

Zebiak-Cane 数值模式的可预报性分析

刘新超¹ 段晚锁² 朱克云¹

1 成都信息工程学院大气科学系高原大气与环境研究中心, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 用 Zebiak-Cane (ZC) 模式关于热带太平洋海表温度距平 (SSTA) 的预报资料, 从预报误差发展的角度, 考察了该模式关于 El Niño/La Niña 事件生长期和衰减期以及正常年份 SSTA 的预报技巧。结果表明, ZC 模式关于 ENSO 预报的一个最突出的特征是: El Niño 事件生长期 SSTA 的预报误差存在着明显的季节依赖性, 最大预报误差增长通常出现在春季和夏初 (AMJ), 存在显著的春季可预报性障碍 (SPB); 对于 El Niño 事件的衰减期、La Niña 事件的生长期和衰减期以及正常年份, SSTA 预报误差没有明显的季节依赖性。作者比较了 ZC 模式关于 ENSO 事件不同发展阶段 (生长期和衰减期) 以及正常年份 SSTA 的可预报性。结果表明, La Niña 生长期 SSTA 的预报最困难; 在 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份 3 种情形中, ZC 模式关于 La Niña 事件的预报技巧最低。用上述动力学方法, 进一步考察了 ZC 模式预报技巧的年代际变化。结果表明, ZC 模式在 20 世纪 80 年代 SPB 现象相对较弱, 有较高的预报技巧; 而在 70 和 90 年代, ZC 模式预报技巧明显低于 80 年代, 同时伴有显著的 SPB 现象。

关键词 ENSO 事件 可预报性 预报误差 春季可预报性障碍 年代际变化

文章编号 1006-9585 (2008) 02-0134-15 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

Predictability Analysis of Zebiak-Cane Model

LIU Xin-Chao¹, DUAN Wan-Suo², and ZHU Ke-Yun¹

1 *Center for Plateau Atmospheric and Environmental Research, Department of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*

2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Using the equatorial Pacific sea surface temperature anomaly (SSTA) forecasts of the Zebiak-Cane model, the SSTA prediction skill for neutral years and the growing/decaying phase of El Niño/La Niña events are investigated by analyzing the behavior of forecast error growth. The results show that there is a most prominent signature for the ENSO forecast of ZC model and the evolution of SSTA forecast error associated with the growing phase of El Niño events depends remarkably on season with the fastest growth occurring during boreal spring (AMJ), having prominent SPB. For the decaying phase of El Niño events, the growing/decaying phase of La Niña events and neutral years, the seasonal dependence of SSTA forecast error evolution is not prominent. We compare the SSTA predictability of neutral year and the growing/decaying phase of ENSO event for ZC model, the results show that the SSTA forecast of growing phase of La Niña event is most difficult, and for the El Niño and La Niña

收稿日期 2007-10-09 收到, 2008-01-24 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-230、国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403606 及国家自然科学基金 40505013、40675030 和 40221503

作者简介 刘新超, 男, 1982 年出生, 硕士研究生, 研究方向为气候预测与数值模拟。E-mail: liuxc82@163.com

通讯作者 段晚锁, E-mail: duanws@lasg.iap.ac.cn

event and neutral year, the prediction skill of La Niña event is the lowest. The decadal change of the ZC model forecast skill is also investigated by using the same dynamical method. It is found that the ZC model forecast skill is higher in 1980s, and relatively weak SPB, the ZC model forecast skill is lower in 1970s and 1990s, and having prominent SPB.

Key words ENSO event, predictability, forecast error, spring predictability barrier, decadal change

1 引言

ENSO 是重要的短期气候现象之一, 它的发生往往给全球众多地区造成严重的自然灾害, 尤其是 20 世纪 70 年代中期以来, 世界范围频繁出现异常严重的干旱、洪涝、热浪、冷害及沙尘等极端气候灾害, 给各国带来了严重损失, 引起国际社会、各国政府和公众的普遍关注。关于 ENSO 变异及其可预报性的研究因此成为我国乃至全世界科学家面临的重要科学问题^[1~5]。

“春季可预报性障碍”(SPB) 是 ENSO 可预报性研究的一个重要问题。所谓 SPB, 即是指大多数模式在跨春季预报 ENSO 时, 模式的预报技巧明显下降的一种现象^[6,7]。Chen 等^[8] 改进了前人的预报过程, 即在初始化时考虑了海气相互作用, 减弱了 SPB 的影响; Samelson 等^[9] 研究了 ENSO 事件的可预报性障碍问题, 提出了 ENSO 事件“暖相生长期的可预报性障碍”, 即 ENSO 事件在 El Niño 生长期可预报性很低。另外, 从近几年美国国家环境预测中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECWMF)关于 ENSO 事件的实际预测结果可以看出, SPB 仍是影响 ENSO 可预报性的一个重要因素。

