

赤道太平洋次表层海温距平的 EEOF 分析及与厄尔尼诺的关系

杜华栋¹, 李 婧², 叶志敏³, 兰伟仁²

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 总参气象中心, 北京 100008; 3. 南京军区气象水文中心, 南京 210016)

摘 要: 通常气候变量场在时间上存在着显著的自相关及交叉相关, 扩展的经验正交函数 (Extended EOF, 以下记作 EEOF) 分析是在经典的 EOF 基础上发展而来的, 它同时考虑了要素的空间和时间相关性, 可以得到变量场的移动性分布结构。本文通过对赤道太平洋次表层海温距平 (SOTA) 场的 EEOF 分解, 发现第一特征向量是关于 El Nino 的模式, 它反映了 El Nino 的发生持续消亡的整个过程, 对应的时间系数 (第一主分量) 与 Nino3 指数有很好的同时相关。第二特征向量是关于西太平洋暖池的模式, 它反映了西太平洋暖池从暖位相到冷位相 (同时东太平洋从冷位相到暖位相) 的过程, 第二主分量与滞后 6 ~ 10 个月的 Nino3 指数有很好的相关性。这两个主分量不但有助于了解赤道太平洋海温异常的过程, 而且为厄尔尼诺的预报提供了重要线索。

关键词: 赤道太平洋次表层海温距平; EEOF 分解; 厄尔尼诺

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2006) 4 - 0021 - 07

1 引言

自 80 年代以来, 各国政府气象海洋部门及科学家越来越关注厄尔尼诺及拉尼娜现象, 因为它们的发生给全球不少地区造成了严重灾害。近年来已有大量这方面的研究。蒲书箴等^[1] (1998 年) 分析了 1997 ~ 1998 厄尔尼诺的发生和发展, 发现赤道太平洋次表层水温在厄尔尼诺期间早于表面水温的变化, 而且跃层深度以 Kelvin 波速向东传播。李崇银^[2] (1999 年) 指出, 赤道西太平洋暖池次表层海温正异常及沿赤道向东传播对 El Nino 事件的爆发有直接关系, 而其东传的原因在于赤道西太平洋地区西风异常的发生及向东扩展。2000 年, 李崇银^[3] 又利用 1965 ~ 1993 年间 6 次 El Nino 事件和 6 次 La Nina 事件的合成, 研究了西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用。蔡怡^[4] 等 (2003 年) 利用 EOF 分析方法, 讨论了近 20 年来赤道太平洋次表层温度、纬向流距平与厄尔尼诺的关系。如此看来, 近年来对 ENSO 现象的研究重点逐渐从海表风场和海表面水温 (SST) 转到海洋次表层或这几个方面相结合的研究上来了。

2 资料及方法

无论是风场、海温场还是流场,对它们的时间序列分析和预测而言,有两个影响因素。其一,资料的获取和资料的可信度。已往的研究往往局限于资料的时间序列长度以及资料所能达到的深度,随着海洋观测手段的改进和海洋观测资料的增加,这个问题正得到解决。其二,是研究方法的选择。合成分析中起始时间段的选取随意性大,缺陷是显而易见的。从气候要素的时间空间场中提取主要的、有用的信息和特征,这一类方法很多,每一种方法的效果是不同的,要结合实际选择一种方法或几种方法相结合使用。用经验正交函数(EOF)分解,我们可以得到气候变量场空间上的分布结构,是固定时间形式的空间分布结构,它不能得到扰动时间上移动的空间分布结构。然而,气候变量场在时间上存在显著的自相关及交叉相关。扩展的经验正交函数^[5](EOF)分析是在经典的EOF基础上发展而来的,它同时考虑了要素的空间和时间相关性,可以得到变量场的移动性分布结构。某气候要素的时间序列记作 $\{x_i(i):1 \leq i \leq L, 1 \leq i \leq N\}$,其为距平值,其中 L, i 分别为地理空间站点或变量序号和样本序号(时序)。最大时滞步数取为 m ,构造时滞矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(N-m+1) \\ x_1(2) & x_1(3) & \cdots & x_1(N-m+2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_1(m) & x_1(m+1) & \cdots & x_1(N) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(N-m+1) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_L(m) & x_L(m+1) & \cdots & x_L(N) \end{bmatrix}_{(L \times m)(N-m+1)} \quad (1)$$

