

# 基于 EEMD 的中国地区 1956—2005 年 日照变化的趋势分析

李慧群 付遵涛<sup>†</sup>

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京 100871; <sup>†</sup>通信作者, E-mail: fuzt@pku.edu.cn

**摘要** 根据国家气象信息中心给出的逐日日照时数资料, 利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法, 得到中国地区日照时数的非线性趋势变化特征。对各气象台站日照时数的非线性变化趋势类型做了分类以及分区域和季节研究, 并与线性趋势进行对比。结果表明: 近 50 年来中国地区绝大部分气象台站(占总气象台站数的 67.5%)日照时数呈现下降的趋势, 尤其是在中国南部和东北地区, 呈现明显的区域特征和季节特征。日照时数的年代际变化整体在 1980 年前后出现气候转型, 即呈现前期日照较长、后期较短的气候形态。

**关键词** 日照时数; 集合经验模态分解(EEMD); 非线性趋势; 多年代趋势  
**中图分类号** P467

## Sunshine Duration's Trend Behavior Based on EEMD over China in 1956–2005

LI Huiqun, FU Zuntao<sup>†</sup>

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies,  
School of Physics, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: fuzt@pku.edu.cn

**Abstract** The daily sunshine duration data in 1956–2005 from national meteorological information center are used to analyze the sunshine duration's nonlinear trend behavior over China by the method of ensemble empirical mode decomposition (EEMD). The sunshine duration exhibits different nonlinear trends over different regions and in different seasons, most of them (over nearly 67.5% stations) show a descending trend, especially over the south and northeast China. The multi-decadal variability appears a climate shift in 1980s with the longer sunshine in the earlier stage and the shorter in the late part.

**Key words** sunshine duration; EEMD; nonlinear trend; multi-decadal trend

最近 50 年以来, 以气温升高为主导的气候变化特征在我国大部分地区很显著<sup>[1]</sup>, 在气候变化的因子中, 太阳辐射是一个很重要的驱动力。因此, 日照时间的长短也是影响温度变化的重要因子, 了解日照时数变化对认识当前气候变化具有重要意义。已有的研究发现日照时数最近 50 年来处于一个减少的过程中<sup>[2-4]</sup>, 此结论是在假定气候系统是线性平稳的基础上得到的。但是, 作为一个复杂的非线性

系统, 真实的气候变化更可能是非线性和非平稳的, 线性拟合的趋势可能与实际不符合。另外, 传统趋势分析中, 大尺度循环和趋势变化很可能混合在一起, 不能分辨出趋势变化还是周期震荡。因此, 本文应用近年发展起来的集合经验模态分解(EEMD)方法<sup>[5]</sup>分析日照时数变化的趋势特征, 特别是非线性趋势特征。

EEMD 方法具有自适应性和时间上的局部性特

国家自然科学基金(40775040, 40975027)资助

收稿日期: 2011-04-26; 修回日期: 2011-05-24; 网络出版日期: 2011-12-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20111221.1545.011.html>

点,是适应于非线性非平稳领域的时频分析方法,与其他方法相比,能够更好地提取趋势和周期信息<sup>[6]</sup>。该方法定义趋势为单一信号或其值小于预先给定的值,即集合经验模态分解的最后一项(残余项),不仅能够反映数据内在的和自适应的趋势,同时反映出序列在整个时间轴上变化的程度。该方法以及其前身 EMD 方法在气象研究中的应用很多,如孙娴等<sup>[7]</sup>利用 EMD 对中国 700 多个气象站(1951—2001 年)月平均气温进行了分析,提取气温变化趋势项得到空间分型;Li 等<sup>[8]</sup>用卫星高度表资料研究发现南极冰盖存在年代际变化;Bindschadler 等<sup>[9]</sup>用 85 GHz 垂直极地波动辐射表采集的数据发现新雪厚度具有大范围的显著变化;Hu 等<sup>[10]</sup>用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)方法研究全球变暖对北大西洋涛动(NAO)变率的影响,鉴别出与大尺度大气波形有关的 NAO 活动中心的北移;Xie 等<sup>[11]</sup>揭示了美国东南部热带气旋的年际和十年际尺度变化特征;等等。

