

太平洋次表层海温距平的立体 EOF 分析及其与 ENSO 的关系

张立峰^{1,3}, 许建平^{2,3}, 何金海¹

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 应用太平洋次表层海温距平资料构造了一个立体的西低东高的四级阶梯模型, 使用 EOF 方法对此模型进行时空分解, 并讨论与 ENSO 循环的关系。结果表明, EOF 分解的前两个主分量方差贡献达到 42.58%, 其中第一主分量代表了暖池-厄尔尼诺(拉尼娜)模态; 第二主分量代表了次表层温度距平的东西运移模态。后者存在着突变和渐变两个过程, 在赤道及其附近, 由冷位相变暖位相为渐变过程, 暖位相变冷位相是突变过程, 在赤道外南北纬 10°附近则反之, 厄尔尼诺正是东西运移模态突变的结果。时滞相关分析估算, 一次 ENSO 循环的平均周期约为 41 个月, 即 3.42a, 厄尔尼诺、拉尼娜模态与温度距平的东西运移模态的位相差平均约为 9.7 个月。运用逐步回归法求得一个对 nino3 指数预报效果比较理想的预报方程, 其中 EOF 分解的第一时间系数对 nino3 距平指数有重要的预报价值, 第二时间系数对 nino3 距平指数预报意义虽然不如第一时间系数明显, 但仍具有一定的参考价值。

关键词: 次表层海温距平; 太平洋; 阶梯模型; ENSO 循环; nino3 指数预报

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2005) 4 - 0027 - 09

1 引言

已有大量研究从各种角度对 ENSO 进行分析, 特别是对热带风场和海表温度场的研究, 取得很多研究结果。最近发现赤道西太平洋暖池与厄尔尼诺的关系^[1-6], 使我们对 ENSO 的认识从海洋表面深入到海洋内部。蒲书箴等^[7]利用实测资料研究表明, 赤道太平洋次表层水温在厄尔尼诺期间早于表层水温的变化, 在跃层深度以 Kelvin 波速向东传播。Yves-M, Warren. B. W^[8]等用 TOGA (热带海洋和全球大气计划) 等观测资料, 分析了全球上层 400m 热容量距平的变化, 发现赤道太平洋上层 400m 热容量 EOF 的第一、二模态与赤道中东太平洋和赤道中西太平洋的厄尔尼诺信号有关。Zhang Rong-hua, Syeny L.^[9]应用 Levitus 资料, 对赤道太平洋表面到 400m 深度的海温距平和热容量进行分析, 得到很多有意义的结果, 但是 Zhang 等用的是年平均资料, 而且只对热带太平洋各层温度的水平结构进行分析。最近, 蔡怡等^[10]对赤道太平洋地区次表层海温、流场

收稿日期: 2004-06-22

基金项目: 国家科技部国际合作重点项目 (2002CB714001); 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室资助项目。

作者简介: 张立峰 (1979-), 男, 黑龙江双鸭山人, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究。

异常的垂直结构进行了研究,得出厄尔尼诺事件是赤道西太平洋暖池突变过程的结果,但该文的研究区域仅限于赤道附近,时间序列也比较短,只有 20 年。

近来一系列的研究结果^[11~13]还表明,厄尔尼诺和拉尼娜事件发生在一个环路上,当赤道附近有次表层海温异常向东传播时,在南、北纬 10°左右,有反位相的海温异常反向传播,这在温跃层上更为明显。ENSO 不是独立的事件而是一个循环,而且是三维立体循环,单独的在水平面或垂直剖面上研究 ENSO 都会割裂这一循环。

2 资料来源及处理方法

本文所用海温距平资料来自于美国 Scripps 海洋研究所 JEDAC(Joint Environment Data Analysis Cnter) 的月平均资料,时间序列从 1961 年 1 月~1998 年 12 月,共 456 个月。所取资料水平范围为 120°E~80°W,18°N~16°S,水平网格为 5°(纬向)2°(经向),垂直层所在深度为:0、20、40、60、80、120、160、200、240、300 和 400m,共 11 层。nino3 距平指数资料来自于美国 IGOS 数据集。

