

广东现代樟树树轮纤维素的碳同位素 与厄尔尼诺事件的关系

孙艳荣¹⁾ 崔海亭²⁾ 穆治国¹⁾ 刘鸿雁²⁾ 李平日³⁾ 刘玉琳¹⁾ 谭惠忠³⁾

(1)北京大学物理学院,北京,100871;2)北京大学地理中心,北京,100871;
3)广州地理研究所,广东 广州,510070)

摘 要 本文对广东阳春河的樟树树轮纤维素 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列研究发现,厄尔尼诺对树轮 C 同位素的高频变化的影响有一定的滞后性,一般是厄尔尼诺强度高峰期所对应年的下一年树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值较低。通过谱分析发现,树轮记录的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列变化中 2~3 a 周期与热带气候的“准两年振荡”(QBO)十分一致,这从另一个侧面说明了广东樟树树轮记录了大范围的 ENSO 信息。其中准 4.57 a 周期可能与影响全球气候异常的厄尔尼诺事件的周期有关,很可能就是厄尔尼诺事件引起的气候变化对树木生长影响的反映。研究表明,广东厄尔尼诺所引起的气候变化,在树轮同位素中有较好的记录。说明在热湿地区,冬季树木仍有同位素分馏,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 依然能记录冬季气温和东亚冬季风强弱变化。

关键词 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 厄尔尼诺 广东 樟树

The $\delta^{13}\text{C}$ Sequence of Cinnamomum Camphora Tree Ring α -cellulose in Yangchun County, Guangdong Province, and Its Relationship with the El Niño Event

SUN Yanrong¹⁾ CUI Haiting²⁾ MU Zhiguo¹⁾ LIU Hongyan²⁾
LI Pingri³⁾ LIU Yulin¹⁾ TAN Huizhong³⁾

(1)School of Physics, Peking University, Beijing, 100871; 2)Center of Geographic Science, Peking University, Beijing, 100871; 3)Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou, Guangdong, 510070)

Abstract The authors measured the tree ring α -cellulose $\delta^{13}\text{C}$ time series in Yangchun County, Guangdong Province. By spectrum analysis, the variation of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ sequence shows a quasi periodicity of 2~3 a, which is coincident with “quasi two-year tropic barometric oscillation” (QBO) and demonstrates that the tree ring in Guangdong Province can record large-scale information of ENSO. Quasi periodicity of 4.57 a is correlated with the global standard periodicity of El Niño. The results indicate that the high-frequency oscillation of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ sequence in this area is related to El Niño, temperature, rainfall and Asiatic monsoon. The climate change resulting from El Niño can be better recorded in isotopes of tree ring. In the warm and humid area the advantage of tree ring isotope lies in the fact that $\delta^{13}\text{C}$ can still record the effects of winter temperature and Asiatic monsoon.

Key words tree ring $\delta^{13}\text{C}$ El Niño Guangdong

全球气候变化是当前地球科学研究的一个前沿,而树轮同位素研究以其精确度高、连续性强、分辨率高及对环境波动的敏感性强等优势,已成为树木年轮学中的重要分支,是古气候研究的重要组成部分。虽然国内开展树轮研究较多,但多数年表不适合用于厄尔尼诺(El Niño)重建,因为这些年表多数来自于热带、亚热带以外的寒冷、干旱地区,受厄

尔尼诺影响不显著。因此,关于树轮与厄尔尼诺的关系研究只有少数报道(陈宝君等,2002),而国内热带地区树木年轮同位素的研究尚属空白。

许多研究表明,年轮稳定同位素与气象要素之间关系密切,而且在一些年轮宽度与气象要素之间关系不明显的地区,树轮同位素却能很好地反映气候变化(吕军等,2002)。不同地区、不同气候区、不

