

用树轮 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 重建天目山地区 近 160 年气候*

钱君龙^① 吕 军^② 屠其璞^② 王苏民^①

(^①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, 南京 210008; ^②南京气象学院, 南京 210044)

摘要 对采自天目山的柳杉树轮进行交叉定年后,测得树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列. 经谱分析,树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化有与厄尔尼诺事件基本一致的准 4.4 年的周期. 将 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列去除大气 CO_2 的影响,利用其附近气象站资料,分析 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应. 结果表明:天目山地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高频振荡与季节的气温、降水等要素有显著相关,并有滞后效应,此外还与东亚季风的强弱变化有一定关系. 通过建立回归方程重建浙江北部地区的气候序列,分析了这一地区一百多年来的气候变化状况及演化趋势.

关键词 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 气候重建 东亚季风

全球气候变化是当前地球科学研究的前沿,而利用湖芯、冰芯、树木年轮、珊瑚等方法的古气候研究是它的重要组成部分. 其中树木年轮可以提供分辨率达到年甚至季节的记录,在古气候研究中具有不可替代的地位. 树轮同位素研究,以其精确度更高,连续性强及年轮对环境波动的敏感性强等优势,已成为树木年轮学中重要分支,并在国际上已取得重要进展^[1-7]. 树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应是一个复杂的过程^[8],气候影响光合作用、呼吸作用等树木生理过程,从而影响树液的生成和流动及其伴随碳同位素的分馏,而且不同地区,不同树种的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应也不同^[1]. 因此前人的研究主要局限于一些限制性因子强的地区(如干旱、寒冷地区等),因为在这些地区,树木生长主要受诸如降水,夏季气温等单一的或某一季节的气候要素影响. 而在亚热带,热带等温湿地区,生长的条件几乎四季都能满足,树木全年都在生长^[1]. 由于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 受气候的影响较为复杂,主要表现为影响时间长、影响要素多等特点,相关的研究也较薄弱. 为此,本研究致力于寻找温湿地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候响应的规律,并为分析湿润地区的过去及未来气候变化提供有效的途径.

本文选择的浙江西天目山(30° 20' N, 119° 25' E) 位于国家自然保护区,人为影响小,是利用树轮分析气候和环境变化的一个理想地区. 同时天目山属北亚热带湿润气候,其树木生长期长,生命力旺盛,因此年轮的生长不仅决定于各季节的气候要素,而且会受前期气候要素的影响,即滞后效应.

1 材料与方 法

本文研究选择了中国东部西天目山林区柳杉树种(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenkex Otto

2000-04-19 收稿, 2000-09-20 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49771001)

et Dietr (CF)). CF-1 树盘采自西天目山狮子口地区(30° 20'N, 119° 26'E, 海拔 1020m), CF-3 树盘采自西天目山老殿地区 (30° 20'N, 119° 26'E, 海拔 1090 m). 样本收集方法按国际树轮数据库标准进行. 通过交叉定年技术, 确定 CF-1 的树龄为 176 a (1822~1997 年), CF-3 的树龄为 151 a (1833~1983 年).

树稳定碳同位素分析流程为: 覆盖整个年轮均匀地分别逐年雕刻采集木质样 2 g 左右. 而后, 样品在 70~80°C 干燥 3 昼夜, 磨至 30~60 目; 通过苯醇混合溶剂抽提, 去除全部类脂物质^[9], 再通过氯化作用^[10]和碱洗过程^[11], 提取出 α -纤维素. 气体提取和质谱分析在南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室完成: 提取出的 α -纤维素与 CuO, Pt 丝在真空下密封于小石英管中高温燃烧, 产生供质谱分析的 CO₂ 气体. 最后, 将收集到的 CO₂ 在 MAT-252 质谱仪上测得树轮的 ¹³C/¹²C 同位素比值, 并通过换算以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 表示 (简称为 $\delta^{13}\text{C}$), 单位为‰, 分析误差 < 0.2‰.

