

全球热带海表温度异常的 POP 预报模型[†]

段安民 吴洪宝

(南京气象学院气象学系, 南京 210044)

摘 要 在对全球热带海表温度异常(SSTA)进行主振荡型(POP)分析的基础之上综合考虑大尺度海洋运动状况和长期预报的特征引入了相位划分预报方案,将典型POP模态进行相位划分并综合考虑它们的相位承替规律预报SSTA未来发展趋势,独立样本事后预报结果证实相位划分预报方案能提供较好的预报信息。

关键词 海表温度异常,主振荡型,相位划分,预报模型

分类号 P732.1

SSTA 对研究气候异常和制作长期预报有着十分重要的意义。1980年前后,都田菊郎等曾指出:制作长期预报应以海表温度异常以及积雪区、海冰区和土壤水份等有较高持续性的地表状态异常为依据。若假设大气和地球表面一旦不存在任何相互作用,那么几周以后大气的状态就变得与初值无关,正是由于大气受到具有几周以上记忆的地球表面的影响,较长时间的长期预报才成为可能。

我们的前一工作运用 POP 分析方法对全球热带 SSTA 进行了细致分析^[1]。本工作将采用 Planut 等^[2]提出的振荡现象相位划分方法对文献 [1] 得到 POP 型划分相位,分析相位承替和同相位合成图,通过综合考虑几个传播型和驻波型 POP 的相位承替规律,对 SSTA 未来发展趋势作出预报。

1 资料与方法

1.1 资料

独立样本事后预报试验使用综合海洋大气数据集(COADS)的1992年1~12月SSTA资料。

1.2 方法

1.2.1 中性预报方案

由 POP 分析模型可知,场的序列 $\tilde{X}(t)$ 中存在的某个传播的振荡成分可以被它的系数矩阵 B 的一对复特征向量表示

[†] 本研究得到国家“九五”重中之重项目(96-908)资助

收稿日期:1997-10-15;改回日期:1998-01-27

第一作者简介:段安民,男,1973年4月生,硕士,现在拉萨市气象局工作

$$\tilde{X}(t) = \alpha(t)P + \alpha^*(t)P^* = \alpha_1(t)P_1 + \alpha_2(t)P_2 \quad (1)$$

其中 P 和 P^* 是一对复共轭特征向量, 对应的一对复共轭特征值记为 $\lambda = \lambda e^{i\tilde{\omega}}$ 和 $\lambda^* = \lambda e^{-i\tilde{\omega}}$, P_1 和 P_2 分别是 P 的实部和虚部向量, $\alpha(t)$ 、 $\alpha^*(t)$ 是一对复共轭时间系数, $\alpha_1(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ 是实的时间系数, 它们的关系为

$$\left. \begin{aligned} \alpha(t) &= \frac{1}{2}(\alpha_1(t) - i\alpha_2(t)) \\ \alpha^*(t) &= \frac{1}{2}(\alpha_1(t) + i\alpha_2(t)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

假定 $X(t)$ 满足多维马尔科夫过程, 则复系数 $\alpha(t)$ 的变化满足

$$\alpha(t_0 + 1) = \lambda\alpha(t_0) = \lambda e^{i\tilde{\omega}}\alpha(t_0) \quad (3)$$

由 (2) 和 (3), 复系数 $\alpha(t)$ 的模衰减 e 倍所需时间为

$$\tau = -1/\ln \lambda \quad (4)$$

实系数 $\alpha_1(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ 有相同的周期 T 并且正交

$$T = 2\pi/\tilde{\omega} \quad (5)$$

(3) 式可作为预报方程。然而, 对于时间上离散的有限长度序列 $X(t)$, λ 的估计值总 < 1 ^[1], 也就是说按 (3) 式预报, 振荡总是衰减的。这是按 POP 模型做预报的缺陷。Hans 等认为^[1], 对于 MJO (Madden Julian Oscillation) 和 ENSO 振荡, 即使不能预报出强度的变化, 仅预报出相位的变化也是有价值的。于是, 他们人为的取 $\lambda = 1$, (3) 式成为

