

全球平均海温演变的奇异谱分析

林志强

(广州中心气象台, 510080)

提 要

用奇异谱分析(Singular spectrum analysis, 以下简称 SSA)研究了 136 年(1856—1991 年)全球平均海温季距平演变特征,并对各主分量作了最大熵谱分析。结果表明,海温演变除了具有 81 年周期外,还有一些非常明显的周期振动,这些周期主要是准 10 年和 2.6—6 年。从各主分量的方差贡献来看,前 15 个主分量的方差贡献之和是总方差的 78%。从特征向量的分布函数来看,第 1、2 特征向量表示了海温序列的线性特征,它们的方差之和可以占到总方差的 48%,其合成曲线基本上可以描述海温百年尺度内数年或数十年中的总体平均变化趋势;第 3 及其以后的特征向量表示了海温的波动规律,前 4 个主分量的合成曲线能很好地拟合海温年变化特征。

关键词: 海温 奇异谱分析 主分量

引 言

全球气候变化是人们普遍关注的课题,随着人们陆续地对一些长时间记录资料的整理,我们才得以窥探全球的气候变化趋势,如 Jones 等(1986)^[1,2]处理了全球平均陆地气温资料(1851—1984 年),并且对该资料作了定性描述。之后, Jones(1988)^[3]将该资料序列延拓到 1987 年,同时定性地说明了南、北半球的时间变化特征。Ghil 等(1991)^[4]对这份陆面气温资料作了单谱分析,发现全球陆面气温具有百年尺度的变暖趋势和某些周期运动的波动,这些周期主要是 16—21 年、准 10 年振荡(9.1)年和 5—6 年振荡。Folland 等(1984)^[5]对 1856 年以来的全球洋面资料进行整理、加工,最后得到一份长序列(1856—1981 年)季海温资料,而且用最大熵谱法分析了全球平均的季海温资料,得到了显著峰值周期为 83 年,其他一些周期振荡,如 16 年、8—10 年和 3—5 年,其功率谱值均很弱

小,不易观察。在 Folland 等(1984)资料的基础上, Bottomley 等(1990)^[6]将资料延拓至 1991 年,并以图集和磁带形式发行。本文目的是想对全球平均季海温(1856—1991 年)作单谱分析,以期得到其显著谱峰周期。

1 奇异谱分析理论

SSA 是 80 年代后期的产品,它是 Broomhead 等(1986)^[7]在研究离散数据非线性动力学时引入的新概念,其目的是想确知离散时间序列在不同时刻所处的相空间位置,这是非线性动力学研究中的中心问题。将 SSA 应用到气候序列分析中的是 Vautard 等(1989)^[8]和 Ghil 等(1991)^[4],他们探索了该方法与其他谱分析法的异同。

SSA 的主要优点在于能将原时间序列分解成不同的基本振荡,这种振荡在形式上不同于三角函数,它们是按方差大小排序的,而不是根据频率。

SSA 的计算思路是,将一时间序列构造

一嵌入空间,并对该嵌入空间求出相关矩阵。由于该相关矩阵是 Toeplitz 矩阵,因此,该矩阵的各特征向量是自然正交的,而相应的特征值则反映了各主分量的相对权重。因特征值的平方根称为奇异值,故该谱图称为奇异谱,该方法就称为奇异谱法。

给定一经过标准化处理的离散时间序列, $x_l = x(l\Delta t)$, 其中 $1 \leq l \leq N_T$, N_T 为样本总数。矢量 $Z_l = (x_l, x_{l+1}, \dots, x_{l+M-1})$ 是具有 M 维的嵌入空间, 其中 $1 \leq l \leq N_T - M + 1$ 。自相关函数 C_{xx} 是 $M \times M$ 的协方差, 其表达式为:

$$C_{i,i+p} = \sum_{j=1}^N x_{i+j-1} x_{i+p+j-1} \quad (1)$$

其中 $N = N_T - M + 1$, $1 \leq i \leq M$, $1 \leq i + p \leq M$ 。这样的主对角线为常数的对称矩阵称为 Toeplitz 阵, 它的特征向量是关于指数 p (或 $\ln p$) 为偶函数或奇函数。

由自相关矩阵构成的特征问题为:

$$C\rho = \lambda\rho \quad (2)$$

该方程定义了特征向量函数 $\rho(p)$, ($p=1, 2, \dots, M$), 它们被称为自然正交函数(以下简称 EOF), 特征值的平方根就构成奇异谱。

原始时间序列在每一段时间 T 内的函数值可以在 EOF 的基底上展开, 即:

$$x(t+p) = \sum_{k=1}^M a_k(t) \rho_k(p) \quad (3)$$

因此, 原始序列在 EOF 第 k 个基底上的投影 $a_k(t)$ 为

$$a_k(t) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t+p) \rho_k(p) dp \quad (4)$$

