

文章编号：1004-4965 (2003) 02-0163-06

登陆广东省热带气旋的奇异谱分析

谢炯光， 纪忠萍

(广州中心气象台，广东 广州 510080)

摘 要：利用奇异谱方法(SSA方法)分析登陆广东省的热带气旋的演变规律，发现年登陆的热带气旋数存在明显的8年、准3年的周期振荡；登陆珠江口以西的热带气旋数存在12年、准2年的周期振荡。把产生热带气旋的源地——西北太平洋划分为8个海区，对每个海区的海表温度进行奇异谱分析，结果显示NINO西区和暖池海区分别存在8年和3年的准周期振荡及12年和2年的周期振荡，这很可能是登陆广东的热带气旋产生的物理原因。最后结合最大熵谱方法(SSA-MEM)做出登陆广东省的全年和登陆珠江口以西的热带气旋趋势预报，其效果较理想，在短期气候预测业务中有一定的参考价值。

关键词：奇异谱分析；热带气旋；周期振荡

中图分类号：P444

文献标识码：A

1 引 言

广东省南临南海，海岸线长，每年受西太平洋热带气旋和南海热带气旋的袭击影响相当频繁，约占全国的登陆数和影响数的40%。因此，做好热带气旋的气候演变规律分析和预测、为防灾抗灾提供科学准确的依据就显得十分迫切需要。另外，随着社会的不断发展，向短期气候预测提出了越来越高的要求，不但要求做全年的热带气旋趋势，还要求做西路或东路的登陆热带气旋的趋势预测。热带气旋的年际变化，受许多复杂因素的共同综合作用，包含的气候噪声很多，这种有限资料的序列适于用奇异谱分析方法。奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis简称SSA)是一种数字信号处理技术，对于事先未知物理本质的系统，可以从它的包含噪声的有限长度观测序列中提取尽可能多的可靠信息。由于SSA不需要正弦性的假定，其识别的波形信号更符合实际，特别适用于研究大气的非线性震荡^[1-4]。SSA分析将时间序列 $\{x_i\}$ (本文为登陆广东省的年热带气旋总数)中隐含的显著振荡信号从噪声系统中提取出来，利用这些振荡信号组成预报因子集做出延伸预报。本文利用SSA结合最大熵谱方法(SSA-MEM)做登陆广东省的热带气旋个数预报，结果表明在短期气候预测业务中有一定的参考价值。

收稿日期：2001-08-21；修订日期：2002-04-12

作者简介：谢炯光(1942-)，男，广东人，教授级高级工程师，主要从事中长期气候预测的研究。

2 奇异谱分析的基本原理

2.1 时间 EOF 和时间主成份

SSA 分析方法实质是将一维时间序列 X_1, X_2, \dots, X_N 按时滞排列建立相空间矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{i+1} & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{i+2} & x_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \cdots & x_{i+m} & x_N \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} X_{10} & X_{11} & \cdots & X_{1,N-M} \\ X_{20} & X_{21} & \cdots & X_{2,N-M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{M0} & X_{M1} & \cdots & X_{M,N-M} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $i = 0, 1, \dots, N-M$; $M = N/2$, X 称为相空间轨迹矩阵, 矩阵 X 中的元素与原一维序列对应关系为后延量, M 称为窗口长度或嵌入维数。

对时间序列 $\{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 给定最大时间后延 M , 对于不同的 $i = 0, 1, 2, \dots, M$ 可求得由自协方差和自相关函数组成的 Toeplitz 矩阵

$$T_x = \begin{bmatrix} C(0) & C(1) & \bullet & \cdots & \cdots & C(M-1) \\ C(1) & C(0) & C(1) & \cdots & \cdots & C(M-2) \\ \bullet & C(1) & C(0) & \cdots & \cdots & \bullet \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bullet & \bullet & \bullet & \cdots & C(0) & C(1) \\ C(M-1) & C(M-2) & \bullet & \cdots & C(1) & C(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)等价于式(1)的协方差矩阵, 亦即是对式(2)求特征值和特征向量, 等价于对式(1)作 EOF 展开, SSA 展开为

