

华东地区降水时频变化特征 与 ENSO 关系

王红雷, 陈 瑶, 梁 艳, 姜燕敏, 程 赢

(瑞安市气象局, 浙江 瑞安 325200)

摘 要:利用 Morlet 小波变换方法分析了近 56 a 来华东地区的降水时频变化特征及其与 ENSO 关系, 结果表明, 华东地区的降水、海温(ΔSST)以及南方涛动指数(ΔSOI)的月距平序列中都存在多时间层次结构, 并且各时间尺度周期分量的强度是不同的。同时又采用交叉小波变换方法, 分别分析了 ΔR 、 ΔT 与 ΔSST 、 ΔSOI 相关关系, 发现华东地区降水与 ENSO 在准 2~4 a 周期变化上呈正相关关系, 在年代际和 8 a 以上年际间呈正负有规律交替且以正相关为主。

关键词: ENSO; 降水; 小波变换

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2012)01-00036-05

ENSO 是厄尔尼诺 (El Nino) 和南方涛动 (Southern Oscillation) 的合称, 它的显著特征是赤道东太平洋秘鲁东海岸海温的大范围异常增高, 南方涛动指数 (SOI) 显著下降。它是迄今为止人们发现气候系统中最强的年际气候信号^[1]。

大量观测研究资料表明, ENSO 事件对全球大气环流和气候变化有着显著影响, 而对于不同地区, ENSO 的影响方式和强度也不相同, 表现出显著的区域性特征。ENSO 对我国气候的影响已经被大量学者研究, 并取得了丰富的成果。例如: 有研究表明 ENSO 当年我国以少雨低温为主, 而次年则相反^[2]。此外北太平洋副热带高压强度变化^[3]、我国台风活动^[4]和淮河流域降水^[5]等, 都与 ENSO 存在着很好的相关性。目前, 关于 ENSO 与我国华东地区的降水关系的研究工作尚不多, 本文试图应用连续小波变换和交叉小波变换方法, 分析 SST、SOI 和华东地区旱涝变化的多时间尺度结构特征及其相关, 为我国区域气候变化的诊断分析提供参考依据。

小波变换作为工具和方法上的突破, 已在信号分析、图像处理、地震资料分析以及大气和海洋科学等诸多领域得到了广泛的应用^[6]。小波分析与传统

数学方法相比显示出了巨大的优越性, 它将一维信号在时间和频率两个方向上展开, 可细致地分析气候系统的局部特征以及任意点附近的振荡行为, 能够分辨局部的奇异点, 根据不同尺度的周期随时间的演变可以分析不同尺度的扰动特征, 并判断出气候序列的显著周期。本文采用多种小波变换方法分析华东地区降水与 ENSO 指标的时频变化特征及其相互之间关系。

1 小波分析方法

小波变换 (Wavelet Transforms 简称 WT; 也有人称为子波变换) 由法国 Elf Aquitaine 公司的石油工程师 Morlet 于 1980 年在进行地震数据分析工作时首创的^[7]。在随后的 10 余年成为国际上极为活跃的科学研究领域。目前它已被广泛地应用于地震资料分析、图像处理、语言信号分析、分形、抽样、湍流以及大气和海洋科学等诸多研究领域。

小波变换在气象中已有一系列不同形式的应用, 这里仅对本文涉及的有关概念和公式作简单介绍。函数 $f(t)$ 的连续小波变换可表示为:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi(a, t-b) dt, \quad (1)$$

其中, $f(t)$ 是被分析的时间序列, $W(a, b)$ 是该序列与选定的小波函数族 $\Psi(a, t-b)$ 卷积, $\Psi(a, t-b)$ 是分析小波函数即母函数也就是 $\Psi(t)$ 通过伸缩和平

