

从树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列中提取大气 $\delta^{13}\text{C}$ 信息的可行性研究陈 拓^{1,2}, 秦大河¹, 何元庆¹, 李江风³, 刘晓宏¹, 任贾文¹

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

²兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; ³新疆气象科学研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 工业革命以来化石燃料的大量使用和森林的过度砍伐, 引起大气 CO_2 浓度大幅度增加, 但同时由于“Suess”效应, 大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值却在不断下降。研究大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化历史, 不仅有助于预测其今后的趋向, 而且可以用来了解碳循环的自然变率和校正全球碳预算模型。由于直接的仪器测量从 1978 年才开始, 因此便产生了各种各样的替代方法。利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建古大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化就是其中的一种, 但树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值容易受到外界环境因子的影响, 从树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值中得到的大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在很大的差异。本文分析了树木生长季 (5—9 月) 温度和降水对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值序列变化趋势的影响。结果表明, 温度和降水对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的趋势变化没有明显的影响, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值近几十年来下降的趋势主要反映的是大气 CO_2 浓度的增加引起的“Suess”效应。但自然灾害的发生和树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的边材效应可以改变这种结果, 如新疆昭苏树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值和年轮宽度分别在 1969 年和 1967 年突然升高以及青海祁连树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 1990 年后上升。

关键词: 树轮; $\delta^{13}\text{C}$ 值; 趋势; 自然灾害; 边材效应

中图分类号: P597.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2002)04-0079-05

海洋、大气圈和生物圈有不同的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 值), 它们彼此之间碳的重新分布将伴随 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化。例如, 由于植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值远低于海洋和大气圈 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 所以当碳从陆地生物圈净流向海洋或大气圈时, 海洋或大气圈的 $\delta^{13}\text{C}$ 值将变得更负, 而这样的一种变化能为气候等自然事件或人类活动 (如化石燃料的燃烧、去森林化等) 所驱动。对大气圈中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的偏移程度的准确了解有助于弄清自然变化和人类活动的影响程度, 以及全球碳循环方式。然而, 大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的直接仪器测量从 1978 年才开始, 且只是对全球零星站点进行测量, 缺乏长期和系统性的资料^[1]。冰心气泡中大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值分析较好地提供了有益的信息, 但提供的序列往往不连续, 特别是年代越古老, 分辨率越低^[2]。由于树轮具有定年精确、分辨率高、连续性好等特点, 从树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值年表中提取关于大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的演变信息是它的一个重要目标^[3-5]。近年来, 在全球范围内建立了大量的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值年表, 其中大多数年表的一个共同特点

是: 自 20 世纪中叶以来, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降了约 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ ^[5], 但也存在一些不同的结果, 如 Francey^[6] 在 7 棵 Tasmania 树中没有观察到任何趋势; Hemming 等^[7] 的结果显示, 近 100 a 树轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 反而有稍微升高的迹象。因此, 笔者研究了新疆昭苏县和青海祁连县两个树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值近 50 a 来的变化趋势, 着重探讨外界环境因子对从树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值恢复大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的干扰。

1 样品采集和处理

实验所用样品的具体情况见表 1。样品的处理和分析见文献 [8]。稳定碳同位素组成的测量结果以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 表示:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = \left[\left(\frac{{}^{13}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_{\text{样品}} - \left(\frac{{}^{13}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_{\text{标准}} \right] / \left(\frac{{}^{13}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_{\text{标准}} \times 1000$$

2 结果与分析

2.1 新疆昭苏县树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年表的特点

从图 1a 可以看出, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以划分为两个阶段: 1956—1969 年 $\delta^{13}\text{C}$ 值快速下降阶段 (年变率为 -0.089‰/a), 1969 年后 $\delta^{13}\text{C}$ 值上升

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (CX-10-06, CX1-10-07); 中国科学院冰心与环境开放实验室知识创新工程项目 (210506); 中国博士后基金项目