本文由自然科学基金项目(编号:40071082)资助。

责任编辑:宫月霞。

第一作者:孙艳荣,女,1973 年生,博士,环境地球化学专业。

同树种的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应也不同(马利民等,2001)。

树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应是一个复杂的过程,气候影响光合作用、呼吸作用等树木生理过程,从而影响有机物的生成和输移及其伴随的 C 同位素的分馏。限制性因子较强的干旱、寒冷地区,树木生长主要受降水、夏季气温等单一的或某一季节的气候要素影响;而在热带湿热地区,植物的生长条件几乎四季都能满足,因此树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候因子的关系较为复杂,相关的研究也较薄弱(马利民等,2001)。

1 样品及实验流程

在广东阳春地区共采集了 40 棵现代樟树(*Cinnamomum camphora*)的 80 个树心样品(每棵树取南北向、东西向两个正交样品)。其中 4 个用来做同位素分析,其他用来做树轮宽度定年分析。本文同位素分析用的树心样品采自广东阳春河朔,海拔 306 m,樟树胸径 0.39 m,据年轮分析,樟树树龄为 24 a,同位素样品按每年一个样。采样点地理坐标为 E111°49'99",N22°39'43"。

将定年后的样品以 5 a 为一个样剥离,并破碎至 60 目,其稳定同位素分析流程如下:

(1)挑样:从破碎好的样品中挑选用来提取纤维素的木屑,颗粒大小要合适。颗粒过大则木质素不易转化,过小则容易被漂洗走。适量,量过大则转化时间过长,导致转化失败;量过少又容易丢失。挑选合适的样品是纤维素提取的重要一步。

(2)有机试剂抽提:样品置于苯和甲醇(体积比为 1:1)混合溶液中抽提 12 h,再加入丙酮浸泡 1 h,以除去树脂、蜡和鞣质等有机物。

(3)氯化:将烘干的样品放在 100 mL 烧杯中加入蒸馏水 60 mL,在开水中沸腾 1 h,于 72 °C 恒温水浴中加热,加入 0.3 mL 冰醋酸及 0.7 mL 次氯酸钠,每隔 45 min 加入同样组分的冰醋酸和次氯酸钠,重复操作至试样变白。

(4)碱洗:用 17% 的 NaOH 浸泡 1 h(不宜过长),用蒸馏水洗涤数次,再用 10% 的醋酸浸泡 10 min,用去离子水洗涤至不显酸性,以除去半纤维素,从而获取纯净的 α -纤维素。

将获取的纤维素样品制备成供质谱仪分析用的 CO_2 气体,并在石油勘探院 MAT-252 型质谱仪上测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对于 PDB 标准。测量精度为 0.02‰。

2 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 分析结果

1978~2001 年广东阳春河 现代樟树树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列分析结果见图 1,表 1。

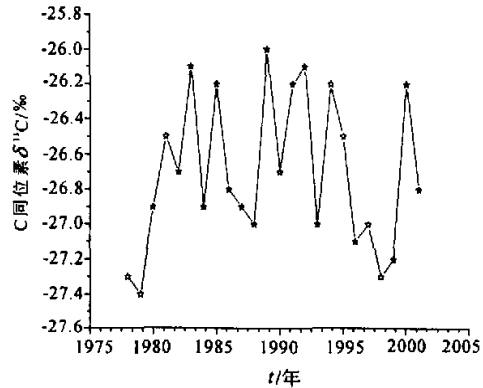


图 1 广东阳春河樟树树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列

Fig. 1 The $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring of *Cinnamomum camphora* in Helang, Yangchun, Guangdong province

表 1 广东阳春河朔樟树树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 1 The $\delta^{13}\text{C}$ value of tree ring of *Cinnamomum camphora* in Helang, Yangchun, Guangdong province

