

# 西太平洋热带地区环流低频变化的主振荡型预测试验\*

杨秋明

(江苏省气象台, 南京 210008)

## 提 要

用1994年逐日西太平洋热带地区200 hPa纬向风场资料建立主振荡预测模型,对低频纬向风场(30~50天)的传播进行独立预报试验.试验结果表明,在夏半年109次预测中提前15天预报的相关预报技巧在0.50以上.它是揭示低频时空演变的有效工具.同时也讨论了有关模型参数的选取方法.

**关键词:** 主振荡型分析 预测 200 hPa 纬向风 低频振荡

## 引 言

自从Madden和Julian开创性地研究热带大气中存在的30~60天振荡(MJO)现象以后<sup>[1]</sup>,气象工作者在其后的20年间进行了大量观测、数值模拟和动力学研究<sup>[2]</sup>,对其活动规律和特性有了较深入的认识.由于亚洲季风的建立和活动与低频振荡密切相关,并造成东亚天气气候异常,因此在分析MJO的基础上建立预测模型对其进行预测是重要的.近年来,主振荡型<sup>[3,4]</sup>已开始用于赤道地区环流的MJO分析与预测试验.由于主振荡型(POP)方法具有客观地揭示复杂系统时空演变特征的优点,从时滞相关阵中抽取的特征向量具有较好的代表性,所以进一步用POP方法对MJO进行独立样本预报试验是必要的,它有助于分析POP模型的预报性能,以便在业务预报中使用.本文用POP模型对热带西太平洋200 hPa纬向风30~50天低频场进行了独立预报试验,并讨论了模型参数的一些选择方法,为中国东部中期天气预报提供新的依据.

## 1 预测模型

### 1.1 资料

200 hPa纬向风场选用ECMWF格点逐日实况风场资料,时间是1994年1月1日~12月31日,在30°N~30°S, 90°E~180°范围内取均匀分布的56个格点,采用一阶Bat-

\* 1996-12-03收到,1997-03-31收到修改稿.

terworth 滤波器进行 30~50 天带通滤波, 得到 200 hPa 低频纬向风场, 经标准化处理后构成基本资料阵  $U_{m \times n}$  ( $m=365, n=56$ ).

## 1.2 200 hPa 纬向风 MJO 的主振荡型分析

1.2.1 热带西太平洋 200 hPa 纬向风低频振荡的时空演变特征 对低频风场  $U_{m \times n}$  进行主成分分析 (PCA) 后, 取方差贡献大于 75% 以上的前  $k_0$  个主成分构成向量序列  $X(t)$ . 设  $X(t)$  满足

$$X(t+1) = BX(t) + \text{noise} \quad (1)$$

式(1)中非对称实矩阵  $B=C_1C_0^{-1}$ ,  $C_1$  和  $C_0$  分别是  $X(t)$  的时滞 1 和 0 的协方差阵, 且  $X(t)$  与 noise 无关, 由 QR 方法计算得到  $B$  的特征根  $\lambda$  和特征向量  $p$ .

当  $\lambda$  是复数时,  $\lambda = \lambda_1 \pm i\lambda_2$ , 复特征向量  $p = p^r \pm i p^i$ ,  $i = \sqrt{-1}$  (传播型). 作变换  $p = \alpha p$  ( $\alpha$  是复常数), 使  $(p^r \cdot p^i) = 0$  且  $|p| = 1$ , 得到 200 hPa 低频纬向风场的主振荡型空间分布  $p^r$  (实部) 和  $p^i$  (虚部).  $X(t)$  在  $p$  上展开得到

$$Z(t) = X(t)p \quad (2)$$

式(2)中  $Z(t) = z' + iz^i$ , 且满足差分方程

$$Z(t+1) = \lambda Z(t) \quad (3)$$

主振荡型的时空演变可表示为

$$X(t) = z' p^r + z^i p^i \quad (4)$$

它的方差贡献是

$$s' = 1 - \frac{\langle e^2 \rangle}{\langle X^2 \rangle} \quad (5)$$

式(5)中误差向量  $e = X(t) - z'(t)p^r - z^i(t)p^i$ ,  $\langle \rangle$  表示时间平均, 该系统的空间演变表现为一环形状链:

$$\dots \rightarrow p^i \rightarrow p^r \rightarrow -p^i \rightarrow -p^r \rightarrow p^i \rightarrow \dots \quad (6)$$

振荡传播周期是

$$T = \frac{2\pi}{\text{tg}^{-1}(\lambda_2/\lambda_1)} \quad (7)$$

由式(3)可对时间系数进行预报, 从而得到主振荡型预测值.

