

树轮稳定碳同位素分析的采样方法 ——以天目山柳杉为例

王 建¹, 钱君龙², 梁 中¹, 赵兴云^{1,3}, 商志远¹, 陈 霞¹, 陆小明¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210097; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008;
3. 临沂师范学院, 山东临沂 276005)

摘要: 树轮稳定碳同位素在重建气候和环境方面得到了越来越多的应用, 可是采样的方法却是多种多样, 限制和影响了不同结果之间的比较。究竟在几个方位采样, 在什么方位采样, 既经济方便又能比较好的反映一棵树的稳定碳同位素变化过程与趋势, 还没有确切的答案。研究利用来自天目山的两个柳杉树盘的多方位的和整轮的碳同位素测试数据 (共计 642 个), 通过不同方位和不同方位组合的平均碳同位素序列与整轮碳同位素序列的关系的多角度的考查、分析发现, 并不是采样的方位数越多越好, 选择 2~4 个方位采样合并分析树轮稳定碳同位素, 既经济方便又能比较好的反映一棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化过程与趋势。在两个或者 3 个方位采样时, 方位之间呈钝角关系时, 其代表性最好。4 个方位采样时, 一般使用的“十字交叉法”并不是最好的选择, 建议采样的方位之间尽可能多的成钝角关系。如果条件限制只能采集一个方位的样品, 采集向阳一侧的树芯, 其代表性最好。

关键词: 树轮; 碳同位素; 采样方法; 采样策略

文章编号: 1000-0933(2008)12-6070-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Sampling strategy for carbon isotope analysis of tree rings: a case study of *Cryptomeria fortunei* from Mt. Tianmu, China

WANG Jian¹, QIAN Jun-Long², LIANG Zhong¹, ZHAO Xing-Yun^{1,3}, SHANG Zhi-Yuan¹, CHEN Xia¹, LU Xiao-Ming¹

1 Nanjing Normal University, Nanjing, 210046, China

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China

3 Linyi Normal University, Linyi, 276005, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6070~6078.

Abstract: Tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ analysis has been widely used in reconstructing past climate and environment. However, it is difficult to correlate the results from samples taken with different sampling strategy. It is still an open question, how to take sample, in which radii to take sample, that the $\delta^{13}\text{C}$ of the samples can represent the tree $\delta^{13}\text{C}$ trend better and more efficient. To address the issue, we analyze the correlation and similarity of the different radii sequence and the different combination sequence with the full-ring-sample sequences, based on 642 $\delta^{13}\text{C}$ data of cellulose fixed in tree-ring at 8 different radii of two *Cryptomeria fortunei* tree disks from Mt. Tianmu, a subtropical mountain of China. It suggests that 2 to 4 radii mixture sample is the better and more efficient choice for the tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ analysis. It had better to take samples at

基金项目: 国家教育部长江学者创新团队基金资助项目 (YST2006-006)

收稿日期: 2007-07-31; **修订日期:** 2008-08-29

作者简介: 王建 (1962~), 男, 南京人, 博士, 教授, 从事地表过程与环境变迁研究. E-mail: jwang169@vip.sina.com

Foundation item: The project was financially supported by Supported by Yangtze River Scholar Team Fund of Chinese Education Administration (No. YST2006-006)

Received date: 2007-07-31; **Accepted date:** 2008-08-29

Biography: WANG Jian, Ph. D., Professor, mainly engaged in earth surface process and environmental evolution. E-mail: jwang169@vip.sina.com

obtuse angle with each other when to take samples at two or three radii. When to take four samples in one tree, commonly the samples are taken in “cross” relation, but the analysis shows it is not the best choice. The more the samples are taken at obtuse angle with each other, the better the representation of the samples. If, sometimes, only one core can be taken, the core in the sunny aspect has the better representation of the tree.

Key Words: tree-ring; carbon isotope; method; sampling; strategy; representative

树轮稳定碳同位素,由于能够在树轮宽度对气候变化不敏感的地区^[1,2],甚至在树木年轮不清晰的地区^[3],较好地反映气候的年际变化甚至季节的变化,受到了越来越多的古气候和古环境研究者的重视。利用树轮稳定碳同位素,不仅可以反演温度、降水的变化^[4~18],而且可以反演低层云量和相对湿度的变化^[19,20],还可以反演大气二氧化碳浓度或者同位素组成的变化^[21~34]以及人类对于森林干扰的过程^[35~38]。

在利用树轮稳定碳同位素反演古气候和古环境的过程中,样品采集的方法多种多样。但概括起来,主要有四种:一是整轮采样法,即在树盘上围绕年轮均匀采集样品^[1,8];二是单一方位采样法,即在某个方位获取的树芯上或者在树盘的某个方位上采集样品^[36];三是多个方位的混合采样法,即利用几个方位获取的树芯或者树盘的几个不同方位上采集样品,然后把几个方位上采集的同年代的样品混合进行测试^[10,13,14,16,36];四是多个方位分别采样法,即在几个方位获取的树芯上或者树盘的几个不同方位上,分别采集样品,分别进行同位素测试^[17,39~42]。