年份	$\delta^{13}\text{C}$	年份	$\delta^{13}\text{C}$	年份	$\delta^{13}\text{C}$
1978	-27.3	1986	-26.8	1994	-26.2
1979	-27.4	1987	-26.9	1995	-26.5
1980	-26.9	1988	-27	1996	-27.1
1981	-26.5	1989	-26	1997	-27
1982	-26.7	1990	-26.7	1998	-27.3
1983	-26.1	1991	-26.2	1999	-27.2
1984	-26.9	1992	-26.1	2000	-26.2
1985	-26.2	1993	-27	2001	-26.8

Stuiver 等(1984)和 Leavitt 等(1995)的研究都假设树轮 C 同位素的组成包括大气 $\delta^{13}\text{C}$ 变化,气候变化引起的同位素分馏和人为影响三部分,而且总是把树轮 C 同位素的趋势性变化当作大气 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响,短期波动归结于气候变化的影响。根据 Leavitt 等(2001)的观点,如果气候因子不具有长期趋势,气候的改变只会引起树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高频变化,大气中 CO_2 影响是一种趋势性变化。为了真实地反映树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 所记录的气候要素变化,须去除上

述大气中 CO_2 引起 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$ 的趋势性变化对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响。钱君龙等(2001)证明了多项式拟合法去除的低频变化基本上包含了大气 CO_2 的影响,因此 Δ 序列保留了由气候变化引起的所有 $\delta^{13}\text{C}$ 高频信息。利用多项式拟合法来去除低频变化,拟合方程式中 Y 为 $\delta^{13}\text{C}$, X 代表年份,为计算方便,将其简化为 $1\sim 24$,共 24 a。由树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列减去(1)式拟合序列,可以得到 $\delta^{13}\text{C}$ 高频变化部分,本文中称之为序列 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ (简称 Δ),如图 2 所示。

$$Y = -27.217 + 0.1104X - 0.0043X^2 \quad (1)$$

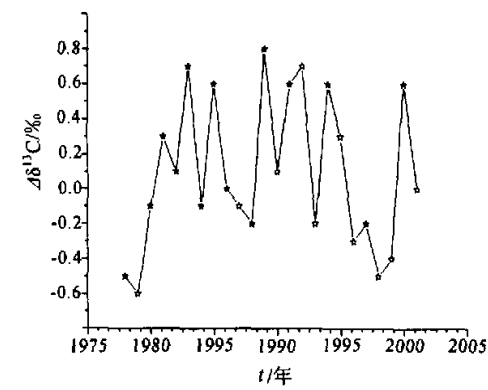


图 2 去除大气 CO_2 影响后的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列
Fig.2 The $\Delta\delta^{13}\text{C}$ sequence without the effect of CO_2

3 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化与厄尔尼诺事件的关系

3.1 近 20 a 来厄尔尼诺事件在 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列中的反映

厄尔尼诺是指赤道东太平洋海面温度异常升高的现象,是气候变化中的强信号,它对全球气候造成重大的影响。当厄尔尼诺事件出现时,南方涛动指数(SO)下降。人们又称这种现象为 ENSO 事件。1976 年以来 7 次厄尔尼诺事件起迄时间、强度指数及等级见表 2(吴尚森等,1981)。

ENSO 是迄今为止发现的全球气候和环境异常最强的年际变化信息,尽管目前对其形成机制尚不完全清楚,然而它对大气环流和气候的年际变化的影响却在全球范围内起作用。ENSO 的信号不仅存在于全球热带海面温度、气压、风、云量以及洋流强度等要素中,而且在许多高纬度地区也能监测到它的存在,只是在不同的地方影响的显著程度不同而已(吴尚森等,1998;包澄澜等,2000)。

表 2 1976 年以来历次厄尔尼诺事件
起迄时间、强度指数及等级
Table 2 The time, intensity index and level
of El Niño since 1976