2 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列及周期变化

CF-1 和 CF-3 两株柳杉逐年 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析结果见图 1. 从图中可以看出, 两者具有基本一致的高频和低频变化 (图 1), 其相关系数为 $r = 0.65$ (通过了信度为 $\alpha = 0.001$ 的检验), 说明两棵树记录了基本相同的环境信息. 本文主要分析 CF-1 年序列. 自工业革命以来, 大气 CO₂ 浓度持续升高, 造成全球树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的下降趋势^[13, 12](幼年和边材效应除外). 本文中结果符合这一变化趋势, 从图 1 可知, 除了 80~90 年代有上升趋势外, 近 100 a 来, 天目山树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 也呈明显下降趋势. 因此, 为了真实地反映树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 所记录的气候要素变化, 须去除上述大气中 CO₂ 浓度增加对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响. 在此, 我们用多项式拟合法来去除低频变化, 拟合方程为

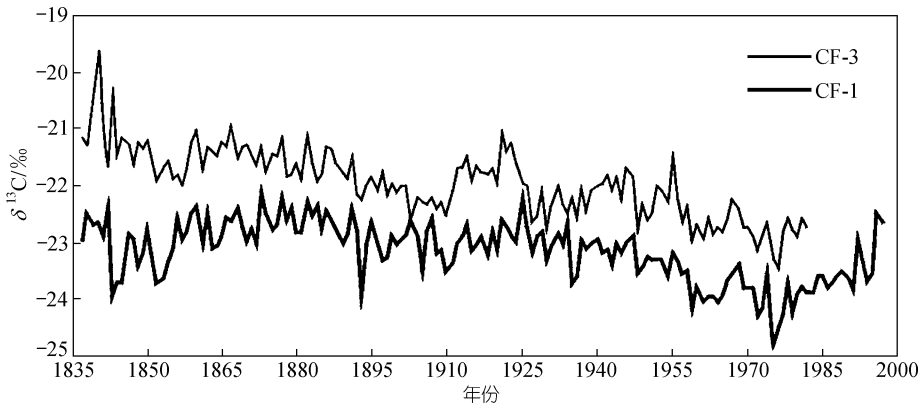


图 1 天目山树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列

$$Y = -23.086 + 6.322 \times 10^{-3}X - 2.817 \times 10^{-5}X^2, \quad (1)$$

式中 Y 为 $\delta^{13}\text{C}$, X 代表年份, 为计算方便, 简化为 -81 至 81 共 163 a. 由树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列减去 (1) 式拟合序列, 可以得到 $\delta^{13}\text{C}$ 高频变化部分, 本文中称之为序列 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ (简称 Δ), 如图 2 所示. 同时, 运用冰芯中 $\delta^{13}\text{C}$ 测量^[13] 和直接的大气 $\delta^{13}\text{C}$ 监测^[12, 14] 计算出树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的残差值^[15], 两者比较, 相关达 -0.945. 从而表明, 用多项式拟合法去除的低频变化基本上包含了大气 CO₂ 的影响. 因此 Δ 序列保留了由气候变化引起的所有 $\delta^{13}\text{C}$ 高频信息.

