

利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建大气 CO_2 浓度序列*

吕 军¹⁾ 屠其璞²⁾ 钱君龙³⁾

¹⁾ (江苏省气象台, 南京 210008)

²⁾ (南京气象学院, 南京 210044)

³⁾ (中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

目前,关于大气 CO_2 浓度的研究是科学界所热衷的问题,而树轮中碳同位素能反映树木生长时大气中的 CO_2 浓度,因此用测定树轮中碳同位素组成的方法已成为对大气 CO_2 进行研究的重要手段^[1,2]。

众所周知,自工业革命以来,大气 CO_2 浓度迅速增加,相应的 $\delta^{13}\text{C}$ 减小,其主要原因是由于化石燃料的大量燃烧向大气中排放了大量的 CO_2 所致。大气 CO_2 浓度的增加必然对树木的生长产生影响,树轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 很好地记录了 CO_2 浓度的增加趋势。

本文利用采自于我国西天目山的柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列,通过分析其变化趋势,重建了近百年来大气 CO_2 浓度时间序列,为分析过去大气 CO_2 浓度变化以及气候变化状况提供了可靠的依据。

1 大气 CO_2 浓度对树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响

在全球碳循环中,大气圈 CO_2 浓度及其同位素组成是不断变化的。植物光合作用在同化大气 CO_2 ($^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$) 形成纤维素时,由于 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$ 质量数的差异,会产生碳同位素分馏。生长于大气中的树木在生长过程中形成树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 将此过程记录在案^[3]。植物固定 CO_2 及随后其碳化合物进入生长的年轮是用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列重建大气 CO_2 碳同位素比的理论基础。

影响树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的因素主要分为两类:气候因素和大气因素。已有许多研究表明树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与环境温度、湿度、降水量等气候要素有密切关系^[4]。大气因素中最重要的是大气 CO_2 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 。树木所需要的 CO_2 主要来自开放大气中的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为 $(7 \sim 8) \times 10^{-3}$ 。自工业革命以来,大量化石燃料 CO_2 (其 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值约为 -25×10^{-3}) 的排放使大气圈 CO_2 浓度持续增加。因此,大量化石燃料 CO_2 (贫 $^{13}\text{CO}_2$) 的排放势必改变大气 CO_2 的同位素组成,导致其 $\delta^{13}\text{C}$ 值不断减小,而树木通过光合作用将大气 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征很好地存储于树轮中,使得树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 也有着自工业革命以来的下降趋势,且与大气 $\delta^{13}\text{C}$ 有着固定的差异和基本一致的变化趋势,这也是我们利用树木年轮同位素来重建大气 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的基本依据。

2 数据分析与计算

本研究选择了中国东部西天目山林区柳杉树种。CF-1 和 CF-3 树盘分别采自于西天

* 本文由国家自然科学基金项目(No:49771001)资助。

2000-05-22 收到,2001-02-30 收到修改稿。

目山狮子口和老殿地区。通过交叉定年技术,确定树龄分别为 176 年(1822~1997 年)和 151 年(1833~1983 年)。稳定碳同位素分析经过雕刻、抽提、氯化作用和碱洗等流程后,产生供质谱分析的 CO_2 气体,最后,将收集到的 CO_2 在 MAT-252 型质谱仪上测得树轮的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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 10^{-3} ,分析误差小于 0.2×10^{-3} 。

图 1 为 CF-1 和 CF-3 两株柳杉逐年年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析结果(其中已去除受幼龄效应影响的年份,最终取两树共有的时段 1870~1982 年数据进行分析)。从图中可以看出,两者具有基本一致的变化特征,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。其中很明显看出近百年来 $\delta^{13}\text{C}$ 的下降趋势。

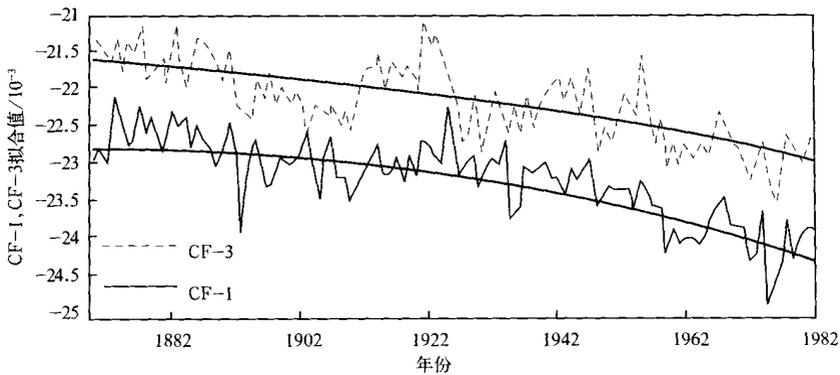


图 1 树轮 CF-1, CF-3 拟合序列

将 CF-1 和 CF-3 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列分别进行二次多项式拟合分析,以提取其长期下降趋势,结果如下:

CF-1 拟合方程为(其中 δ 为树轮 $\delta^{13}\text{C}$; y 为年份):

$$\delta_1 = -458.868 + 0.4651 y - 1.24017 \times 10^{-4} y^2 \quad (1)$$

CF-3 拟合方程为:

$$\delta_3 = -205.691 + 0.2019 y - 5.53252 \times 10^{-5} y^2 \quad (2)$$

结果如图 1 中粗实线所示,从图中可以看出,两棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列有着基本一致的下降趋势,而这下降正是由于大气 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的下降所致。

实测大气中 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值约为 -7×10^{-3} ,而树轮 CF-1 和 CF-3 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 -23.18×10^{-3} , -22.13×10^{-3} 。因此,我们可以利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与大气 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的差值来重建大气 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化情况。将拟合方程(1)中的 δ_1 加上 16.18×10^{-3} (即 -23.18×10^{-3} 与 -7×10^{-3} 的差),拟合方程(2)中 δ_3 加上 15.13×10^{-3} (即 -22.13×10^{-3} 与 -7×10^{-3} 的差),得到用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列重建的近百年来大气 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化。

工业革命以后,大量化石燃料 CO_2 (贫 ^{13}C) 的排放改变了大气 CO_2 的同位素组成,使得大气 CO_2 的浓度与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的变化呈反向相关关系,这种关系并不是完全线性的。利用在南极等地实测的大气 CO_2 浓度值(ρ)及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[5],我们用二次多项式拟合得两者间关系为(其中 δ 为大气 $\delta^{13}\text{C}$):

$$\rho = 544.785 + 105.977 \delta + 10.3449 \delta^2 \quad (3)$$

通过此拟合方程,我们可以代入式(1)和式(2),计算得出大气 CO_2 浓度。图 2 即为分别由树轮 CF-1 和 CF-3 $\delta^{13}\text{C}$ 重建出的自 1870 年之后的大气 CO_2 浓度序列,其中 Δ 为在南极冰芯及大气直接测量所得的大气 CO_2 浓度。从图 2 可见,重建值与实测值吻合的很好。此外,从图中还可以看出,将两个重建序列从 1982 年延长至 2000 年,其值与实测大气 CO_2 浓度值仍然十分相近,因此重建序列可以较好的预测未来几十年的大气 CO_2 浓度变化。

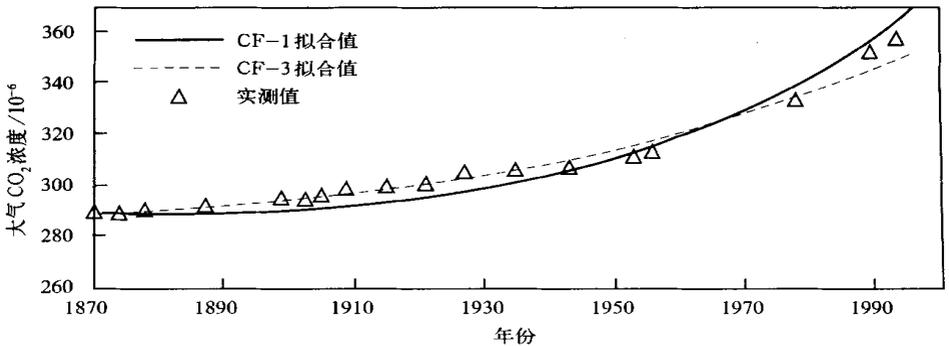


图 2 树轮 CF-1,CF-3 重建大气 CO_2 序列

3 结果分析

由本文研究结果可知,用树轮重建大气 CO_2 浓度的变化,效果比较好,但由于采用的是拟合法,因而主要反映的是大气 CO_2 浓度的长期变化趋势,没有很好的反映出 CO_2 浓度的年际变化,其原因主要是气候要素对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的年际变化影响很大,尤其是气温和降水的影响最明显,因而增加了研究大气 CO_2 浓度年际变化的困难。此外,古树年轮资源来之不易,再加上 $\delta^{13}\text{C}$ 的提取花费很大,使得研究中所用的样本较少,因而若能获得较多的样本,则对进一步研究大气 CO_2 浓度的年际变化帮助很大。

参考文献

- 1 Stuiver M, Burk R L, Quay P D. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tree rings and the transfer of biogenic carbon to the atmosphere. *Jour. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 11737 ~ 11748.
- 2 李正华, 刘荣谟, 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.
- 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 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. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D16): 507 ~ 516.
- 5 Friedli H, Lotscher H, Oeschger, 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.