

文章编号: 1000-0240(2002)01-0083-04

# 新疆阿勒泰地区小冰期特征的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

陈拓<sup>1</sup>, 秦大河<sup>1</sup>, 刘晓宏<sup>1</sup>, 李江风<sup>2</sup>, 任贾文<sup>1</sup>, 孙维贞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 新疆气象科学研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**建立了新疆阿勒泰地区一个长约450 a的落叶松树轮碳同位素年表。该年表一个最为明显的特点是1850年后年轮  $\delta^{13}\text{C}$  显著降低, 这是化石燃料燃烧和土地利用方式改变的缘故。在1550—1850年期间, 该年表经历了明显的距平“正负”(即暖冷)变化: 17世纪年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值相对偏负, 气温较低, 18世纪年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值相对偏正, 温度较高。根据已有的树轮  $\delta^{13}\text{C}$  温度系数, 17世纪的温度相对偏低约0.672.46℃。广泛的区域性对比表明, 该年表所揭示的小冰期温度变化具有较高的可信度。

**关键词:** 树轮; 碳同位素组成; 小冰期

**中图分类号:** P467 **文献标识码:** A

小冰期作为距今最近的一次冷期, 在全球广大地区已由不同学者通过不同的方法加以证实<sup>[1]</sup>。在我国, 小冰期多指15世纪后期到19世纪末的气候寒冷期<sup>[2]</sup>。由于近几百年的气候变化对研究现代气候变化趋势与人类活动的气候影响具有重要意义, 小冰期气候的研究成为20世纪80年代以来全球气候变化研究的热点之一。

树木年轮(包括宽度、密度、同位素)序列常常记录了环境气候变化的信息, 已被列为全球变化研究(IGBP)的重要技术手段之一<sup>[35]</sup>。本文通过对新疆阿勒泰地区一个树轮碳同位素序列气候信息的分析, 研究了解小冰期在该区存在的证据及其特点。

## 1 样品采集和处理

样品于1981年7月21日采集于新疆阿勒泰县落叶松(*Larix sibirica*)林上限区, 地理坐标为87°45'E, 48°22'N, 海拔2110 m。定年(共24个样本)和宽度测量在新疆气象研究所完成, 采取美国亚利桑那大学年轮实验室年表制作程序研制而成, 并通过了该实验室的验证<sup>[6]</sup>。同位素分析在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室

进行, 具体方法见文献[7], 树轮碳同位素分析结果以  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  表示。

## 2 生长限制因子的识别

树轮  $\delta^{13}\text{C}$  主要受温度和降水两个气候因子的影响, 并且它们对年轮  $\delta^{13}\text{C}$  的影响并不是等价的, 而往往认为只有一个因子在起作用, 另一个因子对  $\delta^{13}\text{C}$  的影响则是通过该主要因子间接地施加的<sup>[8]</sup>。为了识别该主要因子, 李江风等建立了本采样地点树木年轮宽度指数的气候响应函数<sup>[9]</sup>, 该响应函数的主要特征是: 温度对年轮生长有明显的影响, 而降水的作用甚小, 且多变而不稳定。降水对树木生长影响的不明显原因主要有: 首先, 落叶松是直根系植物, 其根系相对较深, 加之生境肥沃的土壤类型(020 cm土层中有机质含量达到140 g·kg<sup>-1</sup>, C/N为18.8)为根系发育提供养分保障, 从而使得落叶松不仅可维持与表层水的联系, 较深层的地下水也能为其所用; 其次, 采样点坡度较缓(16°), 植被覆盖度高(约为90%), 空气湿度较高(有内陆“湿岛”之称)。全年气温较低(森林处7月平均温度在12℃以下, 最高温度不超过20℃), 林下凋落物多,

收稿日期: 2001-04-08; 修订日期: 2001-08-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-06); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室知识创新工程项目(210506); 中国科学院阜康荒漠生态野外观测站基金资助

作者简介: 陈拓(1971—), 男, 湖南岳阳人, 助理研究员, 2000年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位。现主要从事树木年轮同位素研究。E-mail: chentuo@163.net