几种方法各有利弊,整轮采样法可以使分析所得到的稳定碳同位素结果比较好地代表一棵树的碳同位素变化历史,但是树盘不是到处都能获得的,因此该方法的应用受到一定的限制。多个方位分别采样、分别测试,尽管可以获得更多的气候和环境信息^[39,40],但是会成倍的增加分析的成本,同时也会因为突出了局地环境的信息,而使区域气候和环境的信号受到干扰。单一方位采样和多个方位的混合采样,究竟能在多大程度上代表一棵树,在多大程度上反映一棵树的稳定碳同位素变化过程与趋势,还没有确切的答案。Mazany 等认为,尽管树轮的不同方位的同位素存在显著的差异,但是这在整个生长过程中都是稳定的,因此每棵树采集一个方位的树芯即可反映整株的趋势^[17]。而 Leavitt & Long 的研究却表明,一棵树采集 4 个树芯合并分析 $\delta^{13}\text{C}$,才可以比较好的反映一棵树 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势^[41]。在进行稳定碳同位素分析时,究竟应该采集几个方位的树芯,既经济方便又能较好的代表一棵树的稳定碳同位素变化趋势呢,还需要做进一步的研究。在什么方位采样、怎么组合采样更具有代表性,还没有人进行过研究。本文根据来自天目山的两个柳杉树盘的多方位的和整轮的碳同位素测试数据(642 个),以及通过不同方位和不同方位组合的平均碳同位素序列与整轮碳同位素序列的关系的多角度的考查、分析,来探讨既经济方便又能比较好的代表或者反映一棵树的稳定碳同位素变化过程与趋势的采样方法。

1 样品与数据

样品采自浙江天目山林区,树种为柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenkex Ottoet Dietr. 简称 CF),树木圆盘采自台风刮倒的树木。其中,CF-1 为 1997 年 10 月 12 日采集,地点在狮子口附近(30°20'N,119°25'E),海拔 1025m,地处东坡,坡度约 44°。经交叉定年,树龄为 176a。CF-3 为 1991 年 3 月 20 日采集,地点在老殿附近(30°20'30"N,119°26'E),海拔 1090m,地处南坡,坡度约 20°,经交叉定年,树龄为 151a。

天目山位于浙江省西北部临安市境内,地处中国东部亚热带季风区。气候温暖湿润,年降水量为 1390 ~ 1870mm,年平均温度为 15.8 ~ 8.9℃(从山麓到山顶)^[43]。冬季寒冷干燥,夏季炎热潮湿。

树轮稳定碳同位素分析流程:(1)先将树盘刨光,然后以 45°角为间隔将树盘等分为 8 个区,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)、西北(NW)。由于树盘的原因,CF-3 东南(SE)方位没有采集到样品,只有 7 个方位的样品。(2)每个区以中心方位为对称轴,在每一轮上大约 5°的范围内均匀地雕刻木质样品 2g 左右,用以测定各方位上每一年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,其中 CF-1 雕刻 50a

样品(1947 ~ 1996 年), CF-3 雕刻 24a 样品(1955 ~ 1978 年);同时,覆盖整个树盘逐年逐轮均匀雕刻木质样品 2g 左右,用以测定每一整轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。(3)将雕刻的每个样品,在 70 ~ 80℃ 下干燥 3d,磨至 30 ~ 60 目;(4)经过抽提、氯化、漂白、碱洗等过程,提取 α -纤维素;(5)制备供质谱分析用的 CO_2 气体,并在 MAT-252 型质谱仪上测定 $\delta^{13}\text{C}$ 。分析结果以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 表示,简写为 $\delta^{13}\text{C}$,表达式为:

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

式中, $\delta^{13}\text{C}$ 单位为‰,分析误差 $\leq 0.1\text{‰}$ 。共获得树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 分析数据 877 个,其中用于该项分析的是其中的 642 个(表 1)。

表 1 用于本文分析的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 样品分布

Table 1 Background of the samples

采样方位 Sampling radii	CF1		CF3	
	年轮数 Total No. of rings	跨越时间 Spanning time	年轮数 Total No. of rings	跨越时间 Spanning time
E	50	1947 ~ 1996	24	1955 ~ 1978
SE	50	1947 ~ 1996		
S	50	1947 ~ 1996	24	1955 ~ 1978
SW	50		24	
W	50		24	
NW	50		24	
N	50		24	
NE	50		24	
整轮 Whole ring	50		24	

2 分析方法

整轮序列比较好的代表了一棵树的整体变化的历史,每个方位反映了一棵树的某个方面或者局部的变化信息。通过计算分析不同方位及其组合均值序列与整轮序列的相关系数,比较他们的均值、标准差,计算他们与整轮序列之间的差值平方和,可以弄清他们与整轮序列的相关程度、相似性,从而探讨他们对于整轮序列的代表性。