$$\alpha(t_0 + 1) = e^{i\tilde{\omega}}\alpha(t_0) \quad (6)$$

还可递推得第 τ 步预报公式

$$\alpha(t_0 + \tau) = e^{i\tilde{\omega}\tau}\alpha(t_0) \quad (7)$$

按 (6) 或 (7) 做预报时, 振荡的强度保持起报时刻的不变, 相位按固定的角速度 $\tilde{\omega}$ 变化, 这就是所谓的 ‘中性预报方案’ (neutral prediction model)。

文献 [4] 对 MJO 用中性预报、NCAR CCM 预报和 NMC 资料分析作了比较, 指出中性预报方案的准确程度对初始相位敏感, 受 $\alpha(t)$ 的振幅影响很大。文献 [5] 用中性方案预报 ENSO 循环也出现同样问题, 只有当起报月处于非平静相位 (标准是 $\alpha(t_0) > \alpha(t)$ 的时间平均值) 时预报效果较好。可见, 尽管 POP 分析具有识别出振荡成分的功能, 但还需引入其他更合理的预报方案来改进或替代 ‘中性预报方案’。

1.2.2 相位划分方法预报方案

我们知道, 任何实际预报都有时效、详细程度和可靠性三个彼此不独立属性, 其中时效是可预报性的主体形式, 可以借助损失详细程度和可靠性来延长预报时效。因此, 可预报性是预报详细程度和可靠性的函数, 而详细程度也应适应于预报的可靠性, 所以可靠性差的预报不应过分详细^[6]。基于这一思想并结合大尺度海洋运动的特点, 本文引入了相位划分预报方案仅对 POP 所处的相位阶段进行预报。

文献 [1] 根据振荡成分解释原方差百分比的大小和稳定性 (τ/T 大的稳定, 与特征向量序号无关) 已得到, 第 5 和 6、第 19 和 20 复共轭特征向量和第 49 实特征向量分别描述主要的西传型、东传型和驻波型振荡 (以下简称 (5, 6)、(19, 20) 和 49 型)。按一定规则确定资料时段内每个月处于各个振荡型的相位, 进而求得各型各相位的实际 SSTA 合成图, 按实际的相位承替规律及合成图做预报, 将克服 ‘中性预报方案’ 中振荡的强度保持起报月的不变和相位按谐波均匀变化的缺陷。本文根据文献 [1] 提出的相位划分方法, 对选定的 POP 的系数 $\alpha(t)$ ($i=1$ 或 2) 用中

央差求得其导数 $b(t)$, 对于周期函数 $\alpha(t)$, 二维向量 $(\alpha(t), b(t))$ 一个周期内在平面上转动 2π 角, 求向量 $(\alpha(t), b(t))$ 与单位向量 $(0, 1)$ 之间的夹角, 并将 $0 \sim 2\pi$ 划分成 8 等份, 按逆时针方向依次排序为 1 ~ 8 相位, 这样所得夹角分别对应于这 8 个相位, 不同相位对应于 POP 型的不同演变阶段, 相位划分法可确定各主振荡型在资料时段内的每个月份 (开始和末尾月除外) 处于 POP 振荡的哪一个相位阶段, 通过综合研究几个主要 POP 型的相位承替规律即可对对象的未来发展趋势作出预报。由于传播型的实部系数和虚部系数之间相位固定差 $1/4$ 周期, 因此根据实部系数和虚部系数划分的相位作用上相同, 为突出相位与 El Nino/La Nina 事件的关系, 分析中挑选了与 Nino3 区 SSTA 相关系数绝对值最大的时间系数作为划分相位的序列, 按此标准, 使用的是传播型 (5, 6) 和 (19, 20) 的虚部系数 $\alpha_i(t)$ 和驻波型 49 的系数 $\alpha(t)$ 。

