

El Niño 的周期变化和空间特征

——兼应用 PC 和 CPC 分析太平洋海温距平场

王必魁

A. Longhetto

(中国科学技术大学, 合肥 230026)

(Istituto di Cosmo-geofisica CNR, Turin, Italy)

提 要

本文联合利用实主成分(以下简称 PC)分析和复主成分(以下简称 CPC)分析, 探讨太平洋 SST 演变的时空特征. 结果表明: 这两种分析方法得到的第一个主成分都展示 El Niño 随时间周期性变化, 在 PC 中表现为峰谷的变化, 在 CPC 中表现为振幅和位相的变化; 相应的荷载向量主要反映 El Niño 和 La Niña 事件时期空间分布特征, 大振幅区域位于主要冷暖洋流活动中心. 第一个复荷载向量可以认为在驻波上附加一个南北向传播的行波, 第二个荷载向量为一个驻波, 第三个复荷载向量看上去像一个东西向传播的行波, 后两个特征型各自强调不同 El Niño 和 La Niña 时期的空间特征. 驻波峰、谷区域之间呈现反相关关系; 这里虽然没有研究波群和群速度, 但就行波而言, 也初步看出能量传播的路径. 与复荷载向量对应的实荷载向量仅显示驻波特征.

关键词: El Niño; 周期性; 主成分; 驻波; 行波.

一、引 言

PC 分析已经广泛地用来探讨气象和海洋要素场演变的时空特点与遥相关. 这个方法的优点之一是能浓缩包含在原要素场系列中的主要信息为少数几个相互正交的分量, 降低了原资料的维数. 但是 PC 分析只能揭示驻波, 显示位相相同或者相反(即正、负号相同或相反). 与之对比, CPC 分析不仅能揭示驻波, 而且也能揭示行波, 位相可在 $-\pi$ 到 π 间连续取值.

由于 El Niño 和 La Niña 事件是与太平洋 SST 有关的主要气候特征, 因而, 太平洋 SST 的空间分布和时间演变必然会反映 El Niño 和 La Niña 的本质. 我们同时运用 PC 和 CPC 分析两种方法进行比较研究, 不仅得到了 El Niño 的周期变化, 而且较好地揭示它们的驻波和行波特征及其与洋流和地域的关系.

符淙斌等^[1]用 CPC 分析了 1951—1979 年 32°S — 32°N 赤道太平洋 SST, 得到有意义的结果. 本文同时用 PC 和 CPC 两种分析方法, 对更长的资料、较北的区域进一步研究, 得到更为一般的有价值的结果. 我们用的资料是: 10°S — 50°N , 120°E — 80°W , $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 经纬度, 286 个网格点上, 从 1949 年 1 月到 1987 年 12 月太平洋 SST 月平均值. 1982 年以前的资料是周琴芳等取自美国渔情公报, 1983 年以后直接取自美国 KWBC.

1992 年 7 月 31 日收到, 11 月 11 日收到修改稿.

二、PC 和 CPC 分析方法

复主成分分析方法是一种从波动的角度分析物理量场的空间结构和随时间变化的比较新的方法。Barnett^[2]第一次有效地应用它, Horel^[3]解决了它的旋转问题。它是从实主成分分析发展而来的。根据本文的应用需要, 对它作相应的简要说明。

设一标量函数 $u(x, t)$ 随时间和空间变化, 用它的 Hilbert 变换 $\hat{u}(x, t)$ 作为虚部, 构成复函数, 在离散的情况下, 有

$$U_{j,t+1} = u_{j,t+1} + i\hat{u}_{j,t+1}, \quad (1)$$

$j = 1, \dots, M$ 为空间点数, $t = 0, \dots, N-1$ 为时间点数。复时间序列场的相关矩阵是 Hermite 矩阵, 它的元素为

$$r_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} U_{j,t+1}^* U_{k,t+1}, \quad (2)$$

$j, k = 1, \dots, M$, 这里 * 号表示复共轭。Hermite 矩阵具有实的特征值 λ_j 和复的相互正交的特征向量 V_j , $i, j = 1, \dots, M$, 复主成分由下式给出

$$T_{i,t+1} = \sum_{j=1}^M U_{j,t+1} V_{ij}, \quad (3)$$

这里

$$\sum_{t=0}^{N-1} T_{j,t+1}^* T_{i,t+1} = \begin{cases} \lambda_i, & \text{当 } i=j, \\ 0, & \text{当 } i \neq j. \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M V_j^* V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i=k, \\ 0, & \text{当 } i \neq k. \end{cases} \quad (5)$$

