

杨秋明,李熠,钱玮,等. 南京地区夏季高温日数年际变化的主要模态及其与 200 hPa 经向风的联系[J]. 气象,2011,37(11): 1360-1364.

# 南京地区夏季高温日数年际变化的主要模态 及其与 200 hPa 经向风的联系<sup>\*</sup>

杨秋明 李 熠 钱 玮 黄世成 谢志清

江苏省气象科学研究所, 南京 210008

**提 要:** 利用集合经验模态分解(EEMD)方法研究了南京地区夏季高温日数主要的非平稳年际变化周期型。对 1946—2000 年的南京地区夏季高温日数进行分解,分别得到包含有准 2 年周期分量和 6 年周期分量的年际变化型,而且准 2 年周期分量幅度较大,变化特征与高温日数观测数据变化具有较高的相似性。不同于传统方法,EEMD 方法给出了高温日数在不同时间尺度上各自分离的变化特征。另外,这两种时间变化模态的演变对应于同期夏季不同的全球 200 hPa 经向风波列型,前者主要作用区域在南亚经过南海、西太平洋的副热带地区到日本海附近、北美中纬度地区和南印度洋和南大西洋中高纬度地区,而后者仅位于欧亚中高纬度地区。这两种独立变化时间模态的对应的遥相关空间分布型对于提高南京地区高温日数气候预报精度有重要意义。

**关键词:** 南京地区, 高温日数, EEMD 方法, 年际变化, 200 hPa 经向风

## Principal Modes of Interannual Variation in the Summer High Temperature Days in Nanjing and Its Relationships to the 200 hPa Meridional Wind

YANG Qiuming LI Yi QIAN Wei HUANG Shicheng XIE Zhiqing

Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210008

**Abstract:** Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method was adopted to study the non-stationary interannual variations of the high temperature days in Nanjing summer. Using the EEMD method, the days of the high temperature in Nanjing during 55 years (1946—2000) can be decomposed into a series of modes, including a quasi-biennial oscillation (QBO) component and a 6-year component. Among those, the QBO with the larger amplitude has the high correlations with original numbers of the high temperature. In brief, the EEMD method other than the traditional and conventional methods can bring us the isolated characteristics of variations of high temperature days at various time scales for the interannual timescale. Moreover, the above two modes correspond to the different wave trains of the global meridional wind at 200 hPa. The former is over South Asia, the South China Sea, the subtropical western Pacific and the Sea of Japan, the middle latitude of North America, and the high and middle latitudes of the southern Indian and southern Atlantic Ocean, while the latter is over the high and middle latitudes of Eurasia. These relationships are of indicative guidance for the climatic prediction of the high temperature days in Nanjing.

**Key words:** Nanjing, high temperature days, ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method, interannual variation, meridional wind at 200 hPa

\* 国家自然科学基金项目(41175082)资助

2010 年 11 月 15 日收稿; 2011 年 4 月 13 日收修定稿

第一作者: 杨秋明, 主要从事中长期天气预报和气候变化研究. Email: yqm0305@263.net

## 引 言

近几十年来,由于人类活动及自然因素等综合影响,大范围气候异常现象不断出现,尤其是极端高温事件频繁发生,给社会、经济和人民生活造成了严重的影响和损失。因此,高温作为一种气象灾害越来越被人们关注。进入 21 世纪以来,国内外许多学者加强了对全球各个不同区域极端高温事件变化特征和机制的研究,并取得了许多重要成果<sup>[1-8]</sup>。对于中国东部地区来说,特别是长江中下游地区,夏季高温的形成与西太平洋副热带高压的强度和西伸异常变化有密切联系,而副热带高压的持续异常又是多系统综合作用的结果。初步分析表明,热带太平洋—印度洋海温、中西太平洋跨赤道气流异常、对流层高层环流和平流层过程以及全球增暖的背景条件是其重要机制。但是,极端高温等极端事件年际变化具有高度非线性和复杂性,它的年际气候预测准确率仍较低,其时间变化规律尚需从多方面进一步揭示。因此,用更多不同的方法,从不同的角度充分揭示其变化特征及其与大尺度环流之间的不同联系,有利于加深对高温年际变化机制的认识,更好地提高极端高温的预测能力。为了深入认识长江中下游地区夏季高温非线性年际变化规律和成因,现用较长时间的 55 年(1946—2000 年)资料,对长江下游地区南京夏季高温日数进行集合经验模态分析(EEMD)<sup>[9-13]</sup>,研究南京地区夏季高温日数年际变化的主要模态及其与全球对流层高层大尺度环流的关系,为长江下游地区高影响天气的年际预测提供更多有用信息。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