本文基于集合经验模态分解方法,主要分析 1956—2005 年日照时数时间序列的非线性趋势变化特征和年代际趋势(将表征年代际震荡的 IMF (intrinsic mode function)分量与趋势项累加得到)特征,得到日照时数在较长时间尺度上的变化,对于日照时数的预测有一定参考价值。根据趋势变化类型的不同,将我国不同气象台站的日照时数变化做了类型分类,并与线性趋势进行简单对比,从而了解日照时数时间序列在整体以及局部的变化结构,更全面地了解全球变暖状态下的日照时数变化具体特征。

## 1 资料和方法

本文采用的资料来源于中国国家气象信息中心 752 个气象台站的逐日日照时数数据集,精度到 0.1 h。由于中国近地面气候观测在 1951 年以后才具有比较好的空间覆盖和时间连续性,兼顾资料长度尽量长和气象台站数目尽量多两个原则,选取从 1956 年 1 月 1 日到 2005 年 12 月 31 日,中间连续缺测不超过 30 天,在资料长度上满足总缺测数少于 50 组观测记录数据的气象台站。本文一共选取 309 个符合以上标准的气象台站的数据。在青藏高原地区、新疆地区和黑龙江北部选择的气象台站数量较少,大部分气象台站集中在我国南方地区、北方地区大部 and 西北地区中部。

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法是将复杂的信号进行平稳化处理,从而从原序列提取不同尺度或层次的波动和趋势分量,得到若干具有不同特征尺度的本征模函数(IMF)。EMD 是自适应的,同时基于信号的局部变化特性,适用于非平稳、非线性信号,是目前提取数据序列趋势的最好方法<sup>[12]</sup>。EMD 过程如下。

1) 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  $h_1$ 。

2) 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  $c_1$ ,代表原始序列中最高频的分量。其他剩余量可以表示为  $r_1 = x(t) - c_1$ 。

3) 对  $r_1$  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  $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n$ ,

即利用 EMD 将时间序列  $x(t)$  分解成一系列 IMF 和一个残余项。每个 IMF 分量具有如下特征:1) 极值点数和过零点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。

本文使用的 EEMD 方法是 EMD 的改进版,Wu 等<sup>[13]</sup>发现通过在原数据中加一定比列的白噪音后进行上述经验模态分解,经过多次计算,最后进行集合平均以使加入的白噪声互相抵消,不仅保留了原序列的信号信息,很大程度上克服了模态混合(mode mixing)问题,使分解在物理上唯一。本文在 EEMD 过程中,每次所加白噪音的振幅为合成序列标准差的 20%,集合平均次数为 1000 次。为了减小 EEMD 过程中的边界效应,参考文献[14]的方法增加了样本数,采用逐日资料进行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 全国平均日照时数的变化趋势特征

由我国 309 个气象台站的逐日日照时数序列做全国平均,得到新的逐日日照时数序列(1956 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日),用 EEMD 方法对该时间序列做分解后,得到 13 个 IMF 分量和一个趋势项(图 1),考虑到 EEMD 的边界效应,对首末年不做