第 i 个复主成分的方差比是

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^M \lambda_j}. \quad (6)$$

类似于实荷载向量, 复荷载向量为

$$R_{ij} = V_{ij} \sqrt{\lambda_i} / S_j, \quad (7)$$

$j = 1, \dots, M$, 这里 R_{ij} 表示第 i 个复主成分与第 j 个空间点上时间序列之间的复相关系数, S_j 是第 j 个点时间序列的标准差。记 $\text{Im} R_{ij}$ 为 R_{ij} 的虚部, $\text{Re} R_{ij}$ 为其实部, 则有 R_{ij} 的振幅函数为

$$|R_{ij}| = [(\text{Im} R_{ij})^2 + (\text{Re} R_{ij})^2]^{1/2}, \quad (8)$$

R_{ij} 的相函数为

$$\theta_{ij} = \text{arctg} \left[\frac{\text{Im} R_{ij}}{\text{Re} R_{ij}} \right] \quad (9)$$

相函数 θ_{ij} 可在完整的周期 $[-\pi, \pi]$ 内取值。这点比实主成分分析优越。

同理, 我们可以有复主成分的振幅和位相函数:

$|T_{i,j+1}| = \{(\text{Im}T_{i,j+1})^2 + (\text{Re}T_{i,j+1})^2\}^{1/2}, \tag{10}$

$\alpha_{i,j+1} = \arctg \left[\frac{\text{Im}T_{i,j+1}}{\text{Re}T_{i,j+1}} \right]. \tag{11}$

值得注意的是：实特征向量的方向允许作相反的选择，随之荷载向量的符号允许相反，而复特征向量和复荷载向量的初位相也允许有不同选择。

三、主要结果

对整个区域 286 个点，三组不同时段分别作实域和复域中主成分分析，这些时段是：1，1966 年 1 月— 1987 年 4 月，共 256 个时间点，2，1957 年 1 月— 1978 年 4 月，共 256 个时间点，3，1949 年 1 月— 1987 年 12 月，共 468 个时间点。

头四个主成分的方差比列在表 1 中，由表 1 可见 CPC 分析比 PC 分析收敛快，且第 1 组收敛比其他两组快，说明第 1 个时段里，太平洋海温统计相关最好，这个时段里包含两次起源于中太平洋的强 El Niño 事件。

表 1 三组前四个主成分的方差比(%)

组 次	1	2	3	组 次	1	2	3
PC 分析	(1)18.8	21.0	19.2	CPC 分析	(1)22.6	22.2	20.0
	(2)11.3	7.2	8.4		(2)12.0	8.9	9.3
	(3)6.4	6.0	6.9		(3)7.8	6.5	6.4
	(4)4.6	4.7	5.4		(4)5.1	4.8	5.5
	Σ 41.1	38.9	39.9		Σ 47.5	42.4	41.2

太平洋海面温度的时空特征与 El Niño 和 La Niña 事件存在非常密切的关系，史久恩¹⁾给出这两种事件发生的时间，将其列出，见表 2。臧恒范等^[4]对这个问题以年为

表 2 El Niño 和 La Niña 时间序列¹⁾

El Niño 事件		La Niña 事件	
起止日期	持续月数	起止日期	持续月数
1951.6— 1952.2	9	1949.9— 1950.11	15
1953.4— 1953.11	8	1954.4— 1956.2	23
1957.4— 1958.7	16	1964.5— 1965.1	9
1963.7— 1964.1	7	1967.7— 1968.6	12
1965.5— 1966.3	11	1970.6— 1971.12	19
1968.11— 1970.1	15	1973.6— 1974.4	11
1972.4— 1973.2	11	1975.5— 1976.2	10
1976.6— 1977.3	10	1984.10— 1985.9	12
1979.9— 1980.6	10	1988.6— 1989.3	10
1982.5— 1983.10	18		
1986.9— 1988.2	18		

1) 史久恩, 1990, ENSO and Anti-ENSO episoder in recent 40 years and Northwest Pacific typhoon activity, International TOGA Scientific Conference, Honolulu.

单位作了研究.