这些特点均有利于土壤保持水分。

### 3 结果与分析

图 1 显示了落叶松年轮  $\delta^{13}\text{C}$  的时间序列。该序列有一个比较明显的特点:1850 年后  $^{13}\text{C}$  富集( $\delta^{13}\text{C}$  更负)( $R^2 = 0.8268$ ,  $p < 0.01$ )。这种现象在世界上许多树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列中存在,被认为是化石燃料燃烧和土地利用方式改变的缘故<sup>[10]</sup>。由于 1850 年后的大气  $\text{CO}_2$  中  $\delta^{13}\text{C}$  受人类活动的影响较大,本文仅针对 1850 年以前年轮  $\delta^{13}\text{C}$  的变化进行分析。而埋藏在冰芯气泡包裹体的大气  $\text{CO}_2$  中  $\delta^{13}\text{C}$  信息表明,1850 年之前大气  $\text{CO}_2$  中  $\delta^{13}\text{C}$  较为稳定,基本上恒定在  $-6.48\text{‰}$  附近<sup>[11]</sup>。因此,根据 Farquhar *et al.*<sup>[12]</sup> 的分馏模型,1850 年之前树轮  $\delta^{13}\text{C}$  的变化可以认为是气候(温度)变化的产物。

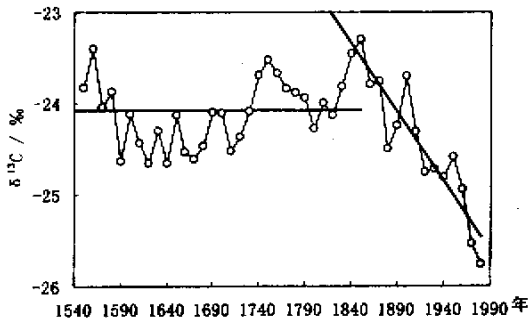


图 1 新疆阿勒泰地区树轮  $\delta^{13}\text{C}$  10 a 平均值随时间的变化

Fig.1 Temporal changes of 10-year average of tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  in Altay Prefecture of Xinjiang Region

落叶松的生长季为 59 月,一般在 5 月发芽,6 月展叶,9 月底落叶。通过 Hemming *et al.*<sup>[13]</sup> 的公式  $\Delta^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C})(1 + \delta^{13}\text{C})$ , 其中  $\delta^{13}\text{C}_a$  指大气  $\text{CO}_2$  中  $\delta^{13}\text{C}$  值,本文将年轮  $\delta^{13}\text{C}$  转化为  $\Delta^{13}\text{C}$  (一般认为  $\Delta^{13}\text{C}$  包含有更多的气候信息)后,计算了后者与 59 月平均温度的单相关系数,发现它们之间存在负相关关系( $r = -0.47$ ,  $n = 12$ ) (图 2)。尽管不显著,这可能是因为本文所使用的气象站海拔(737 m)明显偏低,以致不能很好地代表采样点(海拔为 2 110 m)真实的气候状况。同时,将本研究区树轮指数年表与温度逐月相关,发现温度(指 56 月)对树木生长的影响主要为正影响<sup>[9]</sup>,即温度越高,越有利于树木的生长。也就是说,树木的光合作用随温度的升高而增强,这样树木内部  $\text{CO}_2$  浓度相对降低,导致树木对  $^{13}\text{CO}_2$  的识别能力( $\Delta^{13}\text{C}$ )降低。上述两种方法均证实了在本研究区,温度与  $\Delta^{13}\text{C}$  是反相关关系。根据 Hemming *et al.*<sup>[13]</sup> 的公式,年轮  $\delta^{13}\text{C}$  与温

度正相关。因此,文中年轮  $\delta^{13}\text{C}$  的距平“正负”变化主要反映了暖冷的更迭。

1850 年之前年轮  $\delta^{13}\text{C}$  (冷暖)的变化可分为 5 个阶段:从 1560 年开始,年轮  $\delta^{13}\text{C}$  逐渐变负(气候逐渐变冷),在 1590 年  $\delta^{13}\text{C}$  值达到较低(气候较冷),随后在其附近波动持续到 1710 年,从 1710 年到 1740 年再到 1800 年再到 1850 年,年轮  $\delta^{13}\text{C}$  也随之由变正(暖)到变负(冷)再变正(暖)期间虽有小的温度回落,但温暖一直是其主要特征(图 1)。