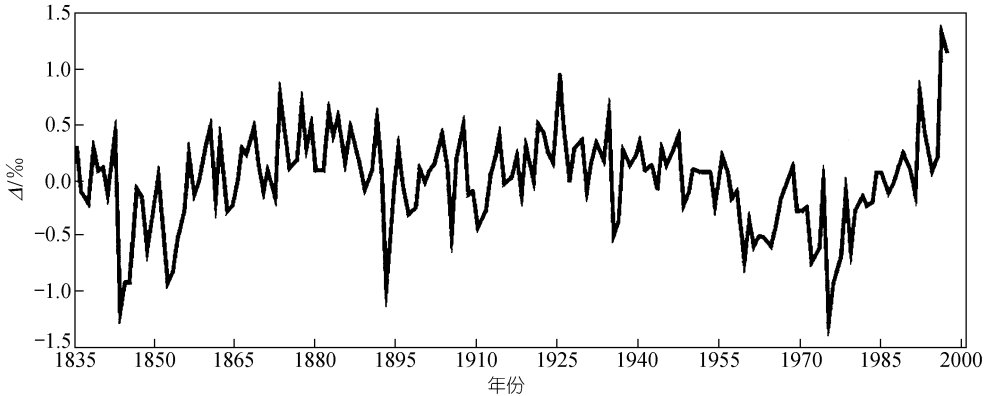


图 2 去除大气 CO₂ 影响后的 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 序列

将上述树轮 Δ 序列作功率谱分析^[16], 结果如图 3, 其中横坐标为周期, 纵坐标 $S^2(k)$ 为将 Δ 序列分解的各谐波的方差, 其中较大的且经过检验的周期即为显著周期. 经 F 检验, 发现 Δ 序列有显著的准 40.7 a, 准 23.3 a, 准 13.5 a, 准 4.4 a 周期. 其中准 4.4 a 周期可能与影响全球气候异常变化的厄尔尼诺事件的周期有关^[17]. 近几百年来, 平均 4.4 a 就有一次厄尔尼诺事件发生, 在本世纪, 厄尔尼诺发生频率有增加趋势, 但仍保持准 4.2 a 的周期. 我国是受其影响的重要地区, 厄尔尼诺事件的周期性发生, 必然导致沿海地区气候异常的周期性变化. 树轮记录的准 4.4 a 周期的 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 序列变化很可能就是厄尔尼诺事件引起的气候变化对树木生长环境影响的反映. 其余周期的成因可能与太阳黑子等活动有关, 有待进一步研究.

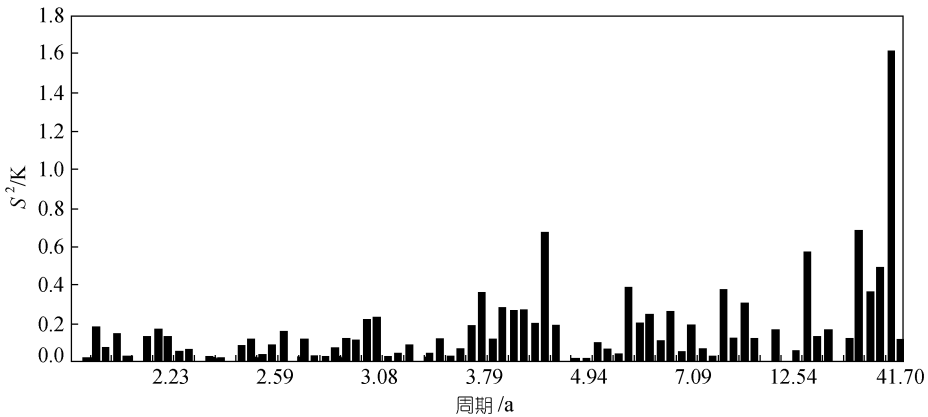


图 3 Δ 序列周期谱分析

3 与气候要素的相关分析

相应地, 在选择气象台站资料时, 必须考虑气候的一致性, 即要求气象站点和采样点同属一气候区, 且气候记录足够长. 在此, 我们选择了采样点附近的天目山气象站, 此外选择距采样点约 80 km 的杭州市气象站作为参考站, 其中天目山站有连续的 1956 ~ 1996 年共 41 a 资料, 杭州站有连续的 1951~1996 年共 46 a 资料, 符合本文研究需要. 两站同处浙江省北部, 该区域为我国较湿润地区, 其气候具有中亚热带向北亚热带过渡的特征. 主要特征为: 季风强劲, 水

热同季,湿润多雨;冬冷夏热,四季分明^[18].因而气温和降水是影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的很重要的气候因子.

在我国东南沿海的山区,一年中雨季时间很长,雨量变化表现为双峰型,3~5 月为春雨,6~7 月为梅雨,是一年的雨季高峰期,9 月的秋雨为第二雨季^[18].因此降水对天目山树木的生长及同位素组成变化易产生较强的影响.表 1 列出了树轮 Δ 序列与天目山和杭州当年及前一年各月降水总量及平均最高气温之间的相关系数值^[16].由表 1 可见,两站降水与 Δ 的相关性基本一致,总的来看,天目山及杭州地区降水对树木年轮的影响时间跨度很长,主要表现为年轮生长旺盛期的夏季(主要为 6~7 月)降水及生长期刚开始的春季(主要为 3 月)降水与 Δ 序列呈较大的正相关;而秋季(即 9~11 月)降水与 Δ 呈负相关.此外,还计算了若干相邻月份降水总和与 Δ 的相关性,结果发现其中 6~7 月总和及 9~11 月总和与 Δ 的相关系数值都大于各单个月份与 Δ 的相关(表 1).