2 非独立样本相位承替规律分析

图 1a、b、c 分别是传播型 (5, 6)、(19, 20) 的虚部系数以及驻波型 49 的系数在 1 ~ 8 各相位的平均值, 从中可看出 2、3 相位有最大的正值, 结合 1 给出的传播型 (5, 6)、(19, 20) 虚部型和驻波型 49 的空间分布可知当这些型处于第 2 和第 3 相位时, 对应 El Nino 事件发展至成熟; 7、8 相位有最大的负值, 对应于 La Nina 事件发展至成熟。图 2a、b 分别是传播型 (19, 20) 与传播型 (5, 6)、以及传播型 (19, 20) 与驻波型 49 的相位联合出现频数图。从图中可看出三者 2、3 和 6、7 相位上有同时出现的倾向, 说明 El Nino/La Nina 事件发生时以这三种模态恰好 “锁相” 为主。比较文献 7 给出的资料时段内发生的历次 El Nino/La Nina 事件, 可证实这一论断, 极少数例外的情况是 80 年代两次 La Nina 事件 (1984 ~ 1985 年和 1988 ~ 1989 年) 期间驻波型 49 时间系数仍维持暖相位。

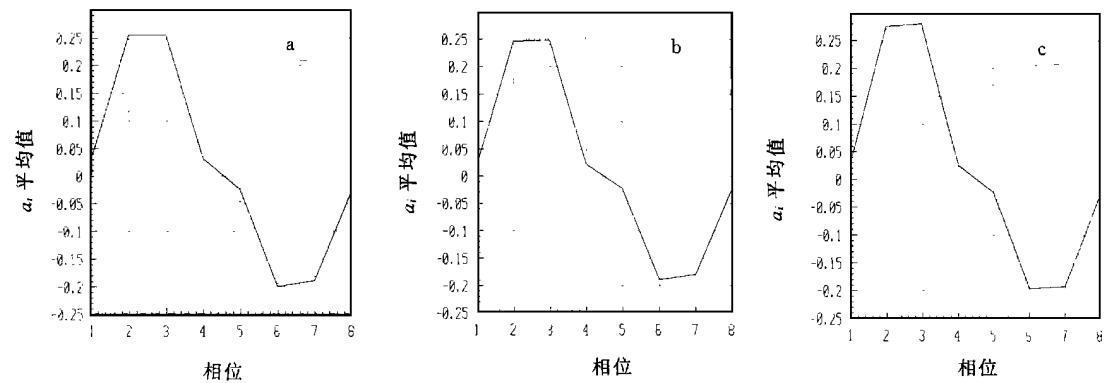


图1 传播型和驻波型系数在1~8相位的平均值

a. 传播型(5, 6); b. 传播型(19, 20); c. 驻波型(49)

Fig. 1 Average values of three eigenmode's coefficients for phase 1 ~ 8

a. imaginary- part coefficients of propagating pattern (5, 6); b. imaginary- part coefficients of propagating pattern (19, 20) c. coefficients of standing pattern (49)

为简短起见, 表 1 仅列举了传播型 (5, 6) 在 1961 年 1 月 ~ 1991 年 12 月的相位分布情况, 从中可看出各相位大致呈顺序循环出现, 但也有个别相位不连续跳跃的情况, 各相位出现频数又以 2、3 和 6、7 相位最多; 平均循环周期为 28 个月左右, 同时还发现每次 El Nino/La Nina 事件暖/冷相位均维持 8 个月以上, 其中第 3/7 相位 4 个月以上; 暖/冷相位维持时间与 El Nino/La Nina 事件强度呈正比, 其他两个典型模态情况与此类似, 但相位平均循环周期分别接

表1 1961-01~1991-12传播型(5, 6)的振荡位相分布

Table 1 phase variations of the propagating pattern (5, 6) during 1961- 1~1991- 12