当  $\lambda$  是实数时, 其实特征向量是  $p$ , 主振荡型的时空演变由  $X(t) = Z(t)p$  表示 (驻波型).

基本资料阵  $U_{m \times n}$  的主成分分析结果表明前 5 个主成分的累积方差贡献达 80.2%, 因此取这 5 个主成分组成  $X(t)$  进行主振荡型分析 (POP), 得到一对复特征值  $0.978 \pm 0.142 i$  (对应于 POP1, 传播型) 和 3 个实特征值 0.975、0.946、0.653 (对应于 POP2、POP3 和 POP4, 驻波型), 方差贡献分别是 21.2%、7.6%、14.1% 和 20.2% (由式(5)计算). 所以 POP1 方差贡献最大, 它是 1994 年热带西太平洋 200 hPa 纬向风 30~50 天振荡低频场变化中最显著的低频信号. 另外, POP4 也起重要作用.

1.2.2 POP1 和 POP4 的演变过程 图 1 是热带西太平洋 200 hPa 纬向风 30~50 天振荡的第一对主振荡型 (POP1) 的空间分布  $p^r$  和  $p^i$  以及时间系数  $z'$ 、 $z^i$ , 它的方差贡献是 21.2%, 传播周期是 43.4 天. 从图 1(a)、(b) 可以看出虚部  $p^i$  呈现以赤道为对称轴的南

北半球热带地区的反相变化特征, 而实部  $p^r$  则表现为赤道地区是一显著负值带状区域, 在赤道两侧是弱的正值带, 并且日本南部洋面还有一个负值中心. 结合时间系数演变, 可知系统循环过程按式(6)次序周而复始. 为了讨论方便, 不妨设开始位相是  $-p^i$ , 这时赤道以北热带是大范围西风距平区, 经过  $1/4$  周期(约  $10\sim 12$  天), 空间分布型逐渐被  $-p^r$  代替, 西风距平区南移到赤道附近. 到  $1/2$  周期,  $p^i$  占优势, 即  $-p^i$  的西风距平已移动到澳大利亚附近, 赤道以北变为大范围东风距平区. 当再经过  $1/4$  周期, 空间分布型由  $p^r$  表示, 原来的西风距平区向南移出分析区域, 赤道附近出现强东风距平. 然后到了 1 个周期后返回到  $-p^i$  位相, 上述过程再现. 因此, 在 200 hPa 纬向风  $30\sim 50$  天低频循环过程中, 低频波列从北半球热带地区越过赤道向南传播, 它反映了南亚季风区由海陆加热的季节性差异激发的低频波的能量频散途径, 与季风的活跃和中断有密切联系. 另外, 从时间系数变化(图 1c)来看, 低频振荡的强度随时间变化, 夏半年 4~8 月以及初冬 11~12 月显著, 而 1~3 月和 9~10 月振荡不显著, 这与已有的研究结果是一致的<sup>[2]</sup>, 即南亚和东亚季风区初夏低频振荡最显著, 而初冬低频振荡加强可能与东亚寒潮活动引起热带西太平洋地区对流活动加强有关, 它对这个地区  $30\sim 50$  天振荡的形成有触发作用<sup>[5]</sup>.

