

天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化及成因探讨

王 建¹, 赵兴云^{1,2}, 钱君龙³

(1. 南京师范大学地理科学学院, 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, 南京 210008)

摘要: 对天目山两株柳杉 (分别简称 CF-1 与 CF-3), 分别测定了不同方位上的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列。方差分析表明: 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著的方位差异和年际变化。不同方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 序列年际变化趋势基本一致, 但极值出现的方位存在明显的年际漂移。同一树体各方位之间及两树体对应方位之间 $\delta^{13}\text{C}$ 值均存在较好的相关性, 表明区域环境背景条件对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化及年际变化趋势的影响是共同的。重点分析了局部环境差异对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的影响。不同坡向及树冠不同方位光照条件的差异是造成树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的主要原因。

关键词: 天目山; 树轮; $\delta^{13}\text{C}$; 方位分布; 成因探讨

文章编号: 1000-0585(2006)02-0242-13

20 世纪 70 年代以来, 国外已有部分关于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 随方位变化的研究^[1~8]。这些研究发现: 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 在不同方位存在较明显的差异, 最大差值可达 1‰~4‰, 但多数研究分析的方位数只有 2~5 个, 时间分辨率多低于 5 年, 且样本数也较少。如 Tans 等^[1]的分析虽达到了年分辨率, 但分析方位只有 2 个; Leavitt 等^[4]分析的方位数虽达到 8 个, 但以 5 年木块为一个样本进行分析, 因而时间分辨率较低; 而 Nguyen-Queyrens 等^[6]只分析了某一年的方位变化等。从方位变化的原因分析看, 个别研究仅作过较为简单的阐述。如 Francey 等^[3]认为: 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 存在方位差异的原因可能是树木不同方位接收到的太阳辐射不同造成的; Panek 等^[8]认为 $\delta^{13}\text{C}$ 方位差异与树冠的形态及树枝长度有关, 而 Schleser 等^[7]则认为是由根系的不同形态及其不同方位的水肥供应不同引起的。国内有关树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的研究很少。陈宝君等^[9,10]对天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的方位变化及其气候意义作过研究, 并提出了光照日变化是造成树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的共性原因, 树木立地环境决定树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的个性, 但没有结合具体的环境条件分析树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 存在方位差异的原因; 邓自旺等^[11]分析了树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位变化型及其与环境变量的关系, 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 存在方位差异的原因也未作具体分析。本文在他们研究的基础上, 对比分析了天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 7~8 个方位、以年为时间分辨率、24~50 年序列的方位变化量级及变化规律, 并对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在方位差异的原因进行了具体分析。研究的目的是通过对各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异量级及 $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现方位的探讨, 为今后树轮稳定碳同位素研究的取样方位及方位数的确定提供参考依据。

1 材料与方 法

天目山位于浙江西北部临安县境内, 地处北纬 $30^{\circ}18'30''\sim 30^{\circ}21'37''$, 东经 $119^{\circ}24'11''$

收稿日期: 2005-06-22; 修订日期: 2005-11-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2003CB415201); 国家自然科学基金资助项目 (49771001)

作者简介: 王建 (1962-), 男, 南京师范大学教授, 副校长, 博士生导师。主要研究方向为地貌演变与地貌过程。

E-mail: jwang@njnu.edu.cn

~119°27'11"之间, 属亚热带季风性湿润气候区, 气候温暖湿润。这儿也是国家级自然保护区, 人类活动影响较小, 自然生态环境优越^[12]。加上海洋暖湿气流的影响, 植被生长茂盛, 树种组成多样。这里有树龄达几百年的柳杉、金钱松、杉木等树种。根据仙人顶气象站(海拔 1506m)和禅源寺气象站(海拔 350m)的气象资料分析, 从山麓到山顶年平均气温的变化为 14.8℃~8.8℃, 年降水量为 1390mm~1870mm。正常生长季节为 4~10 月, 生长季平均气温为 14.6℃, 降水量为 1314.8mm^[12]。一年的降水量变化呈现双峰型, 有两个明显的干、湿季节, 因而本区树木生长形成了明显的年生长轮, 这为本区树木年轮学的研究提供了客观条件。

本研究选择西天目山林区, 选择树种为柳杉 (*Cryptomeria fortunei* Hooibrenkex Ottoet Dietr. 简称 CF)。在林区内南坡和东坡采集了 2 个柳杉树盘(台风刮倒), 分别命名为 CF-1 与 CF-3, 树盘离根高度约为 50cm 左右。另外采集 20 株柳杉的生长锥样 40 芯, 用于定年与建立标准宽度年表。样品采集过程与定年均按国际树轮数据库(International Tree-Ring Data Bank)标准完成。样品采集信息如表 1。

表 1 西天目山采集柳杉树轮样品基本信息

Tab. 1 The basic information of the selected sections from western Tianmu Mountain

树盘	采集地点	地理位置	海拔高度(m)	树龄(a)	采样时间
CF-1	狮子口附近	30°21'N, 119°25'E	1025	176 (1822~1997)	1997.10.12
CF-3	老殿附近	30°20'30"N, 119°26'E	1093	151 (1833~1983)	1991.03.20

树轮样品雕刻与稳定碳同位素分析流程如下^[10,13]: (1) 将刨光的每个树盘, 以 45°为间隔等分为 8 个方位区, 每个区的中心方位分别为北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)和西北(NW)。(2) 在每个区以中心方位为对称轴, 在每一轮上大约 5°的范围内均匀雕刻木质样品 2g 左右, 用来测定各方位上每一年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 其中 CF-1 在 8 个方位各雕刻 50 年样品(1947~1996), CF-3 在 7 个方位(缺东南方位)各雕刻 24 年样品(1955~1978)。(3) 将雕刻的每个样品, 在 70~80℃下干燥 3 天, 过 30~60 目筛;(4) 经过抽提、氯化、碱洗等过程, 提取 α -纤维素; 5) 将提取的 α -纤维素与 CuO、Pt 丝在真空下密封于小石英管中, 高温燃烧使其产生供质谱仪分析用的 CO₂ 气体, 并将收集的 CO₂ 气体在 MAT-252 型质谱仪上测定 ¹³C/¹²C 比值(此过程在南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室完成), 测定结果通过换算以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 表示, 简写为 $\delta^{13}\text{C}$ 。