年份	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1961	2	3	3	3	3	4	5	6	6	6	6	6
1962	6	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
1963	7	7	8	1	2	2	2	2	2	2	3	3
1964	3	3	4	6	6	6	6	6	6	7	7	7
1965	7	7	8	1	2	2	2	2	2	2	3	3
1966	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1967	4	5	6	7	8	7	6	6	6	6	6	6
1968	6	7	7	7	7	1	2	2	2	2	2	2
1969	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3
1970	3	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6
1971	6	7	7	7	7	7	6	6	6	6	7	7
1972	7	7	8	1	2	2	2	2	2	2	2	3
1973	3	3	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6
1974	7	7	7	7	8	6	6	6	6	6	6	6
1975	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7
1976	7	7	7	7	8	1	2	2	2	2	3	3
1977	3	3	4	5	1	2	2	2	2	2	2	3
1978	3	3	3	4	5	6	6	7	7	7	8	1
1979	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1980	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5
1981	6	6	6	6	6	6	7	7	8	1	2	3
1982	3	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1983	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1984	3	3	3	3	4	1	2	2	3	4	5	6
1985	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	6	7
1986	7	8	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1987	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3
1988	3	3	3	3	4	5	6	6	6	6	6	6
1989	7	7	7	7	7	7	7	7	8	1	2	2
1990	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
1991	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	-

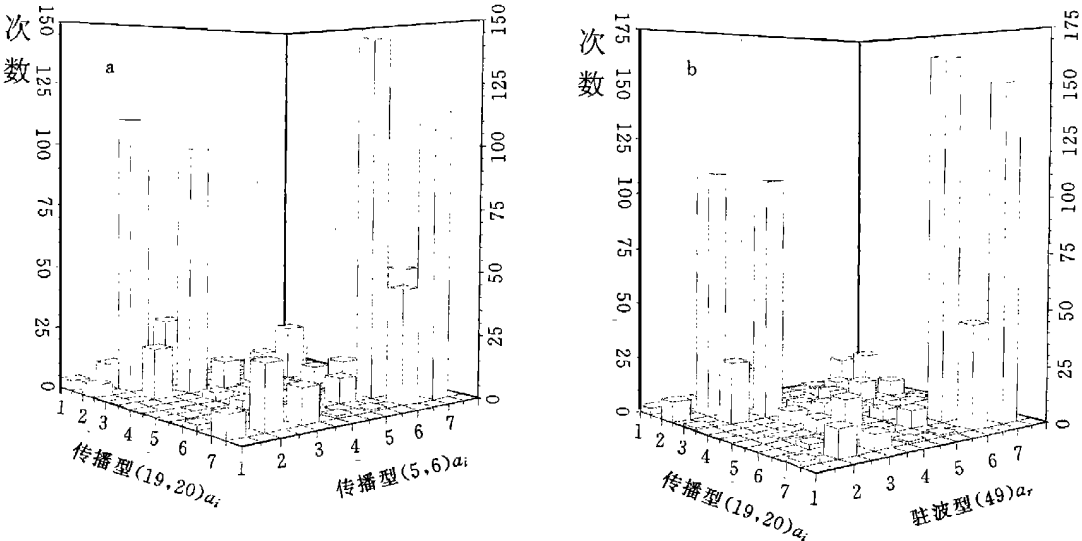


图2 传播型(19, 20)与(5, 6)、驻波型(49)相位联合出现的频数
a. 与传播型(5, 6); b. 与驻波型(49)

近按(5)式计算出的各自振荡周期;传播型(19, 20)在历次事件中峰值出现时间与传播型(5, 6)前后相差在3个月以内。这一方面说明传播型是 El Nino/La Nina 事件中 SSTA 最主要的模态, 预报中应着重考虑, 而驻波型可用于事件强度的参考, 同时也为预报未来 El Nino/La Nina 事件是否发生提供了依据。从另一个角度分析它们的相位演变, 没有发现两个传播型典型模态“锁相”但却不形成事件的情形。还可以看出: El Nino/La Nina 事件具有明显的季节性, 绝大多数事件的峰值都出现在秋、冬季节(当年10月至次年1月)。