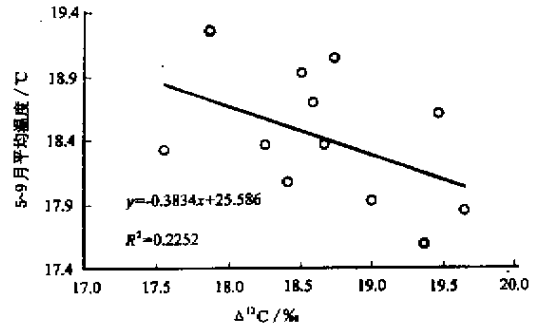


图 2 树轮与 59 月平均温度的关系

Fig.2 Relationship between tree-ring and average temperature of May to September

图 3 显示了阿勒泰树轮  $\delta^{13}\text{C}$  与青海都兰序列<sup>[14]</sup>之间存在较好的对应关系( $R^2 = 0.2816$ ,  $p < 0.002$ )。姚檀栋等<sup>[15]</sup>对古里雅冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录研究表明,16 世纪末至 17 世纪初,气候由冷变暖,18 世纪初气温迅速回升,此后温暖气候是 18 世纪的主要特征。这与本文中所反映的冷暖变化基本相似。对比敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录<sup>[16]</sup>、华北地区温度曲线<sup>[1]</sup>和格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  曲线<sup>[17]</sup>,发现它们之间大致同步的波动,如后三者基本上均显示,17 世纪以冷期为主要特征,而 18 世纪以暖期为主要特征(图 4)。说明了小冰期在本树轮  $\delta^{13}\text{C}$  存在的可信性。

从图 1 中还可以看出,1590—1730 年本序列中  $\delta^{13}\text{C}$  值整体上处于最低期,比 1550—1850 年的平均值偏低约  $0.32\text{‰}$ 。根据已发表的文献关于针叶树的年轮  $\delta^{13}\text{C}$  的温度系数(主要在  $0.130\text{--}0.48\text{‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  之间变化,需要指出的是,这里只考虑温度对树轮的影响为正影响时的情况)<sup>[10]</sup>,如果忽略年轮  $\delta^{13}\text{C}$  对气候响应的地区差异,本序列中  $0.32\text{‰}$  的降低相当于气温降低约  $0.672\text{--}0.46^\circ\text{C}$ 。张振克等<sup>[2]</sup>综述了中国不同历史记录(包括历史文献、树木年轮、冰芯和湖泊沉积)所揭示的小冰期气候特征,指出 17 世纪(中叶)为小冰期最寒冷的阶段,青藏高原、西北干旱区和中国东部地区年平均温度比现今低  $12^\circ\text{C}$ 。这与本文的估计基本一致。

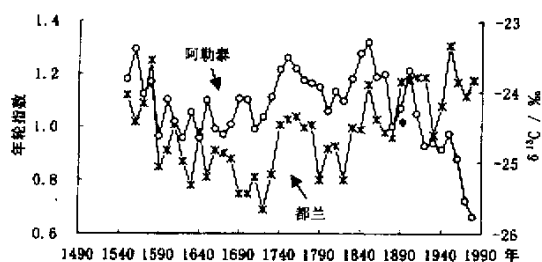


图3 新疆阿勒泰树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列与青海都兰树轮宽度指数年表<sup>[14]</sup>的比较

Fig.3 Comparison of tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  series in Altay Prefecture of Xinjiang Region with tree-ring width index of Dulan County of Qinghai Province

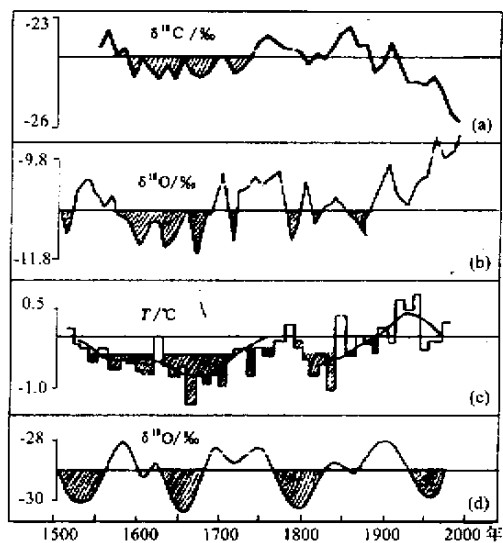


图4 新疆阿勒泰地区树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列所揭示的小冰期气候特征及与其它地区的比较

a. 阿勒泰地区树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列; b. 敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  曲线<sup>[16]</sup>;  
c. 华北温度距平<sup>[21]</sup>; d. 格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  曲线<sup>[17]</sup>

Fig.4 Climatic features of the Little Ice Age disclosed by treering series in Altay Prefecture of Xinjiang Region

## 4 讨论

作为2 000 a BP 来气候环境中两个主要事件之一,小冰期在中国各地都有存在的证据. 从以上分析可以看出,小冰期的信息同样包含在阿勒泰树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列中,主要表现为年轮  $\delta^{13}\text{C}$  在小冰期期间更加偏负. 其作用机制可能是小冰期期间树木生长季平均温度低于通常树木的光合作用最适温度,因而抑制树木光合羧化酶的活性,降低其光合速率,导致树木内部  $\text{CO}_2$  浓度升高,树木对  $^{13}\text{CO}_2$  的识别能力也随之增强,树木  $\delta^{13}\text{C}$  值更负. 低温使得树轮  $\delta^{13}\text{C}$  更负在其它许多树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列中也有发现. 另外,小冰期的“低温”可能影响了全球性碳循环. 有报道指出,在 1600—1800 年期间,大气  $\text{CO}_2$  浓度降低了约  $6 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[18]</sup>. 由 Farquhar *et al.*<sup>[14]</sup> 的理论

