

赵天保, 钱诚. 2010. 传统距平与变年循环参照系下的中国气温变率比较 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 34-44. Zhao Tianbao, Qian Cheng. 2010. Comparison between traditional anomaly and variability of temperature in China in modulated annual cycle reference frame [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 34-44.

# 传统距平与变年循环参照系下的中国气温变率比较

赵天保<sup>1,2</sup> 钱诚<sup>1</sup>

1 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

**摘要** 用功率谱分析、小波分析和经验正交函数 (EOF) 分析三种方法, 对比分析了 1953~2002 年北京单站以及中国区域地表气温的传统距平与以集合经验模分解 (EEMD) 的频-幅调制年循环 (MAC) 为参照的“距平”, 同时还比较了用传统距平描述的“年际及更长尺度变率”和以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量。通过对比分析, 发现传统距平和用传统距平所描述的“年际及更长尺度变率”仍然包含有年周期, 而且还包含有小于年尺度的波动; 而去除 MAC 的距平则更好地去除了准年周期, 而且以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量只包含有 1 年以上尺度的波动, 因而更适合用来描述“年际及更长尺度变率”。

**关键词** 集合经验模分解 (EEMD) 频-幅调制年循环 (MAC) 传统距平 年际变率

**文章编号** 1006-9585 (2010) 01-0034-11 **中图分类号** P423.3+3 **文献标识码** A

## Comparison between Traditional Anomaly and Variability of Temperature in China in Modulated Annual Cycle Reference Frame

ZHAO Tianbao<sup>1,2</sup> and QIAN Cheng<sup>1</sup>

1 *Key Laboratory of Regional Climate - Environment Research for Temperate East Asia of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

**Abstract** Traditional anomaly of surface air temperature was compared with “anomaly” in amplitude - frequency modulated annual cycle (MAC) reference frame defined by the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) method using power spectrum analysis, wavelet analysis, and Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis for Beijing station and all over China during the period from 1953 to 2002. The “interannual and longer timescale variability” represented by the traditional anomaly was also compared with the low frequency (timescale is longer than one year) component in MAC reference frame. The results show that the traditional anomaly and the traditional “interannual and longer timescale variability” still contain residual annual cycle. Moreover, the fluctuations with timescale less than one year exist in the traditional anomaly. In contrast, the anomaly that the MAC is excluded better excluded annual cycle, and the low frequency component in MAC reference frame only contains fluctuations with timescale longer than one year, thus it is more suitable to represent “interannual and longer timescale variability”.

**收稿日期** 2008-11-16 收到, 2009-09-13 收到修定稿

**资助项目** 中国气象局气候研究开放实验室开放课题 LCS-2006-03 和国家自然科学基金项目 40805032

**作者简介** 赵天保, 男, 1976 年出生, 博士, 助研, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhaotb@tea.ac.cn

**通讯作者** 钱诚, E-mail: qianch@tea.ac.cn

**Key words** Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), amplitude - frequency modulated annual cycle (MAC), traditional anomaly, interannual variability

## 1 引言

以往研究气温异常多是从气候距平资料出发。所谓气候“距平”就是消去原始资料中的年循环，是相对于年循环的偏差。以往“年循环”被定义为一个变量的气候平均值，“年际变率”则被定义为该变量相对于这个气候平均值的偏差，也就是通常说的距平。根据这种定义，年循环是每年固定不变的，不应再有年与年之间的变化，而“年际变率”也不应包括年周期。这是以往研究中最常用的方法。

然而，在面对气候系统这样一个非线性、非平稳的系统时，以往这种平稳的假设在实际研究中常常会出现矛盾的地方。例如，选择“气候平均”的起始时段因人而异，过去较多的是取 1961~1990 年的平均值，而根据世界气象组织的最新建议是取 1971~2000 年的平均值。但不同的时段的平均值是不同的，也就是计算所得的“年循环”是不同的。再如，过去研究 El Niño 和南方涛动 (ENSO) 很多是从距平资料开始的，得出 ENSO 锁相于季节循环 (Rasmusson and Carpenter, 1982)，即 El Niño 的成熟位相大多在冬季。这样 El Niño 事件期间与 La Niña 事件期间的年循环就明显不同：El Niño 事件期间的年循环偏弱，而 La Niña 事件期间的年循环偏强 (Gu and Philander, 1995)。

不少学者认识到年循环是变化的，使用传统的“距平”会存在一定的问题，并提出了一些不同的方法加以改进。其中，使用较多的是以 1976 年或 1977 年为界，分前后时段分别计算距平，如朱益民和杨修群 (2003) 在研究太平洋年代际涛动 (PDO) 和中国气温年代际变化的联系时，为了除去年际异常中所包含的年代际背景信息，在计算 Niño3 指数和中国气温距平时按 PDO 不同的位相来计算，即以 1976~1977 年 PDO 位相转换期为界，分 1951~1977 年 (处于 PDO 冷位相期间) 和 1978~1998 年 (处于 PDO 暖位相期间) 两段时间来分别定义气候平均值，再分别计算相

应的距平值。Pezzulli et al. (2005) 和 Shen et al. (2005) 提出考虑每一年的年循环来计算距平。Wu et al. (2008) 的研究定义了频-幅调制的年循环 (amplitude - frequency Modulated Annual Cycle, MAC)，认为非线性、非平稳的气候系统的年循环的频率和振幅每年都是变化的，并且发展了以集合经验模分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) (Wu and Huang, 2005, 2009) 方法为基础的从原始数据中自适应地获取 MAC 的方法，同时提议以 MAC 作为气候距平的参照系。Qian et al. (2009) 又指出以 MAC 作为气候距平参照系可以克服传统距平计算中因选择时段的不同而产生差异的缺陷，同时提出在 MAC 参照系下，分时间尺度来研究不同时间尺度上中国气温变化的空间模态、时间演变及其影响因子的思路。