关于 SPB, 前人做了大量的工作, 并提出了一些可能的解释^[6~17], 但仍存在争议。Webster 等^[6] 认为季风循环在春季的瞬时转变是 SPB 产生的原因; Webster^[7] 则认为春季最弱的海气耦合导致 SPB; 还有研究^[8,10] 认为, 海表温度距平(SSTA)在春季最小, 数值模式不容易捕捉到有用的信息, 使得 ENSO 预报产生 SPB 现象。Samselson 等^[9] 认为 SPB 是 ENSO 的一个固有属性; Chen 等^[8,18] 则认为可以通过改进初始场, 减弱甚至消除 SPB; 近来, McPhaden^[19] 通过在数值模式中考虑了次层的信息, 大大改进了所用模式跨春季预报 ENSO 的可预报性。

最近, Mu 等^[16] 用一个理论 ENSO 模式^[20], 通过条件非线性最优扰动方法, 从初始误差增长的角度研究了 ENSO 事件预报不确定性的季节依赖性, 探讨了 El Niño 事件和 La Niña 事件的 SPB 问题。他们指出 CNOP 型误差在 El Niño 事件生长期的春季增长最大, 具有明显的季节依赖性, 并且该现象随着初始误差的增大变得越来越明显; 而 La Niña 事件的 CNOP 型误差的季节依赖性则不明显; 同时, Mu 等^[16,17] 的研究表明, 存在一类初始误差, 它们既不导致 El Niño 事件的 SPB, 也不导致 La Niña 事件发生 SPB。在这些结果的基础上, 提出了 SPB 的一种可能机制, 即 SPB 是 ENSO 事件本身、季节循环以及初始误差共同影响的结果。Mu 等^[16,17] 是在不考虑模式误差的基础上得到以上结论的。我们知道, 对于实际的 ENSO 预报, 模式并不是完美的。那么在这种情况下, El Niño 事件和 La Niña 事件的预报不确定性的季节依赖性又如何?

本文拟在 Mu 等^[16,17] 研究的基础上, 不区分初始误差和模式误差, 从它们共同导致的预报误差的角度出发, 利用 Zebiak-Cane 模式^[21] (ZC 模式) 的实际预报资料, 考察 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份预报技巧的季节依赖性, 并进一步探讨 ENSO 可预报性的年代际变化。

2 资料及 ENSO 事件生长期和衰减期的定义

采用的资料是哥伦比亚大学的气候预测国际研究中心和 Lamont-Doherty 地球观测台 (IRI/LDEO) 气候数据资料库提供的 Zebiak-Cane (ZC) 模式^[21] 关于太平洋海表温度距平 (SSTA) 的预报资料以及相应的观测 SSTA 资料。预报所用资料为 ZC 模式标准版本 (LDEO1), 采用的初始化方案详见文献 [22], 其包括提前 3、6、9 和 12 个月的预报资料。观测资料为美国哥伦比亚大

学气候分析中心 (CAC) 发布的观测 SSTA 资料^[23,24], 观测的 SSTA 与预报的 SSTA 相对应, 两者具有相同的格点分布, 该观测资料一直为 LDEO 预报 ENSO 使用。本文考察的范围为 Niño3 区 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$), 时间跨度为 1972 年 1 月至 2000 年 2 月, 水平分辨率为 $4^{\circ}\times 2^{\circ}$ 。

本文采用 Niño3 指数来度量 El Niño 事件和 La Niña 事件。在 1972~1999 年间, 有 6 次 El Niño 事件 (图 1 左列): 分别为 1972/1973、1976/1977、1982/1983、1986/1987、1991/1992 和 1997/1998 年; 6 次 La Niña 事件 (图 1 右列): 1973/1974、1975/1976、1984/1985、1988/1989、1995/1996 和 1998/1999 年。

本文考虑 ENSO 事件生长期和衰减期的预报不确定性, 定义 ENSO 事件的生长期和衰减期: 把 Niño3 指数从 $> -0.5^{\circ}\text{C}$ 的负值发展到一次 El Niño 事件峰值的时段称为 El Niño 事件的生长期; 相反, 把 Niño3 指数从 $< 0.5^{\circ}\text{C}$ 的正值发展到一次 La Niña 事件峰值的时段称为 La Niña 事件的生长期; 把 El Niño (La Niña) 事件从峰值下降到 Niño3 指数 $> -0.5^{\circ}\text{C}$ 的负值 ($< 0.5^{\circ}\text{C}$ 的正值) 的时段定义为 El Niño (La Niña) 事件的衰减期。图 1 中, 横坐标上用符号 “·” 标明了本文考虑的关于 ENSO 事件预报的初始时刻。例如, 对于 1972/1973 年 El Niño 事件, 初始预报时刻分别为 1971 年 10 月、1972 年 1、7 和 10 月以及 1973 年 1 月。为方便讨论, 我们用如下记号表示预报的初始时刻: 把 El Niño 事件开始出现暖位相的年份记为 El Niño (0), 上一年记为 El Niño (-1), 次年记为 El Niño (1); 类似地, 记 La Niña 事件开始出现冷位相的年份为 La Niña (0), 上一年为 La Niña (-1), 次年为 La Niña (1)。

