

北半球过去 2000 年气温变化的多尺度分析

杨 周, 林振山

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 对北半球过去 2 000 a 重建气温变化的多尺度分析, 发现: (1) 北半球过去 2 000 a 气温变化存在准 6 a 准 11 a 准 21 a 准 43 a 准 86 a 准 247 a 准 914 a 等 7 个不同时间尺度的波动, 并且以年际变化、年代际变化和近千年周期为主, 不只是在数百年尺度上受太阳活动的驱动, 在数十年尺度上也受到太阳活动的影响; (2) 北半球在中世纪暖期波动幅度较小, 小冰期气温振荡幅度相对较大, 1400~1800 A. D. 这 400 a 间是北半球最寒冷的时期; (3) 在未来的几十年里, 北半球气温的自然波动将极大地减低因人类活动而导致的全球气候变暖效应。

关 键 词: 北半球; 气温; 太阳活动; 多尺度

中图分类号: P467 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2010)02-0295-05

全球气候变化不仅受到人类活动的影响, 还受到包括太阳活动在内诸多气候系统自然要素的制约, 这些自然驱动力及其合力往往表现为多时间尺度。过去数千年的气候变率问题一直备受国际学术界的关注, 尽管已有许多作者对过去数千年北半球与全球的温度变化进行了重建, 但对这一问题的认识仍莫衷一是^[1]。究其原因, 除因气候变化的复杂性与各种重建技术的不确定性外, 气候变化的区域差异也是造成争议的一个重要因素^[2]。由于器测记录较短, 使得我们在了解过去气候、研究当代气候和预测未来气候的变化规律方面产生极大的不确定性。

全新世以来古气候并不稳定, 而有一定的波动, 来自海洋、陆地、冰芯等的沉积物中陆续发现了千年、百年和数十年尺度的气候波动、周期性变化和气候事件^[3~8], 并成为近年来国际古气候、古环境领域研究的热点。通过该时段内高分辨率气候与环境的重建及其周期性和驱动机制等问题的研究, 将有可能为研究近现代气候和环境变化机制、几年至千年一遇的突发事件, 以及预测数十年至百年地球系统的区域至全球尺度的变化速率、幅度、持续时间及趋势提供重要的科学依据。气候系统具有复杂的非线性特征, 需要分析的气候时间序列也多是非线性、非平稳的数据, 各种经典的时间序列分析方法遇到非线性、非平稳的数据就会显得无

能为力, 或者得到的结果没有清晰的物理含义。本文利用经验模态分解方法, 对北半球过去 2 000 a 重建气温资料进行多尺度分析, 从气候时间序列中提取气候信号中各个尺度的变化, 得到一系列 MF 分量分别表示不同尺度上的变化。

1 经验模态分解 (EMD) 方法

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是 1998 年 Huang^[9] 提出, 1999 年又做些改进^[10]。EMD 可以对一个信号同时将不同尺度 (频率) 的波动或趋势逐级分解开来, 产生一系列具有不同特征尺度的数据序列, 称为本征模函数 (Intrinsic Mode Function, MF)。目前, EMD 方法已经成功应用于信号处理、图像处理、湍流、地震及大气科学等众多非线性科学领域^[11 12]。

EMD 是一种全新的处理非平稳数据序列的方法, 可将时间信号 $X(t)$ 分解成一系列本征模态函数 MF, 每个 MF 分量具有如下特征: ① 从全局特性上看, 极值点数必须和过零点数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算术平均和为零。

整个分解过程实质上是将原始特征序列分解为不同振动周期的波动叠加, 得到的每个 MF 分量可以是线性的, 也可以是非线性的。这样, 最终时间序列实现分解。

收稿日期: 2009-06-09 修订日期: 2009-09-11

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20060139010) 资助。

作者简介: 杨 周 (1985-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事气候环境研究。E-mail: yangzhou104@126.com

通讯作者: 林振山, 教授, 博导, 主要从事生态-环境-气候领域的研究。E-mail: linzhenshan@njnu.edu.cn

$$x(t) = \sum_{i=1}^n MF_i(t) + r_n(t)$$

EMD分解过程就是依次提取各个 MF分量的过程,每次提取都将高频信号分离出,剩下低频信号,最后得到趋势分量或者是定常值。无论是数字滤波器、小波变换、还是 EMD/HHT方法,都存在如何处理边界问题^[13]。本文采用镜像对称延伸方法^[14]解决这一问题,能较好地解决边界对于 EMD分解过程中的上冲和下冲现象。