表 1 树轮 Δ $\delta^{13}\text{C}$ 与天目山、杭州地区降水 R 及最高温度 T_M 的相关系数^{a)}

月	杭州 R		天目山 R		杭州 T_M		天目山 T_M	
	当年	滞后	当年	滞后	当年	滞后	当年	滞后
1	0.25	0.33	<u>0.37</u>	0.47	-0.02	0.02	0.08	0.06
2	-0.25	-0.07	-0.26	-0.17	0.04	0.06	-0.17	-0.07
3	0.50	0.38	0.51	0.43	-0.20	-0.07	-0.18	-0.06
4	-0.25	0.20	-0.27	0.08	0.04	-0.24	-0.15	-0.34
5	-0.09	0.08	-0.09	-0.03	0.27	0.15	0.05	0.04
6	0.19	0.34	0.28	0.51	0.31	0.03	0.01	-0.26
7	<u>0.45</u>	0.36	0.35	<u>0.39</u>	-0.10	-0.11	-0.15	-0.15
8	0.04	-0.01	0.02	-0.28	-0.04	0.10	-0.16	-0.05
9	-0.27	-0.20	-0.25	-0.11	0.10	0.18	-0.15	-0.16
10	-0.20	-0.19	-0.25	-0.21	0.01	0.35	-0.20	0.14
11	-0.01	-0.18	-0.15	-0.28	0.22	0.25	0.35	0.24
12	-0.17	-0.30	-0.13	-0.28	0.25	0.16	0.28	0.11
6~7	<u>0.41</u>	0.47	<u>0.40</u>	0.59				
9~11	-0.29	-0.34	<u>0.37</u>	-0.30				
11~12					0.33	0.29	<u>0.42</u>	0.24

a) 数据下划线表示通过信度为 0.01 的检验 ($r > 0.37$), 其中粗黑体表示通过了信度为 0.001 的检验 ($r > 0.46$); 滞后表示 Δ 与前一年气候要素的相关系数

通过分析两站气温资料发现,温度对 Δ 的影响不如降水明显(表 1). 其中 Δ 序列与两站的各月平均最高气温的相关要好于与月平均气温和月平均最低气温的相关(Δ 与月平均气温和月平均最低气温的相关系数普遍较小,都未通过信度检验,表 1 中略). 可见天目山柳杉树轮生长对月平均最高气温的响应比较大.此外,在 Δ 序列与若干相邻月份的平均最高气温中与 11~12 月的相关明显优于与其它各月的相关,对 CF-1 的氢同位素组成 δD 年序列与气温相关分析中,也同样发现 δD 与冬季温度相关(已另写论文),国外也有类似的报道^[19, 20].这或许就是温湿地区的特色.“在热带,一年间的气候变化很少,树木生长四季几乎无间断”^[21]“一些树种如柳属,发芽早而落叶晚,生长活动超出生长季之外,常绿树种,特别是针叶树在霜期内温度较高的日子里,仍有不同程度的生长现象”^[1],只要有生长,有树液的流动,就有同位素的分馏,就会影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值.本研究发现,在这种温湿地区,因为在冬季树轮仍有同位素分馏,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 就能纪录冬季气温的影响,这与寒冷地区以年轮宽度作气候代用资料的情况不

同. 北方冬季气候寒冷, 树木冬眠后, 年轮宽度不再增加, 就无法记录冬季气温. 这正是树轮同位素的优势所在.

综上所述, 在天目山这种温湿地区, 气温和降水在树木生长期的不同时段对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响程度各有抑扬. 主要表现为: 在每个生长期的刚开始阶段 (即 3 月), 树木生长需要充足的水份, 降水的影响较大; 之后在生长期的旺盛期 (即盛夏 6~8 月) 因温度很高且变化不大, 所以降水的影响占主要部分; 在秋季 (9~10 月), 两者的影响共同存在; 而在冬季 (11 月~次年 1 月), 降水因为较少而影响小, 则气温的影响比较突出.