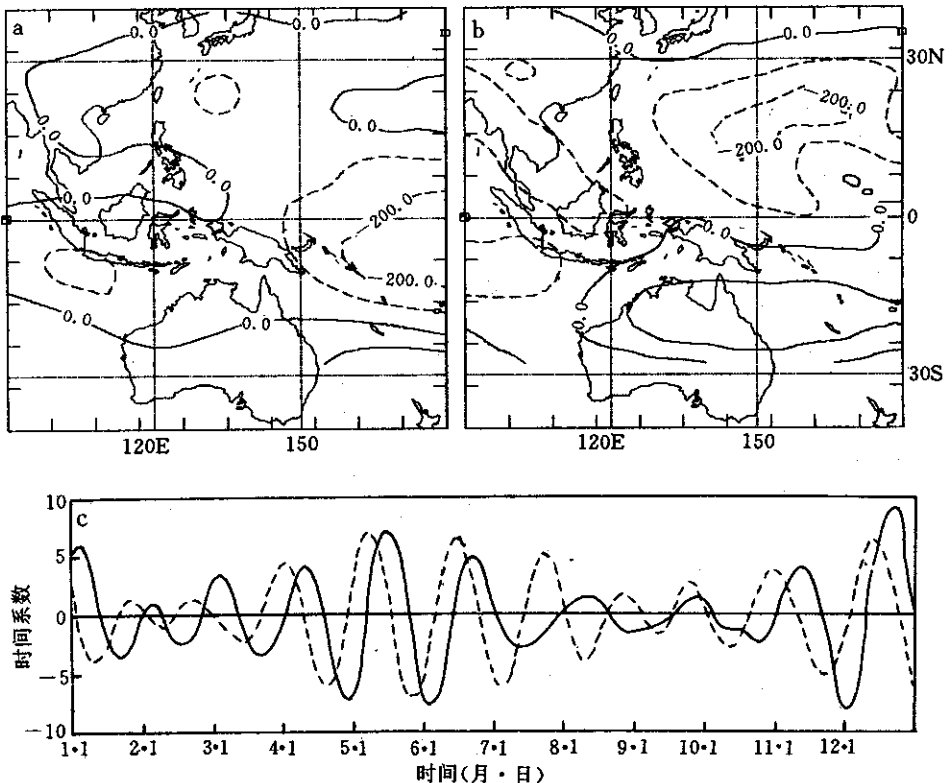


图 1 西太平洋热带地区 200 hPa  $30\sim 50$  天振荡低频纬向风场第一主振荡型(POP1) (a) 空间分布实部  $p^r$ , (b) 虚部  $p^i$  和 (c) 时间系数 ((a)、(b) 中等值线间隔是 100, 虚线表示负值. (c) 中实线是  $p^r$ , 虚线是  $p^i$ , 图中数值已乘 1000)

图2是热带西太平洋200 hPa纬向风30~50天振荡第四主振荡型(POP4)的空间分布和时间系数,它的方差贡献是20.2%。从图中可以看到,其空间分布以负值为主,等值线呈纬向分布,主要负值带在30°N和20°S附近,仅在赤道以北地区存在弱的正值分布区。非整数功率谱分析<sup>[7]</sup>表明,这种驻波振荡的周期是41天。从图2(b)可知这种驻波在1~2月和11~12月较显著,它可能与经向温度梯度的作用有关,它对东亚夏季风的作用较弱。