利用上述海温距平资料构造一个立体的西低东高的四级阶梯模型:经向范围在 18°N~16°S 之间,第一级阶梯在 120°~180°E,取深度 120~160m 的次表层海温距平的平均值;第二级阶梯在 175°~140°W,取深度 80~120m 的平均值;第三级阶梯在 135°~120°W,取深度 60~80m 的平均值;第四级阶梯在 115°~80°W,取深度 40~60m 的平均值,整个纬向范围在 120°E~80°W 之间。此阶梯与气候温跃层接近,既有水平场信息,又尽可能包括了垂直剖面的信息。然后,使用经验正交函数分解法(EOF)对阶梯模型进行时空分解,并利用逐步回归分析法求取拟合方程和预报方程,最终,对 nino3 指数进行拟合与预报。

3 次表层立体海温异常场的时空特征

3.1 EOF 分解的显著性检验

分解出来的经验正交函数究竟是有物理意义的信号还是毫无意义的噪音,应该进行显著性检验,特别是当变量场的空间点数大于样本量时,显著性检验尤其重要。本文应用 North 等^[14]提出的计算特征值误差范围来进行显著性检验。特征值 λ_i 的误差范围计算公式为:

$$\ell_i = \lambda_i (2/n)^{1/2}$$

n 为样本量,在本文中样本量 $n=456$ 。当相邻的特征值满足 $\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq \ell_i$ 时,就认为这两个特征值所对应的经验正交函数是有价值的信号。

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 40648.51 \quad \ell_1 = 4951.48$$

$$\lambda_2 - \lambda_3 = 19539.49 \quad \ell_2 = 2259.47$$

$$\lambda_3 - \lambda_4 = 4767.3 \quad \ell_3 = 965.44$$

$$\lambda_4 - \lambda_5 = 2338.41 \quad \ell_4 = 649.71$$

$$\lambda_5 - \lambda_6 = 285.14 < \ell_5 = 475.96$$

可见,前五个经验正交函数是有价值的信号。考虑到第一特征向量的方差贡献为 29.24%,第二特征向量的方差贡献为 13.34%,第三特征向量的方差贡献为 5.7%,第四特征向量的方差贡献为 3.84%,第五特征向量的方差贡献为 2.92%,后三者的方差贡献相对较小,因此不在本文的分析范围之内。前两个特征向量场概括了原始场 42.58% 的信息,它们是次表层立体海温异常场的两个主要模态。下面着重讨论这两个特征向量场的时空特征。

3.2 第一特征向量场 (EOF₁ 型) 的时空特征

EOF₁ 型的空间特征主要是纬向变化。图 1(a) 中零值线在 5°N 以南位于 160°W 附近,在 5°N 以北东伸到 130°W。零值线以东为负值变异区,变异中心位于赤道东太平洋 5°N~5°S, 100°~80°W 区域上,负值变异区的整体形态与发生厄尔尼诺、拉尼娜时海温异常的形态很象。在零值线以西为正值变异区,变异中心位于赤道西太平洋偏北 0°~10°N, 150°~170°E 区域上,正值变异区的整体形态与暖池的形态很象。东、西变异区最大变异的绝对值基本相近。这种东西向的分布趋势表明,在该阶梯模型上次表层海温距平具有明显的反位相的纬向变化。当西太平洋暖池海温有负距平出现时,在赤道东太平洋附近海温将异常升高,也就是我们所熟悉的厄尔尼诺位相;反之,赤道东太平洋海温将会异常降低,此时是拉尼娜位相。由于次表层海温距平的季节变化很小,主要以年际变化为主,这可以从 EOF₁ 型时间系数的变化特征得到证明 (见图 1b)。与 nino3 指数比较,两曲线具有明显的反位相关系,同期相关系数为 -0.837,通过信度 $\alpha=0.001$ 的可靠性检验,即厄尔尼诺年 EOF₁ 型的时间系数为负值,赤道东太平洋次表层海温发生暖异常,拉尼娜年 EOF₁ 型的时间系数为正值,赤道东太平洋次表层海温发生冷异常,所以 EOF₁ 型可以称为东西变化型或暖池-厄尔尼诺 (拉尼娜) 模态。

3.3 第二特征向量场 (EOF₂ 型) 的时空特征

EOF₂ 型的空间特征与 EOF₁ 型明显不同。图 2(a) 中零值线位于 5°N 附近,呈东西走向。零值线以北是负值变异区,变异中心有东、西两个,东变异中心位于 120°W, 10°N 附近,西变异中心位于 150°E, 8°N 附近,两个变异中心的强度相近。零值线以南的大部分区域是正值变异区,中心大体位于 3°N~3°S, 160°~140°W 区域上,中心强度略强于两个负值变异中心。在正值变异区的东南部还有一个负值区,但无论强度还是范围均远小于上述两个变异区。这种南北分布趋势表明,在阶梯模型中次表层海温距平具有明显