2 北半球过去 2 000 a气温变化的多尺度分析

做高分辨率气候变化的重建,材料的集成非常重要,千年温度变化的争论焦点是 Mann^[15 16]是否低估了过去 1 000~2 000 a内气温的变化。2005年 Moberg^[17]发表了一个新的近 2 000 a北半球温度序列。建立这序列时共用了北半球 18个地区气温序列,其中 7个为高纬度树木年轮,11个为洞穴温度、孢粉、湖泊与海洋沉积及石笋资料。本文将利用 Moberg建立的气温变化资料,试图用经验模态分解方法(EMD)分析气候周期性的变率对气候变化的影响。数据来源: Moberg et al 2005 2 000–Year Northern Hemisphere Temperature Reconstruction, GBPNAGES World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series# 2005–019 NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

图 1中的 signal是 Moberg等重建的 1~1979 A. D.的北半球气温资料,用 EMD方法对其进行逐级分解,得到了 7个 MF分量和趋势分量 RES。表 1是不同尺度 MF分量所表征的不同时间尺度波动的平均周期及方差贡献率,每一个 MF分量只是一个窄波段的信号。虽然一个 MF分量可能包含不同尺度变化的信息,但同一个时间段、不同 MF分量却不会包含同一个尺度的波动信号^[18]。分析这 7个 MF分量, MF1表示一个准 6 a尺度的振荡,这与 ENSO具有 3~7 a准周期的短周期波动吻合; MF2表示准 11 a的气候变率,和太阳黑子活动的 11 a周期吻合; MF3表示准 21 a的波动,和 22 a的“海尔周期”吻合; MF4表示准 43 a的变率,需要进一步研究; MF5表示准 86 a的波动, MF6表示准 247 a的振荡,这和太阳活动 80~250 a周期大致吻合; MF7则是准 914 a尺度的变

化, MF7包含了显著的北半球中世纪暖期和小冰期过程。这些 MF分量不仅包含了气候系统外在强迫的周期变化,还包含了气候系统的非线性反馈作用。通过 EMD分解出的准 11 a准 21 a准 43 a准 86 a准 247 a准 914 a这些平均周期基本对应了太阳活动的 11 a(太阳黑子周期), 22 a(黑子双周期), 世纪周期, 双世纪周期和千年周期。说明了北半球气温不只是在数百年尺度上受太阳活动的驱动,在数十年尺度上也受到太阳活动的影响。

通过计算各分量的方差贡献率(表 1), MF7表示的北半球气温波动 914年准周期贡献率最大(36.86%),是主周期; MF1、MF2、MF3、MF4和 MF5分量表示的北半球气温年际变化和年代际变化周期贡献率较大,之和达到 53.83%。表明北半球过去 2 000 a温度变化以年际变化、年代际变化和近千年周期为主。中世纪暖期(MWP,一般指 900~1300 A. D.)及小冰期(LIA,一般指 1300~1900 A. D.)是 20世纪 60年代研究欧洲和大西洋地区古气候的专家提出来的。图 1中 MF7分量可以看出北半球过去近 2 000 a中存在中世纪暖期(MWP)和小冰期(LIA)及 20世纪的现代增暖过程。王绍武等^[19]曾分析了全球 30个近千年气温序列,其中 24个最暖出现在 1000~1200 A. D., 27个最冷期出现在 1550~1850 A. D.,分别占 80%及 90%。因此,尽管各地的暖期或冷期不是同时出现的,但大体上还是有一个集中期。MF7分量可以看出,北半球过去近两千年中中世纪暖期波动幅度较小,小冰期气温振荡幅度相对较大,1400~1800 A. D.这 400 a间是北半球最寒冷的时期。

3 中国北京地区过去 2 000 a气温变化的多尺度分析

利用经验模态分解方法,对中国北京地区近 2 000 a重建气温资料进行多尺度分析,资料数据来源: Tan M., et al., 2003 2650–Year Beijing Stalagmite Layer Thickness and Temperature Reconstruction, GBPNAGES World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series# 2003–050 NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. 结果如图 2 MF1表示 3 a尺度的振荡,表现出疏密相间的振荡特征; MF2表示准 6 a周期振荡,也表现出疏密相间的波动特征;这与 ENSO具有 3~7 a准周期的短周期波动吻合^[20]。