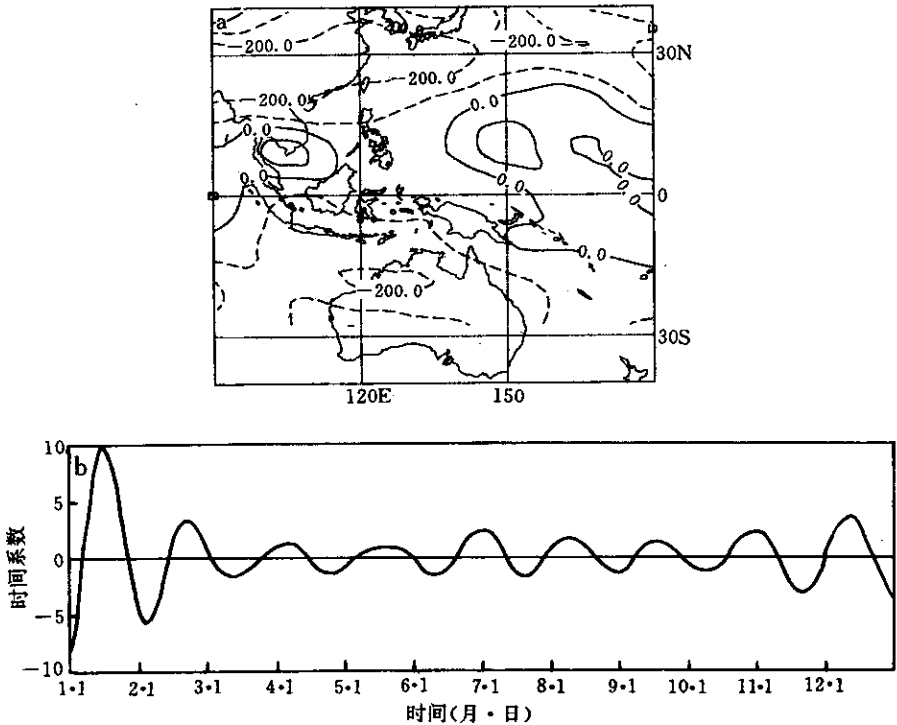


图2 西太平洋热带地区200 hPa 30~50天振荡低频纬向风场第四主振荡型(POP4)  
(a)空间分布实况  $p'$  和(b)时间系数  $z'$  (说明同图1)

以上分析表明,主振荡型客观地揭示了30~50天振荡的循环过程演变特征(包括传播型和驻波型),反映了复杂动力系统主要的时空变化信息。

## 2 预测方法及结果

POP模型不仅是一个分析工具,也是预测低频空间波传播的工具(即对式(6)表示的环形状链进行振荡状态预报)。已有的研究表明<sup>[6]</sup>,当低频振荡强度较大时(即活跃期),预报的效果就好,因为这时从时滞相关阵中抽取的特征向量代表了线性随机系统(式(1))变化特性。而进行实际预报时,必须考察其独立样本预报精度,以反映实际预报能力。由于主振荡型与样本序列长度有关,因此本文用限定记忆法,保持子序列  $N_0$  不变,滑动进行独立样本预测试验,对振荡传播较显著的初夏和盛夏(4月30日~8月16日)共作109次预报,取预报时间  $\tau=15$  天,子序列长度  $N_0=62$  天。时间系数预报公式取

$Z(t_0 + \tau) = |\lambda| e^{-\frac{2\pi\tau}{T}} Z(t_0)$ , 由式(4)得到主振荡型的预测值, 从而得到提前于初始时刻  $t_0$  的时间  $\tau$  的低频风场预报场  $u^p(t + \tau)$ . 用公式

$$r(\tau) = \frac{\langle u^p(t + \tau)u(t + \tau) \rangle}{\sqrt{\langle u^p(t + \tau)^2 \rangle} \sqrt{\langle u(t + \tau)^2 \rangle}} \quad (8)$$

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\langle |u^p(t + \tau) - u(t + \tau)|^2 \rangle} \quad (9)$$

计算相关和均方根误差预报技巧. 109 次预报的平均相关预报技巧  $r(\tau)$  和均方根预报技巧  $\sigma(\tau)$  在图 3 中给出(同时也给出了持续性预报的  $r(\tau)$  和  $\sigma(\tau)$ ). 从图中可以看出 POP