因此,本文利用 SPSS 软件计算了 CF1 8 个方位序列及其 246 个方位组合均值序列,CF3 7 个方位序列及其 120 个方位组合均值序列,与整轮序列的 Pearson 相关系数、均值之差、标准差之差以及序列差值平方和。

3 结果与讨论

从相关系数来看,方位数越多,其组合均值序列与整轮序列的相关系数越大,相关关系越密切,序列对于整轮序列的代表性越好。但是相关系数随着方位数的增加其增大的速度呈指数递减,也就是说方位数的增加对于代表性改善的效果开始是显著的,后来则变得越来越不显著(表 2,图 1)。

序列均值与整轮序列均值之差平方和,反映了序列均值与整轮序列均值之间的相近程度,数值越小说明序列均值越接近整轮序列均值,对于整轮序列的代表性越好。不难看出,方位数越多,该值越小,对于整轮序列的代表性越好(表 2,图 2)。

各序列与整轮序列差值平方和,反映了各序列与整轮序列之间的差异大小。差值平方和越小,表明序列与整轮序列的差异越小,对于整轮序列的代表性越好。不难看出,随着方位数的增加,其均值序列与整轮序列差值平方和越小,对于整轮序列的代表性越好。但是有一点应该注意的是,差值平方和随方位数的增加而呈指数递减。当方位数大于 4 时,差值平方和趋于稳定,方位数增加对于代表性的改善效果已经不明显(表 2,图 3)。

标准差反映了序列变化的性质,标准差越相近,说明两个序列的波动幅度与性质越相似。但是从序列的标准差与整轮序列标准差的差值来看,并不是方位数越多越好。与整轮序列标准差最接近的,即与整轮序列标准差之差最接近于零的是 2 ~ 3 个方位的平均序列(CF1)或者 3 ~ 4 个方位的平均序列(CF3)(表 2,图 4)。

概括地说,当采样方位为 3 ± 1 时,序列的标准差与整轮序列标准差的差值最接近于 0,与整轮序列的波动幅度与性质最相近。

综上所述,并不是采样方位数越多越好,最佳的采样方位数是 3 ± 1 ,选择 2~4 个(最好是 3 个)方位采样合并分析稳定碳同位素,既经济方便又能比较好的代表或者反映一棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化过程与趋势。

表 2 方位及其组合均值序列与整轮序列相似性的比较

Table 2 the correlation and similarity of the single radius sequences and combination sequences with the full-ring-sample sequence

方位数 ^①	CF1				CF3			
	平均相关系数 ^②	序列均值与整轮序列均值之差平方和/样本数 ^③	与整轮序列差值平方和/样本数 ^④	序列平均标准差与整轮序列标准差之差值 ^⑤	平均相关系数 ^②	序列均值与整轮序列均值之差平方和/样本数 ^③	与整轮序列差值平方和/样本数 ^④	序列平均标准差与整轮序列标准差之差值 ^⑤
1	0.755	0.21886	0.31029	+0.04563	0.834	0.03490	0.09410	+0.04231
2	0.838	0.11695	0.16492	+0.00450	0.902	0.01470	0.04517	+0.01242
3	0.872	0.08298	0.12431	-0.00996	0.930	0.00796	0.02885	+0.00031
4	0.890	0.06599	0.10107	-0.01729	0.945	0.00460	0.02070	-0.00591
5	0.901	0.05580	0.08712	-0.02173	0.955	0.00258	0.01580	-0.00970
6	0.908	0.04900	0.07782	-0.02469	0.961	0.00123	0.01254	-0.01225
7	0.914	0.04415	0.07118	-0.02682	0.966	0.00027	0.01021	-0.01410
8	0.918	0.04051	0.06620	-0.03221				

①No. of radii, ②mean Pearson correlation coefficient, ③the average of the sum of the squares of the differences of the sequence averages, ④the average of the sum of the squares of the differences of samples, ⑤the difference of standard deviation between the combination sequences and the full-ring-sample sequence

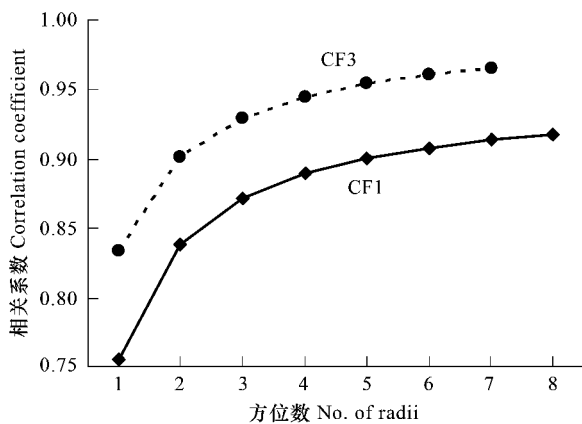


图 1 方位及其组合均值序列与整轮序列的相关系数随采样方位数的变化

Fig. 1 Variation of Pearson Correlation Coefficient of the different combination sequence with the full-ring-sample sequence with the number of radii for combination