本文运用 EEMD、功率谱分析、小波分析、EOF 分析等多种方法，利用中国地表气温对比传统距平与以 EEMD 的 MAC 为参照的“距平”，同时还比较用传统距平所描述的“年际及更长尺度变率”和以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量的一些特征和差异。

## 2 数据和方法

本文所用的气温资料为中国气象局气象信息中心发布的 1951~2004 年中国区域 194 个台站均一化的逐日地表气温观测资料。从中筛选出从 1952 年 1 月 1 日开始有观测记录的站点共计 60 个。之所以用逐日资料，是为了增加样本个数，从而减小资料处理过程中的边界效应 (Huang et al., 1998; Wu and Huang, 2009) 的影响。资料处理方法参考 Qian et al. (2009)，对其中某些天有缺测的台站，用前、后两天的平均值进行插值。经过初步的质量控制后，再用非线性、非平稳时间序列分析方法 EEMD 将各站逐日原始序列进行时间尺度分解。EEMD 的边界点的处理方法参考 Wu and Huang (2009)。为了便于分析，在进行 EEMD 前，所有台站每个闰年的 2 月 29 日的数

都已被去掉,使得每年都是 365 个数据。此外,为了减少边界效应的影响,各台站 EEMD 结果的第一年和最后两年不进行分析。因此,本文实际分析的时间段为 1953~2002 年。各台站的逐日数据经过 EEMD 时间尺度分解后,将其重建为年以下尺度的高频分量、年循环分量 (MAC) 和年以上尺度的低频分量等三大分量 (第三部分将用具体个例介绍)。然后通过功率谱分析和 Morlet 小波分析 (Torrence and Compo, 1998) 来比较传统的距平序列 (相对于 1961~1990 年的平均值) 和去除 MAC 后的序列;再对 EEMD 的年以上尺度低频分量进行 EOF 分析,并与传统距平序列的 EOF 结果进行对比。

此外,本文还计算了北京站逐日气温 EEMD 所得的 MAC 分量的“瞬时频率”(Huang et al., 1998),其具体计算方法为:对某一给定的时间序列  $x(t)$ ,经过希尔伯特变换后得到序列  $y(t)$ ,即

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt', \quad (1)$$

其中  $P$  为柯西主值;  $x(t)$  和  $y(t)$  构成复函数  $z(t)$ :

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)}, \quad (2)$$

其中  $i = \sqrt{-1}$ ; 瞬时振幅  $a(t) = [x^2(t) + y^2(t)]^{1/2}$ ;

瞬时相函数  $\theta(t) = \arctan \left[ \frac{y(t)}{x(t)} \right]$ 。那么,瞬时频

率  $\omega = \frac{d\theta(t)}{dt}$ 。

EEMD 方法 (Wu and Huang, 2005, 2009; Huang and Wu, 2008) 是基于 Huang et al. (1998) 提出的经验模分解 (EMD) 方法 (Huang et al., 1998, 1999, 2003, 2008; Flandrin et al., 2004; Wu and Huang, 2004; Wu et al., 2007) 的基础上发展起来的一种噪声辅助数据分析方法。EMD 方法是一种自适应的、时域上局部的分解方法 (Huang and Wu, 2008), 它把原数据表示成有限个周期成分的组合, 这些周期成分被称为“本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)” (Huang and Wu, 1998; Huang and Wu, 2008)。EMD 方法对不同尺度的波动或趋势的逐级分解是完全基于数据本身的, 摆脱了以往傅里叶分析、小波分析中要事先给定基函数 (所给的基函数可能并不符合数据本身特性) 的限制, 被

认为是一种高效的自适应分解方法 (Huang and Wu, 2008)。Huang et al. (1998) 将 EMD 方法和希尔伯特变换结合, 发展成希尔伯特-黄变换 (HHT) 方法。很多研究已表明, HHT 方法是一种高效的时-频-能量表达方法, 非常适合于非线性、非平稳时间序列分析, 在近年来被广泛应用于科学研究和工程设计中 (Huang and Wu, 2008)。不过, 当遇到局部高频信号时, EMD 方法也会出现尺度混合 (mode mixing) 的问题 (Huang et al., 1998; Wu and Huang, 2009) 而使得分解在物理上不唯一。为克服这个缺陷, Wu and Huang (2005, 2009) 提出 EEMD 方法对原 EMD 方法进行改进, 通过在原数据中加入适当大小的白噪音, 给 EMD 提供一个相对一致的参照尺度分布, 经多次计算后集合平均使所加的白噪音互相抵消, 最后得到尺度一致的分量, 这样很大程度上克服了尺度混合的问题。

### 3 单站逐日地表气温的 EEMD 分析

这里以北京站为例, 具体介绍 EEMD 方法的步骤。对该站的逐日地表气温序列 (实验数据样本数  $N=19345$ ), 加该序列标准偏差 0.2 倍的白噪音序列后进行 EMD 得到  $(\log_2 N - 1)$  的整数个 IMF (13 个) 和一个残差, 每次都加同样的信噪比, 但数值不同的白噪音序列并重复上述过程 1000 次 (实验结果显示 1000 次以上的集合次数所得的结果已基本没有差别)。最后将上述 1000 组结果相应的 IMF 和残差各自进行集合平均得到一组 13 个分量和一个残差。Wu et al. (2008) 和 Wu and Huang (2009) 指出 EEMD 的结果并不一定是 IMF, 因此还需要进行一步后处理才能得到年尺度的单波形式: 将上述 EEMD 得到的第 6 个分量 (年尺度) 和第 7 个分量 (包括部分年尺度和部分更长时间尺度的分量) 相加后再进行一次 EMD, 所得的第 1 个 IMF 即为 MAC 分量。为了简便, 本文把所有这些尺度划分为三大分量, 即: 年以下尺度的高频分量 (第 1 个到第 5 个分量之和)、MAC 分量 (后处理所得的第 1 个 IMF) 和年以上尺度的低频分量 (后处理中的余项以及第 8 个到最后一个分量包括趋势项的总和)。原逐日序列及其 EEMD 后的三大分量如图 1 所示。