收稿日期: 2011-05-23

作者简介: 王红雷 (1978-), 男, 助理工程师, 现从事天气气候预测与研究。E-mail: kinghonglei@163.com

移得到的小波基函数, a 为伸缩尺度, b 为平移参数。

类似于傅立叶功率谱, 可定义单个时间序列的小波功率谱(能量谱)函数为:

$$P_f(W) = \int |W_f(a, b)|^2 db, \quad (2)$$

而对于两个时间序列, 类似于协谱的函数为:

$$C_{12}(W) = \int W_1(a, b) W_2(a, b) db, \quad (3)$$

式中, $W_1(a, b)$ 、 $W_2(a, b)$ 为信号 1、2 的交叉小波变换, 它是信号 1、2 协方差的时间尺度分解, 它在整个时间轴上的积分即为小波交叉谱。

本文采用的 Morlet 小波, 为复数形式小波, 其母函数为:

$$\Psi(x) = e^{i\omega x} (e^{-\frac{x^2}{2}} - \sqrt{2} e^{-\frac{\omega^2}{4}} e^{-x^2}). \quad (4)$$

时间周期与伸缩尺度 a 之间关系为:

$$T = \frac{4\pi}{\omega + \sqrt{2 + \omega^2}} a. \quad (5)$$

Morlet 小波是一个复数形式小波, 在实际应用中比实数形式的小波具有更多优点, 由于它的实部虚部位相相差 $\pi/2$, 消除了实数形式子波变换系数模的振荡。与 Marr 小波一样, Morlet 子波变换的零点, 也对应于卷积函数的拐点, 所以对突变点的检验也是严格的。

2 资料处理

本文所用资料为华东地区六省一市 32 个站点的 1951 年 1 月—2006 年 12 月(共 672 个月)降水(R)序列以及对应时间内 Nino 3.4 海区的月平均海温(SST)和南方涛动指数(SOI)距平序列。其中降水资料来自国家气候中心, SST 和 ISO 资料来自于美国国家大气海洋局气候预测中心(NOAA/CPC)。在小波变换前, 为减低资料的边界效应影响, 将 R 、 SST 、 SOI 3 个时间序列分别采用对称外延方法^[8]将资料延长为 2 016 个月。习惯上, 通常采用的延拓方法为:

原序列: $f(i) \quad i=1, \dots, N$

向前延伸 N 个资料: $f(-i)=f(i+1)$

$i=0, 1, \dots, N-1$

向后延伸 N 个资料: $f(i+N)=f(N+1-i)$

$i=1, \dots, N$

根据小波分析尺度因子的变化特点,

$a=3.0 \times (2)^j \quad (j=1, 2, \dots, 14)$ 。

对应的周期 T 为 1~32 a。

3 结果分析

图 1~3 为 Morlet 小波变换系数分布图; 图 4~5 为交叉小波变换系数分布图。小波变换图中横坐标为时间 t , 纵坐标左边为周期 T (1~32 a), 右边为伸缩尺度 a 的幂指数 j (即分辨尺度); 因伸缩尺度 a 与周期 T 相对应, 所以图中没有标出。图中正值用实线表示, 负值用虚线表示。等值线越密集, 表示信号振荡中心强度越强, 周期特征也越明显, 其所代表的气候因子振荡也越强, 而零等值线反映了信号突变的时频位置^[9]。类似地, 交叉小波系数绝对值大的区域表明两序列信号在对应的时频域正相关或负相关显著; 否则相关就弱。

3.1 ENSO 基本变化特征

国际上监测 ENSO 普遍使用的是厄尔尼诺监测区的 SST 指数及南方涛动(SOI)指数, 本文利用美国国家海洋大气局气候预测中心(NOAA/CPC)提供的 1950 年以来完整的、可靠的资料, 研究了 ENSO 事件过程及强度指数的建立。厄尔尼诺是赤道中、东太平洋海水大范围增暖事件, 选取能够表明其特征的海区十分重要^[10]。美国国家环境预测中心^[11]和中国国家气候中心^[12]等利用 Nino 1+2, Nino 3, Nino 4 区对 ENSO 事件进行监测。