$a_k(t)$ 被称为第 k 个主分量 (Principal component, 以下简称为 PC), 它表示在时刻 t 的邻域 $[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}]$ 内原始序列 x 关于 ρ_k 的滑动平均。

由于特征向量函数 $\rho_k(p)$ ($p=1, 2, \dots, M$) 并不是事先确定的, 它随着序列的不同而不同, 因此, 奇异谱分析可以被用来检测噪音

及分析夹杂有噪音的弱振荡。

2 结果分析

奇异谱分析中嵌入维数 M 的选取对结果有重要影响。若太小, 信息损失较多; 若太大, 则会携带大量噪音。通过对 M 取值的试验, 当 $40 \leq M \leq 80$ 时, 得到的各主分量基本相同, 因此, 本文中 $M=60$, 在这 60 个特征值中, 前 15 个特征值 (从大到小排列) 占整个方差贡献的 78%, 所以, 本文着重对这些主分量进行分析。

根据各特征向量 (图略) 的分布, 第 1、2 特征向量是线性变化的, 其物理意义为它们表示了海温序列的线性变化特征, 这两个向量的方差之和是总方差的 48%。第 3、4 及其之后的特征向量呈现出波动特性, 且特征向量序号越大, 其表现出的波动越多。由于它们所占方差贡献都较小 (PC3 的方差贡献为 5.1%, PC15 为 1.1%), 因此, 这些特征向量所表示的物理意义就是海温距平中各种不同形式的波动, 且它们对海温扰动的贡献随着特征向量序号的增大越来越小。

图 1 给出了几个有代表性的主分量, 它们分别是 PC1、PC3、PC5 和 PC15, 括号中的数值为其方差贡献。如图所示, 它们的变化规律都不一样。根据前面对特征向量的分析, 第 1 和第 2 (图略) 主分量表示了海温的线性变化部分。通过对这两个主分量的最大熵谱分析, 我们发现其最大谱峰周期均为 81 年, 且都超过了 0.005 的信度检验。与 Folland 等 (1984) 对海温原始序列所做的最大熵谱分析相比, 它们的显著谱峰周期是 83 年, 这与本文所做的 81 年周期是基本吻合的, 这说明 80 多年的周期运动是海温演变的主要韵律之一, 而本文则可以给出这个周期运动的第 1、2 主分量变化特征。

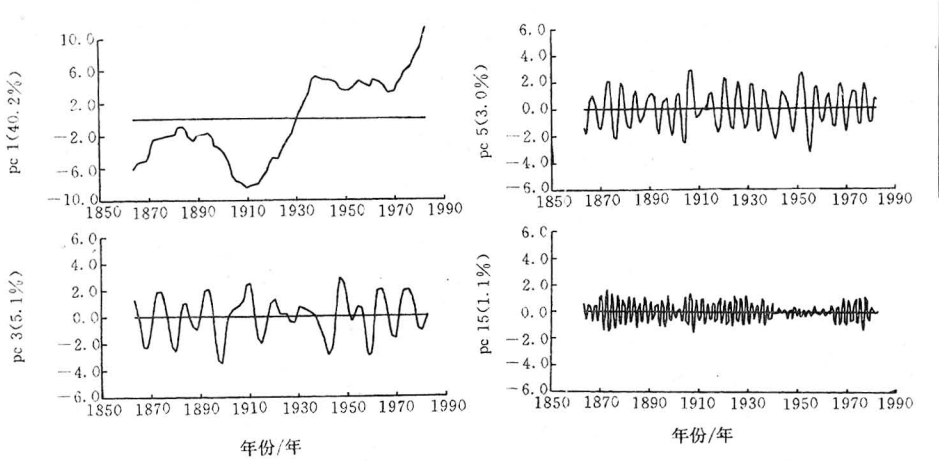


图1 各主量的演变

第3和第4(图略)主分量变化特征基本相似,其最大熵谱分析结果表明,它们的谱峰周期均是9.8年,且都超过了0.005的信度检验。这说明海温演变存在着准10年的变化周期。

通过对第5至第15主分量(其中第6至第14的图略去)作类似分析,我们发现PC5的谱峰周期为6.0年,PC6为5.4年,以此类推,PC15为2.6年,这些周期基本上呈递减趋势,而它们均超过了0.005的信度检验。这些周期与Ghil等(1991)定义的年际振荡(5—6年)是一致的,它们表示了ENSO事件的扰动。