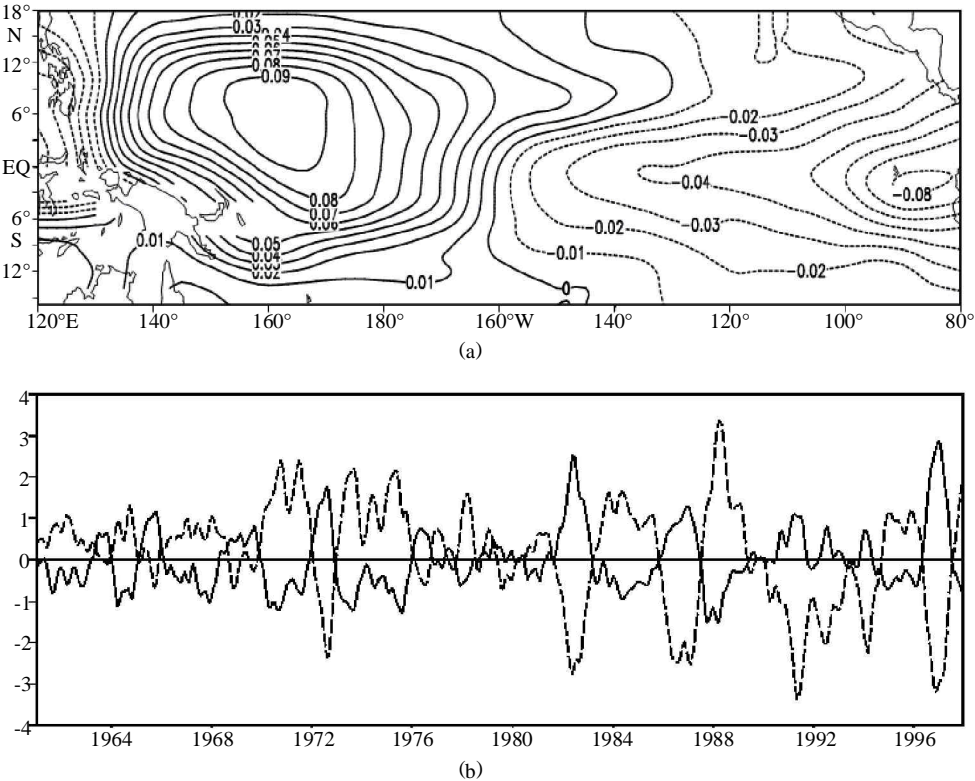


图 1 EOF 展开的第一主分量 (a) 为空间向量 ;(b) 为 nino3 指数与时间系数的变化曲线
(实线表示 nino3 指数, 虚线表示时间系数)

的反位相的经向变化, 即当赤道及附近海温异常升高时, 在南、北纬 10°附近, 尤其是 10°N 附近的海温将产生冷距平; 反之, 将会产生暖距平。该模态与文献 11、12 的环路特征极为相似, 此模态对应的时间系数与 nino3 指数的时滞相关结果也表明, 在时间系数超前 nino3 指数时, 两者为正相关, 时间系数滞后 nino3 指数时, 两者为负相关, 因此, 该模态实际反映了 ENSO 循环期间冷、暖温度距平在次表层的東西向运移。其运移路线呈扁平“8”字形, 由正、负变异区域和强度看, ENSO 循环期间冷、暖温度距平在次表层东西向运移路线主要是在赤道及 10°N 间的扁平“0”形路径。所以, EOF₂ 型可称为南北变化型或海温距平的東西运移模态。

从图 2(b)第二时间系数的分布看, 赤道附近的暖位相能维持 1~3 年之久, 但由暖位相向冷位相的转换却相当迅速。分析发现, 当暖位相达到峰值并开始向冷位相转换时, nino3 指数迅速上升, 平均 9~10 个月后就达到峰值, 然后迅速下降, 从而完成一次厄尔尼诺过程。也就是说, 海温距平的東西运移模态存在突变和渐变两种过程, 在赤道及其附近由冷位相变暖位相为渐变过程, 暖位相变冷位相是突变过程, 在南、北纬 10°附近则反之, 厄尔尼诺过程正是这种突变的结果。