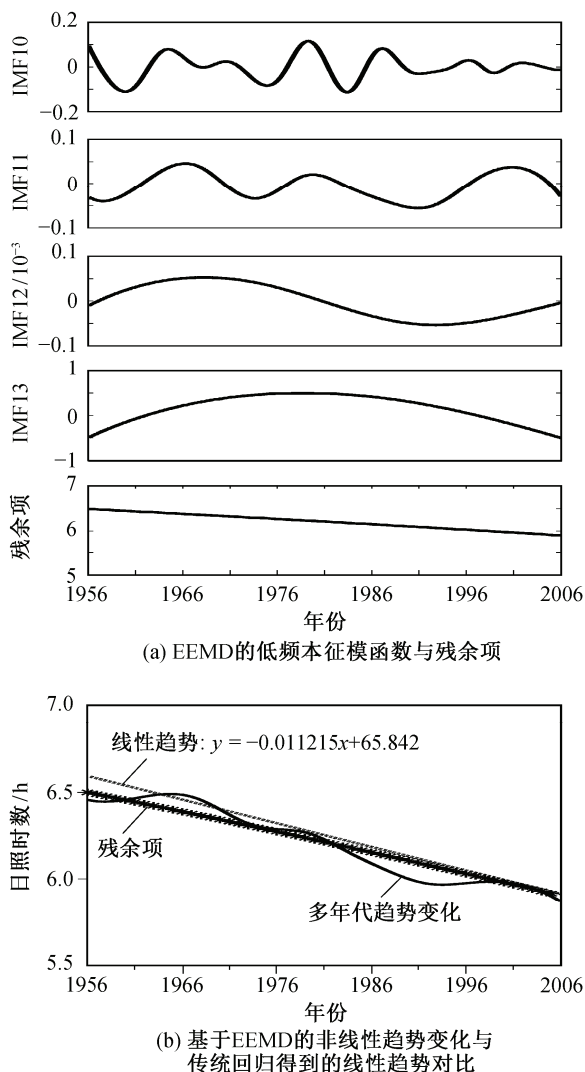


图 1 全国平均日照时数时间序列 EEMD 的低频本征模函数及基于 EEMD 的趋势变化与线性趋势对比  
 Fig. 1 Low frequency IMFs and trend of average sunshine duration series over China calculated by EEMD and their comparison with the linear fit trend

分析。

各项本征模函数代表了不同尺度的变化行为，对于 50 年的逐日日照时间序列来说，年循环信号是该序列中最突出的信号(图略)，同时 2, 4, 8, 11 和 25 年等年际振荡和年代际振荡也很明显(图 1)。这说明，从我国日照时数最近 50 年的逐日时间序列来看，太阳辐射仍然以自然的变率为主，体现在季节更替导致的年循环占据主导变率。年际与年代际的变化在整个序列中虽然不如前者显著，但是对于气候变化来说，大尺度振荡微弱的变化却能给气候系统带来深远的影响，本文的分析主要侧重于年代际趋势的变化情况。

图 1 中虚线代表传统的线性拟合表征的趋势变化；带\*号的线代表 EEMD 的最后一项即残余项的结果；实线代表基于 EEMD 的年代际趋势变化情况，是将年代际本征模函数(IMF11~IMF13)与趋势项累加得到，也可认为由滤掉小尺度振荡得到。从线性趋势与 EEMD 趋势项得到的非线性趋势可以看出，我国日照时数最近 50 年来总体上是一个均匀减少的过程，但是，从中也可以发现，线性趋势与非线性趋势比变化幅度更大，不能反映真实的变化趋势。这一点在下面不同类型的变化趋势图(图 2)中体现得更明显。同时，均匀减小的趋势和 Wild<sup>[15]</sup>全球太阳辐射先变暗后变亮的结论不是很一致。造成这一差异的原因是由于 EEMD 区分了大尺度的气候振荡和趋势变化，即把趋势变化从气候振荡中提取出来了。这一点可以从图 1 中 MF10~ IMF12 以及多年代际趋势得到验证，即日照时数具有明显的大尺度振荡结构，前期以 1966 年为峰值，处在一个较长日照时数气候背景下，后期以 1991 年为谷值，处在一个较短的日照时数背景下，因此去掉年代际振荡的影响，日照时数整体呈现减少的状态。将该大尺度振荡叠加到一个整体下降的气候趋势中，得到日照时数长期变化趋势(图 1(b)实线)：以 1981 年为界，前期处于一个较长日照背景，后期日照时数整体较短。具体来讲，从 1956 年开始，日照时数缓慢增加，在 1966 年达到最长日照时间。随后有微弱的下降过程，在 1974 年停止下降，保持不变状态至 1978 年。从 1978 年开始快速下降，直到 1991 年到达最短日照时数。随后日照时数开始缓慢增加，但是 2001 年之后又有微弱的减少过程。