逐日南京地区极端高温采用 1946—2000 年的资料(由江苏省气象台提供)计算,夏季极端高温日数定义为 5—8 月南京地区日最高温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$  的日数。全球 200 hPa 经向风资料采用 NCEP/NCAR 逐日再分析风场资料( $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ )<sup>[14]</sup>,所取资料时间是 1948—2000 年。

### 1.2 集合经验模态分析(EEMD)

Huang 等<sup>[10]</sup>和 Flandrin 等<sup>[11]</sup>提出经验模态分解(EMD)方法,可将不同尺度的波动从原始信号

中逐级分离出来,不同尺度的波动称为本征模函数(IMF)。EMD 是一种自适应的信号处理方法,其 IMF 随信号本身的变化而变化。EMD 分解过程是<sup>[7]</sup>:找出序列  $x(t)$  所有极大值和极小值点,分别用三次样条函数拟合成上下包络线,得到平均包络线  $m_1$ ,将原序列减去  $m_1$  可得到去掉低频的新序列  $h_1$ 。一般  $h_1$  不是平稳的,多次重复上述过程,使平均包络线趋近于零,得到第一个 IMF 分量  $c_1(t)$ ,代表原始序列中最高频的分量。即: $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ;对  $r_1(t)$  继续上述分解,直到所得到的剩余部分为单一信号或其值小于预先给定的值,分解结束。

原始的时间序列  $x(t)$  可表示为: $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n$ 。EMD 将时间序列  $x(t)$  分解成一系列 IMF,即  $c_i(t)$ ;每个 IMF 分量具有如下特征:(1)极值点数和过零点数必须一致或者至多相差一个;(2)在某一个局部点,极大值包络和极小值包络在该点的值的算术平均和趋近零或小于给定值。这也是 EMD 分解结束的收敛准则。EMD 方法已经在机械振动、地震、医学、气象等领域的信号处理上得到广泛应用。由于 EMD 是数值型方法,目前还缺乏严格的理论基础。虽然对 EMD 算法进行了大量的研究,但 EMD 的理论体系还不完善。EMD 算法也存在一些明显的问题,严重制约着它的实际应用,其中的一个重要缺陷就是模式混淆。为了克服这个问题,Wu 和 Huang<sup>[11-13]</sup>在对白噪声进行 EMD 分解深入研究的基础上,提出了集合经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法<sup>[13]</sup>,该方法利用高斯白噪声具有频率均匀分布的统计特性,使加入高斯白噪声后的信号在不同尺度上具有连续性,改变了信号极值点的特性,因此有效地解决了模式混淆问题,使得 EEMD 方法成为有效分解序列中独立变化信号的方法。其分解步骤与原理如下:(1)在原始信号  $y(t)$  中多次加入具有均值为 0、幅值标准差为常数的高斯白噪声  $n_i(t)$ ,即  $y_i(t) = y(t) + n_i(t)$ ,式中: $y_i(t)$  表示第  $i$  次加入的高斯白噪声后的信号。加入的高斯白噪声的大小会直接影响信号 EEMD 避免模式混淆的分解效果;(2)对  $y_i(t)$  分别进行 EMD 分解,得到的 IMF 记为  $c_{ij}(t)$ ,与一个余项记为  $r_i(t)$ ,其中, $c_{ij}(t)$  表示第  $i$  次加入高斯白噪声后,分解所得到的第  $j$  个 IMF;(3)利用不相关随机序列的统计均值为 0 的原理,将上述对应的 IMF 进行总体平均运算,消除多次加入的高斯白噪声对真实 IMF 的影响,最终得到 EEMD 分解后的 IMF 为  $c_j(t) = 1/N \sum_i c_{ij}(t)$ ,式