$$X_{i+j} = X_{ji} = \sum_{k=1}^M \hat{a}_i^k E_j^k \quad (3)$$

每个特征向量 E^k 的 M 个分量构成一个时间序列, 反映 X 序列中的时间演变型。称 E^k 为时间 EOF (T-EOF)。第 K 个主成份定义为式(1)的状态向量在第 K 个 T-EOF 上的投影

$$\mathbf{a}_i^K = X_i^T E^k = \sum X_{i+j} E_j^k \quad (0 \leq i \leq N-M) \quad (4)$$

因式(1)有 $N-M+1$ 个状态向量, 故主成份长度为 $N-M+1$ 。 \mathbf{a}_i^K 称为时间主成份 (T-PC), 它是 E^k 表示的时间型在原序列的 $X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_{i+M}$ 时段的权重。

2.2 SSA 分析的谱性质

在时间序列的分析中, 经常使用周期变化来描述事物随时间演变的规律。据谐波分析原理, 任一要素的时间序列可由各种不同频率的震荡叠加而成, 在频率域上研究和比较不同频率的波的方差贡献大小, 就可以分析出震荡的主要频率或主要周期, 这种从频率或对时间序列进行分析的方法统称为谱分析。SSA 的重要应用之一就是被分解的各个 T-PC 功率谱贡献之和等于原序列的功率谱

$$P_x(f) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M P_k(f) \quad (5)$$

2.3 重建及预报模型

计算出 E^k 及 \mathbf{a}_i^K 后, 可选取我们感兴趣的 E^k 及 \mathbf{a}_i^K 的集合, 重构原序列及作出预测估计。其重构公式为

$$\begin{aligned}
 y_i &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in A} \hat{a}_i^k E_j^k & M \leq i \leq N - M + 1 \\
 y_i &= \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \sum_{k \in A} \hat{a}_{i-j}^k E_j^k & 1 \leq i \leq M - 1 \\
 y_i &= \frac{1}{N - i + 1} \sum_{j=i-N+M}^M \sum_{k \in A} \hat{a}_{i-j}^k E_j^k & N - M + 2 \leq i \leq M
 \end{aligned} \tag{6}$$

式中的 A 是我们感兴趣的特征成份的一个子集。

3 计算资料

海温资料取自 WMO 全球格点，网格点为 $5^\circ \times 5^\circ$ ，时间为 1949~1996 年共 48 年。登陆和严重影响广东省的热带气旋标准：热带气旋登陆广东省沿海陆地或距离广东省 1 个纬距内，其中登陆珠江口以西的热带气旋称为西路热带气旋。按此标准统计每年的热带气旋和西路热带气旋个数(1951~1996 年)，资料取自广州中心气象台中长期预报科。

4 登陆广东省的热带气旋计算结果分析

4.1 全年登陆广东省的热带气旋趋势分析

对上述资料用 SSA 分析计算得到前 7 个特征值的解释方差之和超过 95%，其中 T-EOF 1 (图 1) 表示了序列的均值。由图还可看出 T-EOF 2 和 T-EOF 3、T-EOF 4 和 T-EOF 5、T-EOF 6 和 T-EOF 7 位相正交，其对应时空 EOF 描述的二个序列具有准周期性，其中 T-EOF 2、3 具有准 3 年周期；T-EOF 4、5 具有准 8 年和准 3 年周期；T-EOF 6、7 具有准 8 年周期。图 2 是 SSA 分析所得的 7 个 T-PC 最大熵谱分析得到的功率谱之和，图 3 是原序列作最大熵谱分析得到的熵谱。从图 2、3 可知序列具有准 8 年和准 3 年周期振荡。文献 [5~6] 表明广东省后汛期降雨量存在 3 年振荡周期，可见热带气旋的这种周期振荡，对研究和分析后汛期的旱涝演变趋势有启发作用。