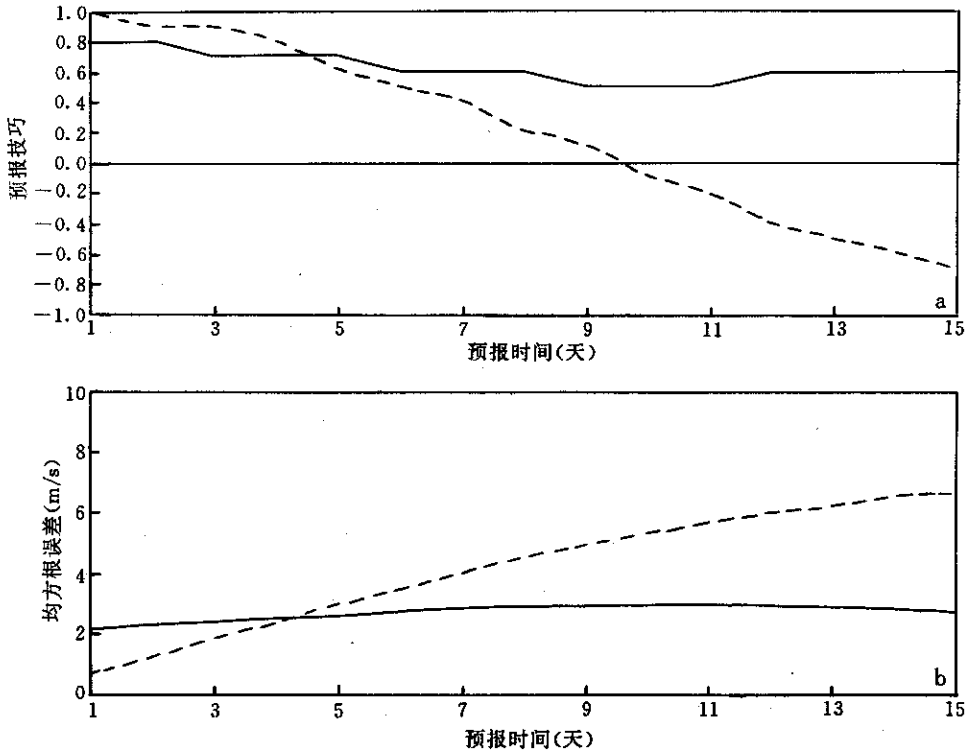


图 3 POP 预报技巧 (a) 相关预报技巧 (b) 均方根预报技巧 (实线: POP 预报 虚线: 持续性预报)

预报直到第 15 天的  $r(\tau)$  仍在 0.50 以上, 而  $\sigma(\tau)$  变化不大, 误差较小; 持续性预报的误差在前 4 天高于 POP 预报, 但 4 天以后,  $r(\tau)$  迅速下降,  $\sigma(\tau)$  增加很快, 失去预报能力. 因此 POP 预报精度较高, 时效较长, 在日常业务预报中有重要参考价值. 图 4 给出了 6 月 17 日预报结果, 使用 4 月 17 日~6 月 17 日逐日 30~50 天 200 hPa 纬向风低频场资料建立 POP 模型并进行预测(由于子序列前两个主成分(累积方差贡献已大于 75%)进行主振荡分析, 仅存在一对复特征值  $0.985 \pm 0.170i$ , 传播周期是 36.8 天, 方差贡献是 79.9%).

对比图 4(a) 和 (b), 可知澳大利亚附近南半球异常东风区和北半球热带西风区都成功报出, 但从中国东部沿  $30^\circ\text{N}$  到西北太平洋附近的东风区预报略偏弱. 由于 200 hPa 东风距平在北半球副热带区加强, 西太平洋赤道地区是西风区, 使得西太平洋副高显著北

跳, 长江中下游进入盛夏高温季节.

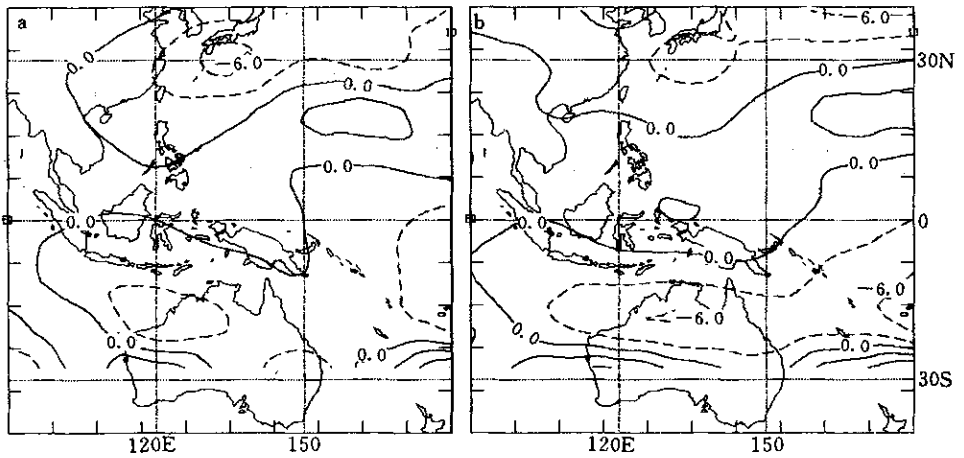


图 4 热带西太平洋 200 hPa 低频风场 POP 预报 (a)6 月 28 日实况 (b)11 天预报(初始场 6 月 17 日) (实线: 西风距平(正值), 虚线: 东风距平(负值), 等值线间隔是 3.0 m/s)