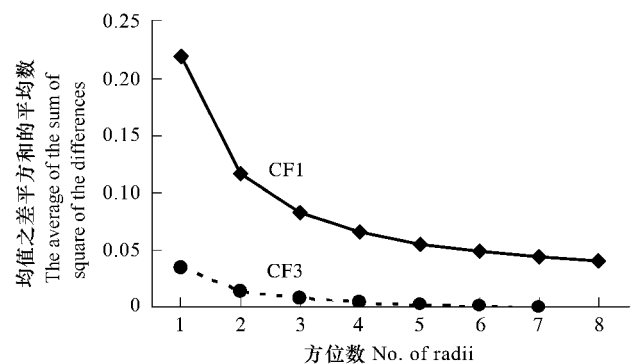


图 2 方位及其组合均值序列的均值与整轮序列均值之差平方和的平均值随采样方位数的变化

Fig. 2 Variation of the average of the sum of square of the differences of the mean value of sequence between the combination sequences and the full-ring-sample sequence with the number of radii for combination

既然 2~4 个方位采样,既经济方便又能比较好的代表或者反映一棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化。在 2 个方位采样时,人们通常选择平角(对角线)采样或者直角(垂直)采样,结果表明,钝角采样的代表性最好。即当采样的 2 个方位的夹角为 135° 时,2 个方位的平均序列与整轮序列的相关系数最大(表 3)。从这个原理出发,3 个方位采样时,最好相互之间应该呈钝角关系。采用树盘 CF1 与 CF3 的采样方位均匀的相间 45° ,3 个方位之间的组合关系大致上可以分为 5 种:锐角关系,采用 3 个方位相临,夹角为 45° - 45° - 270° ;直角关系,3 个方位相隔,夹角为 90° - 90° - 180° ;大致上的钝角关系,三方位之间的夹角为 135° - 90° - 135° ,另外两种为不同角度的组

合。结果表明,当3个方位之间的夹角大致为钝角,夹角大小相近时,其均值序列与整轮序列的相关系数较大,并且相对比较稳定(变化幅度最小)(表4),从而证明前面的推测是正确的,即三方位呈钝角分布时,其平均值序列对于整轮序列的代表性最好。因此建议三方位采样时,采样的3个方位应尽量均匀的呈钝角分布于树干或者树盘上,即夹角要大致为 120° - 120° - 120° 。4个方位采样,一般情况下大家习惯于使用“十字交叉法”,但对4个方位组合的考查发现,“十字交叉法”不是最好的选择。如表5所示,“十字交叉法”所获得的4个方位的均值序列与整轮序列的相关系数平均只有0.886,仅仅高于“相临采样法”,而普遍低于其他采样法。建议四方位采样时,使得方位之间的夹角尽可能多的成钝角关系。也就是在上述三方位钝角采样的基础上,中间插入1个方位即可。

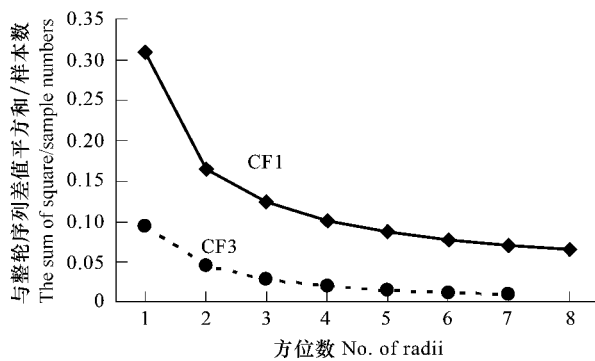


图3 方位及其组合均值序列与整轮序列差值平方和的平均值随采样方位数的变化

Fig. 3 variation of the sum of square of the differences of samples between the combination sequences and the full-ring-sample sequence with the number of radii for combination

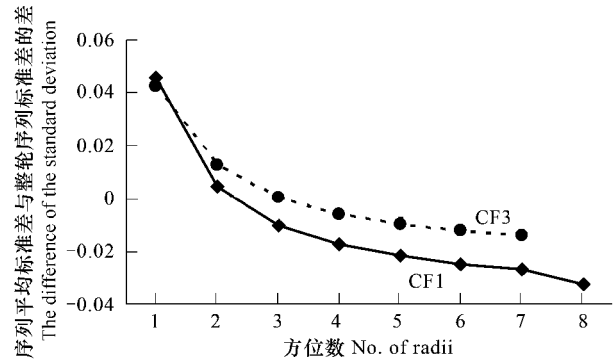


图4 方位及其组合均值序列的标准差与整轮序列标准差的差值随采样方位数的变化

Fig. 4 variation of the difference of the standard deviation between the combination sequences and the full-ring-sample sequence with the number of radii for combination