从图 1 中可以看出, 以 El Niño (-1) 或者 La Niña (-1) 的 10 月和 El Niño (0) 或 La Niña (0) 的 1 月为初始时刻预报 1 年, 春季主要处于 El Niño 事件或 La Niña 事件的生长期; 从 El Niño (0) 或 La Niña (0) 的 7 月和 10 月以及 El Niño (1) 或 La Niña (1) 的 1 月开始的预报, 春季一般处于 El Niño 事件或 La Niña 事件的衰减期。1986/1987 年是一次较特殊的 El Niño 事件, 它不符合大多数 ENSO 事件所具有的成熟位相锁相到年底的特征, 且持续时间较长, 使得从后 3

个初始时刻开始的预报, 春季也处于该次 El Niño 事件的生长期; 1998/1999 年的 La Niña 事件也比较特殊, 从所有考察的初始时刻开始的预报, 春季一直处于该次 La Niña 事件的生长期。另外, 1986/1987 年 El Niño 事件的衰减期大约为 1987 年 8 月至 1988 年 4 月, 其间不包括春季, 因此本文将不讨论其衰减期跨春季预报的情形; 对于 1998/1999 年的 La Niña 事件, 由于资料的缺乏, 也不考虑其衰减期的情况。

图 2 是观测到的正常年份 SSTA 的发展。1972~1999 年, 有 6 个年份属于正常年份。本文也考察了跨春季预报正常年份 SSTA 的不确定性。

3 ENSO 事件预报不确定性的季节依赖性

利用范数 $\|\vec{T}'(\tau)\| = \sqrt{\sum_{i,j} (T'_{i,j}(\tau))^2}$ 度量预报误差的发展, 其中 $T'_{i,j}(\tau)$ 为 τ 时刻格点 (i,j) 上预报的 SSTA 减去观测的 SSTA。为了研究 ENSO 事件预报不确定性的季节依赖性, 把一年分为 4 个“季节”: 1~3 月 (JFM)、4~6 月 (AMJ)、7~9 月 (JAS) 以及 10~12 月 (OND), 然后考察曲线 $\gamma(t) = \|\vec{T}'(t)\|$ 在不同季节的斜率 k 。 k 表示预报误差的发展趋势: 正(负)值表示预报误差增加(衰减), 绝对值越大, 表示预报误差的增加(衰减)越快。

由于所用预报资料不包含初始分析场资料, 我们无法得到初始时刻所在季节预报误差的斜率 k 。但是, 未来季节预报误差的斜率则可以通过上述资料得到。例如, 如果预报的初始时刻是 10 月, 不能得到 OND 季节预报误差的斜率, 但可以通过提前 3 个月和提前 6 个月的预报资料得到 JFM 季节预报误差的斜率; 通过提前 6 个月和提前 9 个月的预报资料得到 AMJ 季节 (即春季和夏初) 预报误差的斜率, 以此类推, 可以得到 JAS 季节预报误差的斜率。

首先分析初始时刻为 El Niño (-1) 或者 La Niña (-1) 10 月和 El Niño (0) 或 La Niña (0) 1 月的 ZC 模式关于 SSTA 的预报误差。表 1 和 2 给出了 1972~1999 年 6 次 El Niño 事件预报误差在不同季节的斜率 k 。