已有很多树木年轮气候学家认为, 某一年的年轮生长情况不仅与该年的气候状况有关, 而且受到树木前期的生长情况影响, 即与前期的气候状况有关^[22]. 天目山属亚热带湿润气候, 其树木生长期长, 且生长旺盛, 所以物质输送能力强, 具有较强的营养储存能力. 因此, CF-1 中某一年的年轮生长极可能不仅受当年气候状况的影响, 而且受到前几年气候要素的间接影响. 经计算得 Δ 序列的各阶自相关系数为 $r_1 = 0.49$, $r_2 = 0.31$, $r_3 = 0.34$, 其中一阶自相关值达到了信度 $\alpha = 0.001$ 的统计显著标准, r_2 和 r_3 也达到了信度 $\alpha = 0.01$ 的统计显著标准, 表明树轮中 Δ 序列有较强的滞后效应, 也就是说 Δ 与前几年的生长情况有关, 而且主要与前一年的生长情况有关, 因而当年的 Δ 值与前一年的气候因素影响有关. 表 1 同时给出 Δ 与前一年气候要素的相关系数 (Δ 与前两年的相关系数普遍较小, 在此略), 它们的基本特征与当年气候要素的相关是一致的. 其中 6~8 月, 11~1 月份滞后一年的相关系数值甚至比当年的还大, 这表明在这些月份, 即在夏季和冬季, 树木生长的适应能力强, 存储能力也强, 因此树轮生长滞后效应强, 使得当年的水分及气温影响能反映在下年的生长中; 而在春季和秋季这两个过渡性季节中, 树轮 Δ 的变化仅对当年的气候变化有反映, 滞后效应相对较弱. 根据上述情况, 我们对 3 月, 6~7 月, 9~11 月降水总和, 11~12 月平均最高气温序列做 5 a 滑动平均, 然后再分别与 Δ 的 5 a 滑动平均序列求相关, 发现相应的相关系数都大有提高, 分别为 0.83, 0.50, -0.60, 0.70. 这进一步说明天目山地区树轮稳定碳同位素变化对气候变化有着很强的滞后性. 其中仅 6~7 月降水的相关系数 0.5 比滞后一年的相关系数 0.59 小, 这说明 6~7 月降水的影响主要集中在第二年上.

综合上述特征, 我们可以采用多元回归方法, 得到树轮碳同位素序列与当年的各气候要素及前一年 Δ 值的回归方程:

$$C = -1.20 + 3.99 \times 10^{-1} C_{-1} + 2.64 \times 10^{-4} R_3 + 5.86 \times 10^{-5} R_{6,7} - 6.89 \times 10^{-5} R_{9,10,11} + 5.21 \times 10^{-3} T_{M11,12}, \quad (2)$$

其中 C_{-1} 为前一年 Δ 值, 其余下标为月份, 上式的复相关系数为 $r = 0.81$, 通过了信度为 0.001 的检验, 进一步说明气候要素与树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 之间密切的联系. 值得注意的是 (2) 式中的常数项比气候因子项系数大得多, 在数量级上是 1 和 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 之比. 这使得 (2) 式是可以退化为单变量线性回归, 即可由 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 反求当年的气候因子. 常数项大, 是由全年气候几乎都满足生长条件所致, 各项的系数相对较小, 反映气候因子不是起主导作用, 而起复合的调节作用, 这从另一角度说明 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 可以和 $T_{M11,12}$ 相关.

我国气候受季风影响明显, 尤其是东亚季风的影响^[23]. 天目山所在的长江下游地区, 6, 7 月梅雨期来临的早晚, 与夏季风的强弱有很大关系. 在近几年中, 50 年代初及 90 年代以来, 夏季风多为正常或者偏弱, 雨带维持在长江中下游地区, 使得天目山地区降水量大, 而这段时期的 Δ 值也多为高峰值; 而在 60~70 年代, 夏季风较强的年份较多, 6, 7 月期间, 雨带已移至北

方,天目山地区降水较少,易干旱,而此时期 Δ 值也多为偏低值.冬季风在我国东部可以长驱南下,对气温影响很大,是控制植物越冬或生长的主导因素,形成了与(以降水为主导的)夏季风敏感带相对应的冬季风气候敏感带,这也是我国东部季风气候区的区域特色.我们发现,近50 a来, Δ 序列与冬季风强度指数^[23]相关达 -0.37 (通过信度 $\alpha=0.01$ 的检验),所以可知冬季风的变化对 Δ 序列有着直接的影响,即冬季风强的年份,气温低, Δ 值也低,反之亦然.因此, Δ 序列较好地记录了冬季风强弱变化的情况,我们可以利用碳同位素序列来分析过去天目山地区冬季风的变化情况.

4 气候要素重建及变化分析

根据上述气候要素与 Δ 的相关性,我们可以利用 Δ 序列建立天目山地区春季(3月)、夏季(6~7月)和秋季(9~11月)降水总和及冬季(11~12月)平均最高温度与 Δ 之间的关系式,并以此重建天目山过去160多年来的气候资料.