起迄时间	L (月数)	强度高峰期 出现时间	M (月数)	F	等级
1976 年 6 月至 1977 年 3 月	10	1976 年 10 月	1	-1.72	弱
1982 年 9 月至 1983 年 9 月	13	1983 年 2 月	9	3.34	很强
1986 年 10 月至 1988 年 3 月	18	1987 年 10 月	8	2.91	强
1991 年 5 月至 1992 年 9 月	17	1991 年 11 月	7	2.40	强
1993 年 4 月至 1993 年 11 月	8	1993 年 5 月	1	-2.08	弱
1994 年 5 月至 1995 年 2 月	10	1995 年 1 月	4	-0.28	中等
1997 年 3 月至 1998 年 5 月	12	1997 年 12 月	8	—	特强

注:1997 年以前引自吴尚森,1997 年由作者根据曹侠资料补充。

由图 3 可以看出,1984 年,1988 年,1993 年,1996 年,1998 年所对应的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值较低,位于谷底。而图中标有五角星的 1983 年,1987 年,1991 年 11 月,1995 年 1 月,1997 年 12 月又是各次厄尔尼诺事件的强度最高峰期。表明厄尔尼诺事件对当年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值影响不大,且一般都持续时间较长,所以它对下一年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值和旱涝影响较大。1982 年 9 月开始的厄尔尼诺事件,于 1983 年 2 月达到强度高峰期,这次厄尔尼诺事件的强度(F)为 3.34,是近 50 a 来(除 1997 年外)最强的一次,使得 1984 年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值偏低。1986 年 10 月开始的厄尔尼诺事件,于 1987 年 10 月达到高峰期,使得 1988 年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值偏低。1991 年 5 月开始的厄尔尼诺事件共持续了 17 个月,于 1991 年 11 月底达到强度高峰期。1992 年上半年厄尔尼诺事件现象一直都比较强烈,直到 1992 年 9 月厄尔尼诺事件现象才逐渐减弱,使得 1993 年出现树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值大幅度下降。而 1993 年发生的厄尔尼诺事件很弱,持续时间也很短,其强度(F)为 -2.08,在 1994 年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值中就没有反映出来。1994 年开始,于 1995 年 1 月达到高峰期的厄尔尼诺事件,在 1996 年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值反映出偏低趋势。1997 年

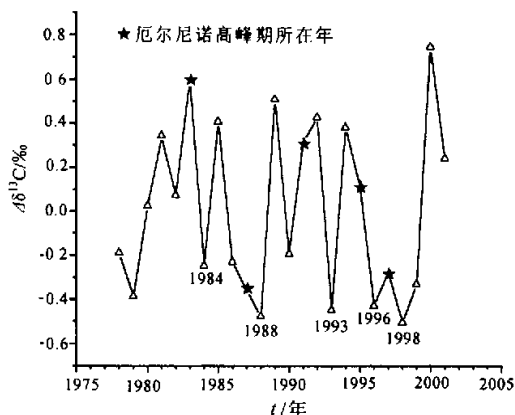


图3 厄尔尼诺效应在序列中的反映

Fig.3 The $\Delta\delta^{13}\text{C}$ response to El Nino

3月开始,于1997年12月达到高峰期的厄尔尼诺事件,是20世纪最强的一次,使得1998年的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值明显降低。1998年秋季以后,一直是拉尼娜年,2000年树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值大幅度回升。综上所述,厄尔尼诺事件对树轮C同位素的高频变化的影响有一定的滞后性,一般是厄尔尼诺事件的强度高峰期所对应年的下一年树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值较低。

广东地区冬季树轮仍有同位素分馏,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录冬季气温的影响,这与寒冷地区以年轮宽度作为气候代用资料的情况不同。钱君龙等(2001)对浙江天目山柳杉树轮C同位素研究也有类似发现,认为在亚热带温湿地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录冬季气温的影响。已有的研究中很多树轮C同位素与温度变化呈正相关,也有不少是负相关。本文的研究结果是负相关。植物生长对环境具有一定的适应性,所有植物的最适宜温度也是处于变化之中的,不同地区、不同树种很难进行比较。从同位素分馏的角度推测广东的树轮C同位素变化情况:在厄尔尼诺年,由于海面温度的升高,使西太平洋副高压偏强偏北,而影响广东地区的冬季气温偏高。广东地区树轮C同位素变化与温度变化呈负相关。当温度越高时,酶的活性越弱,气孔内部的 CO_2 分压增大,树轮纤维素的C同位素降低,同位素变化与温度变化呈负相关。

