

# 子波变换在全球气候多时间尺度变化分析中的应用<sup>†</sup>

邓自旺<sup>1)</sup> 尤卫红<sup>2)</sup> 林振山<sup>2)</sup>

(1) 南京气象学院应用气象学系, 南京 210044, 2) 南京大学大气科学系, 南京 210008)

**摘要** 用墨西哥帽子波变换分析南、北半球及全球气候变化的多时间尺度结构、突变点。结果表明, 气候变化在不同时间尺度下具有不同的冷暖结构和突变点; 南、北半球气候变化有较大差异。说明子波变换方法是气候变化研究的有力工具。

**关键词** 子波变换, 时间尺度, 突变点, 气候

**分类号** P467

气候系统包含各种各样的时、空尺度, 具有多层次结构<sup>[1]</sup>。气候突变可以发生在季节、年际、十年或百年、直到地质时间尺度的时域内, 是存在于各种时间尺度气候变化中的普遍现象, 曾由许多气候学家<sup>[2,3]</sup>作过研究。但是以往的气候突变分析主要是用统计方法, 如低通滤波器、滑动的 t-检验法、Crammer 法、Yamamoto 法和 Man-kendall 法。这些方法虽能判别出某些突变点的大致位置, 却不能揭示出气候变化的多层次的结构。如果抛开时间尺度而谈某一点是气候突变点, 是无意义的, 只能说某点是在某一时间尺度下的突变点。事实上, 气候资料是多尺度的, 较大尺度上讲有冷期和暖期之分, 但这个冷(暖)期中还含有较小尺度的冷、暖期及更小尺度的冷暖期。由于含有多种尺度, 气候资料就显得杂乱无章, 大的小的涨落(或距平)都有, 用传统的统计判别方法很难判别其演化过程, 更难以找到突变点的位置。而子波分析由于具有多分辨特性, 很容易找出各层次突变点的确切位置, 它好比是一个数学放大镜, 调节其放大倍数(1/a)就可以清楚地看出气候时间序列在各个层次上的变化趋势。另外因为气候变化是多层次的, 导致不同层次气候变化的因素不同, 有必要分别研究。

本文用墨西哥帽子波变换对 1881 年 1 月~1993 年 12 月共 113 a 全球、北半球和南半球月平均气温距平资料序列进行分析, 以判别不同时间尺度下的突变点的位置和冷暖变化。

## 1 资料及计算方法

全球气温资料取自 K Ya Vinnikov, P Ya Groisman, K M Lugina<sup>[4]</sup>整编的 1881 年~1993 年全球和南北半球月平均地面气温相对于 1951 年~1975 年平均值的距平序列。

子波变换理论已有很多文献<sup>[5-8]</sup>, 现在在连续子波变换中用得最多的是墨西哥帽子波和 Morlet 子波, 这可能是因为这两个子波都与高斯函数有关系, 使得变换结果更容易与传统分析方法的结果相比较。本文分析都是基于墨西哥帽子波进行的。

<sup>†</sup> 云南省基础应用研究基金 95D133Q 及国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1997-01-13; 改回日期: 1997-08-10

第一作者简介: 邓自旺, 男, 1965 年 3 月生, 硕士

墨西哥帽子波函数的形式为  $\Psi(x) = (1 - x^2) e^{-x^2/2}$ , 其 Fourier 变换为  $\Psi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) e^{-i\omega x} dx$ , 信号  $f(x)$  的墨西哥帽子波变换为

$$W_{a,b}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}(x) f(x) dx \quad (1)$$

也可以写成卷积形式

$$W_{a,b}(f) = \Psi_a(b) * f(b) \quad (2)$$

其中  $\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi(\frac{x-b}{a})$  为伸缩尺度  $a$ , 平移量  $b$  的子波基。

可以证明墨西哥帽子波是对 Gauss 函数  $g(x) = e^{-x^2/2}$  求二阶导数取负所得。即

$$\Psi(x) = - \frac{d^2 g(x)}{dx^2}$$

卷积形式(2)可以改写为

$$W_{a,x} = W_a f(x) = f * \left( - \frac{1}{a^3} \frac{d^2 g_a}{dx^2} \right) (x) = - \frac{1}{a^3} \frac{d^2}{dx^2} (f * g_a) (x) \quad (3)$$

其中  $g_a(x) = \frac{1}{a} g(\frac{x}{a})$ ,  $x$  等价于  $b$ 。

由  $W_{a,b}(f)$  重构  $f(x)$  的子波逆变换为

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^\infty W_{a,b}(f) \Psi_{a,b}(x) \frac{da db}{a^2}$$

其中  $C_\Psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega$  为一常数,  $W_{a,b}(f)$  为公式(1)计算出的子波变换系数。所以子波变换将信号分解为对数坐标中具有相同大小的多通道频率集合。