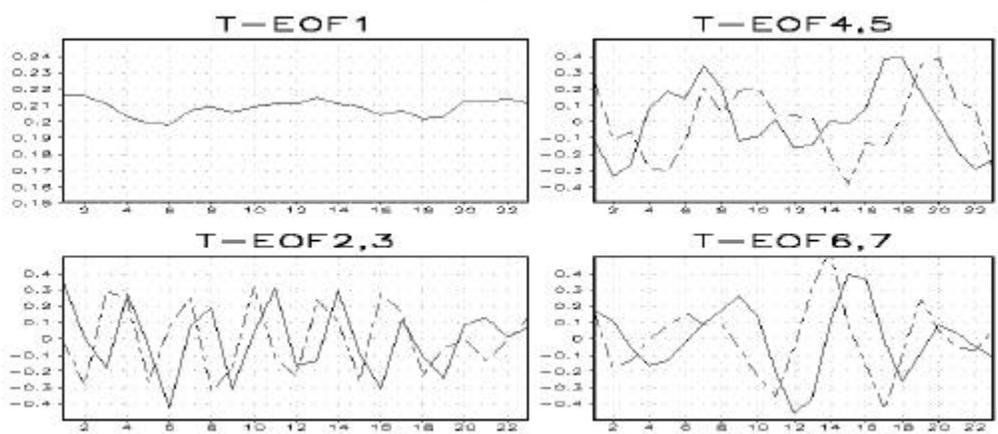


图 1 登陆广东省的热带气旋的 SSA 分析的前 7 个特征向量分布

4.2 登陆珠江口以西(西路)的热带气旋趋势分析

西路热带气旋趋势用 SSA 分析计算得到前 9 个特征值的解释方差超过 95 %。图 4 为 9 个 T-PC 最大熵谱分析结果之和。由图可见西路热带气旋有 12 年和准 2 年的周期振荡,有趣的是在年登陆热带气旋的趋势分析中的 T-PC 1、T-PC 2 等几个主分量中也存在 12 年和准 2 年的周期振荡,可见年登陆热带气旋趋势和西路热带气旋的趋势存在联系,这有待今后作更深入的研究。

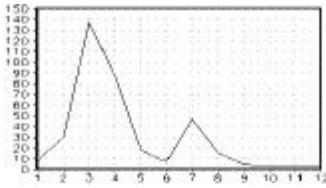


图2 SSA 分析所得的热带气旋的 7 个 T-PC 最大熵谱分析得到的功率谱之和

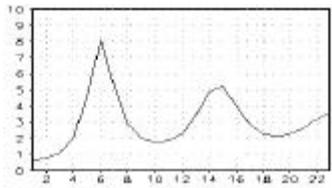


图3 原序列(年热带气旋个数)作最大熵谱分析得到的熵谱

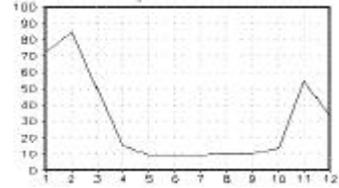


图4 SSA 分析所得的西路热带气旋的 9 个 T-PC 最大熵谱分析结果之和

5 西北太平洋 8 个海区与热带气旋关系的计算分析

众所周知,热带气旋形成对下垫面上的 SST 十分敏感,尤其是和西北太平洋海温的关系更密切,文献[7]指出在暖的海表温度异常区,低层有风场辐合及气旋式涡度形成,高层有风场辐散及反气旋性涡度形成,在动力上有利于热带扰动向热带气旋发展;其次,暖 SSTA 区低层辐合风的增强使该区有更多的水汽输入,降水和潜热释放均因之加强,导致地面气压进一步降低,风场辐合也进一步增强,暖 SSTA 区上方因而有更多热带气旋生成。所以登陆广东的热带气旋的周期震荡的物理基础应在海温的变化中去寻找,这样奇异谱分析得出的登陆广东省热带气旋的变化规律就有了物理依据。

