus*. 1991, **43** (B): 322~330.

[10] Burk R L, Stuiver M. Oxygen isotope ratios in trees reflect mean annual temperature and humidity [J]. *Science*. 1981, **211**: 1417~1419.

[11] Qian Junlong, Deng Ziwang, Tu Qipu. Climatic significance of δD time series in tree rings from Tianmu Mountain [J]. *Science in China (Series D)*. 2001, **31** (5): 372~376. [钱君龙, 吕军, 屠其璞. 天目山柳杉树轮 δD 年序列及其气候含义 [J]. 中国科学 (D 辑). 2001, **31** (5): 372~376].

[12] Chen Tuo, Qin Dahe, Kang Xingcheng, et al. Progress in tree-ring hydrogen and oxygen isotope research [J]. *Advance in earth sciences*. 1998, **13** (4): 382~386. [陈拓, 秦大河, 康兴成, 等. 树轮氢、氧同位素研究进展 [J]. 地球科学进展. 1998, **13**

- (4): 382~ 386.]
- [13] Francey R J, Farquhar G. D. An explanation of $13\text{C}/12\text{C}$ variations in tree rings [J]. Nature. 1982, **297** (5): 28~ 31.
- [14] Freyer H. D, Belacy B. $13\text{C}/12\text{C}$ records in northern hemispheric trees during the superposition past 500 year: a thropogenic impact and climatic [J]. J Geophy Res. 1983, **88**: 6844 ~ 6852.
- [15] Robertson I, Switsur V R, Carter A, et al. Signal strength and climate relationships in $13\text{C}/12\text{C}$ ratios of tree-ring cellulose from oak in east England [J]. J Geophy Res. 1997, **102**, **16** (19): 507~ 516.
- [16] Edwards T, Graf W, Trimborn P, et al. 13C response surface resolves humidity and temperature signals in trees [J]. Geochim Cosmochim Acta. 2000, **64**: 161~ 167.
- [17] Libby L. M., Pandolfi L. J. Temperature dependence of isotopic ratios in tree rings [J]. Proceedings of the national academy of science. 1974, **71**: 2482~ 2486.
- [18] Li Zenghua, Liu Rongmo, An Zhisheng, et al. Seasonal variation and its climatic significance of $\delta^{13}\text{C}$ time series in tree rings [J]. Chinese sciences Bulletin. 1995, **40** (22): 2064~ 2067. [李正华, 刘荣谟, 安芷生, 等. 树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 季节性变化及其气候意义 [J]. 科学通报. 1995, **40** (22): 2064~ 2067.]
- [19] Li Yu, Wu Xiangdong, Leavitt S W, et al. Stable carbon isotope in tree rings from Huangling, China and climatic variation [J]. Science in china (Series D). 1996, **26** (2): 125~ 130. [刘禹, 吴祥定, Leavitt S W, 等. 黄陵树木年轮稳定 C 同位素与气候变化 [J]. 中国科学 D 辑. 1996, **26** (2): 125~ 130.]
- [20] Ma Limin, Liu Yu, Zhao Jianfu. The relationship between environmental change and stable carbon isotopes records from tree ring in Mt. Helan [J]. Environmental Science. 2003, **24** (5): 49~ 53. [马利民, 刘禹, 赵建夫. 贺兰山油松年轮中稳定碳同位素含量和环境的关系 [J]. 环境科学. 2003, **24** (5): 49~ 53.]
- [21] Kang Xingcheng, Grumlich L J, Sheppard P. The last 1835 years climate changes inferred from tree ring records in Dulan region Qinghai, China [J]. Quaternary sciences. 1997, (1): 70~ 76. [康兴成, Grumlich L J, Sheppard P. 青海都兰地区 1835 年来的气候变化-来自树木年轮的资料 [J]. 第四纪研究. 1997, (1): 70~ 76.]
- [22] Liu Guangshen, Hong Yetang, Pu Hechun, et al. Stable carbon isotopic composition series of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and rainfall variation [J]. Acta Mineralogica sinica. 1997, **17** (1): 93~ 98. [刘广深, 洪业汤, 朴河春, 等. 树轮稳定碳同位素组成序列与降水变化 [J]. 矿物学报. 1997, **17** (1): 93~ 98.]
- [23] Yuan Yujang, Li Jiangfeng. Reconstruction and analysis of 450 years' winter temperature series in the Tianshan Mountain [J]. Journal of glaciology and geocryology. 1999, **21** (1): 64~ 70. [袁玉江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450 a 冬季气温序列的重建与分析 [J]. 冰川冻土. 1999, **21** (1): 64~ 70.]
- [24] Shen Changsi, Chen Jinmin, Zhang Zhihua, et al. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 200 years moisture index in Yishan, Shandong province [J]. Geographical Reseach. 1998, **17** (2): 150~ 156. [沈长泗, 陈金敏, 张志华, 等. 利用树木年轮资料重建山东沂山地区 200 多年来的湿润指数 [J]. 地理研究. 1998, **17** (2): 150~ 156.]
- [25] Sun Guchou, Lin Zhifang. $\delta^{13}\text{C}$ ratio in tree ring of subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest and CO_2 concentration in atmosphere [J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 1992, **3** (4): 291~ 295. [孙谷畴, 林植芳. 亚热带常绿阔叶林树木年轮的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 和空气 CO_2 浓度变化 [J]. 应用生态学报. 1992, **3** (4): 291~ 295.]
- [26] Sun Fan, Zhong Zhangcheng. Relationship between tree-ring growth of *Gordonia acuminata* and climatic factors in Mt. Jinyun [J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 1999, **10** (2): 151~ 154. [孙凡, 钟章成. 缙云山四川大头茶树木年轮生长动态与气候因子关系的研究 [J]. 应用生态学报. 1999, **10** (2): 151~ 154.]
- [27] Lin Zhifang, Lin Guizhu, Kong Guohui, et al. Effect of growth irradiance on stable carbon isotope ratio, intercellular CO_2 concentration and water use efficiency of two woody plant in subtropical natural forest [J]. Journal of tropical and subtropical Botany. 1995, **3** (2): 77~ 82. [林植芳, 林桂珠, 孔国辉, 等. 生长光强对亚热带自然林两种木本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 Ci 、 WUE 的影响 [J]. 热带亚热带植物学报. 1995, **3** (2): 77~ 82.]
- [28] Sun Yanrong, Cui Haiting, Mu Zhiguo, et al. The $\delta^{13}\text{C}$ sequence of cinnamomum camphora tree ring α -cellulose in Yang Chun County, Guangdong province and its relationship with the EL Nino Event [J]. Acta geoscientica Sinica. 2003, **24** (6): 05 ~ 510. [孙艳荣, 崔海亭, 穆治国, 等. 广东现代樟树树轮纤维素的碳同位素与厄尔尼诺事件的关系 [J]. 地球学报. 2003, **24** (6): 505~ 510.]
- [29] Qian J L, L J, Tu Q P, et al. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose [J]. Science in China (Series D). 2001, **45** (5): 409~ 419.
- [30] Tang Jinsong, Qian Junlong, Wang Guoxiang, et al. Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ of tree rings cellulose and climatic factors [J]. Journal of Nanjing Forestry University. 2001, **25** (2): 29~ 33. [唐劲松, 钱君龙, 王国祥, 等. 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素的分析与应用 [J]. 南京林业大学学报. 2001, **25** (2): 29~ 33.]
- [31] L Jun, Tu Qipu, Qian Junlong. Reconstruction of precipitation series in east China by $\delta^{13}\text{C}$ of tree rings [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology. 2001, **24** (3): 350~ 355. [吕军, 屠其璞, 钱君龙. 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对华东地区降水序列的重建 [J]. 南京气象学院学报. 2001, **24** (3): 350~ 355.]
- [32] L Jun, Tu Qipu, Qian Junlong, et al. Relative humidity series reconstructed by using stable isotopes in tree ring of Tianmu Mountain [J]. Scientia Meteorologica Sinica. 2002, **22** (1): 47 ~ 51. [吕军, 屠其璞, 钱君龙, 等. 利用树木年轮稳定同位素重建天目山地区相对湿度序列 [J]. 气象科学. 2002, **22** (1): 47 ~ 51.]
- [33] Tang Jinsong, Qian Junlong, Yin Zhuosi, et al. Recon-