表3 CF1 两方位均值序列与整轮序列相关系数随采样两方位夹角大小的变化

Table 3 variation of Pearson Correlation coefficient between the two-radius-average sequence and the full-ring-sample sequence with the change of the angle between the two radii

两方位夹角, Angle between radii	两方位均值序列与整轮序列的相关系数平均值 Pearson correlation coefficient	统计样本数 No. of sequences
45°	0.832	8
90°	0.833	8
135°	0.850	8
180°	0.838	4

表4 CF1 三方位均值序列与整轮序列相关系数随三方位夹角组合关系的变化

Table 4 variation of Pearson Correlation coefficient between the three-radius-average sequence and the full-ring-sample sequence with the change of the angle between the three radii

三方位之间的夹角 Angle between radii	三方位均值序列与整轮序列的相关系数 Pearson Correlation coefficient		统计样本数 No. of sequences
	平均值 Average	极差 Maximum difference	
45°-45°-270°	0.863	0.174	8
90°-90°-180°	0.868	0.126	8
135°-90°-135°	0.881	0.058	8
45°-135°-180°	0.875	0.151	16
45°-90°-225°	0.869	0.167	16

表 5 CF1 四方位均值序列与整轮序列相关系数随四方位夹角组合关系的变化

Table 5 variation of Pearson Correlation Coefficient of the four-radius-average sequence with the full-ring-sample sequence with the angle between the four radii

四方位的关系(夹角) ^①	方位之间的夹角 为钝角的个数 ^②	四方位均值序列与整轮序列 的相关系数平均值 ^③	统计样本数 ^④
十字交叉(90°-90°-90°-90°)	0	0.886	2
四方位相邻(45°-45°-45°-225°)	1	0.884	8
两邻两对(45°-135°-45°-135°)	2	0.891	4
三邻一对(45°-45°-135°-135°)	2	0.892	8
两邻一隔一对(45°-90°-45°-180°)	2	0.891	8
三邻一隔(45°-45°-90°-180°)	1	0.887	16

①Angles between the radii, ②No. of obtuse angle, ③Correlation Coefficient, ④No. of samples for statistics

有时候受到条件限制,只能在 1 个方位采样,那么在什么方位采样更好呢?如表 6 所示,树盘 CF1 的南向方位序列与整轮序列的相关系数最高,与整轮序列平均值之差最小,与整轮序列差值的平方和最小;树盘 CF3 的南向和西南方位序列与整轮序列的相关系数最高,与整轮序列平均值之差最小,与整轮序列差值的平方和最小。因此,从单个方位来看,偏南方位序列对于整轮序列的代表性最好。实际上,尽管从单个方位序列与整轮序列的比较来看,其代表性不是最好的,但是从相关系数来看,CF1 8 个方位与整轮序列的相关系数平均为 0.755,CF3 7 个方位与整轮序列的相关系数平均为 0.834,最低也在 0.5 以上,均超过了 0.001 的显著水平。说明 1 个方位采样也能在相当程度上代表一棵树的¹³C 变化过程与趋势。

表 6 各方位序列与整轮序列关系的比较

Table 6 Correlation and the difference of the different radii sequence with the full-ring-sample sequence

方位 Radius	CF1			CF3		
	序列平均值与整轮 序列平均值之差 ^①	相关系数 ^②	与整轮序列差值 平方和/样本数 ^③	序列平均值与整轮 序列平均值之差 ^①	相关系数 ^②	与整轮序列差值 平方和/样本数 ^③
东 E	0.4876	0.626	0.3571	0.2371	0.795	0.1253
东南 SE	0.3284	0.760	0.1824			
南 S	-0.0446	0.884	0.0482	0.0479	0.889	0.0335
西南 SW	-0.5320	0.852	0.3889	-0.0742	0.902	0.0360
西 W	-0.3374	0.842	0.1794	-0.1654	0.856	0.0826
西北 NW	0.4432	0.503	0.3545	-0.2808	0.838	0.1601
北 N	0.7028	0.835	0.5767	0.0950	0.713	0.1075
东北 NE	0.5622	0.741	0.3950	0.2550	0.848	0.1138
平均 Mean		0.755			0.834	

①difference of the sequence average, ②Pearson correlation coefficient, ③the average of the sum of the squares of the differences