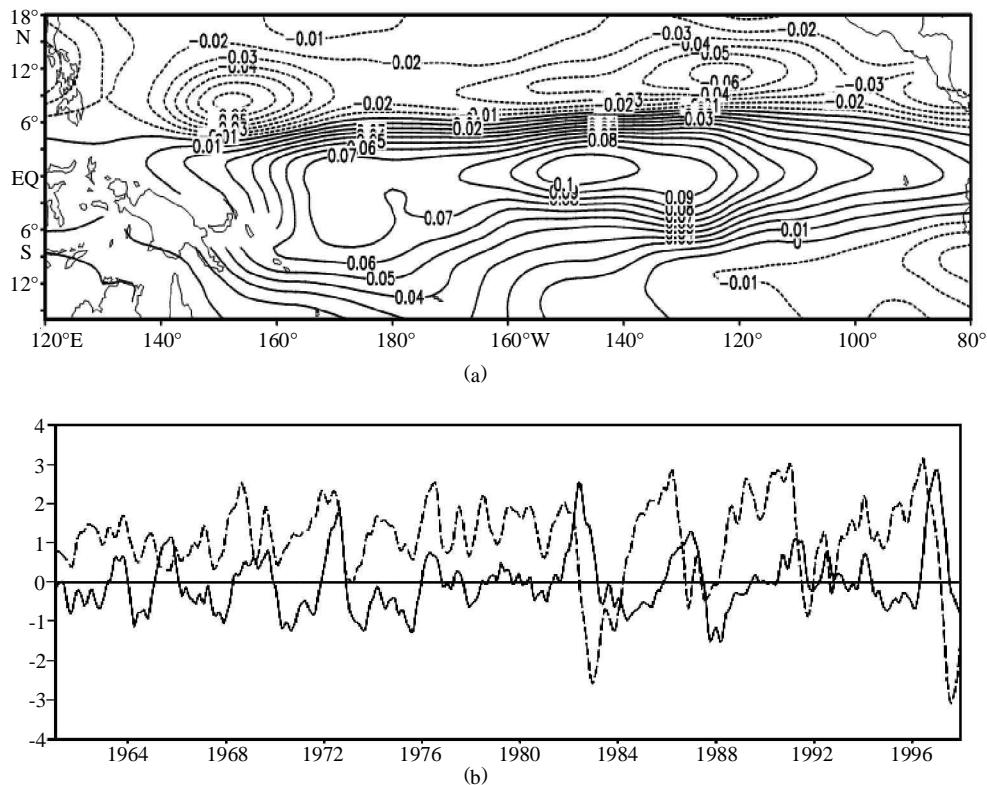


图 2 EOF 展开的第二主分量 (a) 为空间向量;(b) 为 nino3 指数与时间系数的变化曲线
(实线表示 nino3 指数,虚线表示时间系数)

4 讨论

上述分析表明,对阶梯模型进行的时空分解,能很好地描述 ENSO 循环过程。为寻找对 ENSO 循环有价值的预报因子,下面将着重讨论 EOF 分解的第一、二时间系数与 nino3 指数的时滞相关关系,并利用逐步回归分析法对 nino3 指数进行拟合与预报,建立 nino3 指数的预报方程。

4.1 时滞相关分析

图 3 (a) 是第一时间系数与 nino3 指数超前与滞后 36 个月的时滞相关,相关曲线呈现余弦函数的走势。第一时间系数超前 nino3 指数 32~36 个月时,两者为负相关;超前 10~31 个月时,为正相关,其中超前 13~26 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验;超前 9 个月到滞后 10 个月时,两者为负相关,其中超前 7 个月到滞后 9 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验;滞后 11~35 个月时,两者为正相关,其中滞后 15~30 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验;相关系数的极值分别出现在超前 18 个月(数值为 0.254)、同期(数值为-0.837)和滞后 24 个月(数值为 0.304)。