本文采用 Nino 3.4 区指数(Nino3.4 Index)来表征事件的 El Nino 事件的强弱和持续时间。Nino3.4 区指数是指 Nino 3.4 区月平均海表温度 SST 与相应月份多年平均海表温度之差值, 即 Nino3.4 区海域的海表温度距平 $SSTA$ 。据美国 IRI(International Research Institute for climate Prediction)的定义, 当 Nino3.4 区指数 5 个月滑动平均值 ≥ 0.5 °C 的值持续 6 个月以上时为一次 El Nino 事件或 ENSO 暖事件(Warm Episodes)。

3.1.1 Nino3.4 区 SST 时频变化特征的小波分析

从图 1 中可清楚地分析 Nino3.4 区 SST 时频变化特征, 其中横坐标为时间, 纵坐标为尺度。

首先, 在不同时间尺度上厄尔尼诺发生次数有很大差异。可以看出, 在 1~3 a 周期的尺度上存在 1953、1964、1974、1982—1983、1992、1997—1998、2005 年的正值中心, 这与统计的 El Nino 事件^[13]是一致的。在 4~8 a 周期的时间尺度上 ΔSST 信号的响应较为剧烈, 振荡中心位于 1953、1958、1963、1972—1973、1978、1982—1983、1993、1997—1998 和 2002—2003 年。其中又以 1972、1982—1983、1997—1998 年这 3 次暖事件等值线闭合中心值最大, 等值线密集且频域影响范围宽, 说明这 3 次振

荡最为剧烈。对应 11a 周期以上的尺度,小波变换系数存在 4 正 4 负 8 个中心,分别是正值中心 1965、1983、1993、2005 年,负值中心 1957、1975、1987 和 2000 年。零等值线给出了不同尺度上 SST 突变点的具体位置,如在 4~8a 周期的时间尺度上,信号的突变点发生在 1957、1971、1981、1991 和 1998 年。

其次,不同的 El Nino 事件所对应的 Δ SST 的时间层次结构是不同的。从不同的时间层次上看,同一历史时期所发生的 El Nino 事件的数目是不同的:如有人统计 1951—1999 年共发生 14 次 El Nino 事件是相对于 6 个月到 1 a 这一时间层次而言的。如果从 2 a 时间层次上看,可以看到 1951—1999 年共发生了 7 次 El Nino 事件(而不是 14 次):1952—1953 年,1962—1963 年,1968—1970 年,1972—1973 年,1976—1978 年,1982—1983 年和 1987—1988 年。而从 11 a 这一层次看,只发生了两次:1968—1970 年,1982—1983 年。对应于 10 a 以上的时间层次,只存在一正一负的交替中心,可认为是一周期约为 22 a 的自然周期气候波动^[14]。

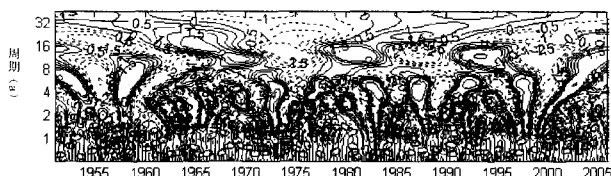


图 1 1951—2006 年 Nino3.4SST 距平的子波变换系数分布

3.1.2 SOI 时频变化特征的小波分析

在 El Nino 年份,出现南太平洋高压和印度尼西亚—澳大利亚低压同时减弱甚至相反(西高东低)的情况,即两地区海平面气压之间出现“跷跷板”式的反相关变化的现象叫做南方涛动(Southern Oscillation)。南方涛动指数一直是标志 ENSO 现象的重要指数之一^[15],联合分析 SST 和 SOI 序列距平,可较清晰地认识 ENSO 现象。

图 2 中的结果说明,SOI 序列的时频特征主要体现在 2~16 a 周期上,小尺度时间周期(1 a 以下)并不明显,在整个时域上均无明显的闭合曲线;而大时间尺度正负值中心交替迅速,其振荡多以准 4 a 周期为频域中心。正值中心在 1956、1963、1968、1975、1980、1990、2000 年表现强烈;负值中心在 1958、1966—1967、1969、1972—1973、1978、1991—1992、2002—2003 年表现强烈。这些中、小时间尺度的变化在 10 a 周期以上时间尺度上有一定的背景,