对此矩阵作 EOF 展开,其分量形式为:

$$y_{i+j} = \sum_{k=1}^{L \times m} \alpha_i^k E_{ij}^k$$

$$\alpha_i^k = X_i E^k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^m x_{i+j} E_{lj}^k \quad (2)$$

这里 y_{i+j} 表示通道第 i 时次的滞后 j 的 EOF 展开分量, E^k 为 $X \times X^T$ 的第 k 个特征向量,是 $L \times m$ 维的,分量 E_{ij}^k 表示第 k 个特征向量在 i 通道滞后的 j 分量,它既反映了空间型(随 i 变化),也反映了时间演变(随 j 变化),是 L 维向量(空间型)的 m 个不同时间滞后的序列, E^k 又称为空间-时间域的 EOF。而时间系数 α_i^k 是第 i 个状态 X_i (即矩阵 X 的第 i 列)在特征向量 E^k 方向上的投影,序列 $\{\alpha_i^k:1 \leq i \leq N-m+1\}$ 称为第 k 个空间时间主分量。(2)式还提供了一种预报时间系数的思路, τ 为提前预报间隔,取第 k 个特征向量 E^k 中每一空间点

的前 $m+1$ 个元素,由 i 时刻的场资料得到 $i+\tau-m+1$ 时刻的时间系数。

$$\alpha_i^k(\tau) = \sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^m x_{i+\tau+j}^k E_{ij}^k \approx \sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^{m+1} x_{i+\tau+j}^k E_{ij}^k \quad (3)$$

资料取自美国 Scripps 海洋研究所环境数据分析中心(JEDAC)整理的一套全球海洋上层海水温度月距平资料,通过南京大气资料服务中心获得。该资料水平分辨率 $\Delta\lambda \times \Delta\varphi = 5^\circ \times 2^\circ$,覆盖范围 $180^\circ\text{W} \sim 0 \sim 180^\circ\text{E}$, $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$,垂直 11 层所在深度:0, 20, 40, 60, 80, 120, 160, 200, 240, 300, 400m,时段覆盖 1955 年 1 月 ~ 1998 年 12 月。本文取 $130^\circ\text{E} \sim 80^\circ\text{W}$ 的赤道(或 $10^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$ 纬向平均)切面,垂直取 0 ~ 240m 共 9 层,时段资料共 528 个时次,即计算时 $L=31 \times 9$, $N=528$ 。一般地,厄尔尼诺的产生发展消亡周期为 2 ~ 3 年,要想提取其整个过程的主要特征,最大时间滞后步数应该与此周期大致相当或更长,考虑到计算量本文暂取 $m=20$ 。

3 结果分析

计算得到第一个特征向量(向量是无量纲的,其数值只具有相对意义),将它分成的二维温度距平场的 20 个不同时间滞后的序列。限于篇幅,只给出其中四幅图,滞后时间依次为 1、7、14、19 个月。取 $\Delta t = 1$ 时(见图 1a)整个赤道太平洋次表层沿温跃层几乎被一个倾斜的海温正距平区所覆盖,其正中心在 $100 \sim 160\text{m}$; $\Delta t = 7$ 时(见图 1b)正距平区向上层发展,中心沿跃层倾斜向东传,到达次表层 80m 以上,中心最大值增加,同时赤道西太平洋暖池区($130^\circ \sim 180^\circ\text{E}$)100 ~ 200m 深度出现温度负距平区并逐渐增强,且沿跃层向东发展迫使正距平区向东退缩; $\Delta t = 14$ 时(见图 1c)西部的负距平区继续发展, 150°W 以西 100m 以下都被负温度距平海水占据,而东部正距平区退到中东太平洋($180^\circ\text{E} \sim 80^\circ\text{W}$)海面及 100m 以上的次表层,且正距平强度减弱; $\Delta t = 19$ 时(见图 1d)负距平区达到最大占据着赤道太平洋次表层大部分区域,东边界达到 120°W ,而中东太平洋海表及浅层仍然有小块弱的正距平区。由此可见,这 20 个序列是关于 El Nino 的模式,它反映了 El Nino 的发生持续消亡的整个过程,包含了西太平洋次表层海温正距平沿赤道温跃层的东传,东太平洋次表层海温正距平的出现、发展和持续,中东太平洋次表层海温正距平减弱及西太平洋次表层海温负距平产生发展等过程。20 个不同时间滞后的序列是关于西太平洋暖池的模式。它反映了西太平洋暖池从暖位相到冷位相(同时东太平洋从冷位相到暖位相)的过程(图略)刻画出了西太平洋暖水东传的重要机制。