- structing CO_2 concentration by the tree ring carbon isotopic ratios of west Tianmu Mountain [J]. Journal of Nanjing Forestry University. 2000. **24** (3): 45~ 48. [唐劲松, 钱君龙, 尹卓思, 等. 用树轮碳同位素年序列重建大气二氧化碳浓度 [J]. 南京林业大学学报. 2000. **24** (3): 45~ 48.]
- [34] Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for Mass-Spectrometric Analysis of CO_2 [J]. Geochim. Cosmochim. Acta. 1957, **12**: 133~ 149.
- [35] Farmer J G, Baxter, M S. Atmospheric carbon dioxide levels as indicated by the carbon isotope record in wood [J]. Nature. 1974, **247**: 273~ 274.
- [36] Diao Mingbi, Zhang Xia, Rao Liangchen. Theoretics statistics [M]. Beijing: China Technology Pubishing Company. 1998. 165~ 170. [刁明碧, 张霞, 饶良臣. 理论统计学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 165~ 170.]
- [37] Tu Qipu, Wang Junde, Ding Yuguo, et al. Applied probability statistics for meteorology [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1984. 148~ 183. [屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学 [M]. 北京: 气象出版社, 1984. 102~ 408.]
- [38] Administrative Bureau of Tianmu Mountain National Natural Protection District. The report of survey on the natural resources in Tianmu Mountain National Natural Protection District [R]. Hangzhou: Technology Publishing Company, 1990. 1~ 54. [天目山自然保护区管理局编. 天目山自然保护区自然资源综合考察报告 [R]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990. 1~ 54.]
- [39] Meteorology Science Research Center of China A chart on drought and waterlogging distribution in china in the last 500 years [M]. Beijing: Bijing Map Press, 1981. 1~ 333. [中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集 [M]. 北京: 地图出版社, 1980. 1~ 333.]
- [40] Zhaong Jiacheng, Zhu Mingdao, Zhang Xiangong, et al. The climate variation and its reason [M]. Beijing: Science Press, 1976. 60~ 83. [张家诚, 朱明道, 张先恭, 等. 气候变迁及其原因 [M]. 北京: 科学出版社, 1976. 60~ 83.]
- [41] Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weilan, et al. The little ice age climate fluctuations derived from lake sediments of Gou Lu Cuo, QingHai-Xizang plateau [J]. Quaternary sciences. 2004, **24** (5): 578~ 582. [李世杰, 王小天, 夏威岚, 等. 青藏高原鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化 [J]. 第四纪研究. 2004, **24** (5): 578~ 582.]
- [42] Chen Tuo, Qin Dahe, Liu Xiaohong, et al. Tree ring $\delta^{13}C$ records in the little ice age in Altay prefecture of Xinjiang Region [J]. Journal of glaciology and geocryology. 2002, **24** (1): 83~ 85. [陈拓, 秦大河, 刘晓宏, 等. 新疆阿勒泰地区小冰期特征的树轮 $\delta^{13}C$ 记录 [J]. 冰川冻土. 2002, **24** (1): 83~ 85.]
- [43] Fang Jingyun, Tang Yanhong, Lin Junda, et al. Global Ecology-Climate Change and Ecological Responses [M]. China Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, Hedelberg. 2000. 21. [方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学-气候变化与生态响应 [M]. 高等教育出版社, 施普林格出版社, 2000. 21.]