图3a~d 分别是传播型(5, 6)在第1~4相位的 SSTA 合成图(5~8相位合成图大致相反), 它代表了典型的西传型 El Nino 事件的一次发展过程, 第1相位合成图相当于 El Nino 事

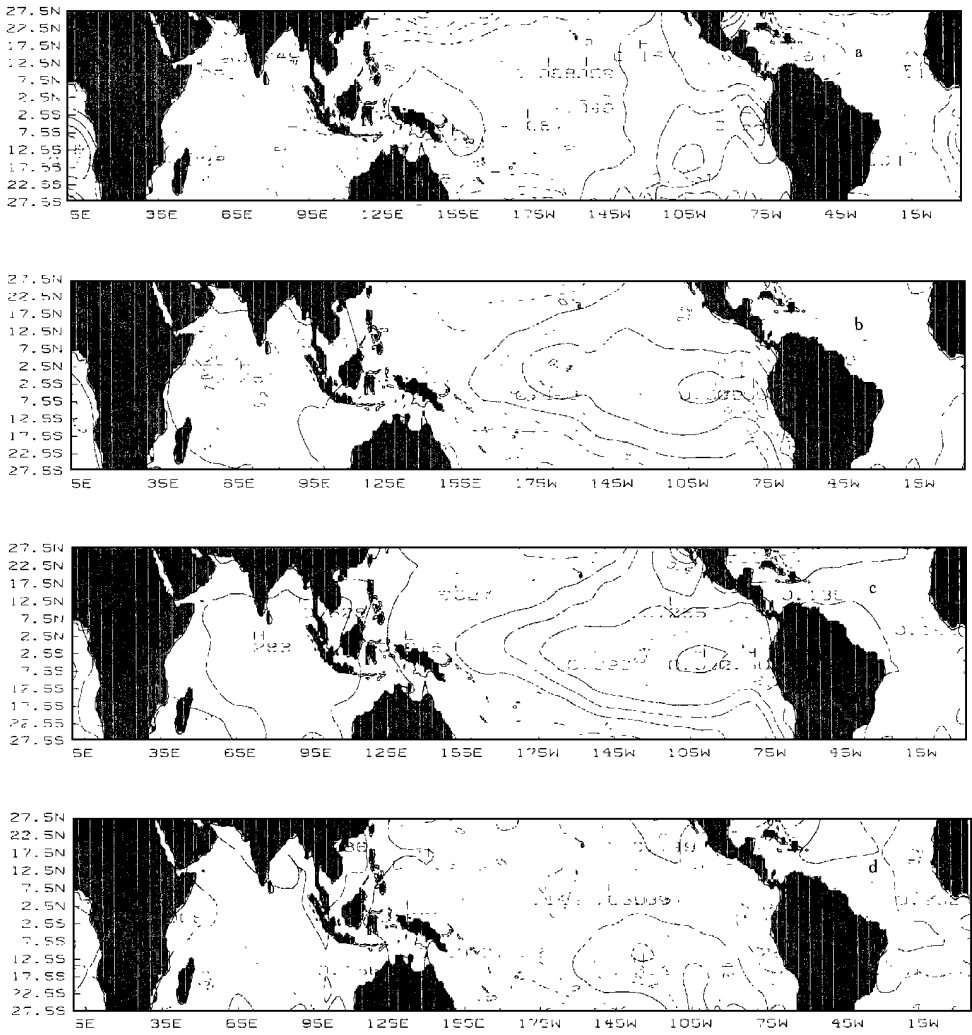


图3 传播型(5, 6)第1~4相位的 SSTA 合成图

a. 第1相位(共22个月); b. 第2相位(共172个月); c. 第3相位(共152个月); d. 第4相位(共25个月);