Leavitt & Long 等对来自亚利桑那北部 Flagstaff 的松树 8 个方位^{δ13}C 序列(5a 间隔)及其不同方位的组合序列与整轮序列进行了 Pearson 相关系数分析以及方差和的计算,通过分析比较认为,一棵树采集 4 个树芯合并分析^{δ13}C,可以比较好的反映一棵树^{δ13}C 的变化趋势,并且认为至少不能少于 2 个树芯。本文对于柳杉的分析结果,总体上是支持 Leavitt 和 Long 的观点的,即 2~4 个方位采样合并分析^{δ13}C,可以较好地代表 1 棵树的¹³C 变化过程与趋势。但是本文的分析结果表明,并不是采样的方位数越多越好。尽管相关系数随着方位数的增大而增大,均值之差平方和、序列差值平方和都随着方位数的增大而减小,但是当采样方位数超过 4 时,均值序列(或者组合序列)的标准差与整轮序列的标准差的差别越来越大。说明尽管随着方位数的增大,平均序列(或者混合序列)的变化趋势与整轮序列越来越一致,序列均值也越来越靠近,但是均值序列(或者组合序列)与整轮序列的波动幅度和性质的差异却越来越大(表 2,图 4)。因此,并不是采样的方位数越多越好,最好的采样方位数在 3 左右,2~4 之间。如果从方位增加对于代表性的改善的效果来看,从 1 到 2 或者

从 2 到 3,是最显著的。考虑到经济方便的因素,采用 3 个方位或者 2 个方位采样最经济高效。

4 结论

并不是采样的方位数越多越好,选择 2~4 个方位采样合并分析树轮稳定碳同位素,既经济方便又能比较好的代表或者反映一棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化过程与趋势。2 个或者 3 个方位采样最经济高效。在两个方位采样时,人们通常选择平角(对角线)采样或者直角(垂直)采样,而本文的分析结果却表明,钝角采样的代表性最好。3 个方位采样时,应尽量均匀的呈钝角分布于树干或者树盘上,即夹角要大致为 120° - 120° - 120° 。4 个方位采样,一般情况下大家习惯于使用“十字交叉法”,但该文的分析发现,“十字交叉法”不是最好的选择,建议采样的方位之间尽可能多的成钝角关系。如果条件限制只能采集 1 个方位的样品,采集向阳一侧的树芯,其代表性更好。这是从处于亚热带季风山地的两棵柳杉树木的分析得出的结论,其适用范围和条件还值得更多的来自不同区域和环境的实例研究来论证。但是该文分析所得出的几点认识,至少对于提高亚洲季风亚热带山地树轮碳同位素分析的采样效率和代表性是有积极意义的。

Reference:

- [1] Qian J L, Liu J, Tu Q P, *et al.* The last 160 years climatic change of Mt. Tianmu recorded by carbon isotope of Tree-ring cellulose. *Science of China (series D)*, 2001, 31(4): 333—341.
- [2] Shen J, Chen Y F. The carbon isotope of Tree-ring and the reconstruction of climate of Nanjing over the last 20 years. *Botany Resource and Environment*, 2000, 9(3): 34—37.
- [3] Poussart P F, Evans M N, Schrag D P. Resolving seasonality in tropical trees: multi-decade, high-resolution oxygen and carbon isotope records from Indonesia and Thailand. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 218: 301—316.
- [4] Li Z H, Liu R M, An Z S, *et al.* Monsoonal variation of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ and its climatic significance. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(22): 2064—2067.
- [5] Liu Y, Ma L M, Cai Q F. Estimate of summer temperature of Mt. Helan since AD 1890 based on the analysis of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$. *Science of China (series D)*, 2002, 32(8): 667—674.
- [6] Zhao X Y, Wang J, Qian J L, Jiang X Y. The last 300 years autumn climate record by the tree ring $\delta^{13}\text{C}$ of Mt. Tianmu. *J of Mountain Science*, 2005, 23(5): 540—549.
- [7] Chen T, Qin D H, Liu X H, *et al.* Tree ring $\delta^{13}\text{C}$ Records in the little ice age in Altay Prefecture of Xinjiang Region. *J of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 83—86.
- [8] Liu G S, Hong Y T, Pu H C, *et al.* Tree Ring $\delta^{13}\text{C}$ series and the changes of precipitation. *J. of Mineralogy*, 1997, 17(1): 93—98.
- [9] Lu J, Tu Q P, Qian J L. Estimation of the precipitation of East China based on the tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ of Mt. Tianmu. *J of Nanjing Institute of Meterology*, 2002, 24(3): 350—355.
- [10] Liu X H, Qin D H, Shao X M, *et al.* Precipitation and its abrupt Change in Nyingchi County of Tibet Autonomous Region for the last 350 years. *J of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 375—379.
- [11] Masson-Delmotte V, Raffalli-Delercé G, Danis P A, *et al.* Changes in European precipitation seasonality and in drought frequencies revealed by a four-century-long tree-ring isotopic record from Brittany, western France. *Climate Dynamics*, 2005, 24: 57—69.
- [12] Liu Y, Ma L M, Leavitt S W, *et al.* A preliminary seasonal precipitation reconstruction from tree-ring stable carbon isotopes at Mt. Helan, China, since AD 1804. *Global and Planetary Change*, 2004, 41: 229—239.
- [13] Danis P A, Masson-Delmotte V, Stievenard M, *et al.* Reconstruction of past precipitation $\delta^{18}\text{O}$ using tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$: a calibration study near Lac d'Annecy, France. *EPSL*, 2006, 243: 439—448.
- [14] Leavitt S W. Prospects for reconstruction of seasonal environment from tree ring $\delta^{13}\text{C}$: baseline findings from the Great Lakes area, USA. *Chemical Geology*, 2002, 192(1-2): 47—58.
- [15] Leavitt S W, Long A. Seasonal stable-carbon isotope variability in tree rings: possible paleoenvironmental signals. *Chem. Geol.*, 1991, 87: 59—70.
- [16] Liu X H, Qin D H, Shao X M, *et al.* Stable carbon isotope of abies spectabilis from Nyingchi County of Tibet Autonomous Region and its response to climate change. *J of Glaciology and Geocryology*, 2003, 48(11): 1209—1213.
- [17] Mazany Y, Lermen J C, Long A. Carbon-13 in tree-ring cellulose as an indicator of past climates. *Nature*, 1980, 287(5781): 432—435.
- [18] Ma L M, Liu Y, Zhao J F, An Z S. Responds of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ of different components to climatic Change. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):

