

## 东亚季风的气候变化及其时间序列模型\*

曹鸿兴<sup>1</sup> 何会中<sup>1</sup> 刘海涛<sup>2</sup> 夏 军<sup>3</sup> 蔡秀华<sup>1</sup> 施 能<sup>4</sup>

(1: 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2: 北京市气象局气候中心, 北京 100089;

3: 中国科学院地理科学和资源研究所, 北京 100101; 4: 南京气象学院, 南京 210044)

**提 要** 本文运用统计方法分析了东亚季风指数的观测序列; 同时还揭示了不同时期的东亚季风变化趋势和年代际变化. 自 1873 年以来, 东亚季风逐渐减少, 同时年代际的变化也十分明显. 在 1891-1900 年间和 1971-1980 年间, 夏季季风指数的十年平均达到极大, 另外还出现两个极小值, 它们分别出现在 1921-1930 年和 1991-2000 年. 为了对东亚季风变化进行模拟, 我们首先简要地介绍了动力系统的自忆性原理, 然后叙述了一个新的时间序列分析方法——基于数据的机制自记忆模型 (DAMSM). DAMSM 被应用于东亚季风指数研究并且证明了它对东亚季风的拟合及预报能力.

**关键词** 东亚季风 时间序列分析 气候变化

**分类号** P426.616

东亚季风是亚洲季风的重要组成部分, 它的移动和变化影响着我国的天气和气候. 人们已在天气尺度和年际变化方面对东亚季风做了大量的工作<sup>[1-2]</sup>. 近年来, 人们对东亚季风的研究工作主要集中在它的年代际变化方面<sup>[3]</sup>. 在本文中, 作者使用了 1873-2000 年的东亚季风指数序列, 用统计方法研究了东亚季风的变化特征. 着重点放在研究东亚季风的年代际变化.

为了模拟东亚季风的变化, 使用了新发展的名为数据机制自记忆模型的时间序列技术. DAMSM 是以系统自忆性原理为基础<sup>[4]</sup>发展的, 将先对其作一简述. 本文导出了一个新的方程, 由于这个方程式在系统的动力方程中引入了自记忆功能, 所以称其为自忆性方程, 实际上它是一种差分-积分方程. 基于自忆性方程的气象预报是与其它预报途径 (求解控制系统运动的微分方程作为初值问题, 即 Cauchy 问题) 不同的预报途径. 像现代控制论中的系统预报一样, 是用求解差分-积分方程方法来预报的, 在这个过程中可以包含有几个过去观测值并对其进行处理<sup>[5]</sup>. 本文把用这种办法建立起的模式称之为自记忆模式.

如何建立起 DAMSM? 首先, 我们可以双向预报误差作为标准导出一个普通的非线性微分方程. 其次以这个方程作为动力核, 在建立并求解差分-积分方程的基础上建立起 DAMSM 模型. 作为实例, 运用季风指数的时间序列反导出微分方程, 然后再建立 DAMSM 模型.

### 1 东亚季风的气候变化

东亚季风指数的定义如下, 首先把海平面气压  $SLP$  沿着经圈方向作归一化处理得到

\*国家自然科学基金 (40375025) 资助. 2003-07-30 收稿; 2003-12-10 收修改稿. 曹洪兴, 男, 教授, email: caohox@yahoo.com.cn.

$SLP^*$ , 则季风指数为:

$$MI_t = \sum_{i=1}^7 (SLP_{i110}^* - SLP_{i120}^*)$$

这里\*表示归一化,  $t$  是第  $t$  年, 110 和 120 意思是经度为  $110^\circ$  (代表陆地) 和经度为  $120^\circ$  (代表海洋),  $i=1, 2, \dots, 7$  表示纬度  $20^\circ, 25^\circ, \dots, 50^\circ$ . 再次对  $MI_t$  归一化:

$$MI_t^* = (MI_t - \bar{MI}) / \sigma_{MI}$$

这里的  $MI$  和  $\sigma_{MI}$  分别代表平均和标准差<sup>[6]</sup>.