由于同位素的分馏取决于代谢活动(光合作用及体液的运输)。代谢的结果引起生长,生长休眠后,代谢引起养分的储存,到来年蓄势待发。从厄尔尼诺事件引起温度和降水的变化,进一步影响植物

的生长和同位素分馏(但有一定的时间滞后,一般滞后1~2 a)。

3.2 广东树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列功率谱分析

谱分析是基于有限数据来估计的信号、随机过程或系统输出的能量频率关系。稳定随机过程的功率谱密度(PSD)通过离散傅里叶变换与自相关序列建立关系(屠其璞等,1984)。谱分析可以通过直接计算给定分段时间序列的傅里叶变换(fft),并将结果幅值平均来实现。简单地讲,如果 $x(n)$ 是时域离散信号 ($n=1:N$),用 MATLAB 语言则表示为(楼顺天等,1998):

$$\text{PSD}(m) = (|\text{fft}(x)|^2) \times 2/N, m=1:N/2 \quad (2)$$

$\text{PSD}(m)$ 即为 $x(n)$ 的功率谱。如果用分贝(dB)表示则如下式所示:

$$\text{psd} = 10 \times \log(\text{PSD}) \quad (3)$$

根据式2和式3,设 n 为年份 ($n=1:24, N=24$, 单位 a), $x(n)$ 为广东阳春河朗樟树的树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列,则功率谱分析(屠其璞等,1984)的结果如图4所示。

图4中横坐标为频率,纵坐标为将 Δ 序列分解的各谐波的功率谱,其中较大的且经过检验的周期即为显著周期。经检验,发现该序列有几个显著的准周期,分别为 10.67 a、4.57 a、2.91 a 和 2.13 a(表3)。其中树轮记录的准 4.57 a 周期的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列变化可能与影响全球气候异常变化的厄尔尼诺事件的周期有关,很可能就是厄尔尼诺事件引起的气候变化对树木生长影响的反映。近几百年来,平均 4.4 a 就有一次厄尔尼诺事件发生,在 20 世纪,厄尔尼诺事件发生的频率有增加趋势,中国是受其影响的

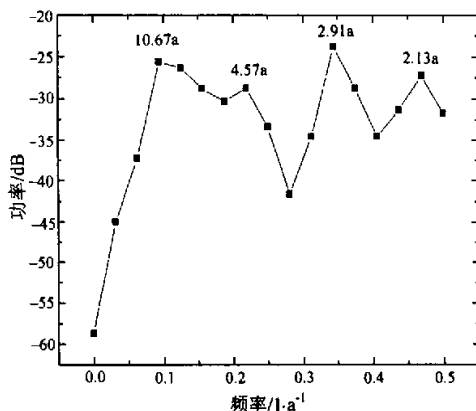
图4 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 功率谱分析图Fig.4 The power spectrum analysis of $\Delta\delta^{13}\text{C}$

表3 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列的周期表Table 3 The period of $\Delta\delta^{13}\text{C}$

序号	频率/Hz	周期/a
1	0.09	10.67
2	0.22	4.57
3	0.34	2.91
4	0.47	2.13

重要地区,厄尔尼诺事件的周期性发生,必然导致沿海地区气候的周期性变化。

厄尔尼诺事件发生时,其中2~3 a周期最为明显,与热带大气的“准两年振荡”(QBO)十分一致。树轮记录的“准两年振荡”的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列变化,从另一个侧面说明了广东树轮记录了大范围的ENSO信息。