Fig. 3 Composites of SSTA for phases 1~4 of propagating pattern (5, 6)

a. phase 1 (22 months altogether); b. phase 2 (172 months altogether);

c. phase 3 (152 months altogether); d. phase 4 (25 months altogether)

件的起始阶段的 SSTA 分布: 赤道太平洋东部为正距平, 最大正中心在 Nino1+ 2区, 而此时赤道中太平洋、大西洋西部和印度洋为负的 SSTA, 赤道中太平洋 SSTA 的负值最大, 西太平洋暖池维持正的 SSTA。第2相位时, El Nino 事件的发展已趋成熟, 正距平区向西发展至 Nino4

区,但最大正中心仍在赤道太平洋东岸 Nino1+ 2区,此时整个热带印度洋几乎都转变为正的 SSTA,西太平洋暖池 SSTA 开始出现负值,而大西洋西部的负距平已减至0。第3相位 El Nino 事件已发展至完全成熟, SSTA 正值区在赤道太平洋向西又略有发展,但赤道太平洋和印度洋 SSTA 强度开始减弱;大西洋西部的 SSTA 正值此时才发展起来。最后至第4相位, El Nino 事件完全消失,太平洋东岸 Nino1+ 2区又回到了负的 SSTA 状态。与文献 [1] POP 分析结果对比可发现传播型(5, 6) 的 P_2 型基本与这里的第2相位合成图的 SSTA 空间分布一致,而 $-P_1$ 型则与第1相位合成图的 SSTA 空间分布相似。类似地, 5~ 8相位则代表了一个相反的过程,即 La Nina 由发展到成熟最后衰亡的过程。