进一步探讨第一特征向量对应的时间系数(即第 1 空间-时间主分量,见图 2),可以发现它与 Nino3 指数有很好的同时相关,相关系数达 0.77。其中 1957、1972、1976、1982 ~ 1983、1986 ~ 1987 年及九十年代的几次 El Nino 事件和 1967、1970、1973、1975、1984、1988、1996 年的 La Nina 事件相关较好。1963、1965、1969 的 El Nino 事件虽然主分量为正,但幅度较小不易辨认。另外,主分量比 Nino3 指数要平滑得多,忽略了一些高频的信号。第 2 主分量(图略)和滞后 6 ~ 10 个月 Nino3 指数有很好的相关性,其中滞

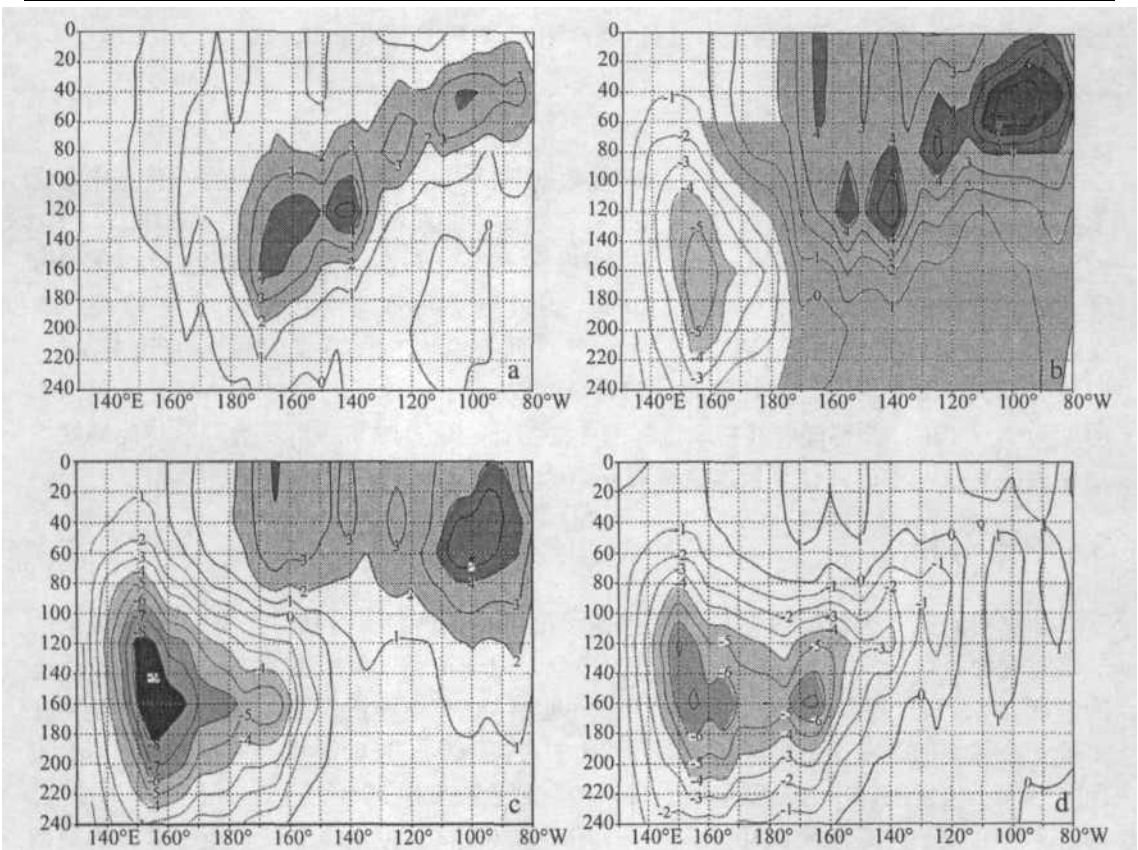


图 1 a~d 时间滞后依次为 1、7、14、19 个月的二维温度距平特征场

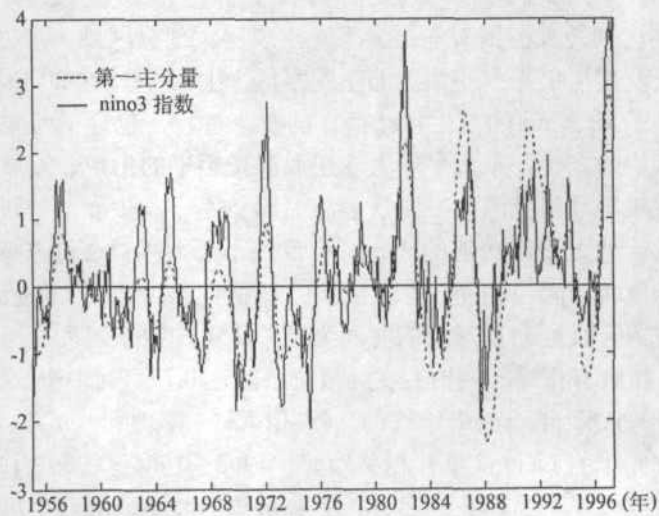


图 2 第一特征向量对应的时间系数(即第一主分量)与 nino3 指数

后 8 个月的相关系数最大达 0.68。也就是说，第二主分量达到最大以后约 6 ~ 10 个月，第一主分量达到最大。由此可见，第二主分量可以作为判断 El Nino 衰减的一个指标，即当赤道西太平洋暖池海温正异常的强度达到最强后 6 ~ 10 个月，Nino3 指数开始下降。这也表明，赤道西太平洋暖池海温正异常中心移到赤道东太平洋大约需要 6 ~ 10 个月。

上述第一、二特征向量所描述的过程尽管十分清晰显著，但毕竟是一个抽象的信息，而且第一、二特征向量的方差贡献分别为 22%、16%，其代表性令人质疑。那么实际发生的 El Nino 事件是否有这样的特征呢？为了与上述过程对比，讨论了 1982 ~ 1983 和 1997 ~ 1998 两次典型的 El Nino 事件。