作者简介: 陈 拓 (1971—), 男, 博士, 主要从事树木年轮稳定同位素研究, E-mail: chentu@ns.lzb.ac.cn

收稿日期: 2002-04-03 修回日期: 2002-09-02 文凤英编辑

阶段(年变率为+ 0.038‰/a)。由于1969年前后树木生长季(5—9月)降水没有明显的变化趋势(图1b),所以这里认为它对1969年前后树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响不大。生长季温度在1969年前后有明显的变化(图1c),温度由1969年的12.1℃快速上升到1977年的13.2℃,年变化速率为0.15℃/a。根据表2给出的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 温度系数,生长季温度0.15℃/a的年变率将导致树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值每年增加0.045‰。因此,本文中所显示的0.12‰/a如此大的逆转不可能完全是温度影响的结果。

图1d显示,树木年轮宽度以1967年为界,1967年前树木年生长量逐渐减小(年变率为-0.039 mm/a),而1967年后树木年生长量急速增加(年变率为+0.074 mm/a)。考虑到昭苏地区树木生长的主要限制因子是降水量^[8,9],温度的升高将导致地表

水的蒸发量增大,既然这里的降水没有明显的增加趋势,树木受到的水分胁迫将更为严重,从而导致树木的生长受到限制。这可以解释1967年前树轮宽度年增长量的减小。1967年后树木生长的加快可能是人类活动或自然灾害(如火灾、雷电、大风)的结果。由于自然灾害或人类的砍伐,使得该树木受周围其它树木的影响降低,甚至为零,具体表现为:一方面树木之间对养分、水分的竞争消失,使得该树可以获得更多的养分和水分;另一方面,林冠遮光的消除,使得该树可以充分利用光能,合成更多的有机物来满足树木生长的需要。根据本文作者之一的介绍,在所采树木周围,并没有见人类砍伐的痕迹,所以树轮宽度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别在1967年和1969年的变异可能反映的是自然灾害事件的发生。

表 1 树轮样品的基本情况

Table 1. The fundamental conditions of tree-ring samples

地名	树种	北纬	东经	海拔/m	树龄/a	树径/cm	采集日期
青海祁连县	<i>Picea crassifolia</i>	38°51′	100°08′	2 100	193	131	1997-07-18
新疆昭苏县	<i>Pinus schrenkiana</i>	43°42′	81°24′	2 250	294	76	1982-08-22