传播型(19, 20) 第1~ 4相位的 SSTA 合成图(图4a~ d) 同样也代表 El Nino 事件的发展

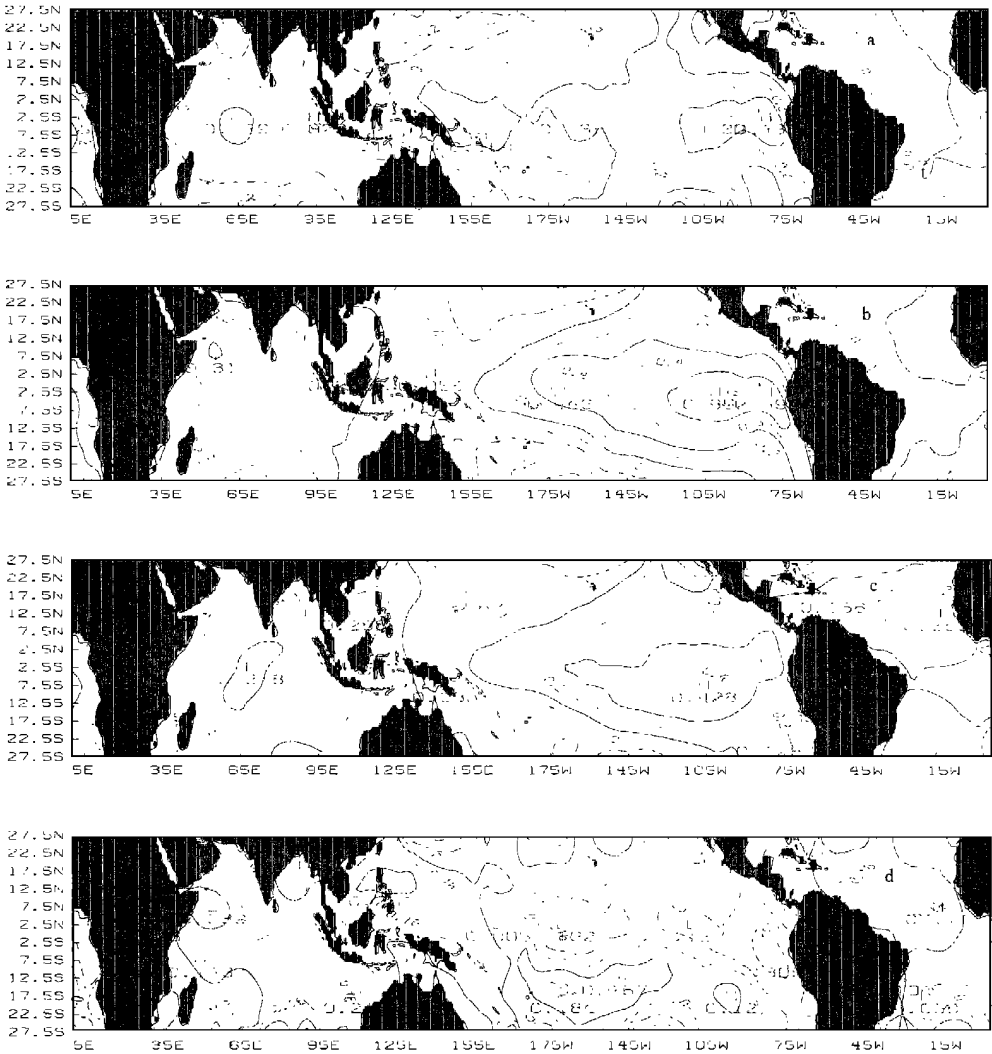


图4 传播型(19, 20) 第1~ 4相位的 SSTA 合成图

- a. 第1相位(共21个月); b. 第2相位(共166个月); c. 第3相位(共162个月); d. 第4相位(共18个月);
- Fig. 4 Composites of SSTA for phase 1~ 4 of propagating pattern (19, 20)
- a. phase 1 (21 months altogether); b. phases 2 (166 months altogether);
- c. phase 3 (162 months altogether); d. phase 4 (18 months altogether)

演变过程,但不同之处在于事件发展阶段赤道太平洋中部,即 Nino4区就已有海表温度的正异

常、与 Nino1+ 2 区的正异常同时出现, 到第2相位时这两个正值区已连成一片, 说明海表温度正异常有自西向东发展的特征, 因此可以理解为这是一类东传型的 El Nino 事件模态, 第2相位合成图空间分布与传播型(19, 20) 的- P_2 型基本对应, 第4相位合成图空间分布与- P_1 型基本对应。第3相位时太平洋区域 SSTA 正值中心已略有减弱, 但印度洋和大西洋的正值区却发展至最大, 看来这两个地区的 SSTA 发展滞后于赤道太平洋地区。

同传播型(5, 6) 、(19, 20) 类似, 驻波型49的 SSTA 第1~ 4相位合成图(图略) 同样也刻划出了 El Nino 事件的演变过程, 但它主要描述与局地振荡相关的事件演变过程, 正的 SSTA 先在 Nino4和 Nino3区以及赤道印度洋中部出现, 然后在整个全球热带海洋发展起来, 最大正中心依然位于赤道中、东太平洋, 第5相位合成图大致与其 POP 空间分布一致。

3 独立样本事后预报

分析表1可知1989年11月传播型(5, 6) 开始进入暖相位阶段并一直维持到1991年末, 其峰值出现在1991年10月, 相对强度达到该模态1982~ 1983年 El Nino 事件的0. 52倍; 传播型(19, 20) 相位变化规律几乎与传播型(5, 6) 情况完全一致(表略) , 峰值相对强度达到该模态1982~ 1983年 El Nino 事件的0. 47倍; 另外驻波型49在此期间也维持暖相位(表略) , 到1991年9月达到峰值, 峰值相对强度为该模态1986~ 1987年 El Nino 事件的0. 61倍。根据相位分析得到的几条规律可作出如下判断: (1) 1989年末到1992上半年是一次中等强度的 El Nino 事件, 其峰值出现在1991年10月左右; (2) 暖相位将继续维持到1992年上半年, 并很快在下半年进入冷相位阶段。