在树木生长过程中必然受到诸如温度、降水、光照、季风、营养物质等环境因子的限制。另外,由于遗传因子的决定,每一种树木都有一个生态阈值,超过一定的生态阈值便无法生长,而生长在生态阈值边缘的物种,能够最大限度地反映生态因子的限制,这就是树轮气候当中的生态幅原理。由于此次研究所用树木生长在阳春山区,人类活动对树木生长影响较小。因此,冬季温度和夏季降水成为该地区树木生长的主要限制因子,而厄尔尼诺则通过影响东亚季风系统而引起广东地区温度和降水的波动。在厄尔尼诺年,由于海面温度的升高,使西太平洋副高压偏强、偏北,冬季温度的升高,延长了树木的生长期,受到厄尔尼诺影响的年份 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低,树木在该年获得一个较宽的年轮。在厄尔尼诺年则会出现相反的情况,从而使树木记录了全球性的ENSO现象。由于ENSO对树木生长和代谢过程的影响,ENSO也被认为是北美一些亚热带地区树木年际生态幅变化的重要胁迫因子之一(Swetran等,1990)。

3.3 树轮同位素与季风的关系

阳春树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列的功率谱分析说明厄尔尼诺事件的发生所引起的气候变化,在树轮同位素中有较好的记录。研究表明,厄尔尼诺事件与东亚季风联系紧密。中国学者对厄尔尼诺事件对亚洲季风及其对中国气候的影响也做了许多工作,得出了许多有意义的结论:厄尔尼诺事件之后的夏季西太平洋副高压偏强偏北,且西伸明显,中国东部降水减少;而厄尔尼诺事件之后的冬季,东亚大槽偏深、冬季风增强,同时东亚夏季风也增强(马利民等,2001)。中国气候受季风影响明显,尤其是东亚季风的影响。广东地区9月至次年3月盛行北风,1月

份频率最大;4~8月盛行偏南风,以7月份频率最大。台风和暴雨大风最多出现在7月。冬季风在中国东部可以长驱南下(李崇银,1995),对气温影响很大,是控制植物越冬或生长的主导因素,形成了冬季风气候敏感带,这也是中国东部季风气候区的区域特色。通常在厄尔尼诺年,中国东部地区冬季气温比常年偏高,而在拉尼娜年,冬季温度则相对降低。但冬季树轮仍有同位素分馏,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 可能记录了冬季气温的影响,这就是树轮同位素的优势所在(钱君龙等,2001)。

4 结论

广东阳春河的樟树树轮纤维素 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列研究发现,厄尔尼诺现象对树轮碳同位素的高频变化的影响有一定的滞后性,一般是厄尔尼诺强度高峰期所对应年的下一年树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值较低。 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列的功率谱分析发现,树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列变化的准4.57 a的周期,与全球厄尔尼诺事件发生的4.4 a周期基本一致,很可能就是厄尔尼诺事件引起的气候变化对树木生长影响的反映。树轮 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 序列变化记录的2.91 a、2.13 a的准周期与热带大气的“准两年振荡”(QBO)一致,从另一个侧面说明了广东树轮记录了大范围的ENSO信息。

参考文献

- 包澄瀛, 向元珍. 2000. 厄尔尼诺对人类社会的影响. 气象科学, 20(3): 277~288.
- 陈宝君, 钱君龙, 濮培民. 2002. ENSO对天目山柳杉树轮同位素的影响. 南京大学学报, 22(4): 53~58.
- 陈拓, 秦大河, 李江风. 2001. 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 趋势地区差异的初步研究. 兰州大学学报, 37(6): 107~111.
- 吕军, 屠其璞, 钱君龙. 2002. 利用树木年轮稳定同位素重建天目山地区相对湿度序列. 中国气象学报, 22(1): 47~51.
- 楼顺天, 李博菡. 1998. 基于MATLAB的系统分析与设计——信号处理. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 李崇银. 1995. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 253~256.
- 马利民, 刘禹, 安芷生. 2001. 秦岭树轮记录中的ENSO事件. 海洋地质与第四纪地质, 21(8): 93~98.
- 钱君龙, 吕军, 屠其璞等. 2001. 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, 31(4): 333~341.
- 屠其璞, 王俊德, 丁裕国. 1984. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 102~408.
- 吴祥定. 1990. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1~369.
- 吴尚森, 梁建茵, 黄增明. 1998. 厄尔尼诺事件及其对华南天气气候的影响. 广东气象, (1): 10~14.