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

整个流程的分析误差 $\leq 0.1\%$ 。

2 结果分析

2.1 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年际变化

图 1 为 CF-1 与 CF-3 各方位年序列 5 年滑动平均曲线图。由图可知, CF-1 与 CF-3 各方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显的年际变化, 且变化趋势基本一致。差别主要表现为两株树对应方位上的 $\delta^{13}\text{C}$ 波动幅度不同以及同一株树不同方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 的年际波动幅度不同。对于 CF-1, 除西北方位外, 各个方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 60 年代初期和 70 年代中期均为低值期, 60 年

代初期以前呈下降趋势, 70 年代中期以后呈上升趋势, 60 年代初期到 70 年代中期有升降波动。各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 出现高值与低值的年份并不完全对应, 有 2~3 年漂移, 而且各个方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 年际波动较大, 波动幅度依次为西南: 1.63‰、北: 1.4‰、西: 1.37‰、南: 1.1‰、东南: 1.05‰、东: 1‰、东北: 0.9‰。西北方位的变化趋势与其他方位相比差异较大, 主要表现在 70 年代初期以前, 整个序列总体表现为上升趋势, 上升幅度约为 1‰。对于 CF-3, $\delta^{13}\text{C}$ 在各个方向上的年际变化趋势非常一致。各方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值年际变化幅度比 CF-1 小, 其中, 西北方向最大差值是 1.1‰, 东方向最大差值为 0.92‰, 北、东北、西三个方向的最大差值分别 0.86‰、0.84‰、0.81‰, 西南与南两方向分别为 0.68‰与 0.62‰。在 1965~1967 年 3 年各方位间的差别均很小。

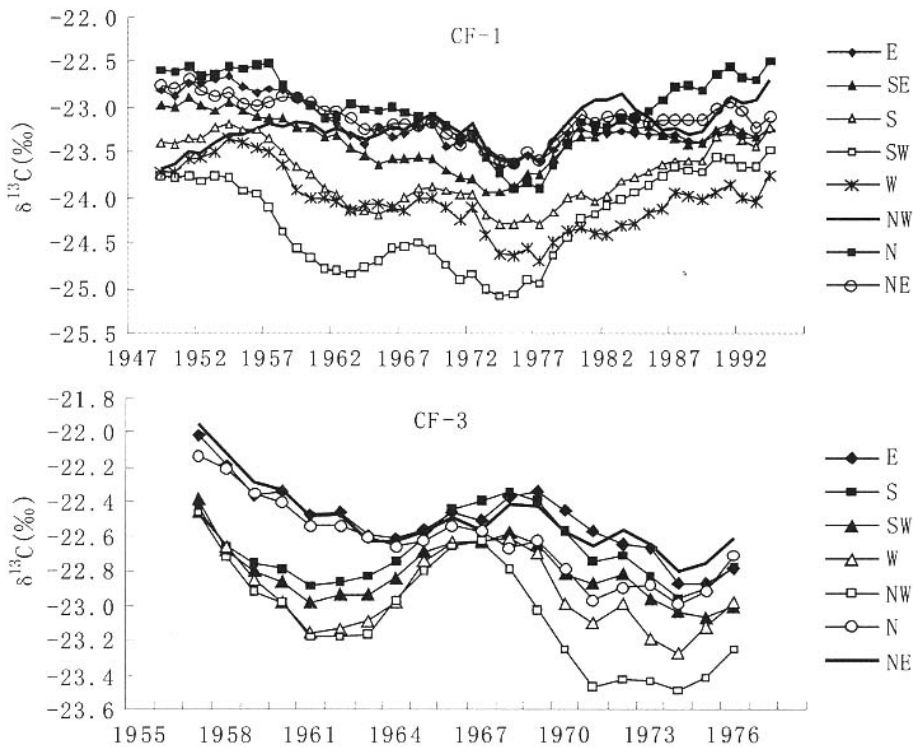


图1 CF-1 在 8 个方位上和 CF-3 在 7 个方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 5 年滑动平均序列图

Fig. 1 The 5-year moving curves of the $\delta^{13}\text{C}$ annual series at eight azimuths of CF-1 and at seven azimuths of CF-3 at Tianmu Mountain

2.2 $\delta^{13}\text{C}$ 随方位的变化

2.2.1 每一年各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差异 对 CF-1 来说, 每一年各方位间的最大差值变化于 0.83‰ (1954, 西南与北方位之差) ~ 2.02‰ (1960, 东北与西南之差; 1961, 北与西南之差; 1965, 北与西之差) 之间, 各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值之差大于 1‰ 的年份有 46 年, 占总年数的 92%。对 CF-3, 各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差值变化于 0.21‰ (1967, 南与西北之差) ~ 1.43‰ (1970, 东与西北之差) 之间, 各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差异明显低于

CF-1, 24 年中差值大于 1‰ 的年份只有 3 年, 占总年数的 12.5%, 如图 2。

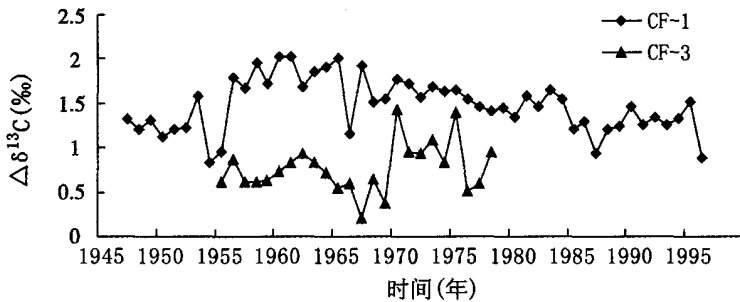


图 2 CF-1 与 CF-3 每一年轮各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差异对比图

Fig. 2 The comparison on the greatest differences of $\delta^{13}\text{C}$ values among azimuths in each tree ring of CF-1 and CF-3