墨西哥帽子波函数对资料序列进行子波变换时其伸缩尺度  $a$  (即子波的分辨尺度) 与物理空间(时间或空间)尺度  $L$  (半周期或波长) 之间的关系为  $L = \pi a / \sqrt{2}$ 。(  $f * g_a$  ) (  $x$  ) 可以看成是气候信号  $f(x)$  用 Gauss 函数按尺度  $a$  进行平滑化的结果。当  $a$  很小时, 用  $g_a(x)$  对  $f(x)$  平滑化对  $f(x)$  的突变部分的位置与形状影响不大。当  $a$  较大时, 此平滑过程会将  $f(x)$  的一些细小的突变消去而只剩下大尺度的突变。因此, 可以根据具体情况来选择适当的参数  $a$ 。

由(3)式可见墨西哥帽子波变换系数  $W_a(f)$  是在尺度  $a$  下平滑后函数  $f(x)$  的二阶导数, 与变换系数零点对应的是  $(f * g_a)(x)$  的拐点, 它的位置反映了  $(f * g_a)(x)$  变化最快点的位置, 即在时间尺度  $L$  下的可能气候突变点。另外, 由于气候信号一般是以波状形式变化的, 可以证明墨西哥帽子波变换系数的变化趋势与气候信号变化趋势基本一致, 不同尺度下子波系数的变化反映出不同尺度下气候的变化特征。如果气候信号为气温, 则某一时间尺度的正子波系数区与该时间尺度气候变化的暖位相对应, 而负子波系数则与冷位相对应。正值中心对应于暖中心, 而负值中心则对应于冷中心。值得一提的是, 子波系数并不是真正的温度值, 两者呈正相关关系。我们采用公式(1)进行变换, 是用数值积分方法进行的。

## 2 月平均气温距平序列在不同时间尺度下的变化

图 1、图 2、图 3 分别为全球、北半球和南半球 113  $a$  气温序列墨西哥帽子波变换系数等值线图(纵坐标左为时间尺度, 右为子波分辨尺度  $a$ , 单位:  $a$ )。由这 3 个图可以清楚地看出全球气候在过去的 113  $a$  的变化情况, 特别是其在不同时间尺度下的突变点的具体位置和冷暖变化。



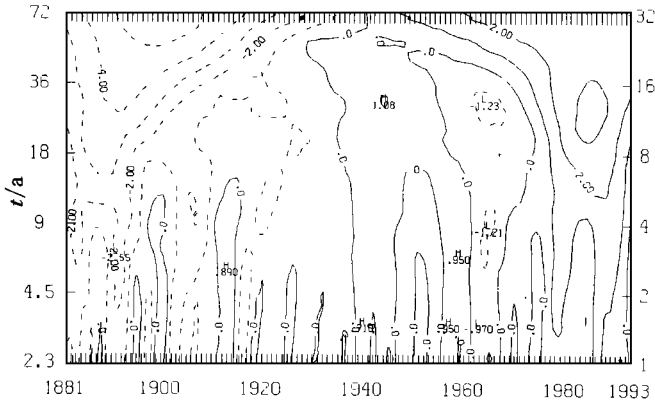


图3 南半球近 113 a 来气温距平序列子波变换等值线图

Fig. 3 Plot of contours of wavelet transformation coefficients for 1881 ~ 1993 temperature anomaly series for the Southern Hemisphere

## 2.2 气候突变点

墨西哥帽子波变换系数对某一时间尺度的过零点的位置是对应于该时间尺度下的可能气候突变点。由于过零点只是突变点的必要条件而非充分条件, 截止目前在子波分析中还没有一种用以检验该点是气候突变点的充分性的方法, 因此本文规定: 如果两相邻过零点间的子波系数绝对值没有大于 0.5, 即在它们之间没有等值线穿过, 则该两点不算为突变点。