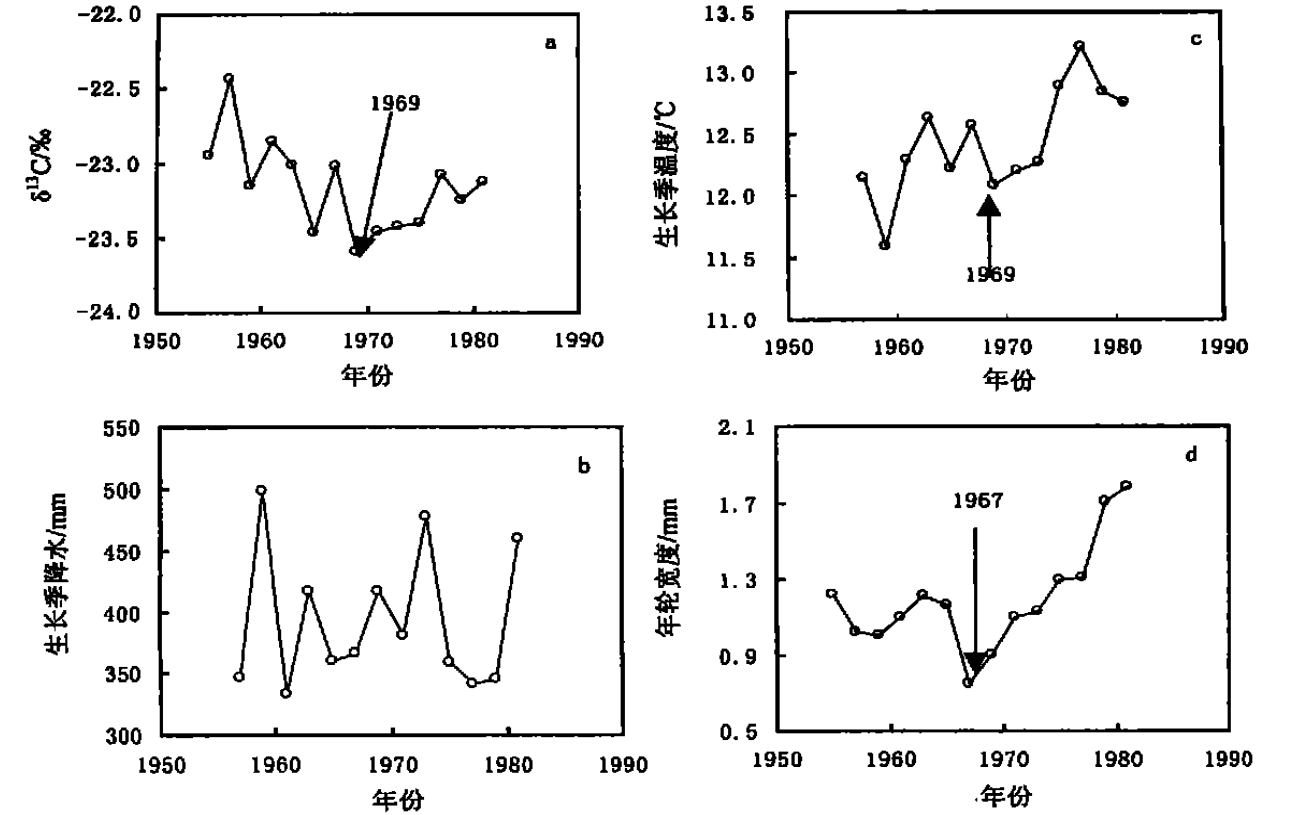


图 1 新疆昭苏树轮 $\delta^{13}\text{C}$ (a)、生长季降水(b)、生长季温度(c)与年轮宽度(d)随时间的变化

Fig. 1 The temporal changes of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ (a), precipitation(b), temperature(c) of May to September and tree-ring width (d) from Zhaosu County of Xinjiang

表 2 已报道的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 温度系数

Table 2. The reported temperature coefficient of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values

树木种类	$\Delta \delta^{13}\text{C} / \Delta T$ ($\text{‰} / \text{°C}$)	资料来源
<i>Quercus</i>	0.27~ 0.39	Tans and Mook, 1980
<i>Pinus</i>	0.18	Freyer and Belacy, 1983
<i>Coniferæ</i>	0.32	Stuiver and Braziunas, 1987
<i>Diphotaxis enucoides</i>	0.33	Schleser et al., 1989
<i>Coniferæ</i>	0.33	Lipp et al., 1991
<i>Pinus silvestris</i>	0.35	Hemannn, 1993
<i>Fagus sylvatica</i>	0.25	Dupouey et al., 1993
<i>Fagus sylvatica</i>	0.34~ 0.36	Saurer et al., 1995
<i>Quercus robur</i>	0.35	Robertson et al., 1997
<i>Quercus robur</i>	0.22	Robertson et al., 1997
平均	0.30	

2.2 青海祁连县树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年表的特点

图 2a 显示,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值除在 1990 年后略为升高外,均呈现明显下降的趋势,其下降速率为

0.047‰/a 生长季降水和温度分别在 356.0 mm 和 10.1 °C 附近波动,没有表现出任何明显的趋势(图 2b 2c)。根据 Leavitt 等^[10]的观点,如果气候因子不具长期趋势,气候的改变只会引起树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高频变化。树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与降水和温度的不相关说明了这点。