利用统计方法分析了 1873–2000 年的东亚季风指数时间序列, 同时还揭示它的长期变化趋势. 结果表明东亚季风的年代际变化十分显著. 1891–1900 年和 1971–1980 年的夏季季风指数为最高期, 而 1921–1930 年和 1991–2000 年的低值期, 与此同时在 1991–2000 时段中国出现了气温突然增加现象<sup>[7]</sup>. 冬季季风指数的高值期出现在 1873–1880 年和 1961–1970 年, 而低值期出现在 1911–1920 年和 1981–1990 年. 一个非常有趣的现象是冬季的极值都比夏季极值出现早 10–20a. 自 1873 年以来, 东亚季风强度有所下降; 其中夏季的下降比冬季更为明显. 它们的线性趋势方程分别为:

$$Y = -0.0106x + 0.6838 \quad (\text{夏季})$$

$$Y = -0.0017x + 0.1115 \quad (\text{冬季})$$

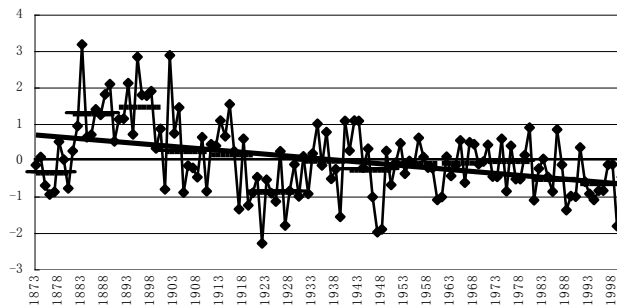


图 1 1873–2000 年东亚季风的夏季年际变化, 它的年代际变化和趋势线

Fig. 1 Yearly change in East-Asia monsoon in summer during 1873 to 2000 and its interdecadal variation and its linear trend (summer)

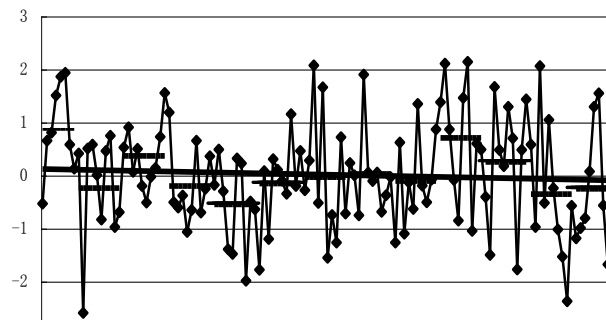


图 2 1873–2000 年东亚季风的冬季年际变化, 它的年代际变化和趋势线

Fig. 2 Yearly change in East-Asia monsoon in winter during 1873 to 2000 and its interdecadal variation and its linear trend (winter)

东亚季风下降的同时中国温度正在上升. 这意味着可能是因为中国大陆的气温上升引起东亚季风强度的下降, 而两者都与全球增暖有着密切的联系.

## 2 数学推导

### 2.1 基本思想

依据微分方程的经典理论, 如果方程有初始值就能被解出, 这是数值预报的数学基础. 它有一个显而易见的缺点, 不管有多少历史观测资料, 数值预报都只用了一个初始观测场. 正如控制论所描述的, 在不能观测到一个系统的所有行为 (例如: 我们无法获取系统当前的完整信息) 时可以反观系统的以前状态, 称之为具有记忆的系统, 可以用它改进对系统未来的预报. 根据 Ashby 控制论原理研究了记忆系统. 有记忆的动力系统要考虑信息机制, 即记忆动力学实际上是信息动力学而不是纯粹的物理机制.