2.2.2 各个方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值之差 CF-3 各方位的总体平均值比 CF-1 各方位的总体平均值高 0.79‰。图 3 为 CF-1 与 CF-3 各自各方位间的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值及两者对应方位上的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值对比图。由图知, 两株树 $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现的方位及极值差是不相同的。对 CF-1, $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位平均值的最大值出现在北方位, 最小平均值出现在西南方位, 两个方位的最大差异是 1.23‰, 其余各方位间的差异变化于 0.04‰~1.1‰ 之间。对 CF-3, $\delta^{13}\text{C}$ 值方位平均值的最大值出现在东北方位, 最小平均值出现在西北方位, 两方位的最大差异为 0.56‰, 其余各方位间的差别变化于 0.02‰~0.54‰ 之间。除个别方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值差异 (对 CF-1, 东与东北间为 0.07‰, 东与西北间为 0.04‰; 对 CF-3, 西与西南间为 0.09‰, 南与北间为 0.07‰, 东与东北间为 0.02‰) 小于分析误差 ± 0.1 ‰ 外, 两株树各自其余方位间的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值之差异均超出了分析误差范围, 说明这种差异不是实验所造成的误差, 而是各方位间实际存在的差异^[9]。

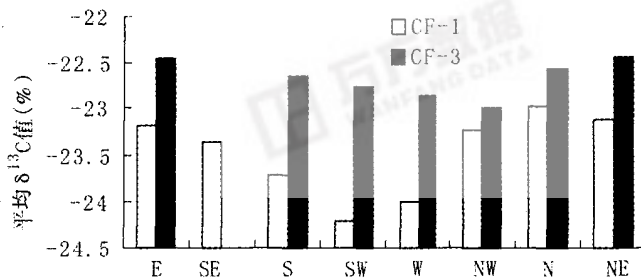


图 3 CF-1 与 CF-3 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的平均值对比

Fig. 3 The comparison on the average values of $\delta^{13}\text{C}$ annual series among azimuths of CF-1 and CF-3

2.2.3 每一年 $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现的方位 从每一年 $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现的方位看, 两株树有不同的变化特点。图 4 为两树各方位出现 $\delta^{13}\text{C}$ 极值的频率统计图。统计分析表明: CF-1, $\delta^{13}\text{C}$ 极值随方位变化的基本趋势较为明显。若以东方位为起点, 沿顺时针方向, 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次降低, 至西南方位 (1947~1979, 其中 1948 年西北方位, 1949, 1955 年西方位)

或西方位 (1980~1996, 其中 1996 年东方位) 达到最低, 而后, 继续顺时针方向递变至北方位 (1947~1969, 1985~1996) 或西北方位 (1970~1984) (个别年份在东方位或东北方位) 达到最大。 $\delta^{13}\text{C}$ 极小值出现的方位基本稳定在西南 (33 年) 或西 (16 年), 这两个方位出现极小值的频率占 92%; 极大值出现的方位基本稳定在北 (28 年) 或西北 (9 年), 这两个方位出现极大值的频率为 74%, 东南与南方位却没有出现极值。而 CF-3, $\delta^{13}\text{C}$ 极值随方位变化的趋势不如 CF-1 明显, 除东南方位缺少数据外, 各个方位上都有 $\delta^{13}\text{C}$ 的极值出现。24 年中东与东北方位出现极大值的次数分别为 9 年与 8 年, 各占总年份的 37.5% 与 33.3%, 西北方位出现极小值的次数为 14 年, 占总分析年份的 58.3%。

两株树对比, $\delta^{13}\text{C}$ 极大值与极小值出现频率最高的方位随坡向而变化。如 CF-1, 地处东坡, $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现频率最高的方位分别在北 (N, 极大值) 和西南 (SW, 极小值), 坡向顺时针转过 90° 至南坡, CF-3 极小值出现频率最高的方位落在西北方位, 与 CF-1 相比, 极小值出现频率最高的方位也顺时针漂移 90° , 极大值出现频率最高的方位也有类似的漂移规律。

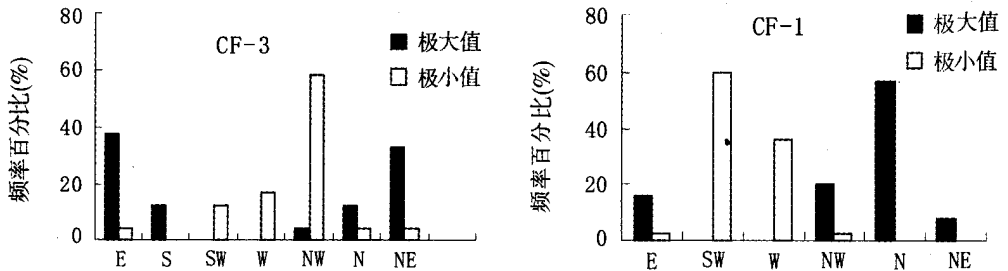


图 4 CF-1 与 CF-3 $\delta^{13}\text{C}$ 极值出现的方位频率统计图

Fig. 4 The frequencies of the $\delta^{13}\text{C}$ extremum values appearing at azimuths of each tree ring of CF-1 and CF-3

2.3 方差分析

为了检验两树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化是否显著, 特对各方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行方差分析。

设 y_{ij} 为各方位历年的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, \bar{y}_i 为各方位的历年平均值, \bar{y} 为 $\delta^{13}\text{C}$ 总体平均值, i 代表方位序号, 对 CF-1, $i=1, 2, \dots, 8$; 对 CF-3, $i=1, 2, \dots, 7$ (缺东南方位)。 j 代表年序号, 对 CF-1, $j=1, 2, \dots, 50$; 对 CF-3, $j=1, 2, \dots, 24$ 。 SS_e 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 各方位内部离差平方和 (即方位内部的变异), SS_i 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 各方位的平均值对总体平均值的离差平方和 (即各方位间的变异), SS_T 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 各年内部离差平方和 (即总变异)。

$$\text{计算公式为}^{[11,14]}: \text{对 CF-1: } SS_e = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{50} (y_{ij} - \bar{y})^2; SS_i = 50 \sum_{i=1}^8 (\bar{y}_i - \bar{y})^2; \\ SS_T = \sum_{ij=1}^{400} (y_{ij} - \bar{y})^2; F_1 = (SS_i/7)/(SS_e/392) \quad (2)$$

$$\text{对 CF-3: } SS_e = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{24} (y_{ij} - \bar{y})^2; SS_T = 24 \sum_{i=1}^7 (\bar{y}_i - \bar{y})^2; SS_i = \sum_{ij=1}^{168} (y_{ij} - \bar{y})^2; \\ F_1 = (SS_i/6)/(SS_e/161) \quad (3)$$