树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值后期升高在钱君龙等^[11]的研究中也有发现,是否也象昭苏树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列一样在后期受到了外界环境的干扰? 图 2d 显示,树木年轮宽度在所研究时段内没有异常波动,因此,可以排除人类活动或自然灾害的影响。初步认为这可能与树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的边材效应有关。

3 讨论与结论

化石燃料的大量使用和森林的过度砍伐,引起大气 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的明显变化。在大气 CO_2 浓度从 1956 年的 314.1 $\mu\text{L/L}$ 升高到 1989 年的 351.0 $\mu\text{L/L}$ 的同时,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也从 -6.69‰ 降低到 -7.85‰(图 3)。植物是大气 CO_2 循环的参与者,

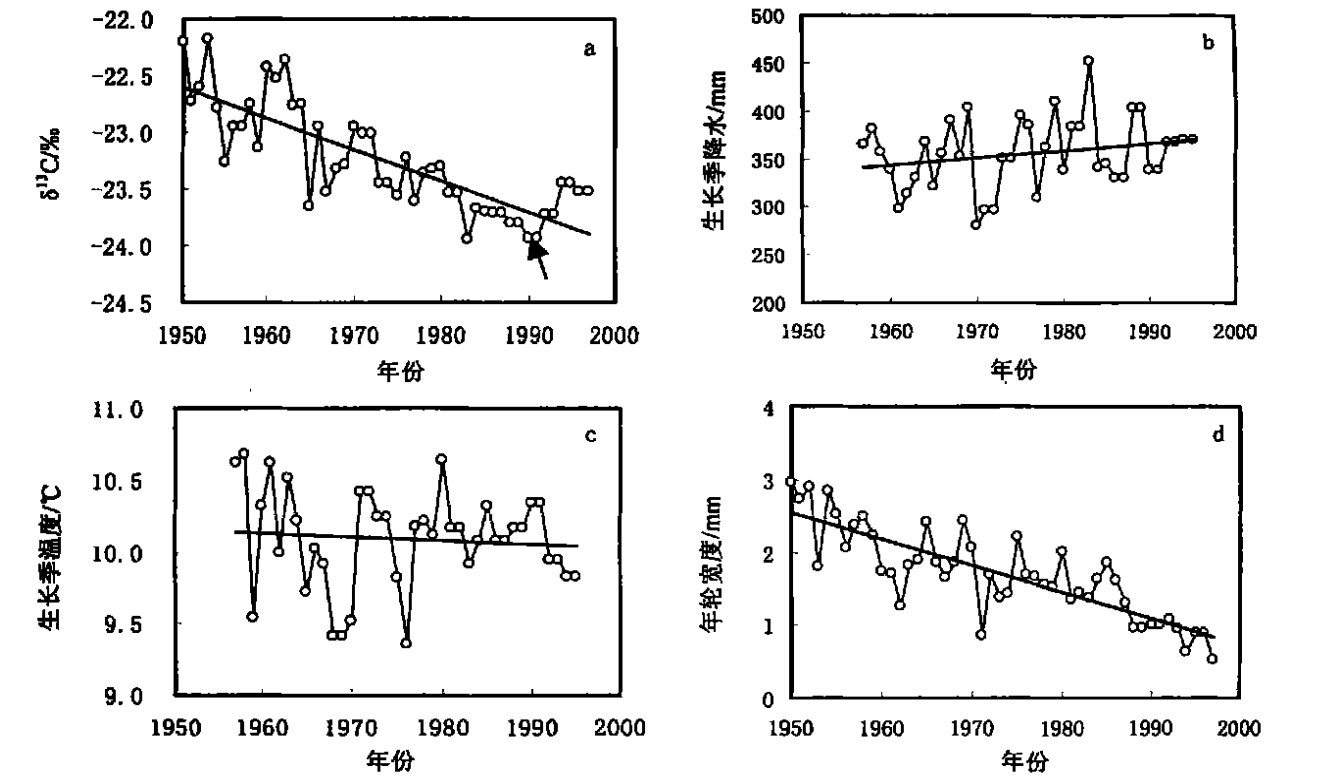


图 2 青海祁连树轮 $\delta^{13}\text{C}$ (a)、生长季降水(b)、生长季温度(c)与年轮宽度(d)随时间的变化
Fig. 2 The temporal changes of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ (a), precipitation(b), temperature(c) and tree-ring width(d) of May to September from Qilian County of Qinghai