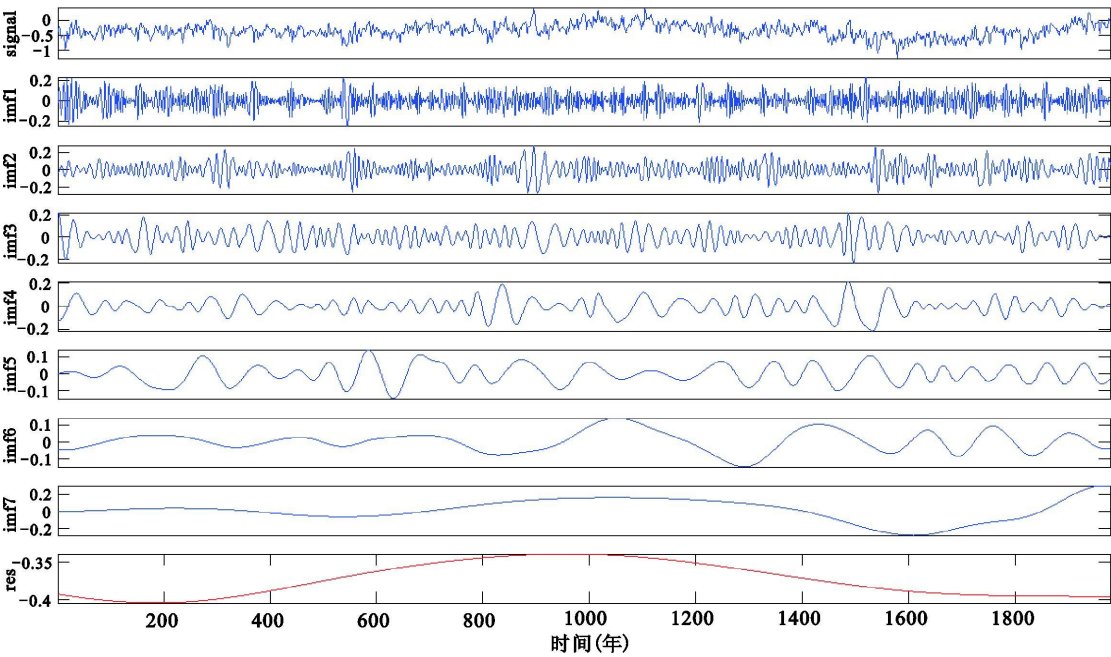


图 1 1~ 1979 A. D. 北半球重建气温变化的 MF 分量及其趋势量

Fig 1 MFs and residual trend res ofNorthem Hemisphere temperature reconstruction from 1 A. D. to 1979 A. D.

表 1 1~ 1979 A. D. 北半球重建气温变化的 MF 分量的方差贡献率

Table 1 Variance contribution of each MF ofNorthem Hemisphere temperature reconstruction from 1 A. D. to 1979 A. D.

MF 分量	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	RES
周期(a)	6	11	21	43	86	247	914	
贡献率(%)	13.04	13.81	11.43	9.13	6.42	8.19	36.86	1.13