因为气候因子 Y 对 Δ 的影响有较强的滞后性, t 年的 Y 不仅影响当年 Δ_t (即 X_1),也影响滞后一年的 Δ_{t+1} (即 X_2),于是有方程组 $X_1 = \alpha Y + \beta Y_{t-1} + \gamma$; $X_2 = \alpha Y_{t+1} + \beta Y + \gamma$;…….考虑方程组的解,即反函数应为多元函数 $Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots)$,但邻近年份的 X_1 和 X_2 应对 Y 起主要作用.因此在设计回归方程时,作简化的线性近似,引入了当年及滞后一年的 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 两个变量,即 X_1, X_2 ,方程如下:

$$Y = aX_1 + bX_2, \quad (3)$$

(3)式中 Y 为相应气候要素,结果见图4(其中3月降水图略).图4反映的是恢复的历史气候资料以及重建值与实测值的对比.其中重建值与实测值的相关分别为0.59, 0.38, 0.42,由于(3)式略去了其他年份的 Δ 对 Y 的影响,故需进行滑动平均来提高准确度,此外经计算得重建值的7 a滑动平均序列与实测值的7 a滑动平均序列相关分别为0.63, 0.70, 0.73,相关系数都大有提高,说明受滞后效应的影响,用树轮 Δ 值重建的气候序列反映气候的年代际变化较之用它们反映气候年际变化,效果更好,这是天目山这种温湿地区树木生长的一个主要特点.

图4(a)为重建的天目山6~7月降水资料.天目山地区夏半年降水主要集中在6,7月间,因此可以把重建的6~7月降水资料作为整个夏季的代用资料,根据文献[24]的旱涝等级的分级标准,可计算出天目山地区各年的旱涝等级,即降水量大于528.38 mm的年份为偏涝年;降水量小于473.62 mm的年份为偏旱年;其余为降水正常年.将重建结果与文献[24, 25]中杭州地区1835~1997年的偏涝年数和偏旱年数比较,如表2,其中完全重合年份超过60%.此外史载天目山地区的一些大旱大涝年^[26],如1849, 1876, 1882, 1922, 1931, 1954, 1991等大涝年及1850, 1892, 1909, 1934, 1953, 1961, 1962, 1971, 1974, 1978, 1981等大旱年在图中都有很好反应,因此可看出,历史上的旱涝年份基本上在图4(a)中被重建出来,因此重建效果是满意的.

表2 夏季降水重建资料与历史资料的旱涝年份对比

文献[24, 25]	记录年数	重建资料年数	重合年数	重合准确率
偏涝年数	57	63	35	62%
偏旱年数	49	49	29	60%

根据文献[27],近百年来华东地区降水在50年代初达一高峰期,50年代末至60年代开始减少,60年代末后波动中略有上升,70年代中后期达最低值,80年代后开始上升.此特征在图4

(a)中有明显反映,这说明天目山代表浙北地区体现了华东地区近百年的降水变化趋势.总的来看,天目山地区 19 世纪 70 年代至 90 年代为夏季降水高峰期,本世纪 20 年代是另一高峰期,这两个时期水涝灾害发生的较多;19 世纪 40~50 年代、90 年代至本世纪初及本世纪 50~70 年代为降水低值期,易发生旱灾.此外,本世纪 80 年代后夏季降水量显著增加,达近百年来的最高值,这也是江淮流域在 80 年代后多次发生洪涝灾害的因素之一.据文献[25],自 1980 年后杭州地区仅有 1981 和 1985 年偏旱,所以可以认为浙北地区夏季现在正处在降水高峰期.图 4