根据第一时间系数与 nino3 指数的时滞相关推算，一次 ENSO 循环周期应为 42 个月份，即两次正极值出现的时滞月份间隔之和。

图 3 (b) 是第二时间系数与 nino3 指数超前与滞后 36 个月的时滞相关，相关曲线呈现正弦函数的走势。第二时间系数超前 nino3 指数 30~36 个月时，两者为负相关；同期至超前 29 个月时，为正相关，其中超前 1~19 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验；滞后 1~25 个月时，两者为负相关，其中滞后 2~21 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验；滞后 26~36 个月时，两者为正相关，其中滞后 29~36 个月区间的相关系数通过信度 0.001 的可靠性检验；相关系数的极值分别出现在超前 7 个月(数值为 0.416)、滞后 9 个月(数值为-0.664)和滞后 33 个月(数值为 0.205)。根据第二时间系数与 nino3 指数的时滞相关推算，一次 ENSO 循环周期应为 40 个月份，即两次正极值的时滞月份间隔之和。

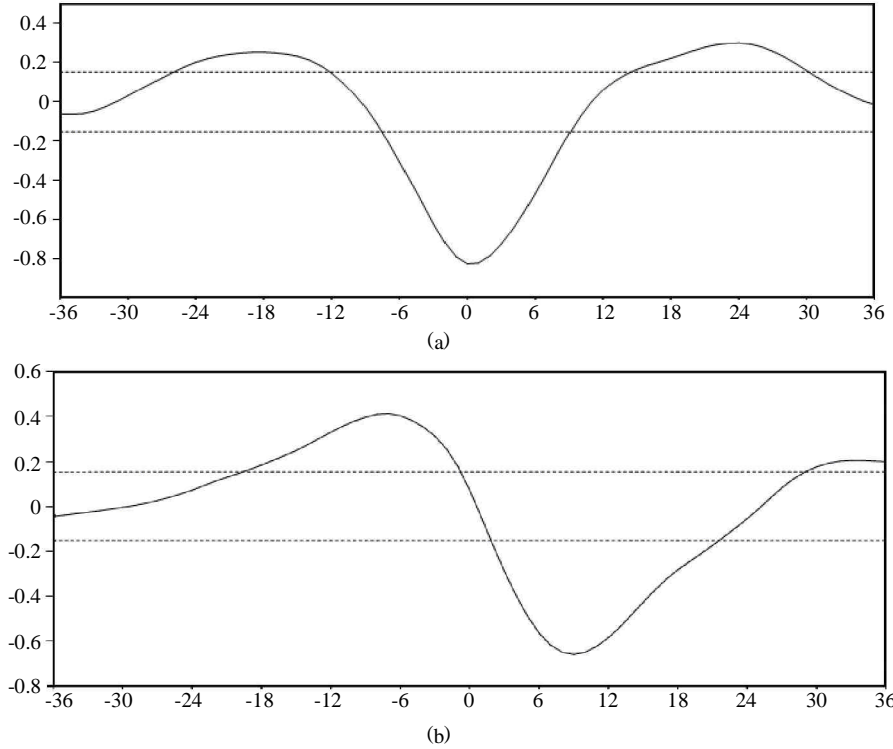


图 3 时间系数与 nino3 指数的时滞相关 (a) 代表第一时间系数 (b) 代表第二时间系数，最大超前与滞后月份为 36 个月，两虚线之外通过信度 0.001 的可靠性检验

由表 1 得出以下结论，一次完整的 ENSO 循环的平均周期应为 41 个月份左右，约 3.42 年。根据时滞相关极值出现的月份差可以得出第一、二空间模态的位相差约为 9.7 个月，由此推算，一次 ENSO 循环周期应为 4×9.7 个月份，即 38.8 个月，接近之前 41 个月的推测。

表 1 ENSO 循环的平均周期及两个模态的位相差

	左正极值时滞月份	负极值时滞月份	右正极值时滞月份	循环周期	平均周期
第一时间系数	-18	0	24	42	41
第二时间系数	-7	9	33	40	
	左正极值位相差	负极值位相差	右正极值位相差	平均位相差	
两模态位差	11	9	9	9.7	

4.2 对 nino3 指数的拟合分析

由时滞相关图选取 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为初始拟合变量，其意义分别是：第一时间系数与 nino3 指数时滞相关的左正极值、负极值、右正极值，第二时间系数与 nino3 指数时滞相关的左正极值、负极值，以上述 5 个初始拟合变量为基础自乘、互乘构造 15 个二次拟合项，利用逐步回归法求取拟合方程为：

$$\begin{aligned} y= & 0.00035405+0.0190866 \times x_1-0.05254136 \times x_2-0.0159449 \times x_5 \\ & -0.00128904 \times x_1 \times x_5+0.00085099 \times x_2 \times x_5 \end{aligned}$$