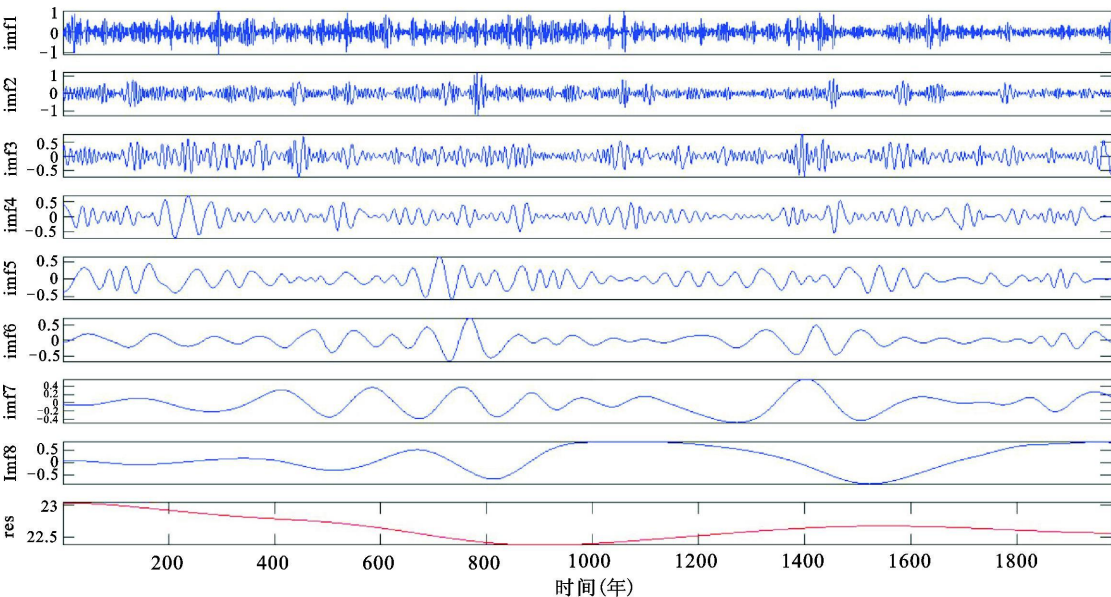


图 2 1~ 1979 A. D. 中国北京地区重建气温变化的 MF 分量及其趋势量

Fig 2 MFs and residual trend res ofBeijing temperature reconstruction from 1 A. D. to 1979 A. D.

MF3表示准 11 a 周期振荡; MF4 的周期是 21 a 振荡; MF5 反映出准 42 a 的振荡周期; MF6 分量、MF7 分量和 MF8 分量分别表示中国北京地区过去 2 000 a 气温变化准 80 a 准 166 a 和 459 a

的周期振荡, 这些 MF分量不仅包含了气候系统外在强迫的周期变化, 还包含了气候系统的非线性反馈作用。通过 EMD 分解出的准 3 a 准 6 a 准 11 a 准 21 a 准 42 a 准 80 a 准 166 a 准 459 a 这些平均周期基本对应了太阳活动的 11 a(太阳黑子周期)、22 a(黑子双周期)、世纪周期。说明中国北京地区气温变化不只是在数百年尺度上受太阳活动驱动, 在数十年尺度上也受到太阳活动影响。

表 2 1~ 1979 A. D. 中国北京地区重建气温变化的 MF分量的方差贡献率
Table 2 Variance contribution of each MF of Beijing temperature reconstruction from 1 A. D. to 1979 A. D.

MF分量	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	RES
周期(a)	3	6	11	21	42	80	166	459	
贡献率(%)	16. 31	9. 25	7. 25	6. 1	5. 69	6. 26	7. 97	36. 03	5. 13

4 讨 论

在太阳辐射的长期变化与气候变化相关方面, 最有说服力的证据是 Eddy^[21]提出的。他通过对太阳黑子数和极光资料的重新整理, 发现在太阳活动减弱的蒙德极小期, 太阳黑子数目很少, 极光也很少出现, 而这一时期恰好对应于气候变化的小冰期。根据树轮¹⁴C浓度的变化, 他在过去 7 500 a中识别出 18次明显的太阳活动强弱变化, 通过与全球冰川进退的比较, 指出每当较长期太阳活动减弱, 地表气温就下降, 全球冰川就扩展; 反之, 每当较长期的太阳活动增强, 气温上升, 全球冰川就退缩, 他推测这种明显的相关性可能是由于太阳辐射变化的结果^[22]。Lean 等^[23]认为, 在小冰期至 1850年期间, 太阳对气候变化起着主要影响, 但从 1900年起, 随着人类活动影响的增大, 太阳活动的影响在减小。有意思的是, 本文所揭示出来的北半球气温波动 914 a准周期(图 1的 MF7分量)贡献率最大(36. 86%), 是主周期, 其权重要比年代际的气候波动大得多。后者是受太阳活动直接调制的, 但前者的驱动力却不甚了解, 有待于我们的进一步深入研究。很显然, 我们不能只局限于有关各类的太阳黑子活动周期或米兰科维奇轨道三参数: (轨道偏心率、岁差、黄赤交)的变化, 太阳活动与地表过程的非线性作用是非常重要的。

气候变暖是当前众多科学家和政府官员的共识, 但无论是图 2的 MF6 MF7 MF8分量还是其趋势项, 都指出未来的气候将由暖期转向冷期, 而这些分量的权重之和是大于 50% 的。因此, 在未

表 2是通过计算的各分量方差贡献率, MF8表示的北京地区气温变化为准 459 a贡献最大(36. 03%)。MF8显示中国北京地区在中世纪暖期(950~ 1340 A. D.)气温偏高, 波动幅度相对北半球而言较大; 而小冰期持续时间(1350~ 1750 A. D.)气温偏低, 波动幅度相对北半球而言较大, 比北半球持续时间(1400~ 1800 A. D.)开始和结束各提前 50 a。