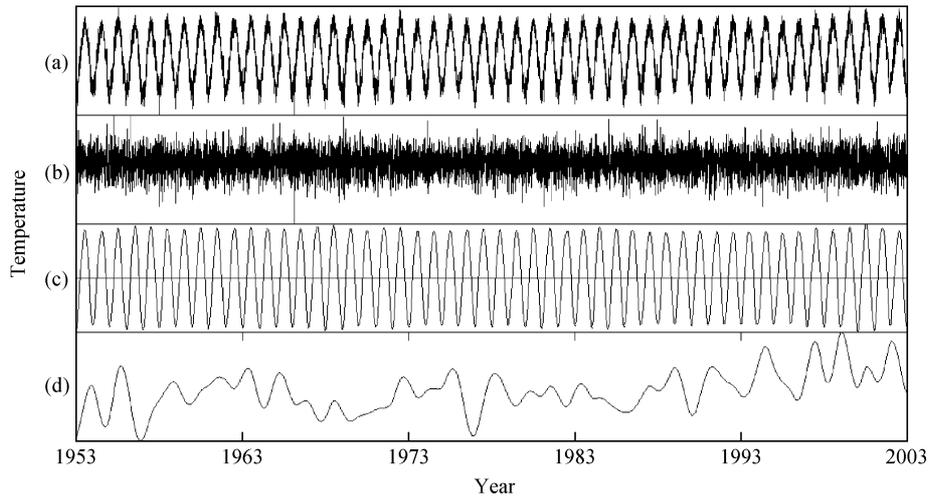


图 1 北京站 1953~2002 年逐日气温序列经 EEMD 时间尺度分离：(a) 原始逐日序列；(b) 年以下尺度高频分量；(c) 年循环分量；(d) 年以上尺度低频分量

Fig. 1 Multi-timescale decomposition of raw daily surface air temperature (SAT) series by EEMD method in Beijing during the period of 1953–2002; (a) Raw daily time series; (b) high-frequency component (timescale shorter than one year); (c) modulated annual cycle (MAC); (d) low-frequency component (timescale longer than one year)

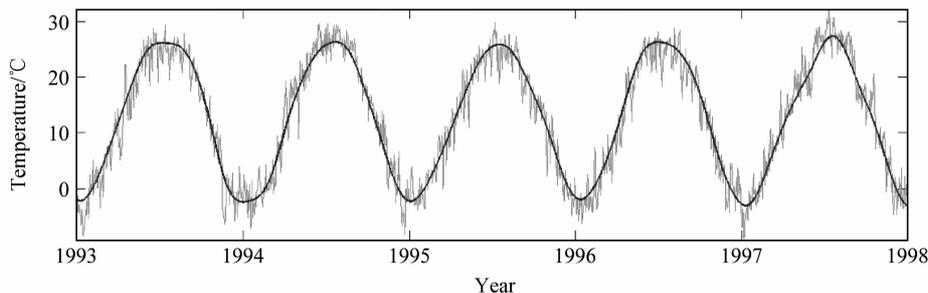


图 2 北京站 1993~1997 年的逐日气温序列 (灰线) 和 EEMD 提取的年循环分量序列 (粗黑线)

Fig. 2 Time series of raw daily SAT (gray) and its MAC (solid black line) extracted by EEMD method in Beijing during 1993–1997

图 1c 显示出 EEMD 方法分解的北京站地表气温每一年的 MAC 都是变化的。为了更直观，我们取出其中的 5 年进行局部放大。图 2 是其中 5 年 (1993~1997 年) 的 MAC，把它们和原来的逐日序列放在一起，可以清楚地看到 EEMD 方法提取的 MAC 很好地拟合了原来的逐日序列，而且反映出这 5 年中 1995 年的 MAC 振幅比其他 4 年要小；1993 年夏季从升温到降温的转变比 1997 年同期要平缓得多，气温维持高温的时间相对较长。如果计算 MAC 分量的瞬时频率 (图 3)，会发现它的频率是随时间变化的，基本是围绕  $1 \text{ a}^{-1}$  的频率 (对应于准 1 年周期) 在  $0.8 \text{ a}^{-1}$  和  $1.2 \text{ a}^{-1}$  的频率带内上下波动，这也符合非线性系统的

波内调频性质。

## 4 传统距平序列与去除 EEMD 的 MAC 后的序列对比

### 4.1 功率谱分析

为了比较传统的距平序列与去除 EEMD 的 MAC 后的序列，首先采用最简单的离散功率谱分析，选择北京站气温做个例分析。将 1953~2002 年的传统距平月平均序列和去除 EEMD 的 MAC 后的月平均序列分别进行离散功率谱分析 (图 4)，可以发现：传统距平序列的显著周期 (通过 0.01 显著性检验) 有 600、300、200、150、120 月