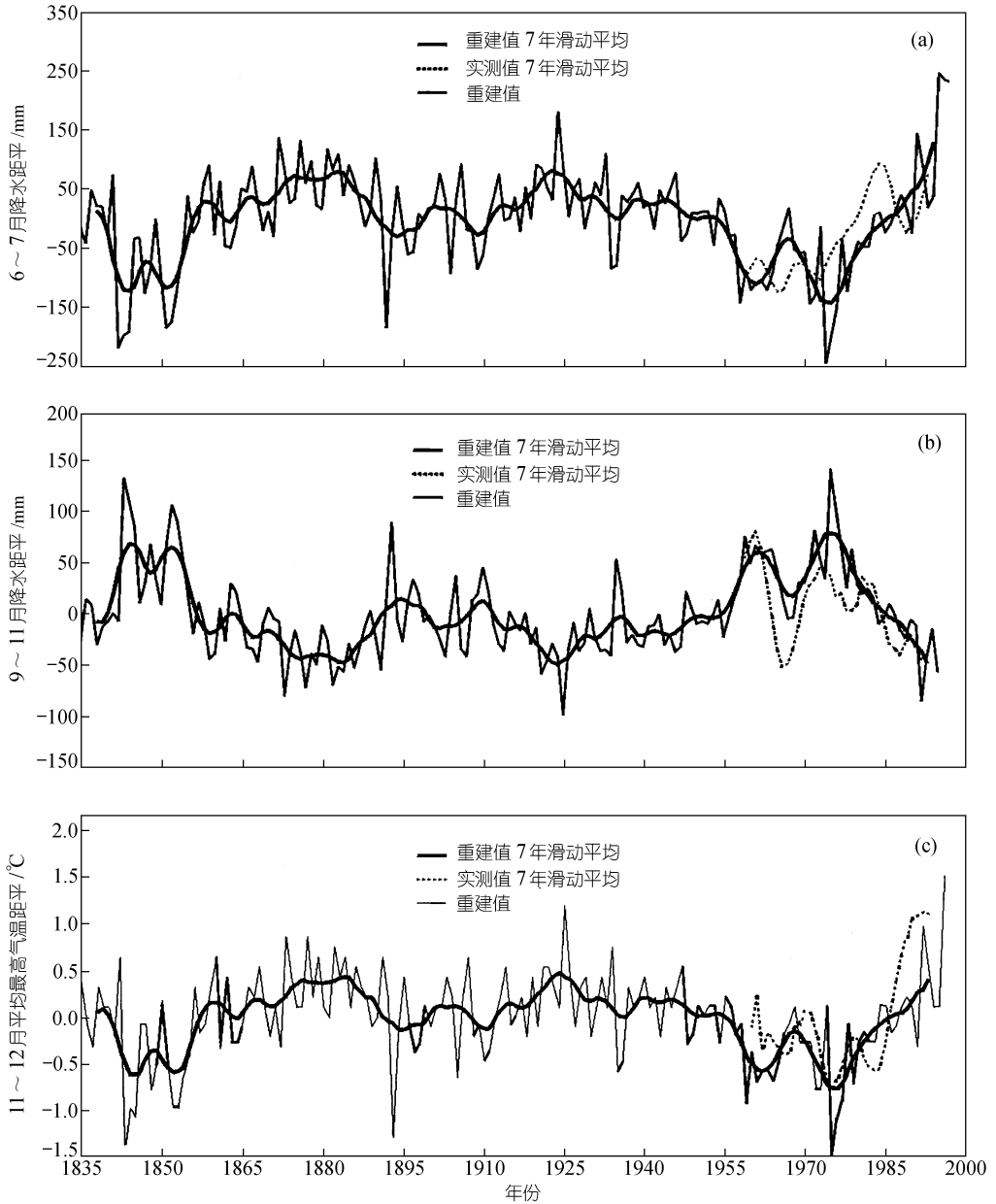


图 4 根据树轮的 $\Delta \delta^{13}\text{C}$ 重建天目山气候要素序列
(a) 6~7 月降水; (b) 9~11 月降水; (c) 11~12 月平均最高气温

(b)为天目山 9~11 月降水重建值与实际值的对比,由图可知天目山地区的秋季降水均值远小于夏季的降水均值,近十几年来有明显下降趋势,因此可知浙北地区秋季趋于干旱。

图 4(c)为天目山 11,12 月平均最高气温的对比图.可以明显看出,上世纪中期及末期最高气温值较低,本世纪 10~20 年代是一相对高温期,最明显的变化是近 50 a 来起伏较大,主要表现为 60 年代较高,70 年代最低,80 年代后开始上升,这也说明近年来气候变暖,主要表现为冬季变暖.参考文献[28]说明浙北地区的变化与华东地区整体变化基本一致。

5 结论

天目山柳杉树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 有着与全球其他地区一致的下降趋势(可能由于边材等原因,80~90 年代并非如此),去除大气 CO_2 趋势后的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 高频变化与天目山及杭州地区的春,夏季降水呈正相关;与秋季降水呈负相关,并与冬季的最高气温呈正相关,而且存在着较强的滞后效应.此外 Δ 还记录了东亚季风的变化情况,尤其能较好地反映冬季风强弱变化.利用多元回归方程重建了两站各季的降水和最高气温资料,结果较好.通过重建的过去 100 多年的气候资料,分析出近 160 多年来浙江北部地区的几个主要的夏季降水高峰期和低值期.同时通过总结近十几年来夏季降水增加较大,秋季冬季逐渐变暖,预测夏季正进入降水高峰期,而秋季正进入高温少雨期.此外,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列有着准 4.4 a 的周期,这与厄尔尼诺事件的发生周期基本一致,说明厄尔尼诺的发生所引起的气候变化,在树轮同位素中有较好的记录。