方差分析结果见表 2。

通过方差分析: 对 CF-1, $F_1 = 48.30 > F_{0.01} = 2.68$; 对 CF-3, $F_1 = 5.42 > F_{0.01} = 2.92$, 都超过了信度为 0.01 的显著水平。表明天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的差异是显著的。

表 2 柳杉树轮 (CF-1 与 CF-3) $\delta^{13}\text{C}$ 方位分布的方差分析特征Tab. 2 The characteristics of azimuth distribution of $\delta^{13}\text{C}$ in *Cryptomeria fortunei* (CF-1 and CF-3) tree rings by variance analysis

变异来源	自由度 DF	方差 SS	均方 MS	检验值 F	显著值 $F_{0.01}$	
CF-1	方位间变异	7	71.34	10.19	48.30	2.68
	方位内变异	392	82.72	0.21		
	总变异	399	154.06	0.39		
CF-3	方位间变异	6	6.26	1.04	5.42	2.92
	方位内变异	161	31.00	0.19		
	总变异	167	37.08	0.22		

综上所述: CF-1 与 CF-3 两树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都存在明显的方位变化。每一年轮各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差异分别达到 $0.83\text{‰} \sim 2.02\text{‰}$ (CF-1) 和 $0.21\text{‰} \sim 1.43\text{‰}$ (CF-3); 各方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值的最大差值达到 0.56‰ (CF-3) 和 1.34‰ (CF-1)。两树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化量值与各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值序列的年际变化幅度 $0.9\text{‰} \sim 1.63\text{‰}$ (CF-1) 和 $0.6\text{‰} \sim 1.1\text{‰}$ (CF-3) 基本处于同一量级。表明, 研究树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位变化与研究其年际变化具有同等重要的意义。

2.4 相关分析

对 CF-1, 各方位间的 $\delta^{13}\text{C}$ 求相关, 除西北方位与其他方位间的相关性较低 (R 变化于 $0.25 \sim 0.48$, 通过 0.05 的显著性水平) 外, 其余各方位间的相关系数介于 $0.5 \sim 0.87$ 之间, 均通过了 0.001 的显著性水平。对 CF-3, $\delta^{13}\text{C}$ 各方位间的相关系数介于 $0.59 \sim 0.89$ 之间, 均超过了 0.001 的显著水平。两树轮对应方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的相关系数介于 0.48 (西北方位) ~ 0.89 (西南方位) 之间, 也都通过了 0.001 的显著水平。用多项式拟合法与差值法对每一方位的年序列去趋势后, 所得各方位上的高频序列间相关性显著提高。对 CF-1, 各方位间的高频序列间的相关系数变化于 $0.62 \sim 0.92$, 只有西北方位在 70 年代初期以前与其他方位间的相关偏低一些 ($0.35 \sim 0.86$), 但最低相关也通过 0.05 的显著性水平。对 CF-3, 多数方位间的相关系数达到 $0.50 \sim 0.94$, 只有东与西北、西和北之间相关性系数变化于 $0.35 \sim 0.48$ 之间。

将各方位的低频序列与大气 CO_2 浓度^①序列进行相关分析, 对 CF-1, 1975 年以前, 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 低频序列与 CO_2 浓度变化呈现高度负相关 (西北方位例外, 为正相关, 相关系数为 1), 相关系数变化于 $-0.93 \sim -0.99$, 1975 年以后呈高度正相关, 相关系数达 $0.91 \sim 1.0$ 。对 CF-3, 尽管在 60 年代 \sim 70 年代间各方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值上升, 但总的趋势是下降的, 所以, 各方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 低频序列与大气 CO_2 浓度变化呈显著负相关, 相关系数达 $-0.77 \sim -1.0$ 。

相关分析表明: 引起两树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变异的大区域环境因素是相似的。尽管不同时段的变化趋势有差异, 但在同一时段, 大的区域环境因素对各方位的影响是共同的, 表现出同一时段的共同趋势变化 (如图 1)。同一树木个体不同方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异及不同树体对应方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异主要是它们立地环境条件及树冠不同方位上光照条件等因素的差异所引起。

① 资料来源于世界气候网站 (www.ncdc.noaa.gov/paleo/data.htm)

3 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的成因分析

3.1 植物碳同位素分馏机理与模式

树轮中的碳来自树木光合作用所吸收的大气 CO_2 。通常,大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 值为 -8‰ ,而树木的叶子和木质部的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏低 ($-20\text{‰}\sim-30\text{‰}$)^[15]。表明植物在吸收同化大气 CO_2 的过程中发生了碳同位素的分馏。树木年轮学所研究的树木都属于 C_3 植物, C_3 植物的稳定碳同位素分馏大致包括两个步骤:一是大气 CO_2 通过气孔、细胞间隙和叶肉细胞的液体进入光合羧化场所的扩散过程。这一过程中,植物优先吸收大气 $^{12}\text{CO}_2$, 因为 $^{12}\text{CO}_2$ 比 $^{13}\text{CO}_2$ 更容易扩散。结果是:叶内空气相对于周围大气缺乏 ^{13}C , 因而产生了 4.4‰ 的扩散分馏,即叶内大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_i$ 比周围大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 低 4.4‰ 。二是在 RuBP 羧化酶的作用下,叶片内 CO_2 发生光合同化反应的过程。因 $^{13}\text{C}=\text{O}$ 键的裂解比 $^{12}\text{C}=\text{O}$ 键的裂解困难,所以 $^{12}\text{CO}_2$ 优先被植物固定在初级光合产物中,因而产生约为 -27‰ 的净羧化分馏^[15]。国外学者已提出了几种模式来描述上述碳同位素分馏过程,其中 Farquhar 等^[16] 提出的 C_3 植物碳同位素分馏模式最有代表性,其表达式为:

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b-a)C_i/C_a \quad (4)$$

$$\text{或} \quad \Delta = a + (b-a)C_i/C_a \quad (5)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}_p$, $\delta^{13}\text{C}_a$ 分别表示植物叶子的碳同位素组成和大气 CO_2 的碳同位素组成, a 为大气 CO_2 通过气孔进入叶子细胞时,由扩散作用引起的 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 分馏 (4.4‰), b 为 CO_2 同化过程中,由 RuBP 羧化酶所决定的 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 的羧化分馏 (27‰)。 Δ 表示大气 CO_2 与植物之间的碳同位素分馏值。 C_i 、 C_a 分别为叶子细胞间和周围环境的 CO_2 浓度,且 $C_i = C_a - A/g$, 或者 $A = g(C_a - C_i)$ ^[3], 式中 A 为叶片对 CO_2 的同化速率,它与细胞内核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶 (RuBPC) 的活性有关, g 为气孔导通系数,它与单位叶面积上气孔数目及气孔大小有关。

由扩散与羧化作用所引起的分馏是不变的,但植物碳同位素分馏值 Δ 并不等于扩散分馏与羧化分馏之和,它的大小主要取决于植物叶片细胞内外的 C_i/C_a 之比^[15]。许多研究^[17~20] 认为:植物碳同位素分馏受植物生长环境中许多因素的影响,如大气 CO_2 浓度、 O_2 分压、温度、降水量、空气湿度、光照强度、土壤水分与矿质元素、地形等。每个因素的变化都可能直接或间接地引起 A 、 g 及 C_i/C_a 值的变化,进而引起植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 发生变化。

3.2 柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化原因探讨

植物的叶子通过光合作用合成有机物质,随后有机物质通过树枝沿导管纵向输送到树干,在横向上通过髓射线向树干各个方位迁移,以供树木年轮生长^[9]。叶片合成的有机物质在纵、横向的输移过程中,还产生进一步的碳同位素分馏,因而树木不同部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比叶子的 $\delta^{13}\text{C}_p$ 要低,如纤维素、木质素等的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比叶子的 $\delta^{13}\text{C}_p$ 通常低约 $3\text{‰}\sim 4\text{‰}$ ^[21]。由于树轮内的 $\delta^{13}\text{C}$ 来源于叶片的 $\delta^{13}\text{C}_p$, 所以,影响树冠不同方位的叶片 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值出现差异的因素也是影响树轮不同方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现差异的因素。

CF-1 与 CF-3 采自同一地区,且为同一树种,其细胞结构和有机组成相近,由生理因素所控制的那部分分馏视为相近,在此不加讨论。相关分析表明:影响两树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变异的大区域环境因素是相似的, $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位差异主要是树木立地条件及树冠周围的

光照条件等因素的不同影响所致。

3.2.1 大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响 根据 Farquhar 等分馏模式：大气 CO_2 浓度及其碳同位素组成直接影响叶片的 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值。Keeling 等^[22] 研究发现：从 1956~1978 年的 22 年间，南北半球间大气 CO_2 浓度仅相差 2.5 mol/L，相应的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 相差 0.1‰。大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 值的海拔差异与纬度差异约为同一数量级^[20]。由此可见，CF-1 与 CF-3 立地处（纬差为 30″，经差为 1′，海拔仅差 70m 左右）大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 差别很微小，对两树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值及其方位差异的贡献是很小的。

相关分析表明，大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 变化主要影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的长期趋势变化。工业化以来，大量化石燃料的燃烧及人类活动对陆地生态系统尤其是对森林、草地等生态系统的干扰与破坏，已将大量 CO_2 排入大气，这类 CO_2 的稳定碳同位素组成较低，约为 -26‰~-30‰^[2]，致使大气 CO_2 浓度升高，而其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 值降低。这种变化在树木的光合作用及生长过程中被记录下来。CF-3 各方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列及 CF-1 在 1975 年前各方位的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列（NW 方位除外）表现出的一致下降趋势，可能是对工业革命以来大气 CO_2 浓度持续升高，其 $\delta^{13}\text{C}_a$ 持续降低在树轮记录中的反映。至于 CF-1 在 1975 年以后各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 序列所呈现的上升趋势，可能是“边材效应”的影响，也可能是树木生长中对人类治理环境污染效应的响应。这种上升趋势是否具有普遍性，还有待进一步研究。1975 年以前，CF-1 西北方位与其他方位不一致的变化趋势也有待于深入研究。

3.2.2 树冠不同方位光照及温度变化对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的影响 不同坡面的太阳辐射是影响树木周围微环境温度，进而影响树木生长及其碳同位素分馏的重要因素。坡向与坡度差异直接影响树木立地表面接收太阳辐射的多少。根据倾斜面上太阳辐射计算模型^[23,24] 计算，CF-3 处的南坡太阳辐射总量约为 3792GJ/m²·y，CF-1 处的东坡太阳辐射总量约为 3201GJ/m²·y，两坡相差约 591GJ/m²·y。可见，CF-3 所处的阳坡地带光照条件好于 CF-1 所处的东坡地带，因而树叶光合速率相对较高，致使叶片内 CO_2 浓度相对降低，进而导致叶片内 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值相对较高^[25,26]。这可能是 CF-3 树轮各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 CF-1 高的原因之一。

光照强度对光合作用速率和气孔的导通率都有影响。就一株树而言，由于太阳的周日运动和周年运动，树冠上不同方位的树叶受光强度存在日变化与季节变化，如表 3^[12]，因而光合作用的强度也有日变化与季节变化。在光合作用适宜的光照与温度范围内，向光的树叶接受较多的光照，叶片光合速率相对较高，而且，光照变强叶片气孔数目减少或关闭，气孔导通率降低^[26]，因而 A/g 增大，细胞内的 CO_2 浓度降低，导致叶片 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值增大。所以，两树冠不同方位受光强度的差异是形成树叶 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值方位差异，进而导致树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现方位差异的重要原因。