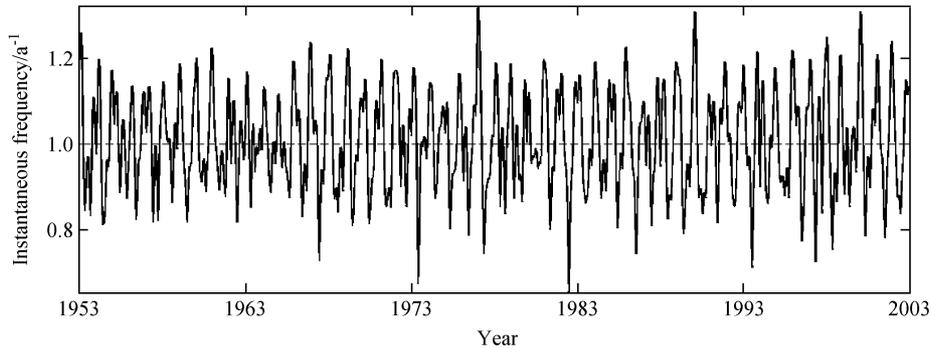
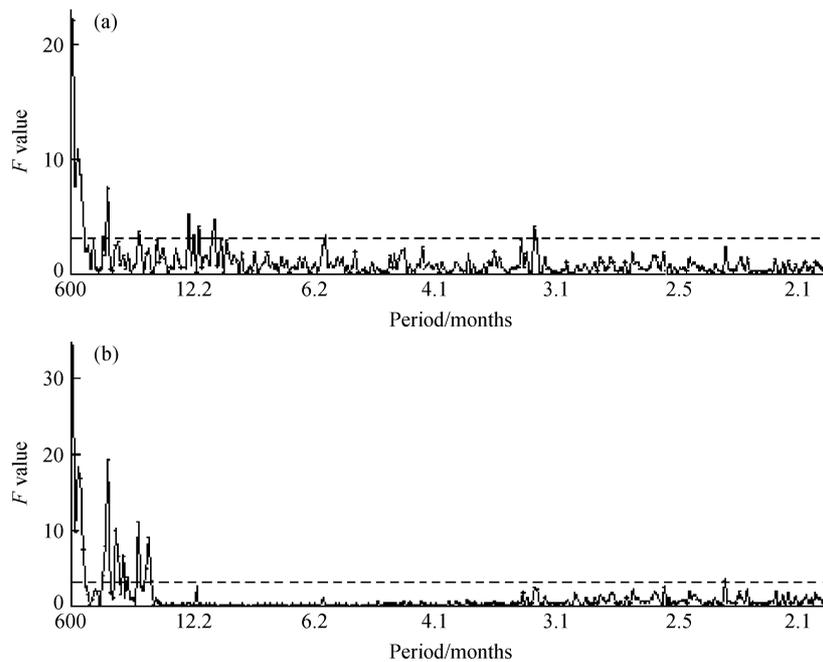


图3 北京站 1953~2002 年地表气温年循环分量的瞬时频率

Fig. 3 Instantaneous frequency of MAC of SAT in Beijing during the period of 1953 - 2002

图4 北京站地表气温的两种月平均序列的离散功率谱分析: (a) 传统距平序列 (相对于 1961~1990 年平均); (b) 去除 EEMD 的 MAC 后的序列。实线为  $F$  值, 虚线为 0.01 显著性水平Fig. 4 Discrete power spectrum analysis of monthly SAT series in Beijing during the period of 1953 - 2002: (a) Traditional anomaly (to 1961 - 1990 mean); (b) residual series that MAC is subtracted from the raw data. Solid line indicates  $F$  value and dotted line indicates 0.01 significance level

(10 年以上的年代际尺度), 46.2、40.0、22.2 月 (2~4 年的年际尺度), 12.8、12.2、11.8、10.7、10.5、10.0 月 (准年周期尺度), 5.9 月 (半年尺度) 和 3.4、3.3 月 (季节尺度)(图 4 a)。从这个结果可以看出, 传统距平序列事实上还是包含了年周期尺度, 并没有有效地将其去除, 这与传统研究想通过“距平”的方法去除年循环的初衷不符, 或者说并没有达到定义距平的目的;

而且, 除了仍然含有年周期外, 传统距平序列还含有尺度小于年周期的高频信号。

图 4b 则显示: 去除 EEMD 的 MAC 后的序列的显著周期有 600、300、200、150、120 月 (10 年以上年代际尺度), 46.2、42.9、40.0、33.3、31.6、28.6、26.1、22.2、19.4、18.8 月 (2~4 年年际尺度) 和 2.3 月 (季节尺度); 准年周期尺度的能量已大幅消减, 无法通过显著性检验; 而 2

~4 年左右的年际尺度的能量则相比图 4a 更加显著。由图 4a 和 4b 的比较可以看出，对去掉 EEMD 提取的 MAC 后的序列，即使是用与 EMD 方法的原理完全不同的傅里叶分析，也同样表明它是相比传统距平更有效地去除了准年周期尺度。

#### 4.2 小波分析

为了考察上一小节所得结果是否依赖于所采用的时频分析方法，我们进一步用小波分析进行上述对比（图 5）。结果显示，传统距平序列（图 5a）的全小波能量虽然没有通过显著性检验的周