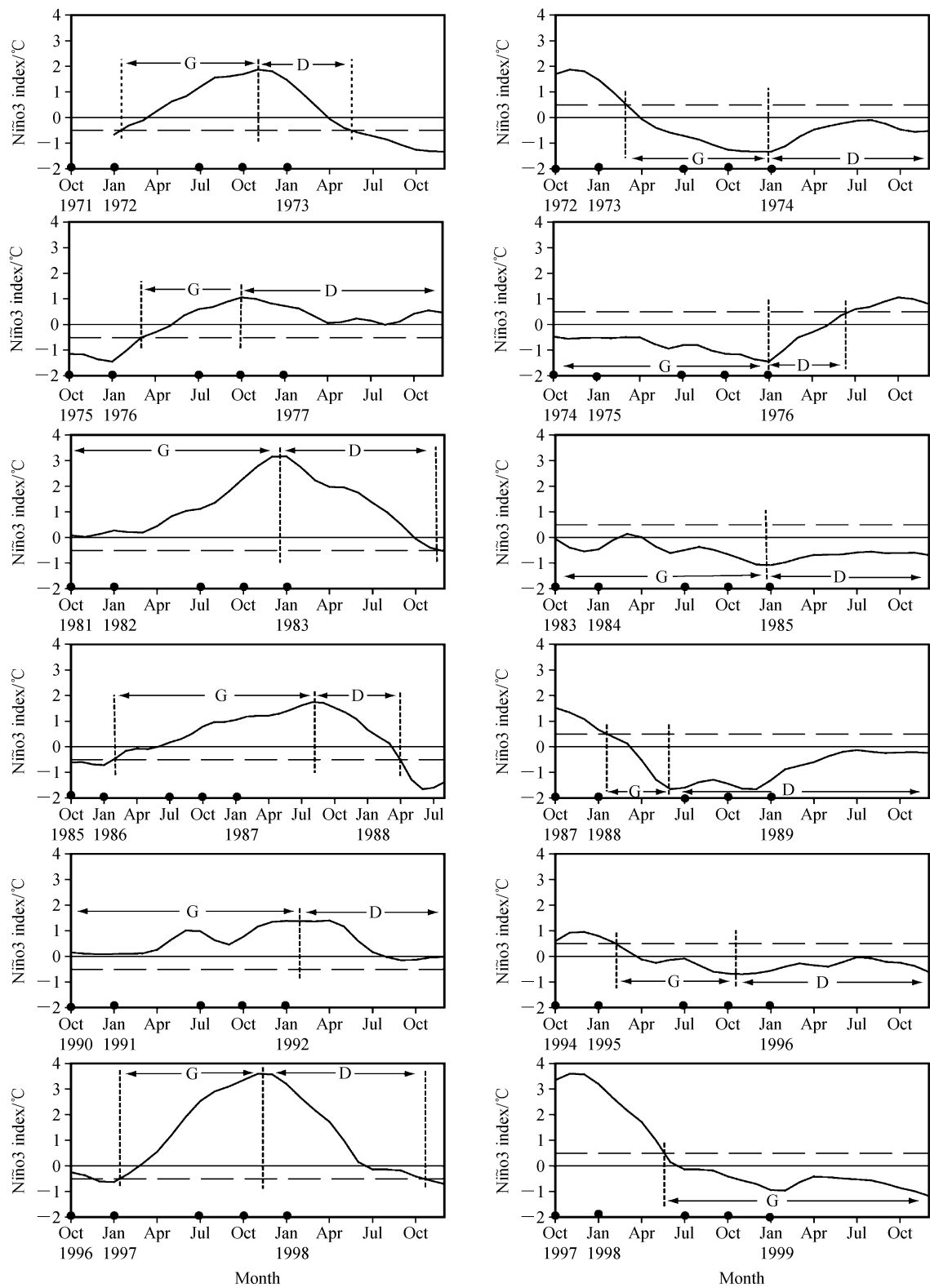


图1 1972~1999年6次El Nino事件(左列)和6次La Nina事件(右列)的观测Niño3指数。G表示生长期,D表示衰减期,横坐标上的“●”表示预报的初始时刻

Fig. 1 Observed Niño3 index of six El Niño events (left column) and La Niña events (right column) during 1972–1999. G: growing phase, D: decaying phase, dots located on axis denote the initial time of prediction

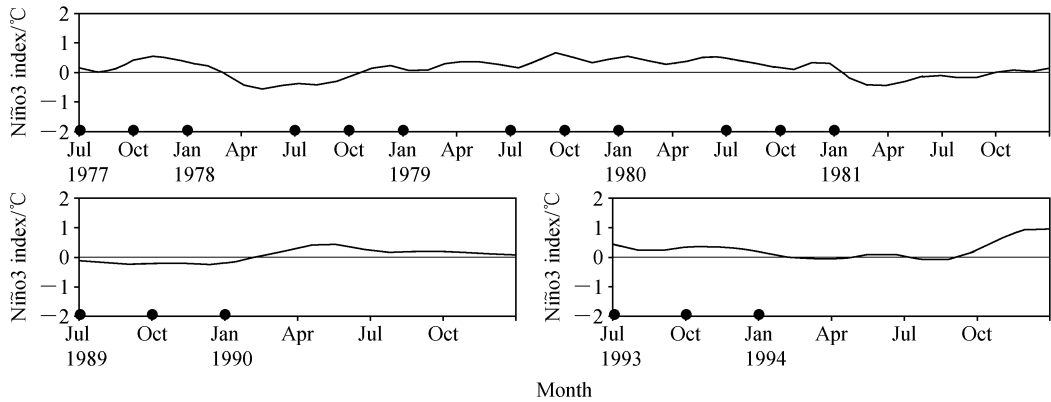


图2 1972~1999年正常年份的观测 Niño3 指数。横坐标上的“●”表示预报的初始时刻
Fig. 2 Observed Niño3 index of neutral years during 1972–1999. Dots located on axis denote the initial time of prediction

从表 1 和 2 可以看出，分别从 El Niño (−1) 10 月和 El Niño (0) 1 月开始预报 El Niño 事件，预报误差关于时间的最大正斜率出现在 AMJ 季节，这意味着 El Niño 事件的最大预报误差增长发生在春季和夏初，而在其他季节，预报误差发展则倾向于负的斜率，即误差衰减。也就是说，El Niño 事件预报误差的发展有明显的季节依赖性，发生了 SPB。另外，发现从上述两个时刻开始的 El Niño 事件跨春季预报，春季处于 El Niño 事件的生长期。同时，也注意到，1986/1987 年 El Niño 事件比较特殊，它不具有大多数 El Niño 事件成熟位相锁相到年底的特征，因此，其生长期和衰减期也对应不同的时段。除了上述讨论的初始时刻 El Niño (−1) 10 月和 El Niño (0) 1 月外，当预报从 El Niño (0) 7 月和 10 月开始时，春季也处于该次 El Niño 事件的生长期。计算表明，从这两个初始时刻开始预报，1986/1987 El Niño 事件预报误差的最大增长率也出现在 AMJ。所以，ZC 模式预报 El Niño 事件的发生和