致谢 树样定年在中国科学院地理研究所邵雪梅研究员指导下进行,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 吴祥定.树木年轮与气候变化.北京:气象出版社,1990.1~369
- 2 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 Geophys Res*, 1997, 102, D16(19): 507~516
- 3 Freyer H D, Belacy N. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ records in northern hemispheric trees during the superposition past 500 years: a thropogenic impact and climatic. *J Geophys Res*, 1983, 88: 6844~6852
- 4 Lipp I, Trimborn P, Fritz P, et al. Stable isotopes in tree ring cellulose and climate change. *Tellus*, 1991, 43(B): 322~330
- 5 McCarroll D, Pawellek F. Stable carbon isotope ratios of latewood cellulose in *Pinus sylvestris* from northern Finland: variability and signal-strength. *Holocene*, 1998, 8: 675~684
- 6 Biondi F, Fessenden J E. Response of lodgepole pine growth to CO_2 degassing at Mammoth Mountain, California. *Ecology* 1999, 80: 2420~2426
- 7 Edwards T, Graf W, Trimborn P, et al. ^{13}C response surface resolves humidity and temperature signals in trees. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 161~167
- 8 于 强, 王天铎. 光合作用-蒸腾作用-气孔导度的耦合模型及 C_3 植物叶片对环境因子的生理响应. *植物学报*, 1998, 40(8): 740~754
- 9 轻工业部造纸研究所. GB2677.7-81 造纸原料苯醇抽出物含量的测定. 北京: 中国标准出版社, 1981. 244
- 10 轻工业部造纸研究所. GB2677.10-81 造纸原料综纤维素含量的测定. 北京: 中国标准出版社, 1981. 250~251
- 11 轻工业部造纸研究所. GB744-79 化学纸浆甲种纤维素的测定. 北京: 中国标准出版社, 1979. 114~115
- 12 Keeling C D, Mook W M and Tans P. Recent trends in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of atmospheric dioxide. *Nature*, 1979, 277: 121~123
- 13 Friedli H, Lotscher H, Oeschger H, et al. Ice-core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, 1986, 324: 237~238
- 14 Leavitt S W, Long A. The atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ record as derived from 56 pinyon trees at 14 sites in the southwestern tree rings.

Water Resources Bulletin, 1989, 25: 341~34

- 15 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. 中国科学, D 辑, 1996, 26(2): 125~130
- 16 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984. 102~408
- 17 陈菊英. 厄尔尼诺事件的历史气候特征及其对天体物理周期的响应. 见: 气候变化规律研究论文(三). 北京: 气象出版社, 1996. 46~47
- 18 天目山自然保护区管理局. 天目山自然资源综合考察报告. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990. 39~54
- 19 Libby L M, Pandolfi L J. Temperature dependence of isotopic ratios in tree ring. Proceedings of the National Academy of Science, 1974, 71: 2482~2486
- 20 Leavitt S W, A Long. An atmospheric $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ reconstruction generated through removal of climate effects from tree ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ measurements. Tellus, 1983, 35B: 92~102
- 21 北京林学院主编. 木材学. 北京: 中国林业出版社, 1987. 13
- 22 Xiahong Feng and Samurl Epstein. Carbon isotopes of trees from arid environments and implications for reconstructing atmospheric CO_2 concentration. Geochimica Cosmochim Acta, 1995, 59(12): 2599~2608
- 23 施能. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系. 应用气象学报, 1996, 7: 175~182
- 24 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 北京地图出版社, 1981. 1~333
- 25 刘传志, 张德二. 中国近五百年旱涝分布图集续. 见: 气候变化研究论文(一). 北京: 气象出版社, 1996. 75~81
- 26 中国气象局研究所编. 华东地区近五百年气候历史资料. 北京: 中央气象局出版社, 1978. 1~4, 36
- 27 王伯民. 我国降水标准序列的趋势变化分析. 见: 气候变化研究论文(一). 北京: 气象出版社, 1996. 200~206
- 28 陈隆勋. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 3: 257~271