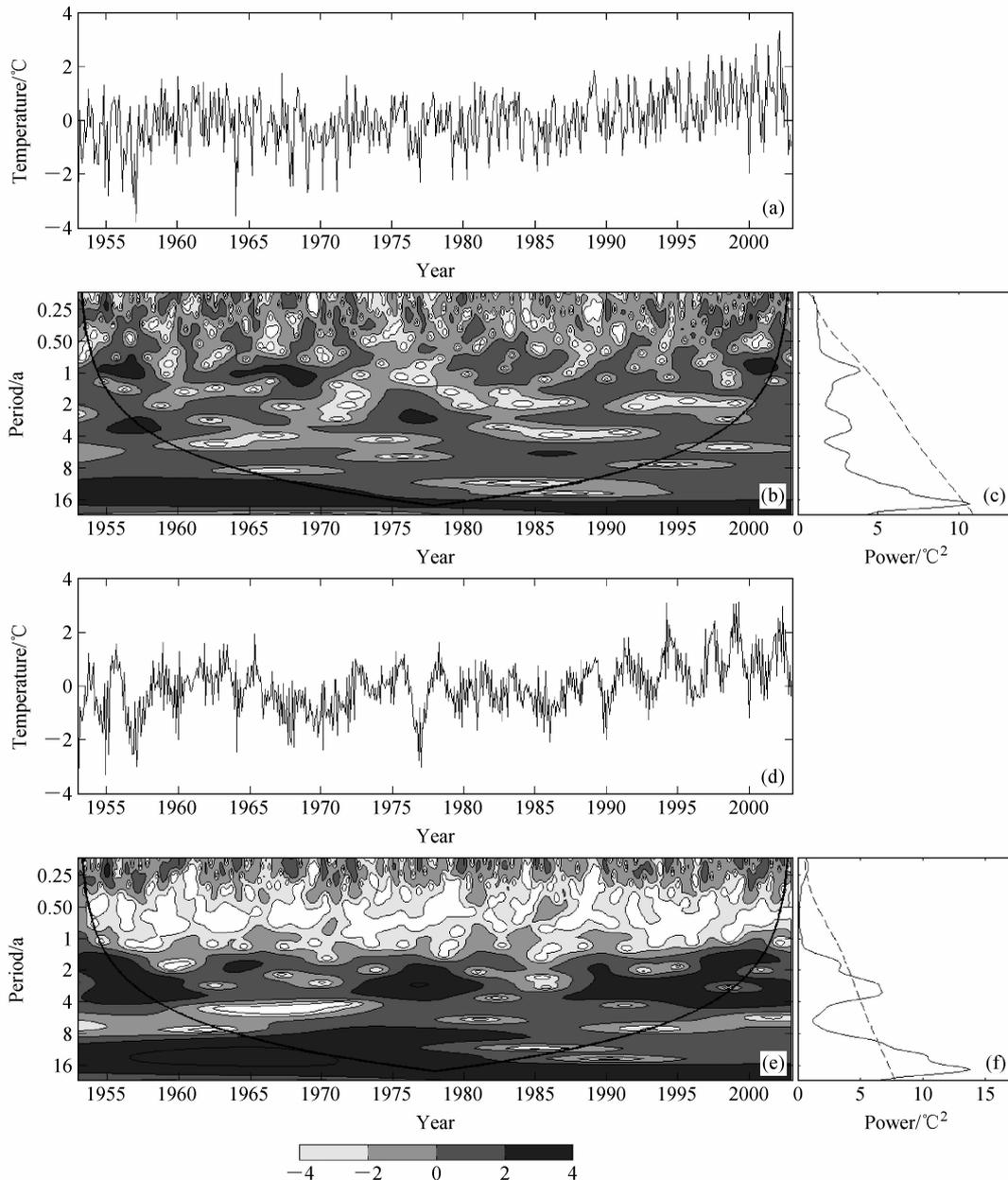


图 5 北京站 1953~2002 年地表气温的月平均序列的 Morlet 小波分析：(a)、(b) 和 (c) 为传统距平序列（相对于 1961~1990 年平均）的结果，(d)、(e) 和 (f) 为去除 EEMD 的 MAC 后的序列。(a) 和 (d) 为所分析的原始序列；(b) 和 (e) 为小波能量谱；(c) 和 (f) 为全小波谱（实线），虚线为 0.01 显著性水平

Fig. 5 Morlet wavelet analysis for monthly SAT series in Beijing during the period of 1953-2002; (a), (b), and (c) are for traditional anomaly (base period is 1961-1990), and (d), (e), and (f) for residual series that MAC is subtracted from the raw data. (a) and (d) are the analyzed time series; (b) and (e) are their wavelet power spectrum; (c) and (f) are global wavelet spectrum (solid line), dotted line indicates 0.01 significance level

期,但还是可以看到在准年周期尺度、2~4年尺度和准16年尺度上,全小波能量都存在极值(图5c)。而且,对于准年周期尺度而言,小波能量在1953~2002年间的各个时段都有残留(图5b)。这表明,传统距平仍然残留了很多年循环的信息。这和上一小节的结果是一致的。而对去掉EEMD的MAC后的序列(图5d),在准年周期尺度上,全小波能量几乎为零(图5f),而且在1953~2002年间的各个时段内也基本都接近于零(图5e)。与传统距平序列的结果相比,它在整个时段上都更有效地去除了准年周期尺度,而且突出了2~4年的年际尺度和10年以上年代际尺度的显著周期,这和上一节傅里叶分析所得的结果是一致的。同时,还值得指出的是2~4年尺度的波动在20世纪50年代、70年代和90年代比较明显(图5e)。

## 5 传统“年际及更长尺度变率”与EEMD的年以上尺度低频分量对比

上一节的分析是基于单站的个例分析,下面对整个中国区域的地表气温就“年际及更长尺度变率”进行对比。以往研究某一变量的年际及更长尺度变率很多是用传统距平资料。我们将1953~2002年中国气温的月平均的传统距平序列进行EOF分析,结果显示它有两个主要的模态(图6a-d)。第一模态(图6a)解释方差占50.4%,其空间分布表现为:除四川盆地外全国符号一致,正值最大中心在内蒙古海拉尔地区和吉林省;东北、内蒙古西部、新疆北部是正值较大的几个区域;负值最大的区域在四川的甘孜地区。这个模态表现的是除四川盆地外全国一致变化,而且北方地区振幅相对较大。这与前人研究的结果基本一致(宋连春,1994;康丽华等,2006;濮冰等,2007;朱艳峰等,2007)。第二模态(图6c)解释方差占17.8%,其空间分布表现为:东北为负值区,其他地方为正值区,即东北和其他地区呈反相变化,当东北气温高(低)时,其他地方气温低(高)的分布形式。这与前人研究的结果也基本一致(康丽华等,2006;濮冰等,2007;朱艳峰等,2007)。所不同的是本文的结果显示新疆北部和东北的变化是不一致的,而与其他地区的变化是一致的。造成这种差异的原因可能是由于受

逐日资料长度所限,本文在新疆地区的取样较少,造成插值上的差异。但这个差异并不影响本文所要对比的内容。

与上一节不同的是,这里我们所用的对比序列是将原序列同时去除EEMD的年以下尺度高频分量和MAC后的序列,也就是用EEMD的年以上尺度低频分量(以下简称“低频分量”(如图1d)。将中国地区各站气温的低频分量(逐日序列)同样进行EOF分析,结果显示它也有两个主要的模态(图6e-h)。第一模态(图6e)解释方差占49.5%,表现的空间分布和图6a大体一致,也是除四川盆地外全国一致变化,而且北方地区振幅相对较大。第二模态(图6g)解释方差占16.3%,表现的空间分布和图6c大体一致,也是东北和其他地区呈反相变化,当东北气温高(低)时,其他地方气温低(高)的分布形式。