下面主要分析时间最长的第 3 组:

1. 第一个特征型

第一个 PC 很好地显示出 El Niño 周期变化(图 1): 每一个 El Niño 事件对应一个波谷时段, 而每一个 La Niña 事件对应一个波峰时段; 从正的峰值下降到负的谷值经历一次从 La Niña 到 El Niño 的转换, 然后数值增加到正常值, 再达到正的峰值, 又发生一次 La Niña, 如此反复. 这反映太平洋 SST 随时间变化的首要特征是周期性变化, 周期为 2—4 年. 这种周期性变化也同样可在第一个 CPC 中体现: 第一个 CPC 的振幅函数清楚地呈现每一个 El Niño 或 La Niña 事件位于其峰值区(图略); 对应的位相函数显示, El Niño 事件开始于位相为特定值 π 之后不久(这个特定位相与初位相选择有

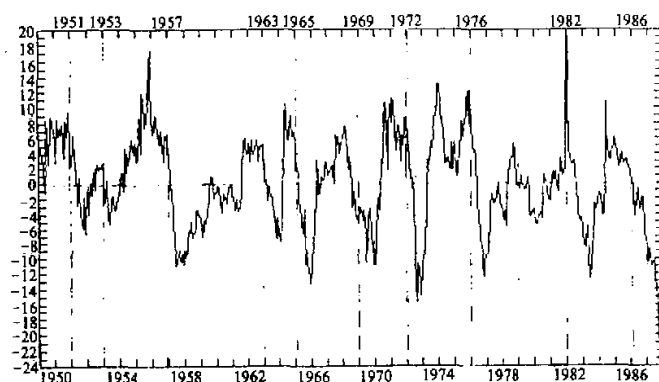


图 1 第一个实主成分

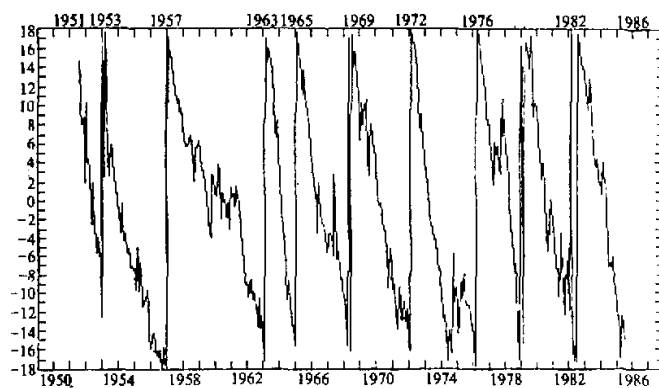


图 2 第一个复主成分: 位相

关), 然后位相渐渐减小到 0, 再到负值, 在经历一次 La Niña 事件之后, 位向趋向 $-\pi$, 指示又一次 El Niño 即将开始等等(图 2). 相邻两个 El Niño 事件之间存在 2π 位相差, 这个结果与符淙斌等的结论一致.

复主成分分析中, 第一个荷载向量振幅的空间分布: 最大振幅位于赤道东太平洋, 以秘鲁寒流区域(称为 I 区)为最, 数值达到 0.76; 次大位于阿留申群岛附近, 北太平洋洋流活动区, 南北洋流交会处(称为 II 区), 数值为 0.41; 第三个大振幅区位于西太平洋黑潮主流海域(称为 III 区), 数值 0.39, 如图 3 所示. 与之对应的第一个荷载向量的位相分布如图 4 所示, I 区和 II 区相位差为 π , 振幅极大处可视为波峰和波谷, 两区之间存在位相梯度很大同时振幅近于 0 的突变地带, 可视为波节, 此波可看成驻波; 围绕 II 区存在一个均匀、呈辐射状的等位相曲线分布, 由波节向南、西和北辐散, 形成扇形, 看上去为一个南 - 西 - 北走向的行波, 附加于上述驻波上; III 区位相比 I 区小、比 II 区大(其差为 $\pi/2$ 或更大一些), 为行波经过的地方, 该处振幅较大, 显示黑潮主流对行波的加强作用.