### 2.2 数学定理

一般来说, 系统的动力方程可以写成:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x, \lambda, t) \quad i=1, 2, \dots, j \quad (1)$$

这里的  $J$  是整数,  $x_i$  是系统状态的第  $i$  个变量,  $\lambda$  为参量. 下面仅考虑一个变量  $x$ , 且省略了  $F_i(x, \lambda, t)$  中的  $\lambda$  和  $x$  (1) 式表达了局地  $x$  的变化和源函数  $F$  之间的关系. 显然,  $x$  是空间  $r_0$  和时间  $t$  的标量函数. 考虑到一个时间序列  $T=[t_p \dots t_0 \dots t_a]$ , 其中  $t_0$  为初始时间, 一个是空间序列  $R=[r_\alpha \dots r_i \dots r_\beta]$ , 这里  $r_i$  是被考虑的空间点. 可以定义一个内积空间  $L^2: T \times R$ , 由内积:

$$(f, g) = \int_a^b f(\xi)g(\xi)d\xi \quad f, g \in L^2 \quad (2)$$

来定义, 相应地可以定义一个模:

$$\|f\| = \left[ \int_a^b (f(\xi))^2 d\xi \right]^{1/2}$$

完备化  $L^2$ , 它就变成一个 Hilbert 空间  $H$ . 一个多时次模式的解可以看作在  $H$  的一个广义解. 省略 (1) 式中的下标  $i$ , 并应用 (2) 式定义的内积进行运算, 再引入记忆函数  $\beta(r, t)$ , 我们可以得到:

$$\int_{t_0}^t \beta(\tau) \frac{\partial x}{\partial \tau} d\tau = \int_{t_0}^t \beta(\tau) F(\tau) d\tau \quad (3)$$

由于上式是运用于特定点  $r_0$ , 因此  $\beta(r, t)$  的  $r$  项被省略. 假设变量  $x$  和  $\beta(r, t)$  等都是连续、可微和可积的, 对 (3) 式的左边进行积分可得:

$$\int_{t_0}^t \beta(\tau) \frac{\partial x}{\partial \tau} d\tau = \beta(t)x(t) - \beta(t_0)x(t_0) - \int_{t_0}^t x(\tau)\beta'(\tau)d\tau \quad (4)$$

这里  $\beta'(\tau) = \partial\beta(t)/\partial t$ . 根据微积分中的中值理论, (4) 式的右边第三项变为:

$$- \int_{t_0}^t x(\tau)\beta'(\tau)d\tau = -x^m(t_0)(\beta(t) - \beta(t_0)) \quad (5)$$

这里中值  $x^m(t_0) \equiv x(t_m)$ ,  $t_0 < t_m < t$ . 把 (4) 和 (5) 代入 (3) 式后进行代数运算可得:

$$x(t) = \frac{\beta(t_0)}{\beta(t)} x(t_0) + \frac{\beta(t) - \beta(t_0)}{\beta(t)} x^m(t_0) + \frac{1}{\beta(t)} \int_{t_0}^t \beta(\tau) F(\tau) d\tau \quad (6)$$

上式中的第一、第二项仅与固定点  $r_0$  在初始时间  $t_0$  和中间时间  $t_m$  的值有关, 它们与固定点  $r_0$  有关, 因此把它们称为自记忆项. 自然地称方程右边的第三项为外部影响项, 它是在  $[t_0, t]$  时间内其它点对  $r_0$  点的影响总和.

对于多个时次  $t_i, I=-t_i, I=-p, -p+1, \dots, t_0, t,$ , 同 (4) 式一样, 我们得到:

$$\int_{t_{-p}}^{t_{-p+1}} \beta(\tau) \frac{\partial x}{\partial \tau} d\tau + \int_{t_{-p+1}}^{t_{-p+2}} \beta(\tau) \frac{\partial x}{\partial \tau} d\tau + \dots + \int_{t_0}^t \beta(\tau) \frac{\partial x}{\partial \tau} d\tau = \int_{t_{-p}}^t \beta(\tau) F(\tau) d\tau \quad (7)$$

略去相同项  $\beta(t_i)x(t_i), i = -p+1, -p+2, \dots, 0$  得到:

$$\beta(t)x(t) - \beta(t_{-p})x(t_{-p}) - \sum_{i=-p}^0 (\beta(t_{i+1}) - \beta(t_i))x^m(t_i) - \int_{t_{-p}}^t \beta(\tau) F(\tau) d\tau = 0 \quad (8)$$

它是一个差分-积分方程, 由于它考虑了  $p$  个时次的观测值, 所以称其为具有回溯阶  $p$  的自忆性方程, 它是我们进行研究的基本方程.