温度是影响植物碳同位素分馏的重要气候因子之一，它主要是通过影响光合羧化酶的特性来影响光合作用速率和通过影响气孔的开放度来影响气孔导通率^[21]，而光合速率与气孔导通率的比率变化又直接影响叶片内的 CO_2 浓度变化，进而影响叶片内的 $\delta^{13}\text{C}_p$ 值。树冠周围的温度变化与太阳辐射与光强变化有一致性。植物对光照强度与温度的变化也有一定的适宜范围，过度强光照射与高温作用，植物的光合作用表现出光抑制（即午睡）现象，光合速率反而会下降，植物光合作用曲线表现出双峰型变化^[27~28]。一天中， C_i/C_a 值随时间变化而变化，正午达到一个峰值，午后又逐渐降低，16 时后又出现增大趋势^[29]。 C_i/C_a 值的两次峰值均由于光合作用降低，呼吸作用加强，导致细胞内 CO_2 浓度升高而引

起,但正午的峰值是由光合作用的“午睡”现象引起,而下午的峰值是因光强减弱导致CO₂同化量减少造成的^[29]。天目山地区,每年7月中旬到8月为副高控制,温度高、光照强^[12]。正午前后太阳辐射最强,气温高,并且气温的升高有滞后性,一般午后2:30点左右气温最高(表3)。正午前后一段时间,向光的叶片在强光照与高温的影响下,光合作用速率会下降,导致叶片内的CO₂浓度相对升高,进而导致叶片的δ¹³C_p值下降。CF-1与CF-3的δ¹³C值在南、西南等方位偏低,与这些方位叶片光合作用受抑制有关。

表3 天目山禅源寺附近林区冬、夏季晴天不同时间实测水平光照强度(单位:10⁴lx)与气温(单位:℃)

Tab. 3 The total hourly horizontal radiation density(unit:10⁴ lx)in winter and summer around Chanyuan temple forests and the temperature(unit:℃)at Tianmu Mountain

时间		6:30	8:30	10:30	12:30	14:30	16:30	18:30
夏	林外	0.7	10.2	15.0	16.5	13.5	5.7	0.29
季	林内	0.09	0.14	0.19	0.26	0.17	0.1	0.07
冬	林外	10~3	2.3	8.4	10.2	7.5	0.6	0
季	林内	10~3	1.3	1.5	1.6	1.0	0.2	0
夏季7月平均最高气温		27.1	31.0	33.7	35.3	36.3	35.4	30.7

注:冬季:1989年1月23日,夏季:1988年7月8日。

与CF-3相比,CF-1各方位间的δ¹³C值差异较大。除了树冠整体所接受的太阳辐射相对少,光照强度相对弱外,还与CF-1地处山体东坡,山体遮挡造成树冠整体获得有效日照时间变短及不同方位的叶片有效向光时间的差异较大有关。如西南、西、西北等方位,δ¹³C值不仅比CF-3相应方位的δ¹³C值低,而且比本棵树其他方位的δ¹³C值也低,这与山体遮挡有重要关系。这些方位上午处在背光一侧,午后阳光又为山体遮挡,一天中向光的时间比其他方位短,叶片受光强度相对较弱,因而叶片同化CO₂的量减少而导致胞间CO₂浓度升高,C_i/C_a值增大,进而导致叶内δ¹³C_p值降低^[29]。

图5为CF-1各对应方位上δ¹³C值与宽度间对比图。两者间呈较明显的反相关性

(除东北方位外),相关系数见表4。其中,南、西南、西及北方位上相关性极显著,达到0.01的显著水平。

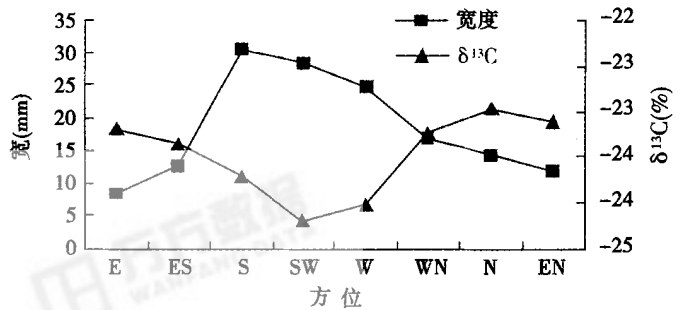


图5 CF-1各对应方位上δ¹³C与宽度间对比
Fig. 5 The comparison between δ¹³C and width at corresponding azimuths

表4 CF-1各对应方位上δ¹³C与宽度间的相关系数

Tab. 4 The correlation coefficients between δ¹³C and width at corresponding azimuths

方位	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE
相关系数	-0.06	-0.02	-0.54	-0.58	-0.45	-0.13	-0.7	0.01

从机理上讲,δ¹³C与宽度并不成函数与变量关系,它们之间的联系来自于间接变量(如降水、温度、光照及大气CO₂浓度等)^[30]。充足的降水和CO₂浓度,加上充足的光照

和适宜温度,将有利于树木的生长,产生宽轮^[31],同样的条件也有利于植物的碳同位素分馏,产生低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

3.2.3 土壤及空气湿度对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的影响 天目山地区为亚热带季风性湿润气候,年降水量丰沛,正常情况下,全年降水量满足树木生长需要。海拔 1000~1200m 高度上,降水量约为 1780mm,相对湿度为 79%~82%,干湿指数约为 0.49,属于全山区最湿润的高度层^[12]。但因 CF-3 与 CF-1 地处坡向不同,阳坡气温比东坡高,蒸发量大,所以,空气湿度与土壤湿度阳坡小于东坡,而且,同一树木周围不同方位间空气与土壤湿度也有差异。湿度状况也是影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的重要因素之一。水分胁迫可诱导叶子气孔关闭、导通系数降低,从而导致植物光合作用所固定的碳同位素值增大^[32]。CF-3 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 CF-1 相应方位高,与阳坡空气与土壤湿度相对低有关。另外,CF-3 各方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 1964~1968 年的上升,与这几年连续少雨(年降水量低于多年平均值),气候干旱,水分胁迫有关。