另外，在多年代趋势中，IMF12 是构成多年代振荡的主要部分，也是该模函数主导了该时间序列年代际变化的趋势。IMF12 显示我国日照时数变化在 1980 年前后气候模态有了明显转换，由原来的比较高的日照时数模态转到比较短的日照时数的模态上来。从多年代波动来看，未来一段时间可能处在一个微弱的上升阶段。

从线性趋势和非线性趋势的对比来看，基于 EEMD 得到的非线性趋势与多年代趋势变化能更好地反映气候变化情况。线性趋势不能反映日照时数在各阶段的变化，也不能分辨大尺度结构与趋势变化，在变化程度上也放大了原序列的减少趋势。因此，线性趋势不能更好地反映非线性时间序列的变化。

## 2.2 日照时数变化趋势分类及其空间分布

2.1 节从整体上给出了日照时数的变化趋势。事实上,在不同的区域,日照时数变化的趋势具有不同的行为。为了更为详细地分析各气象台站日照时数的变化趋势,本文将集合经验模态分解后得到的非线性趋势项进行简单的对比,根据其变化形态将其粗略分为 4 类:上升型、先升后降型、先降后升型和下降型,各类型如图 2 中带\*号的线所示。

全国日照时数整体变化呈现出均匀下降的趋势,且线性趋势与非线性趋势给出相近的变化形态,只是变化的幅度有差别。从图 2 可以看出,线性变化和非线性变化差异很大,线性趋势只是对于日照时数变化局部阶段的粗略描述;更多的时候,非线性趋势,尤其是多年代趋势才相对准确地刻画了日照时数变化的完整结构,特别对于甘肃和内蒙古地区更是如此。本研究发现,很多气象台站的线性趋势和非线性趋势都呈明显差异(图略),对本文所分的 4 种类型来说,对于先升后降和先降后升的变化类型,线性趋势完全不能反映其变化,甚至有可能给出错误的变化趋势;对于上升和下降的变化类型来说,线性趋势与非线性趋势在变化程度上差异也

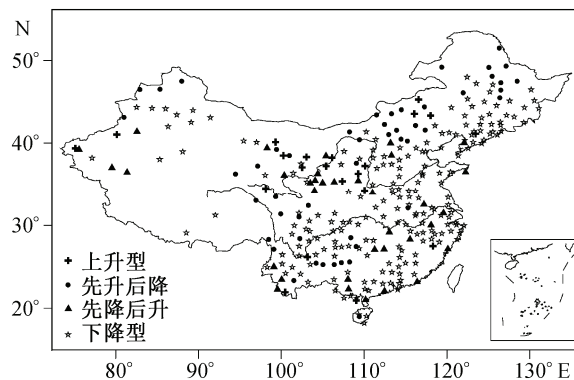


图 3 日照时数变化的趋势类型的空间分布  
Fig. 3 Geographic distribution of different trend types of sunshine duration

较大。

对各气象台站分类得到结果如下:上升型占 6.8%;先升后降型占 16.2%;先降后升型占 11.3%;下降型占 65.7%(图 3,其中所有类型的站点即为本文分析的 309 个气象台站)。如图 3 所示,我国日照时数各气象台站以下降趋势为主要趋势类型,尤其是在我国南部和东北地区大部,这也是我国区域平均后日照时数下降的主要原因。其次,就类型分布较为一致的区域来看,甘肃地区有不少气象台站日照时数呈上升趋势,在内蒙古中部有数站呈先升后降趋势,在甘肃榆中附近气象台站呈先降后升趋势,四川地区大部分气象台站显示下降趋势。本文挑出这 4 个典型区域进行进一步分析。