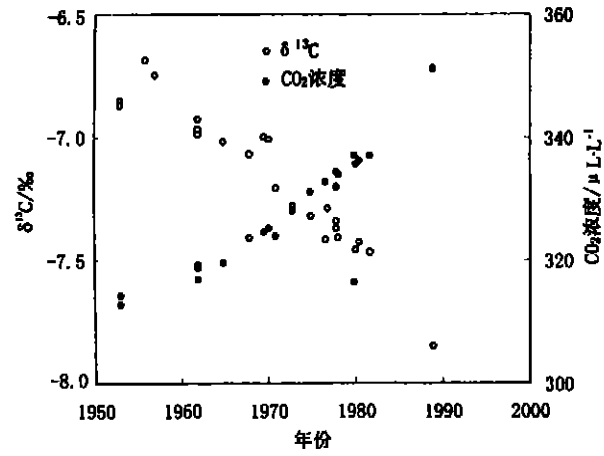


图 3 大气 CO₂ 浓度及其 δ¹³C 值的时间变化

Fig. 3 The temporal changes of the concentration and δ¹³C values of atmospheric CO₂

植物可以利用光能将大气 CO₂ 合成有机物,从而将大气 CO₂ 的信息储存下来。本研究中昭苏和祁连两个树轮 δ¹³C 值年表分别在 1969 年和 1990 年之前的降低趋势可能是这一现象的反应。从理论上讲,植物 δ¹³C 值 (δ¹³C_p) 和大气 δ¹³C 值 (δ¹³C_a)、植物内部 CO₂ 浓度 (C_i) 与大气 CO₂ 浓度 (C_a) 之比 (C_i/C_a) 之间有如下关系^[12]:

$$\delta^{13}C_p = \delta^{13}C_a - a - (b - a) C_i / C_a \tag{2}$$

其中 *a* 为大气 CO₂ 通过叶片边界层和气孔向叶内扩散的碳同位素分差 (4.4‰), *b* 为在固定过程中对 ¹³CO₂ 的判别值 (2.7‰)。因为树木在进行气体交换过程中普遍存在一种自动均衡调节功能,从而使得 C_i/C_a 不易随环境气候条件的变化而有较大的波动^[13]。Wong 等^[14]和孙谷畴等^[15]在控制条件实验中的结果证明了这点。本文对昭苏和祁连两个树轮 δ¹³C 年表的分析也排除了气候对树轮 δ¹³C 值长期趋势的影响。因此,从树轮 δ¹³C 序列中提取大气 δ¹³C 信号是可行的,但树木的生长容易受到一些突发事件的干扰,如昭苏树轮宽度年增长量和 δ¹³C 值分别在 1967 年和 1969 年出现了异常现象,这也许是有些树轮 δ¹³C 值没有表现出自工业革命以来大气 δ¹³C 值下降趋势的原因。因此,我们在采样时应该根据我们的目的慎重选择树木。另外,在利用树轮 δ¹³C 值提取大气 δ¹³C 值信息时也得考虑树轮 δ¹³C 值变化的边材效应。

参 考 文 献

[1] Keeling C D, Bacastow R B, Carter A F, et al. A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds. 1. Analysis of observational data. Aspects of climate variability in the Pacific and the Western America [J]. *Geophys. Monogr.*, 1989, 55: 165–236.

[2] Francey R J, Allison C E, Etheridge D M, et al. A 1000-year high precision record of δ¹³C in atmospheric CO₂ [J]. *Tellus*, 1999, 51B: 170–193.