在 11 a 以上周期上也有 4 正 4 负 8 个中心,分别是正值中心 1957、1975、1987 和 2000 年和负值中心 1965、1983、1993、2005 年。这正好与 SST 的周期完全相反,因此可以认为它们在 11 a 以上的大尺度时间层次上有很好的负相关。

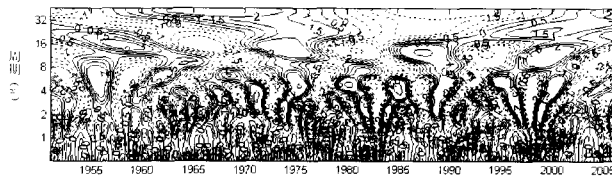


图 2 1951—2006 年 SOI 距平的子波变换系数分布

3.2 华东地区降水的时频变化特征

华东地区处于东亚季风气候区,降水的年际和年代际变化很大,旱涝灾害频繁,并且地区差异性很大。从 20 世纪 80 年代以来,科学家对华东地区降水的时空变化规律作了大量的研究^[16-17]。研究结果表明,华东地区降水存在着总体上升趋势但区域差异较大,长江中下游以南沿海地区增幅比以北地区明显。

从图 3 中可清楚地分析华东地区降水距平的多时间尺度的变化结构。对应 1 a 周期以下的月信号均可以不予考虑,它们没有明显的闭合中心。信号的主要变化特征体现在 2~4 a 周期上,在全时域都有明显的响应,正负中心有规律地交替出现,其他频域的信号都不太显著。在 1968 年以前,华东地区 ΔR 的 2~4 a 振荡明显且缓慢,在 1968—1972 年以后华东地区 ΔR 又变为 2~4 a 振荡但变化明显加快。从 11 a 周期层次上看华东地区降水存在 4 个正值和 4 个负值中心,它们分别是 1963、1974、1984、1997 年和 1958、1968、1980 和 1995 年。零等值线给出了不同尺度突变点的具体位置(图 3)。在 16 a 年代际尺度上,2001—2003 年处在振荡时期,预计未来将向少雨期过渡。

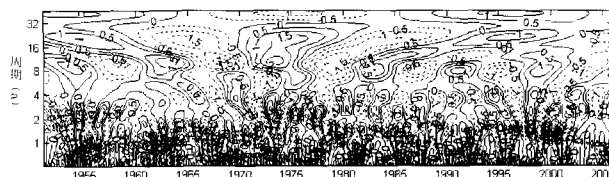


图 3 1951—2006 年 华东地区降水的子波变换系数分布

3.3 ENSO 与华东地区降水变化关系

我国位于亚洲东部,太平洋西岸,冬夏海陆热力

差异显著,天气、气候变化受海温影响明显,这点对于位于东南沿海地区的华东地区来说尤为明显。影响我国华东地区降水异常的因子很多^[18-19],其中包括热带东太平洋海温、西太平洋暖池、欧亚大陆积雪、北极海冰等内外强迫因子。符淙斌^[20]提出不同类型的赤道增温,中国汛期旱涝的分布具有不同的形式。黄荣辉等^[21]指出 ENSO 对中国旱涝分布的影响与 ENSO 事件的不同阶段有关。近年来,不少学者用不同的方法、力图从多个方面对 ENSO 影响中国降水进行了广泛的研究。赤道东太平洋海温在 20 世纪 70 年代后有显著的上升,这种气候和陆地的热力变化必定引起大气环流气候基本态的变化,从而会对华东地区降水造成一定程度上的影响。在典型的 ENSO 年,赤道偏东风强度大减,赤道西风加强,正常的 Walker 环流变弱。空气上升区和下沉区位置发生很大的变动,而造成赤道太平洋上气候的异常。