3.2.4 不同坡位土壤养分差异对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的影响 矿质元素直接或间接影响光合作用。矿质元素缺乏可使光合速率降低,叶子细胞内外的 C_i/C_a 比值增加,植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 降低;反之土壤养分丰富,可使光合速率加快,叶子细胞内外的 C_i/C_a 比值降低,植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 增加^[33~35]。同一树木个体不同方位上土壤营养元素除与土壤母质有关外,还与地形坡度及坡位有关。地形坡度与坡位既影响地面径流与土壤湿度,又影响土壤厚度及土壤有机物质与土壤矿质元素等的分布^[36]。一般是随高度降低,土壤厚度及土壤营养物质增加。CF-1 所处的东坡,斜面坡度达 44°。所以,树木周围不同方位的土壤厚度及土壤营养状况有差异,树木下坡位比上坡位土壤厚度大、土壤养分丰富,侧坡位一般介于上、下坡位之间^[12]。CF-1 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在西、西南方位上尤其低,与 CF-1 上坡位土壤养分相对缺乏也有关系。CF-3 立地处较为平坦,不同方位上因坡位产生的土壤养分的差异较小,由此引起各个方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生的差异也较小,这可能也是 CF-3 各方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较小的原因之一。土壤养分与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 间的关系也已为许多研究所证实。Balesdeat 等^[33] 研究证实:在一定范围内,营养元素越多,光合速率越快,叶片细胞内外的 C_i/C_a 降低,植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加;反之,植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则降低。

3.3.5 风对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的影响 风也是影响树木生长强有力的和经常性的生态因子之一。天目山地处亚热带,冬、夏季风以及台风对本区植物的生长影响均很大。据统计^[12],全年各月累计大风日数达 120.6 天,累年各月最大风速达 40m/s。产生大风的天气系统主要有台风、寒潮等。风能影响植物蒸腾速率,从而影响植物对水分及营养物质的吸收和运输,进而对光合作用产生影响;定向风还能影响树冠生长形态和树枝长度,改变树冠迎、背风面的水分输移状况,进而导致迎、背风方位树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现差异^[8,25]。老殿附近(即 CF-3 处)活的高大松树,其西北侧树枝短小,东南向树枝生长旺盛,反映了定向的西北风对树冠生长形态的影响。CF-3 西北向 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 7 个方位中最低,这与定向的西北风作用,导致该侧树枝短小也有关。因为短枝上的叶片水分输移的路径短,木质部的水分张力相对降低,气孔的导通数会增加,导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低^[25]。因缺少东南向的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,因而无法与西北向相比较,这有待于继续研究。

3.3.6 各生态因子对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的综合影响 植物光合作用同时受到生境中各种生态因子的综合影响,生境中任何因子的变化必然带来其他因子的相应变化。生态因子的适宜配合有利于光合作用,否则会抑制光合作用。生态因子的组合与分布受地形条件的

制约。地形主要通过改变光、热、水、土和风等自然条件间接影响植物光合作用, 这些要素的各种组合会产生多种生态效应, 从而影响树木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位变化。可见, CF-1 与 CF-3 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的方位变异应是多种因素综合作用、相互叠加的结果。

4 结论

(1) 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显的方位差异, 不同方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度与同一方位 $\delta^{13}\text{C}$ 值年际变化幅度具有相似的变化量级。所以, 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的研究同样具有重要意义。

(2) 不同坡向的太阳辐射及树冠不同方位光照条件的差异是造成树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位变化的主要原因。树木立地及附近地形状况 (坡度、坡向及坡位) 影响树木周围的光照条件、局部温度、湿度及土壤养分, 进而导致树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化。所以, 树木立地处的小环境条件也是影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的重要因素。

(3) 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化是多种因素综合作用与相互叠加的结果。本文的探讨仍是不全面的, 如对树冠形态与叶片结构等树木自身因素对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的影响未作讨论, 而且对树木周围土壤元素、空气湿度等因素的方位变化也缺少定量测定, 所有这些均有待于更深入的研究。

(4) 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的方位差异虽存在普遍性, 但统计分析表明; 同一树体各方位间及两树体对应方位上 $\delta^{13}\text{C}$ 序列相关性都较高, 而且有些相邻方位间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异相对较小, 说明这些方位间 $\delta^{13}\text{C}$ 值所记录的信息相似。所以, 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行研究, 并用于地区 CO_2 浓度或气候要素恢复时, 应确定合理的取样方位数。取样方位过少, 可能会遗漏某些方位记录的重要气候信息, 进而会影响重建的精度; 取样方位过多, 又会造成人力、财力的浪费及信息冗余。究竟取几个方位或哪些方位提取的信息更具代表性, 有待于今后进一步探讨。

致谢: 特别感谢中国科学院地理科学与资源研究所邵雪梅研究员为树样定年所给予的指导。

参考文献:

- [1] Tans P P, Mook W G. Past atmospheric CO_2 levels and the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tree rings. *Tellus*, 1980, 32(3): 268~283.
- [2] Francey R J. Tasmanian tree rings belie suggested anthropogenic $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ trends. *Nature*, 1981, 297: 232~235.
- [3] Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, 297: 28~31.
- [4] Leavitt S W, Long A. Sampling strategy for stable carbon isotope analysis of tree rings in pine. *Nature*, 1984, 311: 145~147.
- [5] Sheu D D, Kou P, Chiu C H, *et al.* Variability of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ in Taiwan fir; growth effect and response to May-October temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(1): 171~177.
- [6] Nguyen-Queyrens A, Ferhi A, Loustau D, *et al.* Within ring $\delta^{13}\text{C}$ spatial variability and interannual variations in wood cellulose of two contrasting provenances of *Pinus pinaster*. *Canada Journal of Forest Research*, 1998, 28: 766~773.
- [7] Schleser G H, Helle G, Lücke A, *et al.* Isotope signals as climate proxies: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(7): 927~943.
- [8] Panek J A, Waring R H. Carbon isotope variation in Douglas-fir foliage: improving the climate relationship. *Tree*