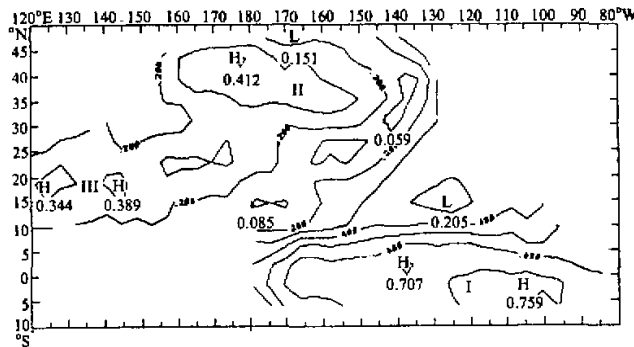


图 3 第一个复荷载向量: 振幅

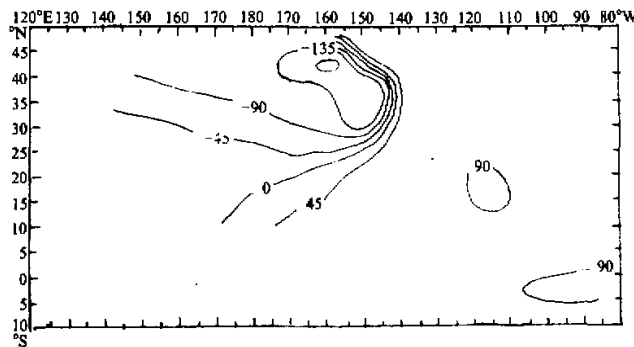


图 4 第一个复荷载向量: 位相

在实主成分分析中, 第一个荷载向量的空间分布如图 5, 与第一个复荷载向量振幅分布类似, I 区和 II 区为两个高值区, 符号相反, 分别为 -0.75 和 0.45 , 表明为一驻

波; 但 III 区数值几乎为 0, 说明行波活动是实主成分分析所不能揭示的。

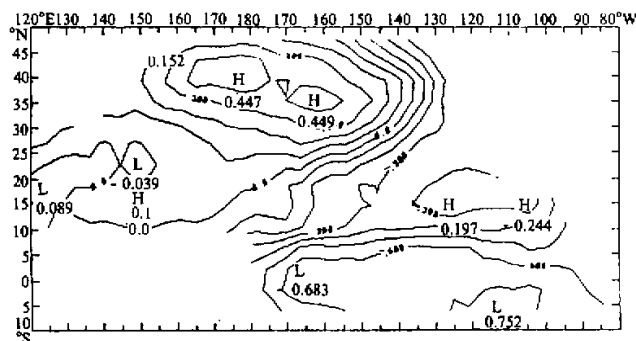


图 5 第一个实荷载向量

第一个实主成分和复主成分约以 20% 的方差比描述太平洋 SST 随时间演变的特点是 El Niño 的周期性变化, 而第一个荷载向量主要反映这两类事件的空间型, 几个高值区为关键区。

2. 第二个特征型

第二个复荷载向量有两个高振幅区, 其中心数值都为 0.56, 一个位于北美洲以西海域, 另一个位于夏威夷群岛东南部海域, 它们有大致相同的位相(图略); 第二个实荷载向量与前者相似, 两个高值区符号相同(图略)。对应的主成分(CPC和 PC)主要突出 1982—1983 年强 El Niño 的作用, 还有 1984—1985 年和 1967 年的作用较大。

3. 第三个特征型

第三个复荷载向量振幅分布主要特征是在 15—30°N 存在一个高值带, 分裂为四个中心, 西太平洋为 0.57, 东太平洋为 0.48, 中太平洋为 0.43 和 0.40, 如图 6; 图 7 为对应位相分布, 西、东太平洋位相相反, 且沿这一纬带存在较均匀的位相梯度, 看起来是东西向传播的行波。这种分布特征突出表现于 1963 年, 因为第三个 CPC 的振幅 1963

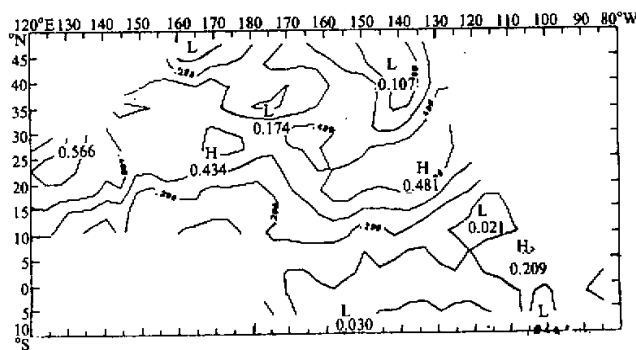


图 6 第三个复荷载向量: 振幅

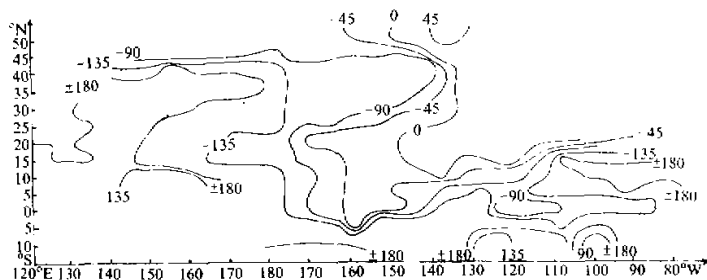


图 7 第三个复荷载向量: 位相

年具有显著的峰值(图略). 第三个实荷载向量分布在上述纬度, 东太平洋有强的负中心, 值为 -0.695 , 西太平洋高值域为 0.297 (图略); 而沿东太平洋海岸的驻波更为明显. 这个驻波在第三个复荷载向量中也有反映(图 6 和图 7). 其余方差比较小, 不再叙述.