发展（即生长期），容易发生 SPB。
类似地，分析从 La Niña (−1) 10 月和 La Niña (0) 1 月开始的关于 La Niña 事件生长期的 SSTA 预报。表 3 和 4 是 6 次 La Niña 事件预报误差的斜率。
从表 3 和 4 可以看出，La Niña 事件生长期预报误差的最大增长率出现在不同的季节，这与 El Niño 事件预报误差最大增长率锁相在某一固定季节的情形不同。对于较为特殊的 1998/1999 年 La Niña 事件，从 La Niña (0) 的 7 月和 10 月及 La Niña (1) 的 1 月开始预报，春季也处于该次 La Niña 事件的生长期。计算表明，从这 3 个初始时刻开始的预报，1998/1999 年 La Niña 事件预报误差的最大增长没有出现在 AMJ，而大致出现在夏秋季。可见，La Niña 事件生长期预报误差发展的季节依赖性没有 El Niño 生长期的显著，但这并不说明 La Niña 事件容易预报。下面讨论初始时刻为 El Niño (0) 或 La Niña (0) 的 7 月和 10 月及 El Niño (1) 或 La Niña (1) 1 月的情形。

表 1 初始时刻为 El Niño (−1) 10 月 El Niño 事件预报误差的斜率 k
Table 1 Slopes k of forecasting error corresponding to El Niño events for start month El Niño (−1) Oct

El Niño 年	JFM	AMJ	JAS
1972/1973	−1.9911	4.3508	−1.2338
1976/1977	−7.7102	3.1563	−2.7666
1982/1983	−3.0287	−2.9951	1.9066
1986/1987	−6.9116	1.1758	−0.8813
1991/1992	−1.7917	1.9968	1.0685
1997/1998	8.4297	15.2141	1.3929
平均	−2.1673	3.8165	−0.0856

表 2 初始时刻为 El Niño (0) 1 月 El Niño 事件预报误差的斜率 k

Table 2 Slopes k of forecasting error corresponding to El Niño events for start month El Niño (0) Jan

El Niño 年	AMJ	JAS	OND
1972/1973	4. 4577	−1. 2506	−5. 2134
1976/1977	3. 6635	−4. 2644	1. 6597
1982/1983	0. 0620	−0. 5749	−1. 9127
1986/1987	1. 1591	−0. 9424	0. 4767
1991/1992	2. 8639	−1. 1868	−1. 7805
1997/1998	17. 5550	1. 9918	−7. 0656
平均	4. 9602	−1. 0378	−2. 3059

表 3 初始时刻为 La Niña (−1) 10 月 La Niña 事件预报误差的斜率 k

Table 3 Slopes k of forecasting error corresponding to La Niña events for start month La Niña (−1) Oct

La Niña 年	JFM	AMJ	JAS
1973/1974	3. 3957	−6. 3555	−0. 5251
1975/1976	0. 1535	4. 8133	7. 8241
1984/1985	−11. 9910	0. 7358	−4. 3869
1988/1989	−7. 1099	12. 4917	2. 1235
1995/1996	4. 1853	−2. 2544	2. 9501
1998/1999	−4. 7453	−1. 9091	−1. 1243
平均	−2. 6853	1. 2536	1. 1436

表 4 初始时刻为 La Niña (0) 1 月 La Niña 事件预报误差的斜率 k

Table 4 Slopes k of forecasting error corresponding to La Niña events for start month La Niña (0) Jan

La Niña 年	AMJ	JAS	OND
1973/1974	−0. 0819	1. 3676	3. 1117
1975/1976	1. 6525	3. 3578	9. 8876
1984/1985	10. 2758	4. 0755	2. 5452
1988/1989	9. 1724	−1. 1038	−2. 8153
1995/1996	−0. 2661	7. 3674	−1. 3752
1998/1999	2. 8442	1. 3910	−4. 7040
平均	3. 9328	2. 7426	1. 1083

表 5~7 首先列出了从上述初始时刻预报 5 次 El Niño事件的预报误差的斜率。在此情形下，春季一般处于 El Niño 事件的衰减期（1986/1987El Niño 事件除外）。

从表 5~7 可以看出，跨春季预报 El Niño 事件的衰减期，从 El Niño (1) 1 月开始的预报，考察的 5 次 El Niño 事件中，ZC 模式关于其中 3 次事件的预报误差在 AMJ 增长最大，发生 SPB；而从其他两个初始时刻开始的跨春季预报，El Niño事件预报误差的最大增长率并不锁定在同一季节。所以，跨春季预报 El Niño 事件衰减期

的 SPB 没有跨春季预报生长期的明显。

对于跨春季预报 La Niña 事件的衰减期，从表 8~10 可以看出，最大预报误差增长并不是只发生在春季。对于不同的初始时刻，La Niña 事件的衰减期发生预报障碍的季节也不同，也就是说，La Niña 事件的衰减期发生预报障碍的季节依赖于预报的初始季节。如：初始时刻为 La Niña (0) 7 月时，最大预报误差增长基本上出现在 OND 季节，即秋冬季；初始时刻为 La Niña (0) 10 月时，最大预报误差增长则倾向于出现在夏秋季；而从 La Niña (1) 1 月开始的预报，预报障碍倾