虽然以上两种“年际及更长尺度变率”表述方式在EOF分析的两个主要模态的空间分布上基本一致,然而,它们各自所对应的时间系数却反映出很大的差别(图6b和f;d和h)。图6f、h虽然是用逐日序列分析所得,但是其时间系数却比图6b、d的平滑得多。将这些时间系数各自进行小波分析(图7),可以确定其相应的周期。结果表明,月平均的传统距平序列的PC1包含有各种时间尺度的波动(图7a),其中准年周期尺度的波动在20世纪50年代中期、60年代末期和80年代以后比较明显,而2~4年尺度的波动在20世纪50年代中后期、70年代中后期和90年代中后期比较明显。它的全小波谱(图7b)反映出其显著周期为准1/4年(季节内)尺度,而在准1年尺度、2~4年尺度和准16年尺度上虽然都没通过显著性检验,但是都存在极值。然而,图7c的对比结果显示,低频分量的PC1只包含有1年以上尺度的波动;而1年以下尺度的小波能量除了左边界效应区以外都为零。它的全小波谱(图7d)显示其显著周期有2~4年尺度和6~16年尺度,其中2~4年尺度在1955~1965年、1975~1985年和90年代比较明显,而6~16年尺度在1970~1990年比较明显(图7c)。对于PC2,也有类似PC1的结果:传统距平序列的PC2也包含有各种时间尺度的波动(图7e),其显著周期也为准1/4年(季节内)尺度,在准1年尺度、准2年尺度

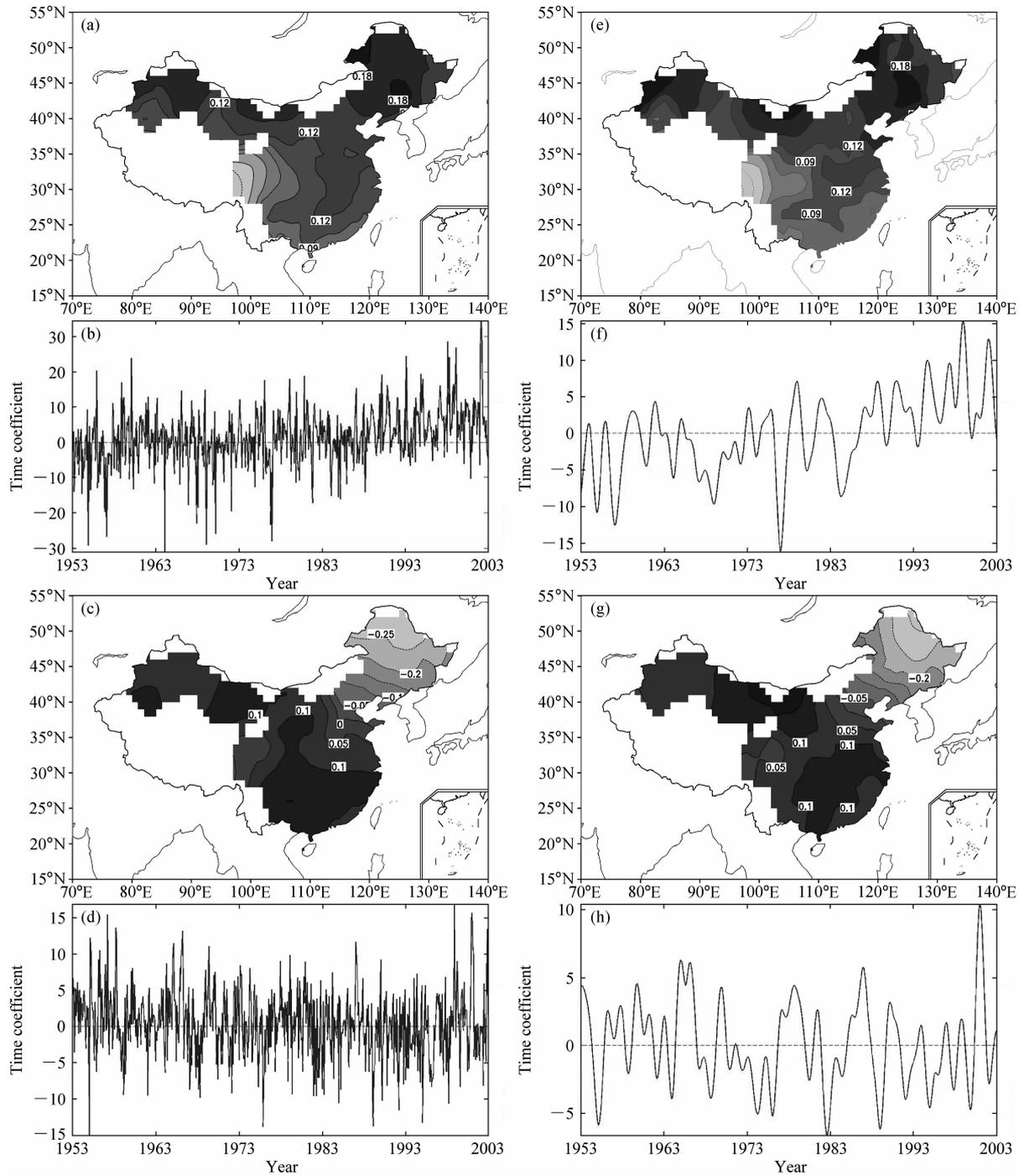


图 6 中国 1953~2002 年地表气温的 EOF 分析：(a) - (d) 为月平均的传统距平（相对于 1961~1990 年平均）；(e) - (h) 为 EEMD 的年以上尺度低频分量。(a) 为第一模态（方差贡献 50.4%）；(b) 为第一模态对应的时间系数；(c) 为第二模态（方差贡献 17.8%）；(d) 为第二模态对应的时间系数；(e) 为第一模态（方差贡献 49.5%）；(f) 为第一模态对应的时间系数；(g) 为第二模态（方差贡献 16.3%）；(h) 为第二模态对应的时间系数