- Physiology, 1995, 15(10): 657~663.
- [9] 陈宝君, 钱君龙, 濮培民, 等. 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的角分布及其在气候重建中的应用. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 463~470.
- [10] 陈宝君, 钱君龙, 濮培民, 等. 树轮 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 角分布及其气候含义. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 14~18.
- [11] 邓自旺, 钱君龙, 屠其璞, 等. 环境因素对天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位分布的影响. 植物生态学报, 2003, 27(1): 93~98.
- [12] 天目山自然保护区管理局. 天目山自然保护区自然资源综合考察报告. 杭州浙江科学技术出版社, 1990. 1~54.
- [13] 钱君龙, 吕军, 屠其璞, 等. 用树轮 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 重建天目山地区近 160 年气候. 中国科学(D 辑), 2001, 31(4): 333~341.
- [14] 盖钧镒, 等. 试验统计方法. 北京: 中国农业出版社, 2000. 99~120.
- [15] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. Quaternary Science Reviews, 2004, 23: 771~801.
- [16] Farquhar G D, O'leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121~137.
- [17] Farquhar G D, Wong S C. An empirical model of stomata conductance. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 191~120.
- [18] Saurer M, Sigenthaler U. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions. Tellus, 1995, (46B): 320~330.
- [19] Zimmerman J K, Ehleringer J R. Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid *Catasetum viridiflavum*. Oecologia, 1990, 83: 247~249.
- [20] Körner C, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. Oecologia (Berl.), 1991, 88: 30~40.
- [21] McCarroll D, Pawellek F. Stable carbon isotope ratios of *Pinus sylvestris* from northern Finland and the potential for extracting a climate signal from long Fennoscandian chronologies. The Holocene, 2001, 11: 517~526.
- [22] Keeling C D, Mook W G, Tans P P. Recent trends in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide. Nature, 1979, 277: 121~123.
- [23] Reindl D T, Beckmann W A, Duffie J A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. Solar Energy, 1990, 45: 9~17.
- [24] 查良松. 我国太阳辐射量区域性变化特征研究. 地理研究, 1996, 15(2): 21~27.
- [25] Waring R H, Silvester W B. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values within the crowns of *Pinus radiata* trees. Tree Physiology, 1994, 14: 1203~1213.
- [26] Zhang H, Shariti M R, Nobel P S. Photosynthetic characteristics of sun vs. shade plants of *Encelia farinosa* as affected by photosynthetic photon flux density, intercellular CO_2 concentration, leaf water potential and leaf temperature. Australian Journal of Plant Physiology, 1995, 22: 833~841.
- [27] 于强, 任保华, 王天铎, 等. C_3 植物光合作用日变化的模拟. 大气科学, 1998, 22(6): 867~880.
- [28] 许大全, 沈允钢. 植物光合作用效率的日变化. 植物生理学报, 1997, 23(4): 410~416.
- [29] 王平, 何春光, 郎惠卿, 等. 小兴安岭湿地植物的光合作用日变化研究. 湿地科学, 2003, 1(2): 98~104.
- [30] 郑成华, 沈承德, 于津生. 两个树轮样品的 ^{13}C 同位素研究及其古气候意义. 地球化学, 1994, 23: 210~216.
- [31] 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. 地理研究, 1998, 17(2): 150~156.
- [32] Xu H L, Wang R, Gauthier L, et al. Tomato leaf photosynthetic responses to humidity and temperature under salinity and water deficit. Pedosphere, 1999, 9(2): 105~112.
- [33] Balesdent J. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. Ecology, 1993, 74(6): 1713~1721.
- [34] Ke S Z, Liu Z R, Qian J L, et al. Angular distribution of element contents in tree rings and the environmental information. Pedosphere, 1999, 9(1): 6~76.
- [35] Qian J L, Ke S Z, Huang J S, et al. Correlation between chemical elements contents in tree rings and soils. Pedosphere, 1993, 3(4): 309~319.

- [36] Ke X K, Qian J L, Ke S Z. Average values and angular distribution of element contents in tree rings. *Pedosphere*, 1998, 8(4): 377~380.

An investigation into the causes of the azimuth variations of $\delta^{13}\text{C}$ in *Cryptomeria fortunei* tree rings at Tianmu Mountain

WANG Jian¹, ZHAO Xing-yun^{1,2}, QIAN Jun-long³

(1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

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

3. Lake Sediment and Environment Laboratory, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: The $\delta^{13}\text{C}$ annual series in different azimuths of two *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr (for short CF-1 and CF-3, respectively) tree discs collected from west Tianmu Mountain, Zhejiang Province were determined based on cross-dated tree ring age. The analysis of variance shows that the $\delta^{13}\text{C}$ values in *Cryptomeria fortunei* tree rings varied along with azimuths significantly. At the same time, we found the differences of the average $\delta^{13}\text{C}$ values among azimuths were up to 0.56‰ (for CF-3)~1.34‰ (for CF-1) and the inter-annual variations in each azimuth were up to 0.9‰~1.63‰ (for CF-1) and 0.6‰~1.1‰ (for CF-3). The $\delta^{13}\text{C}$ variability in space was the same as to the inter-annual. This indicates the study on the azimuth variation of $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings has the same significance to that on the inter-annual variation. The statistical analysis proved that correlation coefficients are highly correlated, ranging from 0.4 to 0.87 for CF-1 and from 0.59 to 0.89 for CF-3 at significance level of $\alpha = 0.001$ among different azimuths, respectively, as well as from 0.48 to 0.89 for the same azimuths between CF-1 and CF-3 tree discs at significance level of $\alpha = 0.001$. This indicates that local environmental factors resulting in the $\delta^{13}\text{C}$ values varying along with azimuths significantly were similar for the two tree rings. In our study, we mainly analyzed the causes that resulted in the differences in the $\delta^{13}\text{C}$ values at the same azimuths for CF-1 and CF-3 as well as between the different azimuths for both CF-1 and CF-3. The differences of the solar radiation on different tilted surfaces and of the radiant condition (such as radiant intensity and efficient sunlight hours) at the different azimuths on crown of a tree were the most important factors leading to the $\delta^{13}\text{C}$ variations along with azimuths. The site conditions where the trees stand including latitude, longitude and altitude as well as gradient and slope orientation can affect the variations of the sunlight, microenvironment temperature, humidity and soil nutrient along the different radials and thus affect the variations of $\delta^{13}\text{C}$ values of tree rings along the azimuths. So the site conditions where the trees were collected are important factors leading to the azimuth variations of the $\delta^{13}\text{C}$ values in tree rings.

Key words: Tianmu Mountain; tree ring; $\delta^{13}\text{C}$; azimuth distribution; cause investigation