以上预报试验表明, POP 模型能有效地揭示复杂动力系统低频演变信号, 特别是低频波的传播, 对于显著的低频传播信号能较好地预测其空间波的状态变化. 由于复特征向量  $p = p' \pm ip''$  随样本而变化, 因此本文建模方案体现了系统特征的动态演变, 即 POP 系数  $z'$ 、 $z''$  在二维  $z$ -平面上的变化是相对于动态正交基  $p'$  和  $p''$  的, 有利于适应系统空间结构的改变. 另外, 子序列长度一般取  $N_0$  为 60 天左右, 使得第一主振荡型的周期在 30~60 天之间, 且解释方差最大(在 109 次预报中, 对于子序列取前两个主成分(累积方差贡献已超过 75%)进行 POP 分析, 每次仅得到一对复特征值和复特征向量, 即传播型低频信号占主导地位, 且对应的周期长度也有显著变化, 其范围在 36~55 天之间). 若  $N_0$  取得太大, 则 POP 分析中有可能包括大于 60 天时间尺度的振荡以及其它噪声的作用, 影响 POP 分析的收敛性. 另外, Batteredworth 带通滤波使序列长度两端各损失一个样本, 所以对于预报时效  $\tau$  实际使用时应为  $\tau-1$ .

### 3 结论和讨论

(1) 主振荡型对于西太平洋热带地区 200 hPa 纬向风的 30~50 天低频振荡的演变能很好地描述, 特别是客观地揭示了赤道地区高层由北向南传播的低频波的存在.

(2) 在对 1994 年夏半年热带西太平洋 200 hPa 低频纬向风场主要传播信号进行的 109 次独立预报试验中, 提前 15 天的相关预报技巧仍大于 0.5, 明显高于持续性预报. 因此, POP 模型具有较强的预报能力, 在中期预报业务中有重要参考价值.

(3) 由于低频振荡的空间分布和周期长度随时间而变化, 所以选择适当的子序列长度, 滑动进行动态建模预报是重要的, 可将复杂系统空间结构变化信息反馈到预测模型中, 有利于提高预报精度.

### 参 考 文 献

- 1 Madden R A and Julian P R. Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40~50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 1109~1123.
- 2 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1993.
- 3 Hasselmann K. PIPs and POPs; The reduction of complex dynamical systems using Principal Interaction and Oscillation Patterns. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 11015~11021.
- 4 von Storch H, Brus T, Bruns I F, et al. Principal Oscillation Patterns analysis of 30 to 60 day oscillation in a GCM. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 11022~11036.
- 5 李崇银, 肖子牛. 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟 I: 对欧亚中高纬“寒潮”异常的响应. *大气科学*, 1993, **17**(5): 523~531.
- 6 Xu J S and von Storch H. Predicting the state of SO using Principal Oscillation Patterns analysis. *J. Climate*, 1990, **3**: 1316~1329.
- 7 杨秋明. 初夏亚洲季风区环流低频振荡与长江下游持续暴雨. *应用气象学报*, 1993, **4**(3): 320~326.

## FORECAST EXPERIMENTS FOR LOW FREQUENCY OSCILLATION OF TROPICAL CIRCULATION IN WEST PACIFIC USING PRINCIPAL OSCILLATION PATTERN ANALYSIS

Yang Qiuming

(*Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008*)

### Abstract

The principal oscillation pattern (POP) models are set up based on the daily data of zonal wind at 200 hPa in tropical West Pacific in 1994, and the independent forecast experiments of POP models are performed for the propagation of the low frequency on the 30~50 day time scale. The results show that the skill score of correlation prediction up to 15 days ahead of time could reach more than 0.50 in the 109 forecasts during the northern summer. It is a useful analysis tool to reveal the spatial and temporal evolution of low frequency oscillation. Furthermore, the method of selecting the parameters is also discussed.

**Key words:** Principal Oscillation Pattern(POP) analysis Prediction 200 hPa zonal wind  
Low frequency oscillation