设  $p=0$ , 这时的时次仅为  $t$  和  $t_0$ , 则 (7) 式变成 (6) 式, 我们把它称为 0 阶自忆性方程. 如果  $p=1$ , 这时的时次为  $t, t_0$  和  $t_{-1}$ , (7) 式变成:

$$\begin{aligned} & \beta(t)x(t) - \beta(t_{-1})x(t_{-1}) - (\beta(t_0) - \beta(t_{-1}))x^m(t_{-1}) - (\beta(t) \\ & - \beta(t_0))x^m(t_0) - \int_{t_{-1}}^t \beta(\tau) F(\tau) d\tau = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

它就叫做 1 阶自忆性方程.

设  $\beta(t_0) = \beta(t_1) = 1$ , 即: 记忆函数取为常数 1, 则 (6) 式变为:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t F(\tau) d\tau \quad (9)$$

它就是传统动力天气预报和数值模拟的解. 显然, 由 (9) 式推广为 (7) 式, 强调了点  $r_0$  的物理量前面  $p$  个时次对以后的影响.

(7) 式的物理含义是: 在  $t$  时次位于  $r_0$  处的  $x$  值等于过去的自记忆影响加上空间函数  $F(x, \lambda, t)$  项乘上自记忆函数的积分.

### 2.3 离散化表达

设取相等的时间间隔  $\Delta t$ ,  $t_i = t_0 + i\Delta t, i = 1, 0, -1, -2, \dots, -p, t_0$  为初始时刻;  $t + \nabla t$  为预报时刻,  $p$  代表回溯阶.

简单地取中值  $x^m(t_i)$ :

$$x^m(t_i) = \frac{1}{2} [x(t_0 + (i+1)\Delta t) + x(t_0 + i\Delta t)]$$

这样 (7) 式变成:

$$x(t) = \sum_{-p}^0 \alpha_i x(t_0 + i\Delta t) + \frac{1}{\beta(t)} \int_{t_0-p}^{t_1} \beta(\tau) F(\tau) d\tau = S_{sm} + S_{oe} \quad (10)$$

这里

$$\alpha_{-p} = \frac{1}{2\beta(t)} [\beta(t_0 - p\Delta t) + \beta(t_0 - (p-1)\Delta t)]$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2\beta(t)} [\beta(t_0 + (i+1)\Delta t) - \beta(t_0 + (i-1)\Delta t)] \quad i = -p+1, -p+2, \dots, -1$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\beta(t)} [\beta(t_0) - \beta(t_0 - \Delta t)]$$

这里称  $S_{sm}$  为自记忆项,  $S_{oe}$  为外在影响项. 把基于方程 (10) 进行计算和预报的技术称为自忆性原理.

用求和代替 (10) 式中的积分, 取等时间间隔  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \equiv \Delta t$ , (10) 式变成:

$$x(t_1) = \sum_{-p}^0 \alpha_i x(t_0 + i\Delta t) + \sum_{-p}^0 \theta_i F(t_0 + i\Delta t) \Delta t \quad (11)$$

这里  $\theta_i = \beta(t_i) / \beta(t)$

如果视  $x$  为系统的输出,  $F$  为系统的输入, (11) 正是系统识别理论的基本方程. (11) 式表明天气或气候预报不再是一个流体力学问题, 而变成一个系统预报问题. 它是气象预报的基本思想的改变; 预报于是变成基于自忆性原理的一种新技术. (11) 的系数  $\alpha_i, \theta_i$  可以用参数估计方法来确定, 如: 最小二乘法、遗传算法、误差极小递推法等.