中  $c_j(t)$  表示对原始信号进行 EEMD 分解后所得到的第  $j$  个 IMF。本文中噪声  $n_i(t)$  取标准差为 0.02 的高斯噪声,计算加入 100 组噪声后的 EEMD 分解结果。对得到的 IMF 与原始序列计算相关系数,通过显著性检验的 IMF 为主要的变化模式,其相对重要性用解释方差的大小表示,未通过相关显著性检验的 IMF 作为伪模态剔除。

EEMD 消除模式混淆的本质在于:对于每次 EMD 分解,添加的白噪声在整个时频空间是均匀分布的,信号的不同频率尺度被自动投影到由白噪声所建立的均匀时频空间的相应频率尺度上。由于每次 EMD 分解添加不同的白噪声,噪声之间不相关,因此对所有 EMD 分解的相应 IMF 求整体平均后,人为添加的噪声被抵消掉。根据零均值高斯白噪声的特性,利用若干组总体的平均使其中的噪声互相抵消的特征,从而使真实信号得以保留。与一次 EMD 分解相比,EEMD 能够消除模式混合,使得 IMF 的物理意义更明确。

EEMD 可将不同时间尺度的波动从原信号中逐级分离出来,它适合于非平稳、非线性信号的分解。EEMD 是自适应的,具有更强的局地特性和较强的提取弱信号的能力。传统的傅里叶分析理论不能很好地分析非线性、非平稳信号,不能精确描述频率随时间的变化,存在时间、频率上的模糊。小波分析也不是自适应的,一旦子波基确定,就被应用于整个序列,其测不准原理限制了其分析精度的提高<sup>[9]</sup>。

2 结果分析

图 1 是 1946—2000 年夏季南京高温日数变化序列,其中高温日数最多的是 1953、1966、1978 和 1994 年,均超过 30 天。对高温日数距平序列(图 2a)进行 EEMD 分解后,得到 2 个 IMF 分量  $c_{01}$ 、 $c_{02}$ (图 2b,图 2c),图上方的数字分别是 IMF 分量与原序列的相关系数和解释方差,结果分别是 0.80、0.47 和 63.3%、22.0%,其中这 2 个分量的相关系数均通过 0.001 的显著性水平检验。因此,它们的变化特征与高温日数原始数据具有很高的相似性。 $c_{01}$  表现为准 2 年时间尺度的年际振荡,解释方差最大,而  $c_{02}$  呈现显著的 6 年左右的年际变化周期,它表明夏季长江下游高温年际变化中存在两种独立变化的显著的时间变化模式。另一方面,从振荡强度

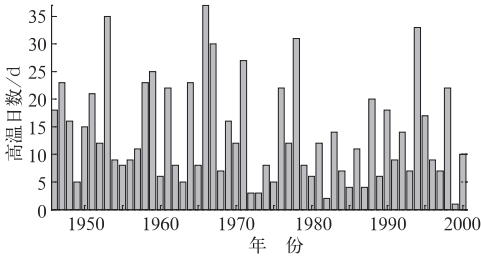


图 1 1946—2000 年 5—8 月南京地区高温日数的逐年变化  
Fig. 1 The time series of the high temperature days in Nanjing from May to August during the period of 1946—2000