3.3.1 SST 与华东降水的交叉小波变换分析

选用 1951—2006 年华东地区月降水距平 ΔR 与相应时段 Nino3.4 区海温距平 ΔSST 作交叉小波变换,结果见图 4。从图上可清晰的看出,在 1 a、2~4 a、6~12 a 尺度上华东地区月平均降水和 Nino3.4 区海温之间相关的多层次特征。对应于 1 a 尺度以下周期 SST 距平与华东降水相关性较弱,等值线大多为零值。对应 2~4 a 周期尺度的振荡,存在着很好的相关性,且大多以正相关为主,负值中心仅存在于 1983 和 1998 年间。在 6~12 a 周期尺度上,相关性比较复杂,正负中心交替频繁。这种复杂的相关情况表明,在各异的时频窗口上,华东地区降水状况与 Nino3.4 区海面温度的相关变化具有多层次的特征。总的来说华东地区降水与 Nino3.4 区 SST 在年际关系上主要为正相关,而在年代际上为正负相关交替出现。

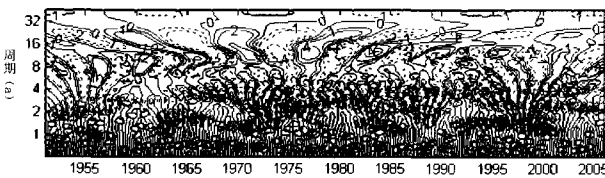


图 4 1951—2006 年 SST 与华东地区降水的
小波变换图

3.3.2 SOI 与华东降水的交叉小波变换分析

华东地区位于东亚大陆性季风区之内,境内年度降水情况与季风的强弱有明显的联系,为分析华东地区 ΔR 序列与 ΔSOI 序列的相关提供了一定的

理论基础。从图 5 上看对应于 1 a 尺度以下周期 SOI 距平与华东降水相关性较弱,等值线大多是没有闭合中心的零值。从在 2~4 a 尺度周期上可以看出 1957 年以前 ΔR 与 ΔSOI 两列信号呈明显的负相关关系,1957—1965 年为振荡调整阶段,1970 年至今呈现较为复杂的正负交替现象但负值中心相对较为强烈,两者间呈弱的负相关关系。在 6~8 a、16 a 以及更大尺度周期上两者呈有规律的正负交替现象。总的来看 ΔR 与 ΔSOI 在较小的年际尺度周期上相关性不显著存在弱的负相关,而在年代际和较大的年际尺度上呈现较为规律的正负交替现象,且这两者在各个尺度层次上都与 R 与 ΔSST 呈反位相。

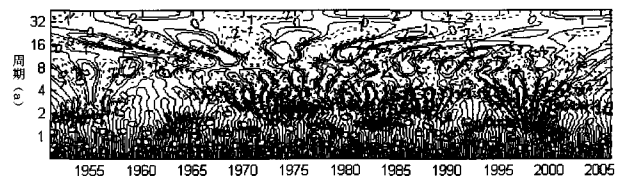


图 5 1951—2006 年 SOI 与华东地区降水的
小波变换图

综合对比图 4、5 可以看出,由于 ΔR 、 ΔSOI 和 R 、 ΔSST 呈明显反位相关,且 SST 与 SOI 是负相关关系,所以可以认为华东地区降水距平与 ENSO 在 4 a 以下的年际间呈正相关关系,在年代际和 8 a 以上年际间呈正负有规律交替且以正相关为主。

4 结论

本文采用连续小波变换分析对近 56 a 来 Nino3.4 区 SST、SOI 距平和华东地区降水状况作了一般分析,并分别得出了它们的多时间尺度特征、局部化特征以及突变特征等。另外为了了解 ENSO 与华东地区降水变化关系,对 SST 和 SOI 与降水分别作了交叉小波变换分析,讨论了其相互联系的一般特征和多时间尺度特征。归纳本文的研究结果,得出以下几点结论:

(1) ΔSST 序列中存在多时间尺度的周期变化,其中以准 2 a 和 4~8 a 的振荡较为明显,不同的 El Nino 事件对应不同的时频结构,在不同的时间层次里,同一历史时期所发生的 El Nino 事件数目是不同的。

(2) ΔSOI 序列的显著周期集中在 2~7 a,正负中心呈现明显的波动更替,11 a 以上的大尺度时间层次上 ΔSOI 与 ΔSST 序列信号有很好的负相关关系。