以上引入拟合方程的各项都通过信度 0.001 的可靠性检验。限于资料长度和初始拟合变量的选取，本文只能对 1996 年 12 月以前的 nino3 指数进行拟合，由图 4 可见，无论是位相还是振幅强度，拟合方程对 nino3 指数的拟合效果均很好，这从另一个角度说明，对由太平洋次表层海温距平构建的阶梯模型进行时空分解，得到的时间系数与 nino3 指数有着很好的相关关系。

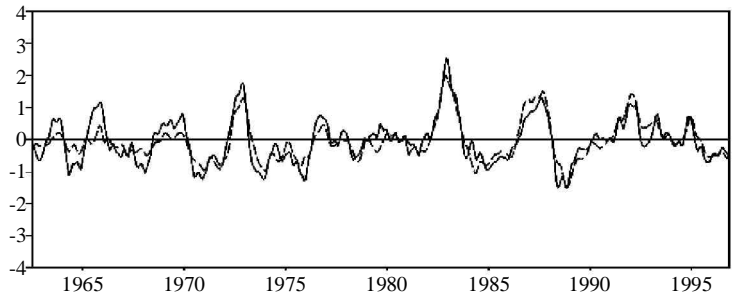


图 4 拟合方程对 nino3 指数的拟合结果(实线代表 nino3 指数，虚线代表拟合结果)

4.3 建立预报方程对 nino3 指数试预报

能很好地拟合 nino3 指数对我们的研究还是不够的。为了对 nino3 指数进行预报，本文选取超前 nino3 指数 1~5 个月的第一时间系数作为预报变量 $x_1 - x_5$ ，上述变量与 nino3 指数的超前相关值分别为：-0.802、-0.726、-0.623、-0.515、-0.409；选取超前 nino3 指数

6~8 个月的第二时间系数作为预报变量 $x_6 - x_8$, 上述变量与 nino3 指数的超前相关值分别为: 0.406、0.416、0.412; 选取超前 nino3 指数 17~19 个月的第一时间系数作为预报变量 $x_9 - x_{11}$, 上述变量与 nino3 指数的超前相关值分别为: 0.25、0.254、0.254, 以上预报变量均通过信度 0.001 的可靠性检验。然后, 以这 11 个初始预报变量为基础自乘、互乘构造 66 个二次预报变量, 在一定的信度检验要求下, 利用逐步回归法对上述 77 个预报变量进行引入、剔除计算, 最后求取的预报方程为:

$$y = 0.02962677 - 0.09254534 \times x_1 - 0.02337976 \times x_2 + 0.01556615 \times x_5 \\ + 0.01230716 \times x_9 + 0.0006693 \times x_8 \times x_8 + 0.00074555 \times x_1 \times x_9$$

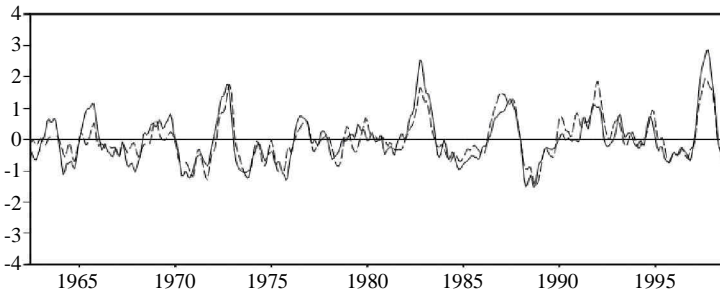


图 5 预报方程对 nino3 指数的预报结果 (实线为 nino3 指数, 虚线为预报结果)

由图 5 可见, 预报方程对 nino3 指数的预报效果比较好, 除了振幅强度与 nino3 指数略有差异, 其它方面的预报结果均很理想。引入的变量 x_1 、 x_5 、 x_9 、 $x_1 \times x_9$ 来自第一时间系数且通过了信度 0.0001 的可靠性检验, 这充分说明第一时间系数对 nino3 指数有着重要的预报价值; 变量 $x_8 \times x_8$ 来自第二时间系数, 通过信度为 0.05 的可靠性检验, 显然, 第二时间系数对 nino3 指数预报意义不如第一时间系数明显, 但仍具有一定的参考价值。