表 5 初始时刻为 El Niño (0) 7 月 El Niño 事件预报误差的斜率 k

Table 5 Slopes k of forecasting error corresponding to El Niño events for start month El Niño (0) Jul

El Niño 年	OND	JFM	AMJ
1972/1973	0.5344	2.4045	-8.6131
1976/1977	1.9961	0.8703	-1.1185
1982/1983	0.7721	0.3469	4.8585
1991/1992	-1.0526	1.5975	0.9065
1997/1998	1.6719	-10.3083	-8.4260
平均	0.7844	-1.0178	-2.4785

表 6 初始时刻为 El Niño (0) 10 月 El Niño 事件预报误差的斜率 k

Table 6 Slopes k of forecasting error corresponding to El Niño events for start month El Niño (0) Oct

El Niño 年	JFM	AMJ	JAS
1972/1973	3.3957	-6.3555	-0.5251
1976/1977	0.2354	-0.3800	-3.4984
1982/1983	-0.2715	5.8076	4.9307
1991/1992	-1.4764	2.1122	-3.5530
1997/1998	-4.7453	-1.9091	-1.1243
平均	-0.5724	-0.1449	-0.7540

表 7 初始时刻为 El Niño (1) 1 月 El Niño 事件预报误差的斜率 k

Table 7 Slopes k of forecasting error corresponding to El Niño events for start month El Niño (1) Jan

El Niño 年	AMJ	JAS	OND
1972/1973	-0.0820	1.3676	3.1117
1976/1977	2.2526	-0.0031	0.9795
1982/1983	7.4589	9.6381	1.4273
1991/1992	5.4448	-3.2878	-0.4804
1997/1998	2.8442	1.3910	-4.7040
平均	3.5837	1.8212	0.0668

表 8 初始时刻为 La Niña (0) 7 月 La Niña 事件预报误差的斜率 k

Table 8 Slopes k of forecasting error corresponding to La Niña events for start month La Niña (0) Jul

La Niña 年	OND	JFM	AMJ
1973/1974	6.1328	-6.0061	1.8066
1975/1976	7.4358	-8.3400	2.7072
1984/1985	0.7152	-0.2316	0.3969
1988/1989	2.1331	-1.5121	-1.3719
1995/1996	-0.1372	-0.1371	2.5142
平均	3.2559	-3.2454	1.2106

表 9 初始时刻为 La Niña (0) 10 月 La Niña 事件预报误差的斜率 k

Table 9 Slopes k of forecasting error corresponding to La Niña events for start month La Niña (0) Oct

La Niña 年	JFM	AMJ	JAS
1973/1974	-1.3208	2.1713	-2.3619
1975/1976	-7.7102	3.1563	-2.7666
1984/1985	-4.2358	0.1459	1.7710
1988/1989	-1.2306	-0.8116	3.4009
1995/1996	-0.5181	0.8723	2.1215
平均	-3.0031	1.1068	0.4329

表 10 初始时刻为 La Niña (1) 1 月 La Niña 事件预报误差的斜率 k

Table 10 Slopes k of forecasting error corresponding to La Niña events for start month La Niña (1) Jan

La Niña 年	AMJ	JAS	OND
1973/1974	3. 9010	−3. 2699	−0. 4184
1975/1976	3. 6635	−4. 2644	1. 6597
1984/1985	−0. 8088	2. 6656	2. 8208
1988/1989	−1. 1806	2. 2466	2. 0123
1995/1996	2. 7772	−0. 4382	−3. 1824
平均	1. 6705	−0. 6121	0. 5784

表 11 初始时刻为 7 月正常年份的预报误差的斜率 k

Table 11 Slopes k of forecasting error corresponding to neutral years for start month Jul

正常年份	OND	JFM	AMJ
1978	1. 1678	−2. 0413	3. 0095
1979	2. 3750	2. 6690	−3. 3918
1980	1. 5986	−3. 2017	−2. 1612
1981	−0. 1290	−0. 1925	1. 5625
1990	−4. 5470	5. 4745	0. 5959
1994	1. 6857	1. 2380	−1. 1180
平均	0. 3585	0. 6577	−0. 2505

表 12 初始时刻为 10 月正常年份的预报误差的斜率 k

Table 12 Slopes k of forecasting error corresponding to neutral years for start month Oct

正常年份	JFM	AMJ	JAS
1978	−0. 1982	2. 6976	4. 6815
1979	2. 1532	−2. 7923	4. 5153
1980	−3. 4169	−0. 8195	−4. 4679
1981	1. 0133	1. 5142	−0. 4060
1990	3. 5195	0. 2564	−1. 7304
1994	0. 2078	−0. 3776	5. 2064
平均	0. 5465	0. 0798	1. 2998

表 13 初始时刻为 1 月正常年份的预报误差的斜率 k

Table 13 Slopes k of forecasting error corresponding to neutral years for start month Jan