为了便于比较, 根据图 1、图 2 和图 3 把对应于时间尺度为大于 36 a、36 a、18 a 和 9 a 的全球、北半球和南半球气候突变点制成表 1。由表 1 可以看到, 就大于 36 a 时间尺度而言, 近 110 a 来无论是全球、北半球还是南半球, 都只有一个气候突变点, 全球气候突变发生在 1922 年, 北半球发生在 1921 年, 稍早于全球突变, 而南半球突变点则推迟到 1925 年左右。这主要是因为北半球陆地面积大大超过南半球, 其热惯性远小于南半球造成的。可见本世纪 20 年代初全球气候从冷态突变到暖态, 与实际相一致。对于 36 a 时间尺度而言, 除南半球仍保持 1925 年这一个突变点外, 全球和北半球的气候突变点均增加到 3 个, 均为 1922 年(冷变暖)、1953 年(暖变冷)和 1975 年(冷变暖)。对于时间尺度为 18 a 的全球气候突变点, 仍与以 36 a 为时间尺度所得结果相似, 但前两个突变点的位置有所后移, 南半球与大时间尺度对应的 1925 年的突变点大大后移, 推迟到 1934 年。另外两个突变点比全球气候突变点推迟一年, 为 1956 年和 1976 年。而北半球突变点则增至 5 个(又增加了 1893 年和 1902 年)。当以 9 a 时间尺度来看, 则全球和南半球气候突变点增至 5 个, 而北半球则增至 6 个, 其中 5 个突变点与全球的 5 个基本一致, 而南半球除 1961 年和 1977 年与全球和北半球相一致外, 其余 3 个突变点都与全球和北半球的突变点相差较大。特别是大尺度的 1925 年突变点后移到 1939 年。

由上面分析可知, 全球气候在不同时间尺度下具有不同的突变点, 并且位置发生位移, 个数也相应地发生变化。因此如果抛开时间尺度来谈论气候突变意义不大。全球气候从总体上看(时间尺度大于 50 a 的变化), 气温是上升的, 而以较小的时间尺度看, 则表现为有升有降, 升中有降和降中有升的较为复杂的变化。

表 1 全球、北半球和南半球近 110 a 来不同尺度的气候突变点

Table 1 Abrupt turning points of 1981 ~ 1993 climate change on a range of scales for the globe and bihemispheres

分辨尺度(a)	时间尺度(a)	范 围	突变点数	出现年份
> 16	> 36	全球	1	1922
		北半球	1	1921
		南半球	1	1925
16	36	全球	3	1922, 1953, 1975
		北半球	3	1922, 1957, 1975
		南半球	1	1925
8	18	全球	3	1925, 1955, 1975
		北半球	5	1893, 1904, 1922, 1953, 1977
		南半球	3	1934, 1956, 1976
4	9	全球	5	1894, 1902, 1924, 1962, 1977
		北半球	6	1893, 1902, 1922, 1944, 1962, 1977
		南半球	5	1910, 1918, 1939, 1961, 1977

### 3 结 语

(1) 气候变化表现为多层次相互嵌套的冷暖结构。近 113 a 总的变化趋势是变暖, 其间 60 年代有所下降。

(2) 近百年来全球气候发生了不同尺度下的多次突变。其中本世纪 20 年代的全球气候变暖对应的时间尺度范围很大, 从年际尺度直到几十年尺度, 突变点在 1922 年 ~ 1925 年之间变动。北半球的突变特性较南半球更为强烈, 并且总是稍早于全球突变时间。南半球对应于全球 20 年代的突变点只出现于某些时间尺度(如 9 a 以下的和 36 a 左右时间尺度), 而在其他时间尺度则无此突变点。

(3) 北半球的突变点数明显多于全球和南半球的突变点数, 南半球的突变点数最少。这说明北半球气候的稳定性小于全球和南半球, 变化比较剧烈。这主要是因为南北半球的下垫面属性差异很大引起的。

(4) 子波变换方法能准确地分析不同尺度的气候变化特征, 特别是能定出气候突变点的位置, 是气候变化研究的一个有力工具。

### 参 考 文 献

- 林振山, 杨修群. 理论气候学. 南京: 南京大学出版社, 1995
- 符淙斌, 王 强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482 ~ 493
- 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1994, 53(3): 261 ~ 273
- Vinnikov K Ya, Groisman P Ya, Luginina K M. Global and hemispheric temperature anomalies from instrumental surface air temperature records. Trends 93, 615 ~ 627
- 邓自旺, 林振山, 尤卫红. 子波分析及其在大气科学中的应用方法. 南京大学学报, 1996, 32(地学专辑): 47 ~ 50
- 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近五十年来气候变化多时间尺度分析. 高原气象, 1997, 16(1): 81 ~ 93

- 7 Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Trans. On Information Theory, 1992, 38: 617 ~ 643
- 8 Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges . IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992, 14(7): 710 ~ 732

# APPLICATION OF WAVELET TRANSFORMATION TO ANALYSIS OF MULTIPLE TIME SCALE CLIMATE CHANGE

Deng Zi wang

(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

You Weihong Lin Zhengshan

(Department of atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

**Abstract** Mexican Hat-form wavelet transformation is used to investigate the structures of bihemispheric and global climate change at multi-time scales and the points of abrupt change. The results suggest that climate change exhibits different cold-warm structures and abrupt points at these scales, displaying remarkable difference between the hemispheres, indicating that wavelet transformation is a powerful tool in the study of climate change.

**Keywords** wavelet transformation, time scale, point of abrupt change, climate