在用 (10) 式做预报时, 模式利用了  $t_0$  时次以前的  $p$  个  $x(t_i)$  值和  $p$  个  $F(t_i)$  场. 因此, (10) 式中  $\beta(t_i)$  函数记忆了  $p+1$  个  $x$  值和  $p+1$  个  $F$  场. 这就是我们把其称为记忆函数的原因; 它也是提出记忆函数的数学基础. 而应用 (9) 式, 仅仅依靠当前的  $x(t_0)$  值和  $F(t_0)$  场来预报  $x(t)$ , 再以  $x(t)$  为初值向前预报, 而把  $t$  时刻已前的  $x$  和  $F$  场值忘得一干二净, 也就是说传统气象预报是一种马尔柯夫过程的观点.

### 3 新时间序列分析法

把方程 (11) 看作一个时间序列的 ARMA 模型, 这样 (11) 式的第一项就相当于 AR 模型, 第二项就相当于 MA 模型, 它启发我们发展出一种新的时间序列分析方法, 一般地, 我们可以先从观测序列中反导得到微分方程, 再进行统计建模.

设时间序列:

$$x = \{x_i\}, t = 1, 2, \dots, N$$

令 
$$dx/dt = f(x_i, x_i^2, \sin(t), \cos(t), EXP(t), \dots) \quad (12)$$

如果一个时间序列没有周期性或消除了它的周期性, 则有:

$$\frac{dx}{dt} = a_1 x_t + a_2 x_{t-1} + \cdots + a_p x_{t-p+1} + b_1 x_t^2 + b_2 x_{t-1}^2 + \cdots + b_p x_{t-p+1}^2 \quad (13)$$

这里的系数  $a_i, b_i$  可以用最小二乘法从观测值的时间序列中得到.  $x_i$  为在  $t, t-1, \dots, t-p+1$  时的  $x$  值, 如果考虑到回溯阶  $p$ , 考虑到方程 (13) 和 (11) 式, 就可以建立 DAMSM 模型. 这个模型已被成功地应用于长江三角洲的夏季降水预报.

#### 4 东亚季风的气候变化的时间序列模型

利用东亚季风指数的观测序列值  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ , 经过反导计算, 可以建立 DAMSM 模型; 回溯阶  $p=5$ . 冬季何夏季的季风指数的总样本量  $N$  分别为 117 和 118. 每次作一年预报, 作完一年预报后把该年观测值吸收如同样本集, 在作下一年预报, 如此继续下去. 图 3 和图 4 分别表示对夏季和冬季的计算结果 (拟合和预报) 和观测资料序列. 除了有些年份预报量有过高估计以外, 两个图中的预报和观测曲线具有非常好的一致性.

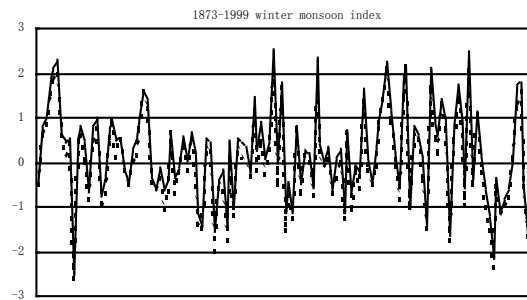


图 3 冬季的东亚季风指数的计算 (实线) 和观测 (虚线)

Fig.3 Calculated (solid line) and the observed (dash line) East-Asian monsoon indices in winter