曾侠,涂悦贤. 2000. 1997 年以来广东重大天气气候回顾. 广东气象, (2): 25 ~ 27.

References

- Bao Chenglan, Xiang Yuanzhen. 2000. Impact of El Niño event on Human society. *Scientia Meteorologica Sinica*, 20(3): 277 ~ 288 (in Chinese with English abstract).
- Chen Baojun, Qian Junlong, Pu Peimin. 2002. The effect of ENSO on the tree ring isotope of Japan cedar in Tianmu Mountain. *Journal of Nanjing Forestry University*, 22(4): 53 ~ 58 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tuo, Qin Dahe, Li Jiangfeng. 2001. Preliminary study on the relationship between trends of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ series and site conditions. *Journal of Lanzhou University*, 37(6): 107 ~ 111 (in Chinese with English abstract).
- Leavitt S W, Liu Y, Hughes M K et al. 1995. A single-year $\delta^{13}\text{C}$ chronology from *pinus tabulaeformis* (Chinese Pine) tree rings at Huangling, China. *Radiocarbon*, 37(2): 605 ~ 610.
- Leavitt S W, Danzer S R. 1993. Method for batch processing small wood samples to holocellulose for stable-isotope analysis. *Anal. Chem.*, 65(1): 87 ~ 89.
- Li Chongyin. 1995. Introduction of climate dynamics. Beijing: Meteorology Press, 253 ~ 256 (in Chinese with English abstract).
- Lou Shuntian, Li Bohan. 1998. Signal process based on system analysis and design of MATLAB. Xi'an: The Press of Xi'an Electronic Technology University (in Chinese with English abstract).
- Lu Jun, Tu Qipu, Qian Junlong. 2002. Relative humidity series reconstructed by using stable isotopes in tree ring of Tianmu Mountain. *Scientia Meteorologica Sinica*, 22(1): 47 ~ 51 (in Chinese with English abstract).
- Ma Limin, Liu Yu, An Zhishen. 2001. ENSO events from tree-ring width in Qinling Mountain. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(8): 93 ~ 98.
- Stuiver M, Burk R L, Quay P D. 1984. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tree rings and the transfer of biospheric carbon to the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 89: 1173 ~ 1174.
- Qian Junlong, Lu Jun, Tu Qipu. 2001. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose. *Science in China*, 31(4): 333 ~ 341 (in Chinese with English abstract).
- Tu Qipu, Wang Junde, Ding Yuguo. 1984. Probability statistics applied in Meteorology. Beijing: Meteorology Press, 102 ~ 408 (in Chinese).
- Wu Shangsen, Liang Jianyin, Huang Zhenming. 1998. El Niño events and its effect on the climate of South China. *Meteorology of Guangdong Province*, (1): 10 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiangding. 1990. Tree ring and climate change. Beijing: Meteorology Press, 1 ~ 369 (in Chinese).
- Swetnam T W, Betancourt J L. 1990. Fire-southern oscillation relations in the southwestern United States. *Science*, (249): 1017 ~ 1020.
- Zeng Xia, Tu Yuexian. 2000. The review of significant weather in Guangdong since 1997. *Meteorology of Guangdong Province*, (2): 25 ~ 27 (in Chinese with English abstract).