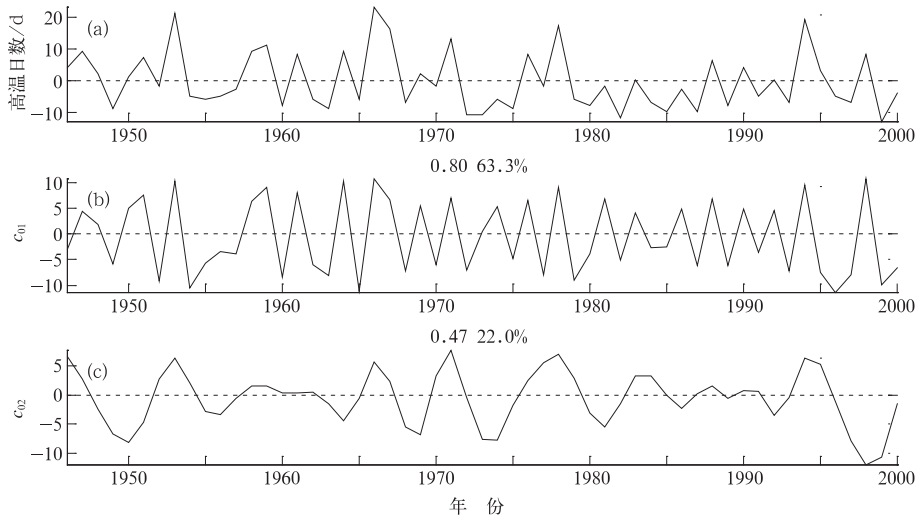


图 2 1946—2000 年南京地区 5—8 月高温日数(距平)序列(a)以及 EEMD 的 2 个 IMF 分量  $c_{01}$  (b),  $c_{02}$  (c)  
Fig. 2 The ensemble empirical mode decomposition components of the high temperature days in Nanjing from May to August during the period of 1946—2000  
(a) the anomaly of the high temperature days, (b)  $c_{01}$  and (c)  $c_{02}$  of the two IMF components

的时间变化来看,准 2 年时间尺度的年际振荡能量随时间呈现一定程度的非均匀变化(图 2b),在 20 世纪 70 年代和 80 年代中期有所减弱,但 6 年时间模态振荡能量在 20 世纪 60 年代和 80 年代到 90 年代初较弱,其余时间较强(图 2c)。这种振荡强度的非均匀变化反映了大气内部动力过程和外部强迫共同作用的非线性。

通过与同期夏季(6—8 月)全球 200 hPa 经向风的相关分析(资料时间是 1948—2000 年)表明,这两种时间变化模态对应于经向风的不同的 Rossby 波列的空间分布。前者主要作用区域在南亚经过南海、西太平洋的副热带地区到日本海附近和北美中纬度地区(图 3a),并且南印度洋和南大西洋中高纬

度还存在另一支显著的 Rossby 波列活动,而后者仅位于欧亚中高纬度地区(图 3b),表现为欧亚地区沿高层西风急流中东移的 Rossby 波列<sup>[15]</sup>,它是夏季北半球对流层高层中纬度绕球遥相关型(CGT)<sup>[16]</sup>的一部分。所以这两种模态对应着不同物理过程(与高层辐散和中层上升运动以及对应的西太平洋副热高压的不同变化及其南北半球环流之间的相互作用有关,具体机制有待进一步研究),其可预报性也可能存在明显差异。因而应针对这两类不同的全球空间波列活动对南京高温年际变化不同的作用过程,建立不同的预测模型才能提高预测效果,它是建立具有较强预测能力的气候预测模型的基础。