如图 2 所示,甘肃地区呈上升趋势的气象台站在 1981 年之前同全国整体趋势一样,处在一个较长的日照时数背景之下,之后有微弱的降低。所不同的是从 1986 年开始,该地区的日照并没有像很多地区一样减少,而是开始增加,随后保持在一个较长日照时数状态。EEMD 的趋势变化显示有明显的日照时数增加的趋势,但是线性趋势相对缩小了这个变化。

内蒙古中部地区前期日照增多,后期日照减少,主要是由于 1966 年前日照时数较短,随后处在较长日照时数的气候态,并且该气候态较其他地区持续更久导致。多年代趋势变化在前期很平稳,后期多年代际振幅变化都比较大,1986 年之后处在日照较短的气候背景下,与全国变化一致。

榆中附近地区日照先减少后增多,显示多年代振荡较其他区域弱,并且该区域在 1988 年之后日照时数异常增多。该区域和内蒙古中部一样,线性拟合可能得到错误的变化趋势。

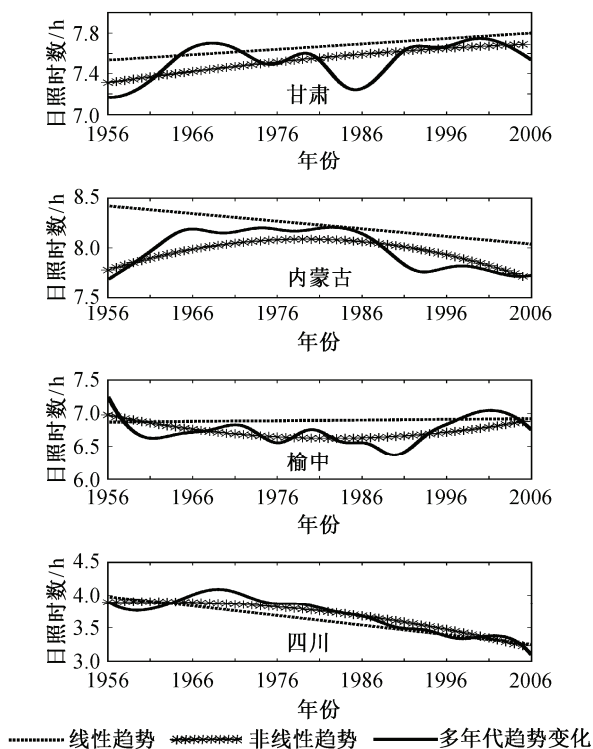


图 2 4 种趋势变化类型对应的线性趋势、非线性趋势与多年代趋势变化

Fig. 2 Four types' trend change: linear trend, nonlinear trend and multi-decadal trend

四川地区在前期保持较稳定状态, 1981 年以后呈现明显下降状态。从多年代际变化尺度上, 1971 年之前大尺度振荡能量较强, 后期多年代振幅相对较小, 日照处在一个较短的背景下。并且前期在 1968 年明显有一个日照极大值年的振荡存在, 所以导致该段时间日照时数的整体下降趋势被掩盖。

### 2.3 内蒙古中部地区和四川地区的季节变化

在图 2 和 3 的基础上, 下面以四川地区呈下降趋势的区域和内蒙古中部地区呈先升后降的区域为例, 具体分析日照时数变化的区域特征。选择这两个区域的原因是各自区域内的气象台站变化相对比较一致, 内蒙古中部 11 个气象台站日照时数先增多后减少, 四川地区 12 个气象台站日照时数减少, 并且在 1981 年前维持在一个较长日照时数不变, 后期日照时数呈减少状态。对这两个区域日照时数做区域平均, 之后对各季节进行趋势分析, 得到这两个区域的季节变化特征(图 4 和 5)。