(3) 近 56 a 的华东地区 ΔR 中存在着显著的 2~

4 a 周期变化,多雨、少雨期波动更替,这种更替速度在 1968—1972 年之后明显加快。

(4) SST 和 SOI 与华东地区降水交叉小波分析表明, ENSO 与华东地区降水的相关表现在多个时间尺度上。华东地区降水距平与 ENSO 在准 2~4 a 周期变化上呈正相关关系,在年代际和 8 a 以上年际间呈正负有规律交替且以正相关为主。

参考文献:

- [1] 彭永清,王盘兴,吴洪宝. 大气低频变化的分析与应用[M].北京:气象出版社,1997,163-164
- [2] 刘永强,丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J].大气科学,1995,19(2):200-208.
- [3] 陈烈庭. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用[J].大气科学,1982,6(2):148-155.
- [4] 李崇银.厄尔尼诺与南海台风活动[J].热带气象,1986,2(2).
- [5] 信忠保,谢志仁. ENSO 事件对淮河流域降水的影响[J].气象科学,2005,25(4):38-46.
- [6] 林振山,邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M].北京:气象出版社,1999.
- [7] 胡增臻,石伟. 子波变换在大气科学中的应用研究[J].大气科学,1997,21(1):58-70.
- [8] 丁裕国,江志红. 气象数据时间序列信号处理[M].北京:气象出版社,1998:278-283.
- [9] 陈涛,孙卫国,程炳岩. 交叉小波变换在河南降水时频分析中的应用 [J]. 南京气象学院学报,2002,25 (5):685-692.
- [10] 翟盘茂,江吉喜,张人禾. ENSO 监测和预测研究[M].北京:气象出版社,2000:40.
- [11] NCEP. Climate Diagnostics Bulletin [R].Climate Analysis Center, U.S., 1997:1-79.
- [12] 国家气候中心. 月气候监测公报[R].1997:47.
- [13] 程炳岩,黄海仁,刘朝顺,等. 河南省气温变化及其与 ENSO 的相关[J].气象科技,2004,32(3):177-181.
- [14] 林振山. 气候建模诊断和预测的研究[M].北京:气象出版社,1996:136-186.
- [15] 余志豪,蒋全荣.厄而尼诺,反厄尔尼诺和南方涛动[M].南京:东南大学出版社,1994:281-308,10-11.
- [16] 陈隆勋. 中国近 45 年来气候变化的研究[J].气象学报,1998,56(3):257-271.
- [17] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究[J].气象学报,1994,52(3):261-273.
- [18] 陈兴芳,赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用[M].北京:气象出版社,2000:241
- [19] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场[M].北京:气象出版社,1999:297.
- [20] 符泽斌. 厄尔尼诺时期赤道增温的两种类型[J].科学通报,1985,30(8):596-599.
- [21] Huang R H, Wu Y F. The influence of the ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[C]. Japan-US Workshop on El Nino Southern Oscillation Phenomenon, Tokyo, Japan, 1987, 11:3-7.

Relationships between ENSO and Precipitation Changes in Eastern China

WANG Hong-lei, CHEN Yao, LIANG Yan, JIANG Yan-min, CHENG Ying
(Rui'an Meteorological Bureau, Rui'an 325200, China)

Abstract: In this paper, the variations of precipitation, air temperature and ENSO in Eastern China during recent 56 years were analyzed using the method of Morlet wavelet transformation. The results showed that multi-time scale characteristics appeared in all the monthly anomaly series of precipitation, air temperature, sea surface temperature (ΔSST) and southern oscillation index (ΔSOI), while each time-scale period's intensity was different. Meanwhile, cross wavelet transformation was also used to study the correlations of ΔR , ΔT with ΔSST , ΔSOI . It showed positive correlations between precipitation and ENSO at quasi-biennial 2-4 years periodic scale, while positive and negative correlations altered regularly at inter-decade scale and annual scale above 8 years and positive correlations dominated. The correlations between temperature and ENSO showed multi-time scale characteristics.

Key words: ENSO, precipitation, wavelet transformation