正常年份	AMJ	JAS	OND
1978	−2. 8439	4. 3333	2. 6464
1979	−2. 1724	5. 7033	4. 5406
1980	2. 2157	−4. 3251	−3. 6780
1981	0. 0101	−1. 6040	−1. 2569
1990	−3. 4348	−1. 2905	−1. 1755
1994	−1. 2383	6. 5123	0. 4367
平均	−1. 2439	1. 5549	0. 2522

向于出现在春季。

下面讨论 ZC 模式关于正常年份预报误差发展的季节依赖性。初始时刻选取为正常年份上一年的 7 月、10 月以及本年 1 月, 预报时间为 1 年。这样可以考察跨正常年份的春季预报 SSTA 的预报误差的发展。

表 11~13 是 ZC 模式关于正常年份 SSTA 的预报误差在不同季节的发展情况。结果表明, ZC 模式预报正常年份, 预报误差发展没有明显的季节依赖性。

上述结果表明, 无论从何时开始跨春季预报 El Niño 事件的生长期, ZC 模式关于每次 El Niño

事件几乎都发生显著的 SPB; 而在 La Niña 事件的生长期, ZC 模式的预报误差发展却没有显著的季节依赖性。在 El Niño 事件的衰减期, 初始时刻为 El Niño (1) 1 月的预报容易发生 SPB, 而在其他初始时刻, El Niño 事件不发生明显的 SPB; 在 La Niña 事件的衰减期, 虽然有一定的预报障碍, 但不一定发生在春季, 其发生预报障碍的季节在一定程度上依赖于预报的初始时刻。对于正常年份, ZC 模式关于 SSTA 的预报误差也没有显著的季节依赖性。由上述结果可以看出, El Niño 事件生长期的 SPB 是 ZC 模式预报 ENSO 的一个最显著的特征。El Niño 事件生长期的春季一般是从冷位相过渡到暖位相的季节。该时段容易发生预报障碍, 意味着 ZC 模式预报 El Niño 事件暖位相的出现 (亦即 El Niño 事件的发生) 一般是比较困难的。

4 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份可预报性的比较

对于 ZC 模式从上述不同初始时刻开始的 SSTA 预报, 分别计算了 6 次 El Niño 事件和 6 次 La Niña 事件在提前 3、6、9 和 12 个月的预报误差, 记为 $E_{\text{Niño}3}$ 。首先, 比较 El Niño 事件生长期和衰减期的可预报性。图 3 给出了初始时刻分别为 El Niño (0) 1 月和 El Niño (1) 1 月 ZC 模式关于 El Niño 事件的预报误差, 其中, 初始时刻为 El Niño (0) 1 月的预报覆盖了 El Niño 事件的生长期, 起始于 El Niño (1) 1 月的预报则主要在 El Niño 事件的衰减期。图中的 $E_{\text{Niño}3}$ 是通过取 6 次 El Niño 事件预报误差的集合平均得到的。

从图 3 可以看出, 对于提前 3、6 和 9 个月的预报, 初始时刻为 El Niño (0) 1 月 (生长期) 的预报不确定性比初始时刻为 El Niño (1) 1 月 (衰减期) 的大; 而对于提前 12 个月的预报, 生长期的预报则相对容易。由此可以推测, 由于 ZC 模式预报 El Niño 事件生长期发生 SPB, 导致 El Niño 事件跨春季预报夏秋季 SSTA 有较大的不确定性, 而由于秋冬季弱的海气耦合不稳定性使得这种不确定性在该季节衰减, 从而使得 ZC 模式跨春季预报冬季相对容易。总体而言, El Niño 事件生长期的预报比衰减期的预报更困难。

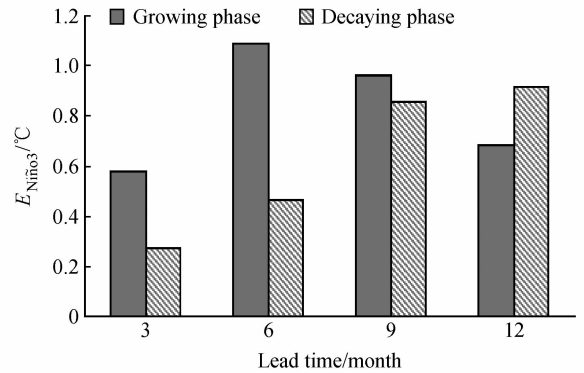


图 3 El Niño 事件的 $E_{\text{Niño}3}$ 随提前预报时间的变化。初始时刻分别为 El Niño (0) 1 月和 El Niño (1) 1 月

Fig. 3 $E_{\text{Niño}3}$ of the El Niño event, as a function of lead time. For start month El Niño (0) Jan and El Niño (1) Jan, respectively