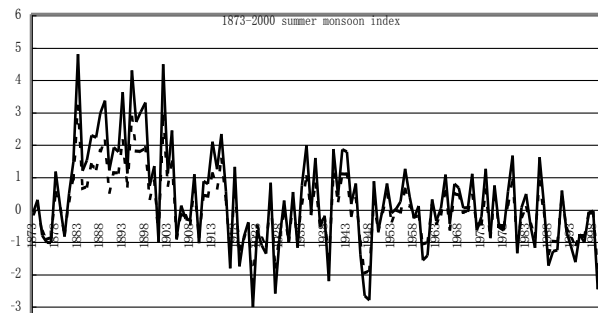


图 4 夏季的东亚季风指数的计算 (实线) 和观测 (虚线)

Fig.3 Calculated (solid line) and the observed (dash line) East-Asian monsoon indices in summer

#### 4 结论

本文用统计技术分析 1873-2000 年的东亚季风指数的时间序列; 同时揭示了它的变化趋势和不同的年代际变化, 它的年代际变化十分显著. 与其它的夏季东亚季风指数十年平均值相比, 1891-1900 年和 1971-1980 年的十年平均值为极大的两个时段, 而 1921-1930 年和 1991-2000 年的十年平均值为极小的两个时段. 与其它的冬季东亚季风指数十年平均值

相比, 冬季季风指数的十年平均极大值出现在 1873–1880 年和 1961–1970 年, 而极小值出现在 1911–1920 年和 1981–1990 年. 一个非常有趣的现象是它们都比夏季早 10–20 年. 另外, 自 1873 年以来, 东亚季风强度一直在下降; 夏季的下降比冬季更为明显. 这可能与全球增暖及全球环流变化有一定联系.

为了模拟东亚季风的变化, 本文使用了新开发的 DAMSM 模型, 并用它模拟了东亚季风指数. 计算结果表明该模型具有模拟和预报东亚季风的气候变化的能力.

#### 参 考 文 献

- 1 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991
- 2 Goswami B N, Krishnamurthy V, Annamalai H. A broad scale circulation index for the interannual variability of the Indian summer monsoon. *Report. 1997, No. 46*
- 3 廖三银, 张晓慧, 蔡夕芳等. 东亚季风强度指数与青岛区域降水相关分析. *气象科技*, 2002, 30 (2): 87–90
- 4 Cao H X. Self-memorization equation in atmospheric motion. *Science in China, Series B*, 1993, 36(7): 845–855
- 5 曹鸿兴. 动力系统的自记忆原理在预报和计算中的应用. 地理出版社, 2002
- 6 施能, 朱乾根. 1873–1995 年东亚冬、夏季风强度指数. *气象科技*, 2000, 28 (3): 15–16
- 7 魏凤英, 曹鸿兴, 王丽萍. 20 世纪 80—90 年代我国气候增暖进程的统计事实. *应用气象学报*, 2003, 14 (1): 79–86

## Climate Change in East-Asian Monsoon and Its Time Series Modeling

CAO Hongxing<sup>1</sup>, HE Huizhong<sup>1</sup>, LIU Haitao<sup>2</sup>, XIA Jun<sup>3</sup>,  
CAI Xiuhua<sup>1</sup> & SHI Neng<sup>4</sup>

(1: Chinese Academy of Meteorological Sciences, CAS, Beijing 100081, P.R.China;

2: Climate Center, Beijing Bureau of Meteorology, Beijing 100089, P.R. China; 3: Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, P.R.China 4: Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, P.R.China)

#### Abstract

The observed series of the East-Asian monsoon index for 1873 to 2000 are analyzed with statistics; its trends and interannual in different periods are also revealed. The East-Asian monsoon has decreased since 1873; its interdecadal variation is much significant. The decadal mean of the summer monsoon index during 1891–1900 was the highest in comparison with that of other decades, while minima occurred in 1921–1930 and again in 1991–2000. In order to model the change in the East-Asian monsoon, first, the self-memory principle of dynamic system is briefed, then the data-based mechanistic self-memory model (DAMSM), which is a new approach of time series analysis, is described. The DAMSM has been applied to the series of (the) East-Asian monsoon index, and demonstrated its ability for fitting and forecasting.

**Keywords:** East-Asian Monsoon, time series analysis, flood