为了检验预报结果是否与实际情况符合, 将独立样本 SSTA 资料(1992-01~ 1992-12) 分别投影到以上几个主要 POP 模态上并划分相位后得到了表2, 可见1992年1月以后的相位是与以前的位相按照 POP 相位承替规律演变的, 实况也证明预报准确, 这次事件大致与1986~ 1987年的 El Nino 事件的强度相当, 峰值出现在1991年末, 到1992年各要素的异常迅速减弱, 整个事件持续时间跨越四个年份, 与历史上1911~ 1913年以及1939~ 1942年的情况类似。

表2 1992年 SSTA 资料对传播型、驻波型投影确定的相位

Table 2 Independent sample's phase distribution of SSTA (1992) determined by projecting to the propagating and standing patterns

传播型(5, 6)		传播型(19, 20)		驻波型(49)	
时段	相位	时段	相位	时段	相位
1~ 3月	2	1~ 2月	3	1~ 3月	3
4~ 5月	3	3~ 4月	2	4~ 5月	2
6月	4	5~ 6月	3	6月	4
7月	5	7月	4	7月	5
8~ 9月	6	8~ 10月	6	8~ 11月	6
10~ 12月	7	11~ 12月	7	12月	7

4 结 论

引入相位划分法对 POP 典型模态进行分析后进一步得到了全球热带海洋 SSTA 的一些变化规律: El Nino/ La Nina 事件期间两个典型传播型模态将维持两个季度以上的暖/ 冷相位,

且它们的峰值期接近, 事件强度与暖/冷相位持续时间成正比; El Nino/La Nina 事件具有明显的季节性特征, 最大增/降温绝大多数情况下都发生在秋、冬季节; 另外, 驻波型典型模态主要影响事件(尤其是正事件)的强度。综合考虑几个典型模态的相位承替规律可预报 SSTA 未来发展趋势, 独立样本事后预报结果表明相位划分预报方案能提供较好的预报信息。

上述结论是对已有观测资料的 POP 分析为依据的, 随着时间的推移, 所确定的主振荡型还可能发生变化, 从而影响使用效果。所以, 应用上述方法时, 最好将资料延伸到编制预报时的前一月, 重新完成 1 和本文的工作。只要准备好程序, 这样做并不难。

参 考 文 献

1 段安民, 吴洪宝. 全球热带海表温度异常的主振荡型分析. 南京气象学院学报, 1998, 21(3): 418 ~ 423
2 Plaut G, Vautard R. Spells of low- frequency oscillation and weather regimes in the northern hemisphere. J A S, 1994, 51(2): 210 ~ 236
3 Xu J S, Storch H V. Prediction the state of SO using principal oscillation patterns analysis. J Clim , 1990, 3(12): 1316 ~ 1329
4 Storch H V. Principal oscillation patterns: A Review . J Clim , 1995, 8(3): 377 ~ 400
5 Tang Benyang. Periods of linear development of the ENSO cycle and POP forecast experiments . J Clim , 1995 , 8(4): 682 ~ 691
6 王绍武. 近百年来海表温度异常的主振荡型. 气象学报, 1993, 3, 20 ~ 33
7 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1993, 52(3): 261 ~ 273

A POP PREDICTION MODEL OF SSTA IN THE GLOBAL TROPICAL OCEANS

Duan Anming Wu Hongbao

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract Based on the POP analysis of SST A in the global tropical oceans , we introduced a phase- categorizing scheme by considering the features of large- scale ocean’s movements as well as long- range prediction, determined the phases of those typical eigenmodes, and got some phase evolution rules for predicting the development trend of SST A. The independent sample hindcast shows that the scheme is reasonable fairly good.

Keywords sea surface temperature anomaly (SST A), principal oscillation patterns (POP), phase- categorizing , prediction model