为了能清楚地看到各主分量在海温演变中的作用,我们对式(3)中的 M 条曲线作各种组合,也就是所谓的合成曲线(如图2)。为了能看清楚海温的年变化特征,我们将海温季距平资料作了平均,就得到该图中的年距平(竖线)。图中虚线是前两个主分量的合成,它纯是海温演变中的线性变化成份,实线为前4个主分量的合成。

从虚线的变化可知,其明显不同变化可以分为3个阶段。

第1阶段(1856—1937):这一阶段的合成值呈现上升→下降→再上升趋势,两个最

低值分别在1857年和1908—1911年,这与实况(竖线)基本吻合。除此之外,合成值还反映了海温年距平的滑动平均特征,但不能描述实况的小波动变化。

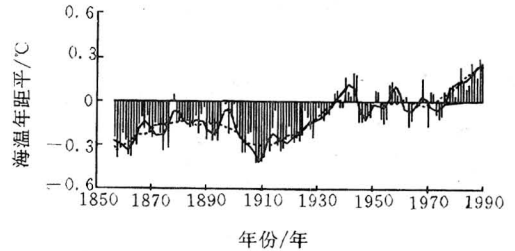


图2 主分量的合成图

竖线为年距平,虚线为前两个主分量的合成、实线为前4个主分量的合成

第2阶段(1938—1970年):在这一阶段,合成值基本上在零值线上下摆动,它反映了此阶段实况的总体平均特征,但无法刻画更细致的数年波动。

第3阶段(1971—1991年):这是百余年来主要升温时期,合成值基本上把握了实况的这一递增趋势。

因此,从百年时间尺度的变化来讲,前两个主分量的合成基本上可以反映海温在数年或数十年内的总体平均特征,而前4个主分量(图中实线,其方差贡献之和为57.9%)

则能更精细地描述海温变化的波动特性,它们之间的相关系数达到 0.887,远远超过 0.001 信度检验。所以,前 4 个主分量的合成可以很好地拟合海温变化特征。

3 小结

奇异谱分析是时间序列分析中的有力工具之一,它可以将原序列分解成几个主分量,而这些主分量则可以表示不同类型的波动,同时还可以知道这些波动在原序列中所起的作用。通过对全球平均海温季距平资料的奇异谱分析,我们还可以得出以下结论。

3.1 海温存在 81 年的周期振动,它主要是由第 1、2 主分量的基本特性决定的,而它们的特征向量是线性变化的。这两个主分量的合成基本上描述了海温年距平在数年或数十年时间内的总体平均特性。

3.2 海温的另两个明显周期是准 10 年和 2.6—6 年。第 3、4 分量是准 10 年周期振动的主要贡献者,海温的年变化波动趋势基本上可以用前 4 个主分量来拟合。第 5 至第 15 主分量对 2.6—6 年的周期振荡有所贡献。

参考文献

- 1 Jones, P. D., T. M. L. Wigley and P. B. Wright. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*, 1986, Vol. 322: 430—434.
- 2 Jones, P. D., S. C. B. Raper and R. S. Bradley et al. Northern hemisphere surface air temperature variation: 1851—1984. *J. Climate and Applied Meteorol.*, 1986, Vol. 25: 161—179.
- 3 Jones, P. D., Hemisphere surface air temperature variations: Recent trends and an update to 1987. *J. Climate*, 1988 Vol. 1: 654—659.
- 4 Ghil, M. and R. Vautard. Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. *Nature*, 1991 Vol. 350: 324—327.
- 5 Folland, C. K., D. E. Parker and F. E. Kates. Worldwide marine temperature fluctuations 1856—1981. *Nature* 1984. Vol. 310: 670—673.
- 6 Bottomley, M., C. K. Folland and J. Hsing et al. Global Ocean Surface Temperature Atlas. A joint project of the UK Meteorological Office and MIT, 1990 310—321.
- 7 Broomhead, D. S. and G. P. King. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica 20D*, 1986: 217—236.
- 8 Vautard, R. and M. Ghil. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Physica 35D*, 1989: 395—424.

The Singular Spectrum Analysis for Global SSTA

Lin Zhiqiang

(Guangzhou Central Meteorological Observatory, 510080)

Abstract

The global SSTA for past 136 years (1856—1991) was studied with singular spectrum analysis, then a maximum entropy spectrum analysis for several principal components was conducted. The result shows that SSTA has several very evident periods of quasidecade and 2.6—6 years besides 81 years. The first fifteen principal components have a variance contribution of 78%. Eigenvector 1, 2 stand for linear characteristic of SSAT, their variance contribution is 48%, and their resultant curve basically described average trends during several years and several decades. Eigenvector 3 and afterwards eigenvectors stand for wave characteristics of SSTA. The first four principal components can better fit SSTA yearly change characters.

Key Words: SSTA singular spectrum analysis principal component