来的几十年里, 北半球气温的自然波动将极大地减低因人类活动而导致的全球气候变暖效应。

参考文献:

[1] 王绍武, 罗 勇, 赵宗慈, 等. 近千年温度变化的争议仍在继续[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 76~ 79

[2] Mann M E, Ammann C M, Bradley R S, et al On past temperatures and anomalous late- 20th century warmth[J]. EOS, 2003, 84(27): 256~ 257

[3] O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core[J]. Science, 1995, 270: 1962~ 1964

[4] Bond G, Shaver G R, Cheseby M, et al A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates[J]. Science, 1997, 278: 1257~ 1266

[5] ZHOU Weijian, LU Xuefeng, WU Zhenkun, et al Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(1): 66~ 70

[6] Wang Yongjin, Cheng Hai, Lawrence Edwards R, et al The Holocene Asian monsoon links to solar changes and north Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308: 854~ 857

[7] 冯 松, 张拥军, 朱德琴, 等. 近 2000年古里雅冰芯净积累量与南疆盆地南沿的干湿变化[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 221~ 223

[8] 朱西德, 王振宇, 李 林, 等. 树木年轮指示的柴达木东北缘近千年夏季气温变化[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 256~ 258

[9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 899~ 995

[10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417~ 457

[11] 邓拥军, 王 伟, 钱成春, 等. EMD方法及 Hilbert变换中边界

问题的处理 [J]. 科学通报, 2001, **46**(3): 257~ 263.

[12] 林振山, 汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用 [J]. 热带气象学报, 2004, **20**(2): 90~ 96

[13] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析 [J]. 地理科学, 2005, **25**(1): 43~ 44

[14] ZHAO J P, HUANG D J M inor extending and circular spline function for Empirical Mode Decomposition method [J]. Journal of Zhejiang University(Science), 2004, (2): 247~ 252

[15] Man M E, Bradley R S, Hughes M K. Global- scale temperature Patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. Nature, 1998, **392** 779~ 787

[16] Mann M E, Jones P D. Global surface temperature over the past two millennia [J]. Geophys Res Letts, 2003, **30**(15): 1820.

[17] Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high- resolution proxy data [J]. Nature, 2005, **433** 613~ 617

[18] 张衍广, 林振山, 梁仁君. 基于 EMD 分析的山东省土地承载力的动力学预测 [J]. 地理科学, 2008, **28**(2): 219~ 220

[19] 王绍武, 叶瑾琳, 毕 鸣. 近千年全球气温变化 [C]. //85- 913 项目 02 课题论文编委会. 气候变化规律及其数值模拟研究论文 (第三集). 北京: 气象出版社, 1996. 157~ 147.

[20] 孙 娴, 林振山. HHT 新技术及其对 ENSO 的诊断 [J]. 气象, 2006, **32**(6): 17~ 22

[21] Eddy J A. The minimum [J]. Science, 1976, **192** 1 189~ 1 202

[22] Eddy J A. Climate and the changing sun [J]. Climate Change, 1977, (1): 173~ 190

[23] Lean J R and D. Evaluating sun- climate relationships since the Little Ice Age [J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 1999, **61** 25~ 36.

Multi-scale Analysis of Northern Hemisphere Temperature Changes over Past Two Millennia

YANG Zhou, LIN Zhen-shan

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046)

Abstract The cyclical climate change and its relationship with solar activity are the hot spot in the international research of paleoclimate and paleoenvironment in recent years. By multi-scale analysis of Northern Hemisphere temperature reconstruction over the past two millennia, the results were found as follows: (1) Seven different time scales of quasi cycles of 6 yr, 11 yr, 21 yr, 43 yr, 86 yr, 247 yr and 914 yr were evidently discovered. And then interannual variability, Interdecadal climate oscillation and the millennium cycles were mainly fluctuation periods. The climate changes at both the centennial scales and the decadal scales were driven by solar activity. (2) The oscillation amplitude was small in MWP of the Northern Hemisphere, but in LIA the amplitude was relatively larger. The coldest period in the Northern Hemisphere was between 1400 A. D. and 1800 A. D. (3) In the next few decades, the natural fluctuations of Northern Hemisphere temperature will greatly reduce the global warming effect caused by human activities.

Key words Empirical Mode Decomposition (EMD); Northern Hemisphere temperature; solar activity; Multi-scale Analysis