如图 4 所示, 结合图 2, 对于内蒙古中部地区, 从季节变化上来看, 该区域春季、夏季和冬季趋势的变化与整体趋势较为一致。全年变化趋势主要受春季和夏季的影响, 尤其是夏季的变化。夏季多年代的振幅很小, 大尺度振荡也较弱, 趋势项呈明显

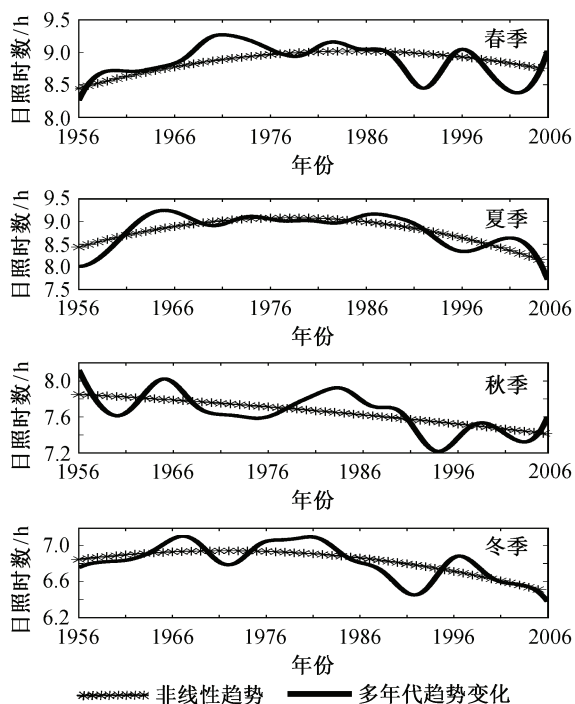


图 4 内蒙古中部地区各季节的趋势变化特征  
Fig. 4 Trend features in four seasons over middle region of Inner Mongolia

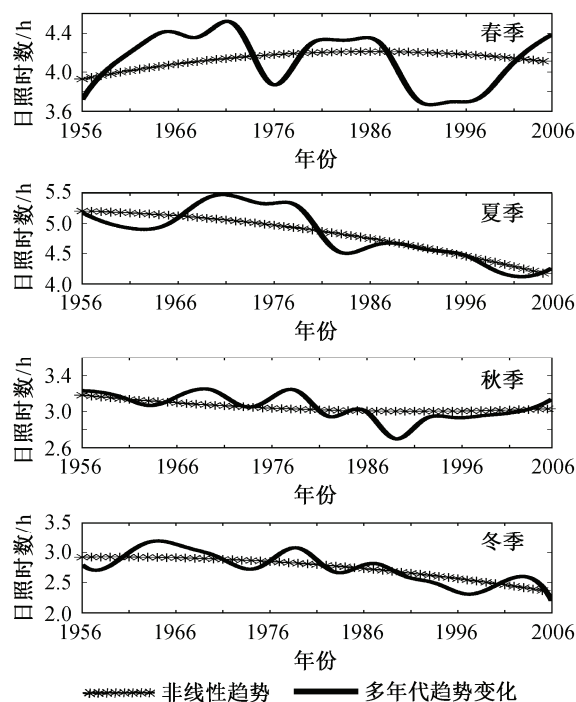


图 5 四川地区各季节的趋势变化特征  
Fig. 5 Trend features in four seasons over Sichuan

的先升后降状态, 因此主导了全年的趋势变化类型。另外春季大尺度振荡振幅很大, 秋季和其他区域比较一致, 一直在减少。

对于四川区域, 根据图 2 和图 5, 各季节的线性趋势变化与非线性趋势变化之间差异较全年的变化更大, 全年的变化显示在 1960 年之后整体呈下降趋势, 线性趋势与非线性趋势之间的差异是不同下降程度的差异。但各季节变化显示更强的阶段性特征, 其中春季和秋季的变化趋势甚至完全不同。该区域的夏季变化最为显著, 即整体日照时间减少, 并且在 1981 年以后减少幅度明显增大, 也是全年变化的最主要原因。其次是冬季的变化, 在 1981 年以后略为减少。春季较为异常, 有增加趋势, 但相对比较小, 大尺度振荡振幅也很大。秋季变化较为平缓。春季与秋季的非线性趋势呈现出相反的位相, 从而导致全年变化趋势的一致性。4 个季节在气候态上较为一致, 即以 1981 年为界, 前期日照较长, 后期较短。