为此,我们将整个西北太平洋海区分为 8 个部分: 西风漂流海区(40~45°N, 160°E~160°W); 湾流海区(35~50°N, 135~125°W); 黑潮海区(25~35°N, 130~145°W); NINO 4 海区(5°S~5°N, 180~150°W); NINO 3 海区(5°S~5°N, 145~90°W); NINO 1+2 海区(10°S~0°, 85~80°W); 暖池海区(10~15°N, 125~135°E); NINO 西海区(10~15°N, 145~180°E)。对上述 8 个海区分别求取 5~10 月的海表气温平均值,然后对每一海区分别做奇异谱分析,其结果见表 1。

表 1 各海区奇异谱分析结果

| 海区 | 西风漂流区 | 湾流区 | 黑潮区 | NINO 4 区 | NINO 3 区 | NINO 1+2 区 | 暖池区 | NINO 西区 |
|------|-------|-----|-----|----------|----------|------------|------|---------|
| 1 周期 | 5.6 | 8.3 | | 7.1 | 3.8 | 4.2 | 12.5 | 8.3 |
| 2 周期 | 3.1 | | 3.3 | 5.0 | | | 3.6 | 5.0 |
| 3 周期 | 2.0 | 2.0 | | 3.6 | 2.0 | 2.0 | 2.3 | 3.3 |

由表 1 可见西北太平洋海区的海表温度普遍存在准 2 和准 3 年周期,其中 NINO 西区存在准 8.3 和 3.3 周期震荡与登陆广东的热带气旋数的准 8 年、准 3 年震荡一致,暖池海区海表温度准 12、3、2 年周期震荡和西路热带气旋周期震荡相一致。从登陆广东省年热带气旋数和 NINO 西区海表温度距平变化曲线(图略)可见,两者大致呈正相关变化;而从西路热带气旋数和暖池海区海表温度距平变化曲线(图略)可见,两者大致

呈反相关变化。由上分析可知，登陆广东省的热带气旋年际震荡源于西北太平洋海温的震荡变化。而对海温的这种震荡演变的规律则可能要从更广泛的角度去进行分析才能掌握。

6 重构及预报结果分析

对 SSA 分析得出的 7 个 T-PC 用最大熵谱的伯格算法同时递推得到每个 T-PC 序列的最优阶数的自回归模型的回归系数，对 7 个 T-PC 的子集做出延伸预报。式(7)是 T-PC 7 的自回归模型（其余略）

$$\hat{x}_t = 0.4647 x_{t-1} - 0.5006 x_{t-2} - 0.3216 x_{t-3} \quad (7)$$

其中 \hat{x}_t 为预报值， x_t 为实测距平值。

用重构公式(6)，根据预报得到 7 个 T-PC 和由 SSA 计算出的 7 个 T-EOF 计算出年登陆广东省的热带气旋个数。图 5 中实线为实测值，虚线为预报值，1996、1997、1998 年为预报年。图 6 为根据 SSA-MEM 计算出的西路热带气旋重构及 3 年预测结果（说明同图 5）。由图 5、6 可见，重构拟合趋势除个别年报之外，绝大部分趋势报得很理想，3 年预报与实际的趋势也基本一致。表 2 是 1997~1999 年几种预报方法的预报结果比较。可见由 SSA 分析方法做登陆广东省和西路热带气旋年个数的预报有较好的参考价值。