2607—2613.

- [19] Liu J, Tu Q P, *et al.* The relative humidity of Mt. Tianmu recorded by stable carbon isotope. *Meteorology Science*, 2001, 22(1): 47—51.
- [20] Xu H, Hong Y T, Zhu Y X, Liu G S. Information of low cloud amount recorded in pine tree ring $\delta^{13}\text{C}$ series in Antu Area. *Earth Chemistry*, 2002, 31(4): 309—314.
- [21] Zhao X Y, Qian J L, Wang J, *et al.* Reconstructing atmospheric CO_2 concentration in the past 300 years by Tree Ring $\delta^{13}\text{C}$ Annual Series. *Pedosphere*, 2006, (3). (SCI): 371—379.
- [22] Zhao X Y, Wang J, Qian J L. Change of the atmospheric CO_2 Concentration since AD1685 recorded by tree ring $\delta^{13}\text{C}$ series. *Quaternary Science*, 2005, 25(5): 545—551.
- [23] Jiang G M, Huang Y X. Significance of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ for the past atmospheric CO_2 level change in Northern China. *Acta Botany Ecologica Sinica*, 1997, 21(2): 155—160.
- [24] 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.
- [25] Li Z H, Liu R M, An Z S, *et al.* Evidence from tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ for the increasing of atmospheric concentration of CO_2 . *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(23): 2172—2174.
- [26] Chen T, Qin D H, Liu X H, Ren J W, Li J F. Chang of atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ in Altay Prefecture of Xinjiang Region for the last 440 years. *J of Applied Meteorology*, 2003, 14(9): 1469—1472.
- [27] Lu J, Tu Q P, Qian J L. Atmospheric CO_2 concentration recorded by tree-ring $\delta^{13}\text{C}$. *J of Applied Meteorology*, 2002, 13(3): 377—379.
- [28] Tang J S, Qian J L, Yin Z S, Yang F C. Reconstruction of atmospheric CO_2 concentration through tree-ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *J. of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(3): 45—48.
- [29] Sun G C, Lin Y F. Change of atmospheric CO_2 concentration and tree-ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of evergreen broad-leaved forest in subtropical monsoon region. *J. of Applied Ecology*, 1992(4): 291—295.
- [30] Leavitt S W, Long A. The atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ record as derived from 56 pinyon trees at 14 sites in the Southwestern United States. *Radiocarbon*, 1989, 31: 469—474.
- [31] Freyer H D, Belacy N. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ records in northern hemispheric trees during the superpositions past 500 years: Anthropogenic impact and climatic. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 6844—6852.
- [32] Francey R J, Allison C E, Etheridge D M, *et al.* A 1000-year high precision record of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 . *Tellus*, 1999, 51B: 170—193.
- [33] Feng X, Epstein S. Carbon isotopes of trees from arid environment and implications for reconstructing atmospheric CO_2 concentration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(12): 2599—2609.
- [34] Feng X. Long-term C_i/C_a responses of trees in Western North America to atmospheric CO_2 concentration derived from carbon isotope chronologies. *Oecologia*, 1998, 117(1): 19—25.
- [35] West A G, Midgley J J, Bond W J. The evaluation of $\delta^{13}\text{C}$ isotopes of trees to determine past regeneration environments. *Forest Ecology and Management*. 2001, 147: 139—149.
- [36] Sakata M, Suzuki K, Koshiji T. variations of wood $\delta^{13}\text{C}$ for the past 50 years in declining Siebold's beech (*Fagus crenata*) forests. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45: 33—41.
- [37] Tian X H, Gou X H, Tian Y Y, *et al.* Relationship of tree growth with its ecological environment recorded by tree-ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *Resource and Environment of Arid Region*, 2004, 18(8): 36—42.
- [38] Lin Z F, Liang C, *et al.* Effect of Human activity on tree-ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(2): 124—132.
- [39] Wang J, Zhao X Y, Qian J L. An investigation into the causes of the azimuth variations of $\delta^{13}\text{C}$ in *Cryptomeria fortunei* tree rings at Tianmu Mountain. *Geographical Research*, 2006(2): 242—254.
- [40] Chen B J, Qian J L, Pu P M, *et al.* Azimuthal distribution of stable carbon isotopes in tree rings and its application in climate reconstruction. *J. of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002, 25(4): 463—470.
- [41] Leavitt S W, Long A. Strategy for stable carbon isotope analysis of tree in pine. *Nature*, 1984, 311(5982): 145—147.
- [42] Ramesh R, Bhattacharya S K, Gopalan K. Dendroclimatological implications of isotope coherence in trees from Kashmir Valley, India. *Nature*, 1985, 317(6040): 802—804.
- [43] Tianmushan Natural Conservation Bureau. Report on Natural Resource Investigation of Tianmushan Natural Conservation Area. Hangzhou: Zhejiang Press of Science and Technology, 1992. 1—54.