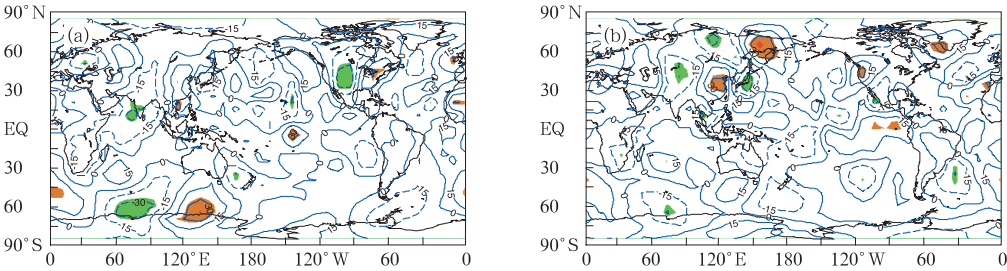


图 3 1948—2000 年期间南京高温日数主要时间模态与 200 hPa 经向风的相关: (a)  $c_{01}$ , (b)  $c_{02}$   
图中相关系数已乘 100, 阴影表示通过 0.05 的显著性水平检验的区域  
Fig. 3 Correlations between the principal modes of the high temperature days in Nanjing and 200 hPa meridional wind anomalies. (a)  $c_{01}$ , (b)  $c_{02}$   
Values are multiplied by 100. Above 0.05 significance level is shaded.

此外,对  $c_{01}$  和  $c_{02}$  分别进行非整数波功率谱分析<sup>[17]</sup>,也表明主要周期分别集中在 2 年和 6~7 年左右(图略),其余振荡周期均不存在,这表明 EEMD 具有很好的分离效果。若对原始高温日数序列直接进行非整数波功率谱分析,仅得到显著的 6 年

左右的振荡周期,2~3 年周期却不明显(图 4),而观测序列中准两年振荡(QBO)的振荡能量最大。由此可见,经典功率谱分析检测非线性,非平稳序列周期的能力仍然有局限性(容易受到噪音的干扰)。另外,对原始高温日数序列(图 1)进行 EMD 分析,也得到了这两个时间变化模态,只是解释方差变小,分别是 62.7% 和 16.9%(图 5),即 EMD 得到信号强度均弱于 EEMD 的结果(其中  $c_{02}$  更为明显,其解释方差比 EEMD 的结果小 5.1%)。所以, EEMD 方法比 EMD 方法具有更好稳定性和高信度。

3 结论和讨论

与传统的高温日数年际变化的研究方法不同, EEMD 方法将其包含的主要时间尺度上的变化分量很好地分离出来。分解结果表明,南京夏季高温日数变化主要包括准 2 年周期分量和 6 年周期分量。对应的 IMF 分量  $c_{01}$ ,  $c_{02}$  与原始数据之间相关系数分别高达 0.80 和 0.47(其显著性为 0.001)。

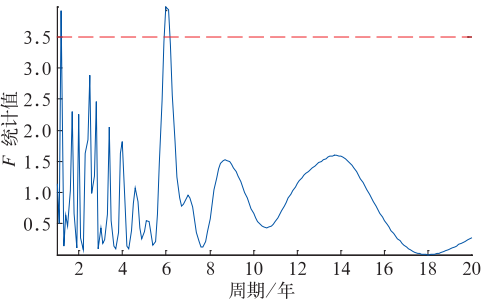


图 4 南京地区夏季高温日数的主要变化周期  
非整数波功率谱分析各周期对应统计量  $F$  值,  
水平虚线表示 0.05 的显著性水平  
Fig. 4 The dominant periods of the high temperature days in Nanjing summer, in which the statistical parameter  $F$  is for the non-integral power spectral analysis and the significant level of 0.05 is represented by horizontal dashed line