分别取 24 个月的时间序列(1982 年 1 月 - 1982 年 12 月和 1997 年 1 月 ~ 1998 年 12 月)作太平洋次表层温度距平的截面(6°S ~ 6°N 纬向平均)。1982 ~ 1983 年的 El Nino 过程(图略)，自 1982 年 3、4 月起正距平东传，8 月份东太平洋全面增温，El Nino 爆发，一直持续到 1983 年 6 月份正距平减弱，赤道太平洋大部分被负距平所占据。1997 ~ 1998 的 El Nino 过程(图略)，1997 年 3 月份至 1998 年 5 月份热带中东太平洋为正距平，期间 1997 年 10 月至 1998 年 1 月达最大。两次 El Nino 事件都十分符合前述的通过 EEOF 时滞 20 个月提取的第一、二特征向量所描述的特征。

由于第一特征向量对应的时间系数与 Nino3 指数有很好的同时相关，对该时间系数的预报对 Nino3 指数的预估有实际意义。对(3)式取 $\tau=14$, $m1=6$ 得到 9 个月的预报时间指数(见图 3)，它和对应的 Nino3 指数相关系数达 0.79。同时，预报指数与第一主分量相比(图略)，高频的波动比较多，能体现大趋势上的小起伏。

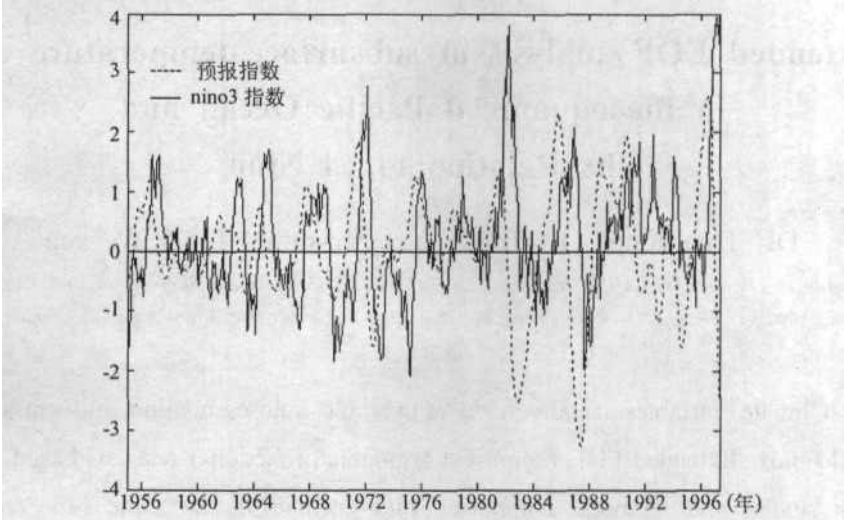


图 3 $\tau=14$, $m1=6$ 取得到的 9 个月的预报时间指数与 nino3 指数

4 结语

对赤道太平洋次表层海温距平场进行了扩展的经验正交函数(Extended EOF)分解发现：

(1)第一特征向量是关于 El Nino 的模式,它反映了 El Nino 的发生持续消亡的整个过程。对应的时间系数(第一主分量)与 Nino3 指数有很好的同时相关。