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 沈吉, 陈毅风. 南京地区近二十年来雪松树轮的稳定同位素与气候重建. 植物资源与环境学报, 2000, 9(3): 34~37.
- [4] 李正华, 刘荣漠, 安芷生, 等. 树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 季节性变化及其气候意义. 科学通报, 1995, 40(22): 2064~2067.
- [5] 刘禹, 马利民, 蔡秋芳. 采用树轮稳定碳同位素重建贺兰山 1890 年以来夏季(6~8 月)气温. 中国科学(D 辑), 2002, 32(8): 667~674.
- [6] 赵兴云, 王建, 钱君龙, 姜修洋. 天目山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 300 多年秋季气候变化. 山地学报, 2005, 23(5): 540~549.
- [7] 陈拓, 秦大河, 刘晓宏, 等. 新疆阿尔泰山地区小冰期特征的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录. 冰川冻土, 2002, 24(1): 83~86.
- [8] 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. 矿物学报, 1997, 17(1): 93~98.
- [9] 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. 南京气象学院学报, 2002, 24(3): 350~355.
- [10] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 西藏林芝地区近 350a 降水变化及突变分析. 冰川冻土, 2003, 25(4): 375~379.
- [16] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 等西藏喜马拉雅冷杉年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候意义. 科学通报, 2003, 48(11): 1209~1213.
- [18] 马利民, 刘禹, 赵建夫, 等. 树木年轮中不同组分稳定碳同位素含量对气候的响应. 生态学报, 2003, 23(12): 2607~2613.
- [19] 吕军, 屠其璞, 钱君龙, 等. 利用树木年轮碳同位素重建天目山相对湿度序列. 气象科学, 2001, 22(1): 47~51.
- [20] 徐海, 洪业汤, 朱咏煊, 等. 安图红松树轮稳定碳同位素记录的低云量信息. 地球化学, 2002, 31(4): 309~314.
- [22] 赵兴云, 王建, 钱君龙. 用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 1685 年以来的大气 CO_2 浓度变化趋势. 第四纪研究, 2005, 25(5): 545~551.
- [23] 蒋高明, 黄银晓. 树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值及其对我国北方大气 CO_2 浓度变化的指示意义. 植物生态学报, 1997, 21(2): 155~160.
- [25] 李正华, 刘荣漠, 安芷生, 等. 工业革命以来大气 CO_2 浓度不断增加的树轮稳定碳同位素证据. 科学通报, 1994, 39(23): 2172~2174.
- [26] 陈拓, 秦大河, 刘晓宏, 等. 新疆阿尔泰山地区近 440 年来大气 $\delta^{13}\text{C}$ 变化. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1469~1472.
- [27] 吕军, 屠其璞, 钱君龙. 利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建大气 CO_2 浓度序列. 应用气象学报, 2002, 13(3): 377~379.
- [28] 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. 南京林业大学学报, 2000, 24(3): 45~48.
- [29] 孙谷畴, 林植芳. 亚热带季风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. 应用生态学报, 1992, (4): 291~295.
- [37] 田沁花, 勾晓华, 田艳艳, 等. 树木年轮 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率记录的树木生长与生态环境关系的研究. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 36~42.
- [38] 林植芳, 梁春等, 彭长连. 鼎湖山地区人类活动对马尾松年轮 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的影响. 生态学报, 1997, 17(2): 124~132.
- [39] 王建, 赵兴云, 钱君龙. 天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化及成因探讨. 地理研究, 2006, (2): 242~254.
- [40] 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.
- [43] 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: 浙江科技出版社, 1992. 1~54.