Fig. 6 EOF analysis of SAT in China during the period of 1953 - 2002: (a) - (d) are for traditional monthly anomaly (base period is 1961 - 1990), and (e) - (h) are for low frequency component decomposed by EEMD. (a) and (e) are the first leading modes, which explain 50.4% and 49.5% of the total variance, respectively; (b) and (f) are the corresponding principal components of the first leading modes (PC1); (c) and (g) are the second leading modes, which explain 17.8% and 16.3% of the total variance, respectively; (d) and (h) are the corresponding principal components of the second leading modes (PC2)

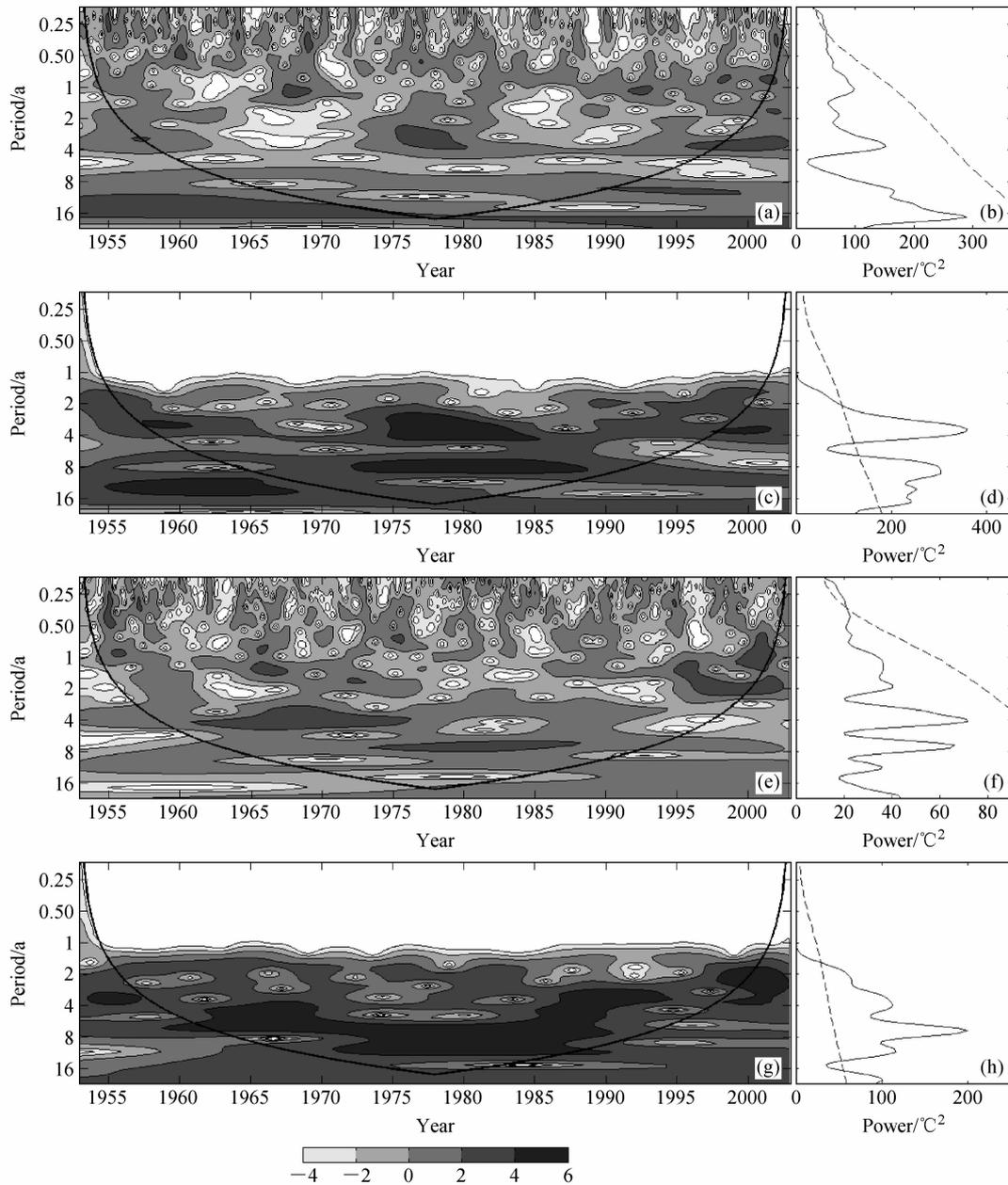


图7 EOF分析时间系数的Morlet小波分析: (a)、(b)、(e)和(f)为月平均的传统距平; (c)、(d)、(g)和(h)为EEMD的年以上尺度低频分量; (a) - (d)为PC1; (e) - (h)为PC2; (a)、(c)、(e)和(g)为小波能量谱; (b)、(d)、(f)和(h)为全小波谱  
Fig. 7 Morlet wavelet analysis for PC1 and PC2 of EOF: (a), (b), (e), and (f) are for traditional monthly anomaly; (c), (d), (g), and (h) are for low frequency components which timescale is longer than one year decomposed by EEMD; (a) - (d) are for PC1, and (e) - (h) are for PC2; (a), (c), (e), and (g) are wavelet power spectrum; (b), (d), (f), and (h) are global wavelet spectrum

和准4年尺度上虽然都没通过显著性检验,但是都存在极值(图7f);而低频分量也是除左边界效应区外只包含1年以上尺度的波动,其显著周期为2~10年,其中以准6年尺度最明显。PC1和PC2的对比结果同时也表明,用低频分量描述的“年际及更长尺度变率”更突出了年际和年代际两