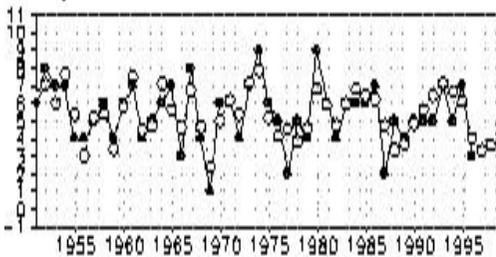


图 5 1951~1999 年热带气旋个数的重构及预测 实心圆为观测值，空心圆为预报值。

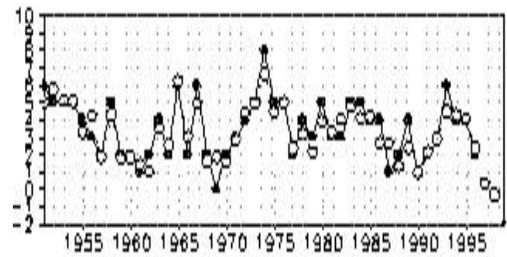


图 6 1951~1999 年西路热带气旋个数的重构及预测 实心圆为观测值，空心圆为预报值。

表 2 1997~1999 年登陆广东省的热带气旋年个数的各种预报比较

| 方法 | SSA-MEM | 均生函数 | 灰色预测 | 谐波分析 | 最大熵谱自回归 | 实况 |
|--------|---------|------|------|------|---------|----|
| 1997 年 | 3.4 | 5.5 | 3.5 | 5.0 | 5.2 | 2 |
| 1998 年 | 3.5 | 6.3 | 3.0 | 5.2 | 5.3 | 4 |
| 1999 年 | 4.8 | 3.5 | 2.5 | 5.7 | 5.6 | 7 |

7 结 论

(1) 用 SSA 分析方法对登陆广东省的热带气旋分析表明，每年登陆广东省的热带气旋有 8 年和 3 年的准周期演变。每年的西路热带气旋有 12 年和 2 年的准周期振荡。

(2) NINO 西区和登陆广东省的热带气旋个数、暖池海区与西路热带气旋个数存在相同的准周期振荡，前者是正相关，后者是反相关。说明登陆广东热带气旋的这些周

期演变规律与西北太平洋海温的变化有极密切的关系。

(3) SSA-MEM做广东省热带气旋趋势预报拟合和3年预测结果都比较理想,在短期气候业务预报中有参考价值。

(4) 登陆广东省的年热带气旋趋势与登陆的地段存在联系。

参 考 文 献:

- [1] CHRISTIAN L K, MICHAEL Chil. Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation Index[J]. *Journal Geophy RES*, 1992, 97: 20449-20454.
- [2] ROBERT Vautard, PASCAL Yiou, MICHAEL Ghil. Singular-Spectrum analysis:A toolkiy for short, noisy chaotic signals [J]. *Physica D*, 1992, 58: 95-126.
- [3] 吴洪宝. 奇异谱和多通道奇异谱[J]. 气象教育与科技, 1997(4): 1-10.
- [4] 刘健文, 周小刚. SSA方法在气候时间序列分析和预测中的应用[J]. 气象科技, 1996(3): 18-22.
- [5] 林学椿. 大气中3~5年周期的观测研究[J]. 科学通报. 1989, 14: 1089-1092.
- [6] 吴尚森, 黄成昌. 华南后汛期降水的年际变化[J]. 热带气象, 1990, 6: 348-356.
- [7] 吴国雄. 海温异常对台风形成的影响[J]. 大气科学, 1992, 16: 322-332.
- [8] 顾骏强. 近50年浙江省旱、涝气候变化及特征[J]. 热带气象学报, 2001, 17: 429-435.

THE SINGULAR SPECTRUM ANALYSIS FOR TROPICAL CYCLONES LANDING IN GUANGDONG

XIE Jiong-guang, JI Zhong-ping

(Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Using the method of Singular Spectrum Analysis(SSA), the evolution regularity of tropical cyclones landing in Guangdong are analysed. The main periods of yearly topical cyclones landing in Guangdong are found at 8 and quasi-3 years, and in the west of Pearl River's mouth are 12 and quasi-2 years in the west of Pearl River's mouth. The north-west Pacific that generate topical cyclones are cut into 8 areas, and the Sea-Surface Temperature (SST) in each area are analysed using SSA. The main periods of NINO-west are 8 and 3 years, and the Warm-pool are 12 and 2 years, respectively. This may be the physical reason that generates tropical cyclones landing in Guangdong. By combining the Maximum Entropy Method(MEM) with SSA(SSA-MEM), the yearly variation trend of tropical cyclones landing in Guangdong and the mouth of Pearl River are forecasted, and the result are good. The method can be used in operational short-range climate forecast.

Key words: SSA ; tropical cyclone ; periodic oscillation