The Climate Change in Autumn Recorded in the $\delta^{13}C$ of Tree Rings in the Past 300 Years at Tianmu Mountain

ZHAO Xingyun^{1,2}, WANG Jian¹, QIAN Junlong³, JIANG Xiu Yong¹

(1. Geography College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, Jiangsu, China;

2. Geography and Tourism Department of Linyi Teachers' College, Linyi 276005, Shandong, China;

3. Lake Sediment and Environment Laboratory, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: Based on cross-dated tree ring age, the annual time series of $\delta^{13}C$ in the *Cryptomeria Fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr (CF) tree rings collecting from west Tianmu Mountain, Zhejiang Province, were measured. The response of the $\delta^{13}C$ series of CF tree rings to the change of climatic factors was analyzed after obviating the influence of the $\delta^{13}Ca$ variation in atmospheric CO_2 on the $\delta^{13}C$ time series of the tree rings by using the Falker's method. It is found that there is a high correlation between the high frequency oscillation of the time series of $\delta^{13}C$ in the CF tree rings and the climatic factors including the temperature in September, October, November and December and the precipitation in September. On the bases, this paper mainly reconstructed the historical changes of the average precipitation and the highest air temperature in September in the past 300 years at Tianmu Mountain area. The climate variability is characterized by the combination of cold-wet

and warm-dry. The statistic result shows that the frequency of drought-waterlog and the cold-warm variation reflected from the reconstructed series basically agrees with that recorded by weather station. This indicates that the reconstructed result better reflects the historical changes of climate in autumn at Tianmu Mountain area. The climatic variation reflected from the reconstruction also better corresponds to the climate change in the past 500 years in China and some history records and as well as the lake sediments of Goulucuo, Qinghai Xizang Plateau, and the tree ring $\delta^{13}\text{C}$ records in Altay County of Xinjiang Region but the exchange time from cold to warm has some moving which reflects the regional difference of the climate changes. The spectrum analysis shows that in the reconstructed series there is quasi periodicity of 58.82 a, which is coincident with the “moment effect” variation periodicity of the planets and earth coming together as well as there are quasi periodicity of 21.28years, 13.70years, 3.23years, 2.63years, 2.33years and 2.07years, which coincide with the solar radiation variation and solar activity and “quasi two-year tropic barometric oscillation” (QBO). This reflects not only the influence of the change of the solar radiation and ENSO phenomenon on the climatic changes, but also the record ability of the time series of $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings on the solar radiation change and large-scale ENSO events at Tianmu Mountain area.

Key words: tree-ring; $\delta^{13}\text{C}$; Tianmu Mountain; climatic variation

第五届海峡两岸山地灾害和环境保育学术研讨会与 第六届全国泥石流学术会议即将召开

由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、中国水土保持学会主办的“第五届海峡两岸山地灾害和环境保育学术研讨会”和由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、昆明市东川区人民政府、中国水土保持学会等主办的“第六届全国泥石流学术会议”，将于 2006 年 7 月 26 日~ 8 月 3 日同时在云南东川召开。会议论文征集工作已经开始，论文摘要截止时间：2005 年 12 月 31 日，全文截止时间 2006 年 3 月 31 日。会议秘书处联系方式：

联系人：马雅阁，张 继

联系电话：028—85248995, 13219060602

E-mail: sec@imde.ac.cn

网址: <http://nsl.imde.ac.cn>