个尺度的显著周期。

## 6 结论与讨论

本文分别用功率谱分析、小波分析和EOF分析3种方法,对比了1953~2002年中国区域地表

气温的传统距平与以 EEMD 的 MAC 为参照的“距平”, 同时还比较了以传统距平所描述的“年际及更长尺度变率”和以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量, 得到以下主要结论:

(1) 北京站气温的 MAC 具有准 1 年周期, 它的振幅和频率都存在年与年间的变化; 它基本是围绕  $1 \text{ a}^{-1}$  的频率在  $0.8 \text{ a}^{-1}$  和  $1.2 \text{ a}^{-1}$  的频率带内调频。

(2) 传统距平和以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量的 EOF 分析的两个主要模态的空间分布是基本一致的, 第一模态都表现为除四川盆地外全国一致变化, 而且北方地区振幅相对较大; 第二模态都表现为东北和其他地区呈反相变化, 即当东北气温高(低)时, 其他地方气温低(高)的分布形式。

(3) 功率谱分析、小波分析和 EOF 分析显示, 北京站地表气温的传统距平以及用传统距平表示的中国区域气温的“年际及更长尺度变率”中仍包含有年周期, 这和定义“距平(去掉年周期)”相矛盾; 而且它们还包含了尺度小于年周期的波动, 这和所谓的“年际及更长尺度”变率也不一致; 而去除 MAC 的序列经小波分析对比表明是更有效地去除了准年周期尺度, 并且以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量也被小波分析证实是只包含 1 年以上尺度波动, 而且突出了年际和年代际两个尺度的显著周期。从这点来看, 以 MAC 为参照的年以上尺度低频分量相比传统距平更适合用来描述“年际及更长尺度变率”。

至于 EEMD 中所加白噪音的大小, Wu and Huang (2009) 认为在一定的窗口范围内, 白噪音振幅的不同取值对 EEMD 结果的影响很小; 他们建议一般情况下加原序列标准偏差 0.2 倍的白噪音。根据 Qian et al. (2009) 的实验结果, 对中国区域的逐日气温资料而言, 最佳信噪比是使后处理(如果是逐日序列, 将它的 EEMD 结果的第 6 和第 7 个分量加起来再作一次 EMD)能得到单一尺度的年周期分量; 在集合次数取 1000 次的情况下, 大多数站点是加原序列标准偏差 0.2 倍(有些站点是 0.3 倍)的白噪音。

致谢 本文所用的 EEMD 分析程序来自 <http://rcada.ncu.edu.tw/research1.htm>; 小波分析程序来自 ht-

[tp://paos.colorado.edu/research/wavelets/](http://paos.colorado.edu/research/wavelets/)。感谢吴召华博士在 EEMD 方法使用上的帮助。

## 参考文献 (References)

- Flandrin P, Rilling G, Gonçalves P. 2004. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 11: 112–114.
- Gu D, Philander S G H. 1995. Secular change of annual and interannual variability in the tropics during the past century [J]. *J. Climate*, 8 (4): 864–976.
- 国家气象信息中心气象资料室. 2006. 中国均一化历史气温数据集 (1951~2004) (1.0 版) [CD]. Climate Data Center, National Meteorological Information Center. 2006. China homogenized historical temperature datasets (1951–2004) (Ver. 1.0) [CD].
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 454A: 903–995.
- Huang N E, Shen Z, Long S R. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31: 417–457.
- Huang N E, Wu M L, Long S R, et al. 2003. A confidence limit for the empirical mode decomposition and the Hilbert spectral analysis [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 459A: 2317–2345.
- Huang N E, Wu Z. 2008. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies [J]. *Rev. Geophys.*, 46 RG2006, doi: 10.1029/2007RG000228.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339. Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. Interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 330–339.
- Pezzulli S, Stephenson D B, Hannachi A. 2005. The variability of seasonality [J]. *J. Climate*, 18: 71–88.
- 濮冰, 闻新宇, 王绍武, 等. 2007. 中国气温变化的两个基本模态的诊断和模拟研究 [J]. *地球科学进展*, 22 (5): 456–467. Pu Bing, Wen Xinyu, Wang Shaowu, et al. 2007. Diagnostic and modeling study of the two basic modes of surface air temperature and its variation in China [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 22 (5): 456–467.
- Qian C, Wu Z, Fu C, et al. 2009. On multi-timescale variability of temperature in China in modulated annual cycle reference frame [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, doi: 10.1007/s00376-009-9121-4.
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 354–

- 384.
- Shen S S P, Shu T, Huang N E, et al. 2005. HHT analysis of the nonlinear and non-stationary annual cycle of daily surface air temperature data [C] // Huang N E, Shen S S P. Hilbert-Huang transform: Introduction and applications [M]. Singapore: World Scientific, 187-210.
- 宋连春. 1994. 近 40 年我国气温时空变化特征 [J]. 应用气象学报, 5 (1): 119-123. Song Lianchun. 1994. Characteristics of temperature in spatial and temporal variation in China during recent 40 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (1): 119-123.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79: 61-78.
- Wu Z, Huang N E. 2004. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. Proc. Roy. Soc. London, 460A: 1597-1611.
- Wu Z, Huang N E. 2005. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A noise-assisted data analysis method [R]. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies Technical Report # 193, ftp://grads.iges.org/pub/ctr/ctr\_193.pdf.
- Wu Z, Huang N E, Long S R, et al. 2007. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 104 (38): 14889-14894.
- Wu Z, Schneider E K, Kirtman B P, et al. 2008. The modulated annual cycle: An alternative reference frame for climate anomalies [J]. Climate Dyn., 31 (7-8): 823-841.
- Wu Z, Huang N E. 2009. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 1: 1-41.
- 朱艳峰, 谭桂容, 王永光. 2007. 中国冬季气温变化的空间模态及其与大尺度环流异常的联系 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 266-270. Zhu Yanfeng, Tan Guirong, Wang Yongguang. 2007. Variation of spatial mode for winter temperature in China and its relationship with the large scale atmospheric circulation [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 266-270.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641-654. Zhu Yimin, Yang Xi-qun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641-654.