[3] Feng X, Epstein S. Carbon isotopes of trees from arid environments and implications for reconstructing atmosphere CO₂ concentration [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 2599–2608.

[4] Freyer H D, Belacy N. ¹³C/¹²C records in northern hemispheric trees during the past 500 years—anthropogenic impact and climatic superpositions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 6844–6852.

[5] Leavitt S W. South American tree rings show declining trend [J]. *Tellus*, 1994, 46B: 152–157.

[6] Francey R J. Tasmanian tree rings belie suggested anthropogenic ¹³C/¹²C trend [J]. *Nature*, 1982, 290: 232–235.

[7] 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.

[8] 陈拓,秦大河,李江风,等.新疆昭苏云杉树轮纤维素 δ¹³C 的气候意义 [J]. *冰川冻土*, 2000, 22: 347–350.

[9] 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: 121–127.

[10] Leavitt S W, Long A. Stable carbon isotope chronologies from trees in the southwestern United States [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1988, 2: 189–198.

[11] 钱君龙,吕军,屠其璞,等.用树轮 α-纤维素 δ¹³C 重建天目山地区近 160 年气候 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31: 333–341.

[12] Farquhar G D. 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] Marshall J D, Monserud R A. Homeostatic gas-exchange parameters inferred from ¹³C/¹²C in tree rings of conifers [J]. *Oecologia (Berlin)*, 1996, 105: 13–21.

[14] Wong S C, Cowan I R, Farquhar G D. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity [J]. *Nature*, 1979, 282: 424–426.

[15] 孙谷畴,林植芳.亚热带常绿阔叶林树木年轮的 ¹³C/¹²C 和空气 CO₂ 浓度变化 [J]. *应用生态学报*, 1992, 3: 291–295.

STUDY ON THE FEASIBILITY OF EXTRACTING INFORMATION
ON $\delta^{13}\text{C}$ OF ATMOSPHERIC CO_2 FROM TREE-RING $\delta^{13}\text{C}$

CHEN Tuo^{1,2}, QIN Da-he¹, HE Yuan-qing¹, LI Jiang-feng³, LIU Xiao-hong¹, REN Jia-wen¹
(¹The Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environments, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering
Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

²National Laboratory of Western China's Environmental Systems, MOE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

³Xinjiang Institute of Meteorology, Urumqi 830002, China)

Abstract The most striking change in the atmosphere is the increase of CO_2 attributed to industrial emission and land-use change. Both perturbations influence the atmospheric stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$ values). Due to the difference of $\delta^{13}\text{C}$ values between atmosphere, ocean and terrestrial biosphere, atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ values can be used to partition the uptake of anthropogenic emission carbon between oceanic and terrestrial reservoirs. They can also be used in studies of natural variability in the carbon cycle and in calibrating global carbon budget models. The detection of anthropogenic signature in atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ values was first reported by Keeling et al. in 1979 and significant calibration problems exist. There have been several successful attempts to detect the atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ signal on centennial time scales via the $\delta^{13}\text{C}$ values in tree rings. The advantage of using tree rings for this purpose is the excellent dating and yearly time resolution over centennial to millennial time scales. However, due to the effects of environmental factors on tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values, the available data about atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ using tree rings indicate considerable differences. In this paper, the effects of temperature and precipitation of May to September on the trends of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values respectively from Zhaosu County of Xinjiang and Qilian County of Qinghai were studied. The results showed that there were no significant effects of temperature and precipitation on the trends of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values, and that the changes of atmospheric CO_2 and its $\delta^{13}\text{C}$ values were the primary reasons why tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values became lower and lower. However, the phenomenon could be changed by natural disaster, for example, only natural disaster could explain the abrupt increase in tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values and width in Zhaosu County of Xinjiang from 1969 to 1967, while the increase in tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values in Qilian County of Qinghai might be caused by sapwood effect.

Key words tree rings; $\delta^{13}\text{C}$ values; natural disaster; sapwood effect