四、结 论

(1) 主成分分析无论在实域中还是在复域中进行, 第一个时间分量都表征太平洋海面温度演变的周期性特点, 它反映了 El Niño 的周期变化. 一般 El Niño 和 La Niña 交替发生, 与之对应的空间分布, 主要表现 El Niño 和 La Niña 时期的特征, 关键区 I、II 和 III 为主要冷暖洋流活动地带, I 区和 II 区为驻波之峰谷, 具有反相关关系, El Niño 时期 I 区为正距平, 则 II 区通常为负距平, La Niña 时期 I 区为负距平, 则 II 区常常有正距平. 这种距平不同分布的形成和转换与南北向和东西向传播的行波输送能量有密切关系(尽管没有探讨群速度), 黑潮主流对其产生加强作用, 促使这些变化.

(2) 尽管 CPC 和 PC 分析和表达方式不同, 但是它们结果协调一致, 相互补充.

(3) CPC 和 PC 分析的稳定性问题并未得到证明. 就我们计算的三组不同时段的结果看, 第一个时间函数非常一致, 在共同的时段里, 几乎能相互重叠, 第一个空间分布也比较相似, 具有一定的稳定性. 有关稳定性这个重要问题将在另一篇文章中讨论.

致谢: 本文得到 ICTP 项目的资助, 大量计算工作在意大利实验室完成. 本文的某些论点曾在气象学会统计气象学委员会成立大会上作过报告, 得到同事们的勉励和有益的讨论, 尤其史久恩教授给我们新的尚未正式发表的关于 El Niño 和反 El Niño 事件的时间表即表 2, 同时, 在计算工作中得到 Silvia Alessio 和 Claudio Cassardo 博士的帮助, 特此一并致以衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] 符淙斌, 全小伟, 苏炳凯, 1987, 用复 EOF 分析 El Niño 增暖的振幅和位相变化, 科学通报, 32, 第 16 期, 1241—1244.
- [2] Barnett, T.P., 1983, Interaction of the Monsoon and Pacific Trade Wind System at Interannual Time Scales. Part I: The Equatorial Zone, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 756—773.
- [3] Horel, J.D., 1984, Complex Principal Component Analysis: Theory and Examples, *J. Climate & Appl. Meteor.*, 23, 1660—1673.
- [4] 臧恒范, 王绍武, 1991, 1854—1987 年期间的 El Niño 与反 El Niño 事件, 海洋学报, 13, 第 1 期, 26—34.

- [5] Fu Congbin and Ye Duzheng. 1988. The Tropical Very Low-Frequency Oscillation on Interannual Scale. *Adv. Atmos. Sci.*, 5, No.3, 369 — 388.

Combined PC and CPC Analysis of SST Anomalies over the Pacific Ocean in Connection with El Niño Recurrence Periods

Wang Bikai

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Arnaldo Longhetto

(Istituto di Cosmo-geofisica CNR, Turin, Italy)

Abstract

Combined application of principal component (henceforth PC) and complex principal component (henceforth CPC) analysis to the study of temporal and spatial features of sea surface temperature (SST) of the Pacific Ocean gave the following results. The first eigenmode of both PC and CPC appears very well correlated to El-Niño and La-Niña time cycle, and its space distribution shows the peculiarity of these events that their largest amplitudes in areas which are located near the active centres of the main cold and warm ocean currents. This property appears as a standing wave on which a travelling wave is superimposed.

The second eigenmode exhibits a space distribution which looks like a standing wave, while the third one seems to be a travelling wave for CPC and a standing wave for PC. PC and CPC of these last two eigenmodes appear correlated to different El-Niño and La-Niña occurrence periods, so they seem to indicate different distinctive features of various El-Niño and La-Niña years.

The two travelling waves revealed by this analysis show different propagation directions; the first one moves south-northward, while the second one east-westward.

The above results can also be used to get a first sight estimate of energy propagation paths without calculating the wave group velocities.

Key words: El Niño; Periodicity; Principal components; Standing waves; Travelling waves.