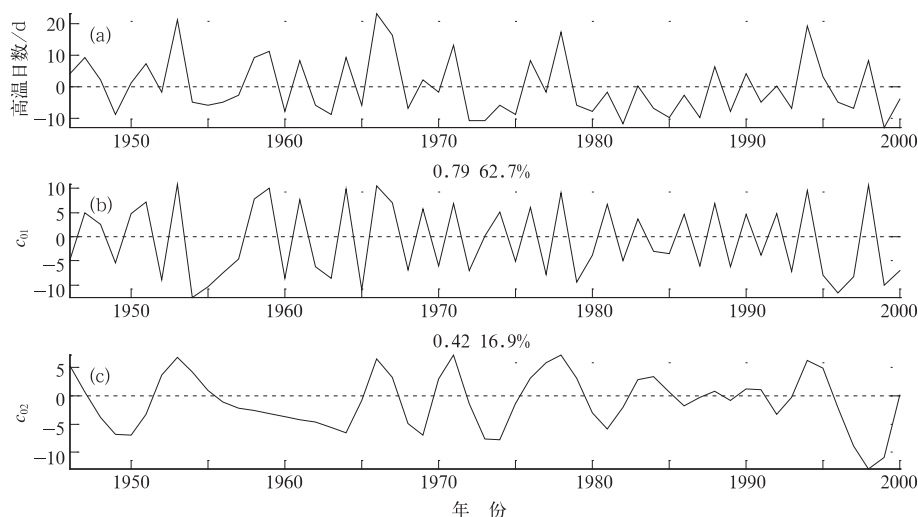


图 5 1946—2000 年南京地区 5—8 月高温日数(距平)序列(a)  
以及 EMD 的 2 个 IMF 分量  $c_{01}$  (b),  $c_{02}$  (c)

Fig. 5 The empirical mode decomposition components of the high temperature days in Nanjing from May to August during the period of 1946—2000

(a) the anomaly of the high temperature days, (b)  $c_{01}$  and  
(c)  $c_{02}$  of the two IMF components

这也证明了 EEMD 方法的稳定性和高信度。在得到的这两个主要时间分量分别解释原序列方差的 63.3% 和 22.0%，其中  $c_{01}$  幅度较大。 $c_{01}$  和  $c_{02}$  的时间变化可准确地反映出该物理过程中能量在时间上的分布规律。这两种时间变化模式对应于不同的全球 200 hPa 经向风波列的空间分布,前者主要作用区域在南亚经过南海、西太平洋的副热带地区到日本海附近、北美中纬度地区和南印度洋和南大西洋中高纬度地区,而后者仅位于欧亚中高纬度地区,因而具有不同的物理过程。把握这两个模式的变化特征就可以很好地得到南京夏季高温日数不同的年际变化特征。所以,得到高温变化在不同时间尺度上的各自变化特征和规律,可以为高温日数气候预测和建模提供很大的帮助。

## 参考文献

- [1] 张迎新,张守保. 2009 年华北平原大范围持续性高温过程的成因分析[J]. 气象, 2010, 36(10): 8-13.
- [2] 史军,丁一汇,崔林丽. 华东极端高温气候特征及成因分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 347-358.
- [3] 高荣,王凌,高歌. 1956—2006 年中国高温日数的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3): 177-181.
- [4] 张德宽,杨贤为,邹旭恺. 均生函数-最优子集回归在高温极值预测中的应用[J]. 气象, 2003, 29(4): 44-47.
- [5] Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations[J]. Climatic Change, 2002, 53(1): 355-392.
- [6] 朱周平,钱炳强. 中国东部地区夏季高温南北不均匀分布特征分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 26-31.
- [7] 韩世刚,周浩,何军,等. 1960—2006 年重庆高温日数时空变化特征[J]. 气象, 2009, 35(9): 68-76.
- [8] 刘绿柳,孙林海,廖要明,等. 国家级极端高温短期气候预测系统的研制及应用[J]. 气象, 2008, 34(10): 102-107.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spect rum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc Roy Soc London, 1998, 454A: 903-995.
- [10] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11: 112-114.
- [11] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proc Roy Soc London, 2004, 460A: 1597-1611.
- [12] Huang N E, Wu Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Rev Geophys, 2008, 46, RG2006, doi:10.1029/2007RG000228.
- [13] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1: 1-41.
- [14] Kalnay E, Kanamitsu, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteorol Soc, 1996, 77: 437-471.
- [15] Lu, R-Y, Oh J-H, Kim B-J. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian Continent in summer[J]. Tellus, 2002, 54A: 44-55.
- [16] Ding Q, Wang B. Circumglobal teleconnection in northern hemisphere summer[J]. J Climate, 2005, 18: 3482-3505.
- [17] Schickedanz P T, Bowen E G. The computation of climatological power spectra[J]. J Appl Meteorol, 1977, 16: 359-367.