5 小结

本文利用 $120^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{W}$, $18^{\circ}\text{N} \sim 16^{\circ}\text{S}$ 范围, 垂直深度为 0~400m 的太平洋次表层海温距平资料构造了一个立体的西低东高的四级阶梯模型, 应用 EOF 分解方法对上述阶梯模型进行时空分解, 并重点讨论与 ENSO 循环的关系, 得到以下结论:

EOF 分解的前两个主分量方差贡献达到 42.58%, 其中第一主分量又称东西变化型, 它代表了暖池-厄尔尼诺 (拉尼娜) 模态; 第二主分量称为南北变化型, 它代表了次表层温度距平的东西运移模态。东西运移模态存在着突变和渐变两个过程, 在赤道及其附近区域, 由冷位相变暖位相为渐变过程, 暖位相变冷位相是突变过程, 在赤道外南、北纬 10 度附近则反之, 而厄尔尼诺正是东西运移模态突变过程的结果。

利用第一、二时间系数与 nino3 指数的时滞相关结果估算, 一次 ENSO 循环的平均周期约为 41 个月, 即 3.42a; 暖池-厄尔尼诺 (拉尼娜) 模态与海温距平的东西运移模态

的位相差平均约为 9.7 个月。

应用逐步回归方法得到一个对 nino3 指数预报效果比较理想的预报方程,其中第一时间系数对 nino3 指数有着重要的预报价值,第二时间系数对 nino3 指数预报意义虽然不如第一时间系数明显,但仍具有一定的参考价值。

与文献 10 比较还发现,对阶梯模型的 EOF 展开结果,能更加全面地揭示 ENSO 作为一个循环的变化过程,尤其在第二空间模态中,对冷、暖水运移路径的描述是文献 10 无法给出的;通过时滞相关分析和逐步回归分析,我们选取有代表意义的预报因子,建立预报方程,该预报方程对 nino3 指数的预报效果也明显优于文献 10 给出的结果。这些都证明,ENSO 循环是一个立体的循环,单独地在水平面或垂直剖面上研究 ENSO 都会割裂这一循环。

参考文献:

- [1] Weiberg R H, Wang C. Slow variation in the equatorial west central Pacific in relation to ENSO[J]. *Journal of Climate*, 1996,10 :1998~2015.
- [2] 刘海龙,张学洪,等. 西风爆发时赤道西太平洋热量平衡的诊断分析[J]. *大气科学*. 2000 ,25 (3) :303~315.
- [3] 穆明权,李崇银. 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) :447~458.
- [4] Cronin M F, M J Mcphaden. The upper ocean heat balance in the western equatorial Pacific warm pool during September-December 1992. *J Geophys res*, 1997,102 :8533~8554.
- [5] Zhang R H, L M Rothstein, A J Basalacchi. Interannual and decadal variability of the subsurface thermal structure in the Pacific Ocean: 1961-90. *Climate Dynamic*, 1999,15 :703~717.
- [6] Wang Bin, Wu Renguang, RogerLukas. Roles of western north Pacific wind variation in thermocline adjustment and ENSO phase transition. *Journal of the Meteoro Soci of Japan*. 1999,77 (1) : 1~16.
- [7] 蒲书箴,等. 1997/1998 厄尔尼诺的发生发展[J]. *海洋学报*, 1998 ,20 (6) :124~131.
- [8] Yves M, Warren B W. ENSO signals in global upper-ocean temperature. *J Phys Oceanogr*, 1995,25 :1317~1331.
- [9] Zhang Rong-hua, Syeny L. Interannual variability of the coupled tropical Pacific ocean-atmosphere system sssociated with the El Nino-Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 1997,10 :1312~1330.
- [10] 蔡 怡,等. 赤道太平洋温度、流场距平 EOF 分析及与厄尔尼诺的关系[J]. *海洋学报*, 2003 ,25 (1) :12~18.
- [11] 巢纪平. 温跃层和厄尔尼诺信号. ENSO 循环机理和预测研究[M], 气象出版社, 2003,109~119.
- [12] 李崇银,穆明权. ENSO-7 赤道西太平洋异常纬向风所驱动的热带太平洋次表层海温距平的循环[J]. *地球科学进展*, 2002 ,17 (5) :631~638.
- [13] 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 :5513~521.
- [14] North G R T, Bell R Cahalan and F J Moeng , Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function Mon. *Wea Rev* 1982,110 :699~706.