### 3 结论和讨论

中国地区日照时数近 50 年来总体呈下降趋势, 绝大部分气象台站(占总气象台站数的 67.5%)呈现下降的趋势, 尤其是在我国南部和东北地区更加明



显,下降趋势占据主导。我国多年代变化整体在 1980 年前后出现气候转型,即呈现前期日照较长、后期较短的气候形态。另外,我国日照变化类型呈明显的区域特征和季节特征,甘肃、陕西和宁夏地区有些气象台站呈现上升的趋势,内蒙古地区中东部先升后降趋势明显,1980 年前后气候出现明显的转型。榆中附近地区日照时数先减少后增多。四川盆地日照时数的减少趋势是由于最近二十多年的下降引起,可能和该区域最近 20 年的气溶胶浓度变化有很大关系。就季节来看,夏季是影响日照时数变化的主要季节,春季大尺度振荡可能整体较强。不同区域和季节差异显著。

中国地区日照时数总体上在减少,但研究发现云量也在降低<sup>[16]</sup>。通过分析气溶胶增加的区域与日照时数减少的区域的一致性,很多学者认为这主要归因于气溶胶的变化<sup>[3,16-17]</sup>。

对一个非线性、非平稳的气候变化序列来说,线性趋势不能反映序列的变化真正趋势,也不能反映时间序列的阶段性变化特征,甚至有可能得到错误的趋势。当趋势变化和大尺度振荡混淆在一起时,EEMD 给出一种很好的分辨大尺度循环和非线性趋势的办法。

### 参考文献

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2007, 3(增刊): 1-5
- [2] Che Huizheng, Shi Guangyu, Zhang Xiaoye, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32: L06803
- [3] Liang Feng, Xia Xiang'ao. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000. *Annales Geophysicae*, 2005, 23: 2425-2432
- [4] Kaiser D P, Qian Yun. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: indication of increased haze pollution?. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(21): 2042
- [5] Huang N E, Wu Zhaohua. A review on Hilbert-Huang Transform: the method and its applications on geophysical studies. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46: RG 2006
- [6] Wu Zhaohua, Huang N E, Long S R, et al. On the trend, detrending, and the variability of nonlinear and non-stationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104: 14889-14894
- [7] 孙娴,林振山. 经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征. *地理学报*, 2007, 62(11): 1132-1141
- [8] Li Yonghong, Davis C H. Improved methods for analysis of decadal elevation-change time series over Antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44: 2687-2697
- [9] Bindshadler R, Choi H, Shuman C, et al. Detecting and measuring new snow accumulation on ice sheets by satellite remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 2005, 98: 388-402
- [10] Hu Zengzhen, Wu Zhaohua. The intensification and shift of the annual North Atlantic Oscillation in a global warming scenario simulation. *Tellus*, 2004, 56A: 112-124
- [11] Xie Li'an, Pietrafesa L J, Wu Kejian. Interannual and decadal variability of landfalling tropical cyclones in the southeast coastal states of the united states. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(4): 677-686
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 182-191
- [13] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41
- [14] 邓拥军,王伟,钱成春,等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理. *科学通报*, 2001, 46(3): 257-263
- [15] Wild M. Global dimming and brightening: a review. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D00D16, doi: 10.1029/2008JD011470
- [16] Kaiser D P. Decreasing cloudiness over china: an updated analysis examining additional variables. *Geophysical Research Letters*. 2000, 27(15): 2193-2196
- [17] 罗云峰,吕达仁,周秀骥,等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. *大气科学*, 2002, 26(6): 721-730