可知,这也会引起更低的年轮  $\delta^{13}\text{C}$ . 根据已报道的年轮  $\delta^{13}\text{C}$  温度系数估算,小冰期的温度降低了约  $0.672.46^\circ\text{C}$ . 这个值跟 Lipp *et al.*<sup>[19]</sup> 利用树轮  $\delta^{13}\text{C}$  序列恢复的温度降低幅度基本一致(约  $1.6^\circ\text{C}$ ).

## 参考文献 (References):

- [1] Wang Shaowu, Wang Risheng. Little Ice Ages in China [J]. Chinese Sciences Bulletin, 1990, **35** (10): 769–772. [王绍武, 王日. 中国的小冰期河 [J]. 科学通报, 1990, **35** (10): 769–772.]
- [2] Zhang Zhenke, Wu Ruijin. Climatic changes of Little Ice Age and its social effects in China [J]. Exploration of Nature, 1999, **67** (1): 66–70. [张振克, 吴瑞金. 中国小冰期气候变化及其社会影响 [J]. 大自然探索, 1999, **67** (1): 66–70.]
- [3] Kang Xingcheng, Zhang Qihua, Graumlich L J, *et al.* Reconstruction of a 1 835 a past climate for Dulan, Qinghai Province, using tree-ring [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22** (1): 65–72. [康兴成, 张其花, Graumlich L J, 等. 利用树轮资料重建青海都兰地区过去 1 835 年的气候变化 [J]. 冰川冻土, 2000, **22** (1): 65–72.]
- [4] Kang Xingcheng, Zhang Qihua. The growing period of cypress in high elevation area of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23** (2): 149–155. [康兴成, 张其花. 青藏高原高海拔地区柏树生长季节的探讨 [J]. 冰川冻土, 2001, **23** (1): 149–155.]
- [5] Chen Tuo, Qin Dahe, Li Jiangfeng, *et al.* Response of  $\text{CO}_2$  concentration parameters and water-use efficiency derived from tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  series to atmospheric  $\text{CO}_2$  increase [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23** (1): 41–45. [陈拓, 秦大河, 李江风, 等. 从树轮纤维素  $\delta^{13}\text{C}$  序列看树木生长对大气  $\text{CO}_2$  浓度变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2001, **23** (1): 41–45.]
- [6] Yuan Yujiang, Ye Wei, Dong Guangrong. Reconstruction and discussion of 314 a precipitation in Yili Prefecture, Western Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22** (2): 121–127. [袁玉江, 叶玮, 董光荣. 天山西部伊犁地区近 314 a 降水的重建与分析 [J]. 冰川冻土, 2000, **22** (2): 121–127.]
- [7] Chen Tuo, Qin Dahe, Li Jiangfeng, *et al.* Study on significance of fir tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  from Zhaosu County of Xinjiang Region, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22** (4): 347–350. [陈拓, 秦大河, 李江风, 等. 新疆昭苏云杉树轮纤维素  $\delta^{13}\text{C}$  的气候意义 [J]. 冰川冻土, 2000, **22** (4): 347–350.]
- [8] Fritts H C. Tree Rings and Climate [M]. London: Academic Press, 1976. 55–245.
- [9] Li Jiangfeng, Yuan Yujiang, Zhang Zhijia, *et al.* Response functions for tree-ring chronologies in Altai Mountain [A]. Study of Tree-Ring Climatology and Tree-Ring Hydrology in Xinjiang [C]. Beijing: Meteorological Press, 1989. 152–159. [李江风, 袁玉江, 张治家, 等. 阿尔泰山树木年轮年表的响应函数 [A]. 新疆年轮气候年轮水文研究 [C]. 北京: 气象出版社, 1989. 152–159.]
- [10] Chen Tuo, Qin Dahe, Kang Xingcheng, *et al.* Progress and prospect in tree-ring carbon isotope research [J]. Exploration of Nature, 1999, **67** (1): 59–65. [陈拓, 秦大河, 康兴成, 等. 树轮稳定碳同位素的研究现状及前景 [J]. 大自然探索, 1999, **67** (1): 59–65.]
- [11] Krishnamurthy R V. Implications of a 400 year tree ring based  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  chronology [J]. Geophysical Res. Letter, 1996, **23**: 371–374.
- [12] 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 [ J ]. Aust. J. Plant Physiol. , 1982 , **9** : 121 – 137 .
- [ 13 ] Hemming D L , Switsur V R , Waterhouse J S , *et al.* Climate variation and the stable carbon isotope composition of tree-ring cellulose : an intercomparison of *Quercus robur* , *Fagus sylvatica* and *Pinus silvestris* [ J ]. Tellus , 1998 , **50B** : 25 – 33 .
- [ 14 ] Kang Xingcheng , Graumlich L J , Sheppeud P . The last 1835 years climatic changes inferred from tree-ring records in Dunlan regions , Qinghai , China [ J ]. Quaternary Sciences , 1997 , **17** ( 1 ) : 70 – 75 . [ 康兴成 , Graumlich L J , Sheppeud P . 青海都兰地区 1835 年的气候变化 [ J ]. 第四纪研究 , 1997 , **17** ( 1 ) : 70 – 75 . ]
- [ 15 ] Yao Tandong , Jiao Keqin , Yang Zhihong , *et al.* Climatic variations since Little Ice Age recorded in the Guliya ice core [ J ]. Science in China ( B Series ) , 1995 , **25** ( 10 ) : 1 108 – 1 114 . [ 姚檀栋 , 焦克勤 , 杨志红 , 等 . 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化 [ J ]. 中国科学 ( B 辑 ) , 1995 , **25** ( 10 ) : 1 108 – 1 114 . ]
- [ 16 ] Yao Tandong , Xie Zichu , Wu Xiaoling , *et al.* The Little Ice Age as recorded by the Dunde Ice Cap [ J ]. Science in China ( B Series ) , 1990 , **20** ( 11 ) : 1 196 – 1 201 . [ 姚檀栋 , 谢自楚 , 武筱龄 , 等 . 德冰帽中的小冰期气候记录 [ J ]. 中国科学 ( B 辑 ) , 1990 , **20** ( 11 ) : 1 196 – 1 201 . ]
- [ 17 ] Dansgaard W . One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheets [ J ]. Science , 1969 , **165** : 561 – 578 .
- [ 18 ] Etheridge D M , Steele L P , Langenfelds R L , *et al.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn [ J ]. Journal of Geophysical Research , 1996 , **101** ( D2 ) : 4 115 – 4 128 .
- [ 19 ] Lipp J , Trimbom P , Fritz P , *et al.* Stable isotopes in tree ring cellulose and climatic change [ J ]. Tellus , 1991 , **43B** : 322 – 330 .

## Tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Little Ice Age in Altay Prefecture of Xinjiang Region

CHEN Tuo<sup>1</sup> , QIN Da-he<sup>1</sup> , LIU Xiao-hong<sup>1</sup> , LI Jiang-feng<sup>2</sup> , REN Jia-wen<sup>1</sup> , SUN Wei-zhen<sup>1</sup>

( 1 . Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environments , CAREERI , CAS , Lanzhou Gansu 730000 , China ;

2 . Xinjiang Institute of Meteorology , Ürümqi Xinjiang 830002 , China )

**Abstract** : Increasing concern on future climate changes and their potential impacts on mankind prompts scientists to explore a variety of historical and natural archives that can infer the past climate changes . Of the various land-based short-term palaeoclimatic indicators , tree rings offer a great promise because of their high resolution ( 1 year or less ) . In this context , ring width , ring density and stable isotope ratios of tree ring have been studied for possible climatic correlations . The  $\delta^{13}\text{C}$  values in annual growth rings of trees should represent a high resolution record of  $\delta^{13}\text{C}$  values of atmospheric CO<sub>2</sub> , or physiological response of plant relating to climatic and environmental changes or a combination of both . There is currently an expectation that  $\delta^{13}\text{C}$  values in tree rings could be less sensitive to random effects than radial growth . So a ca 450-year chronol-

ogy of tree-ring stable carbon isotope was developed from *Larix sibirica* in the Altay County of Xinjiang Region . A rapidly decreasing trend , the most dramatic isotopic event in the chronology , has appeared since 1850 , which was attributed to combustion of fossil fuel and change in land use . From 1550 to 1850 , there were obvious changes of tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  or temperature in the chronology : Tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  or temperature was lower in the whole 17<sup>th</sup> Century while was higher during the 18<sup>th</sup> Century . Using the available temperature coefficient of tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  , a decrease of 0.672.46 °C in the 17<sup>th</sup> Century is found . All kinds of evidence from different regions showed that the temperature changes of the Little Ice Age disclosed by the tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  chronology were reliable .

**Key words** : tree ring ; carbon isotope composition ; Little Ice Age