(2)第二特征向量是关于西太平洋暖池的模式。它反映了西太平洋暖池从暖位相到冷位相(同时东太平洋从冷位相到暖位相)的过程。第二主分量与滞后 6 ~ 10 个月的 Nino3 指数有很好的相关性。这为厄尔尼诺的预报提供了线索。

(3)由于第一主分量与 Nino3 指数有很好的同时相关,根据 EEOF 分解的原理,对其进行了试预报。表明提前 9 个月的预报结果与实际 Nino3 指数相关系数达 0.79。

参考文献:

- [1] 蒲书箴,于非,赵新,等. 1997 ~ 1998 厄尔尼诺的发生和发展 [J]. 海洋学报, 1998, 20 (6): 124 ~ 131.
- [2] 李崇银,穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. 大气科学, 1999, 23: 513 ~ 526.
- [3] 李崇银,穆明权. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用 [J]. 大气科学, 2000, 24 (4): 447 ~ 459.
- [4] 蔡怡,王彰贵,余宙文,等. 赤道太平洋温度、流场距平 EOF 分析及与 El Nino 的关系 [J]. 海洋学报, 2003, 25 (1): 12 ~ 18.
- [5] Ghil M., R. M. Allen, M. D. Dettinger, et. al. Advanced spectral methods for climatic time series, Rev. Geophys 2002, 40 (1): 3.1 ~ 3.41.

The Extended EOF analysis of subsurface temperature anomaly in the equatorial Pacific Ocean and its Relation to El Nino

DU Hua-dong¹, LI Jing², YE Zhi-min³, LAN Wei-ren²

(1. The Meteorological Institute of PLAUST, Nanjing, 211101 China; 2. Head General Staff Meteorological and Hydrological Center, Beijing 100081 China; 3. Meteorological and Hydrological Center of Military Area Commander of Nanjing, 210016 China)

Abstract: Climate variables usually have remarkable auto-correlation and cross-correlation in temporal fields. Extended EOF (empirical orthogonal functions) analysis based on classical EOF takes spatial and temporal correlation into account in the same time, and can get moving distributions of variables. By the EEOF analysis of subsurface ocean temperature anomaly (SOTA) in the equatorial Pacific Ocean, It is founded that, the first eigenvector is the mode about El Nino and it reflects the entire generation, persistence and diminishment process of El Nino phenomenon, there is good contemporary correlation between the cor-

responding time coefficient (first principal component) and the Nino3 index. The second eigenvector is the mode about Western Pacific Warm Pool(WPWP) and it reflects the process from warm phase to cold phase for WPWP (at the same time, from cold to warm for eastern Pacific), there is also good correlation between the second principal component and the Nino3 index of 6 ~ 10 months lag. This two principle components not only help to learn the process of SOTA in the equatorial Pacific Ocean, but also give us an important clue to forecasting El Nino.

Key words : subsurface ocean temperature anomaly (SOTA) ; EEOF ; El Nino

本刊讯

国家海洋环境预报中心为方便广大科技人员的需求,于今年六月建立了《中国期刊全文数据库》《中国重要报纸全文数据库》镜像站点。《中国期刊全文数据库》《中国重要报纸全文数据库》(理工 A 专辑)涵盖了数学、力学、物理学、生物学、天文学、气象、水文、海洋学、地球物理学等学科。庞大的信息源以及图书馆式的搜索查询功能让每位科技人员能非常迅速的从海量的信息中提取自己感兴趣的资源。

镜像站点的建立,及时向科技人员提供了国内外与海洋环境预报有关的各种动态等信息的知识服务。

六月底镜像站点提供服务以来,已有 8333 人次登录检索浏览下载。从一个侧面反映出国家海洋环境预报中心广大科技人员在业务、科研任务繁忙的环境中有不断学习,不断自我丰富的浓厚的学习氛围。

为了充实镜像站服务内容,中心已决定将 1986 年国务院学位委员会批准设立气象学和物理海洋学硕士点后的毕业生学位论文进行信息化处理后放在网上供查阅。

(学军供稿)