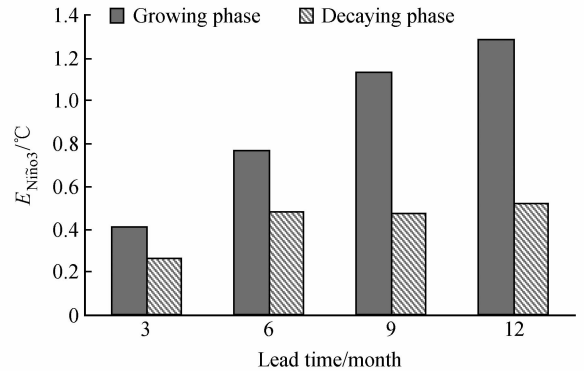


图 4 La Niña 事件的 $E_{\text{Niño}3}$ 随提前预报时间的变化。初始时刻分别为 La Niña (0) 1 月和 La Niña (1) 1 月

Fig. 4 $E_{\text{Niño}3}$ of the La Niña event, as a function of lead time. For start month La Niña (0) Jan and La Niña (1) Jan, respectively

对于 La Niña 事件生长期和衰减期的预报不确定性, 也给出了不同预报时段的预报误差。图 4 是初始时刻分别为 La Niña (0) 1 月和 La Niña (1) 1 月, ZC 模式关于 La Niña 事件的预报误差。结果表明, 对于提前 3、6、9 和 12 个月, La Niña 事件生长期的预报总是比衰减期困难, 并且预报时间越长, 预报误差越大。

比较 El Niño 事件生长期和 La Niña 事件生长期 (初始时刻为 El Niño (0) 和 La Niña (0) 1 月) 的可预报性。图 5 是 6 次 El Niño 事件和 6 次 La Niña 事件预报误差的集合平均。可以看出, 预报时间为提前 3 和 6 个月, 即预报时间较短时, La Niña 事件的可预报性比 El Niño 的可预报性

强;而对于较长时间的预报,即提前 9 和 12 个月,La Niña 事件却比较难预报。

图 6 是关于 El Niño 事件和 La Niña 事件衰减期的预报误差。从图中可以看出,在预报时间较短时,El Niño 事件和 La Niña 事件在衰减期的预报误差没有明显区别,而预报时间较长时,El Niño 事件的预报误差明显大于 La Niña 事件。

Kirtman 等^[25]不区分 El Niño 事件和 La Niña 事件的生长期和衰减期,用统计的方法研究了 ENSO 可预报性。结果表明,El Niño 事件最容易预报,La Niña 事件和正常年份则最难预报。现从预报误差发展的角度考察 ENSO 事件的可预报性,并对比了 El Niño 事件生长期和衰减期、La Niña

事件生长期和衰减期、El Niño 事件和 La Niña 事件生长期及 El Niño 事件和 La Niña 事件衰减期的预报不确定性。为进一步和 Kirtman 等^[25]的结果比较,本文也从预报误差发展的角度探讨了在不区分生长期和衰减期情况下,El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份的预报技巧。

图 7 是 1972~1999 年期间 ZC 模式关于 6 次 El Niño 事件、6 次 La Niña 事件及 6 个正常年份的预报误差。结果表明,对于预报时间提前 6 和 9 个月,El Niño 事件的预报误差最大,而对于预报时间提前 3 和 12 个月的情形,分别为正常年份和 La Niña 事件最难预报。也就是说,很难区分哪种情形最好预报或最难预报。这种情形和 Kirtman 等^[25]的结果有些不同。是什么原因导致这种差异呢?从表 1 和 2 的数据可以看出,ZC 模式关于 1997/1998 年 El Niño 事件的预报技巧最差。Kirtman 等^[25]的结果只考虑了 1970~1993 年的 ENSO 事件,没有包含 1997/1998 El Niño 事件。那么,是否 ZC 模式关于 1997/1998 El Niño 事件预报技巧差导致图 7 的结果和 Kirtman 等的结果有差别呢?为弄清这个问题,考察不包括 1997/1998 年 El Niño 事件在内的 1972~1999 年期间 ENSO 事件的可预报性(图 8)。

从图 8 可以看出,El Niño 事件的预报误差总体比 La Niña 事件和正常年份的小,La Niña 事件的预报误差最大,即说明 El Niño 事件相对容易预报,而 La Niña 事件最难预报。这支持 Kirtman

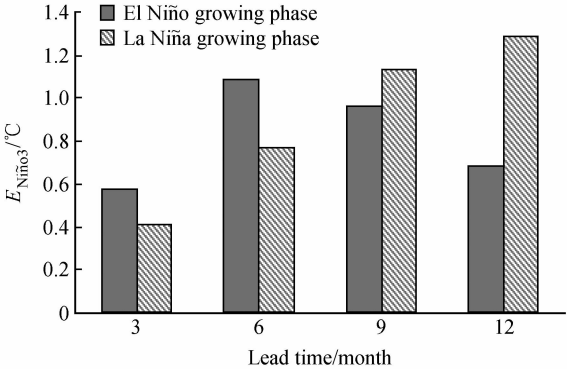


图 5 El Niño 事件和 La Niña 事件的 $E_{Niño3}$ 随提前预报时间的变化。初始时刻为 El Niño (0) 1 月和 La Niña (0) 1 月
Fig. 5 $E_{Niño3}$ of the El Niño event and La Niña event, as a function of lead time. For start month El Niño (0) Jan and La Niña (0) Jan

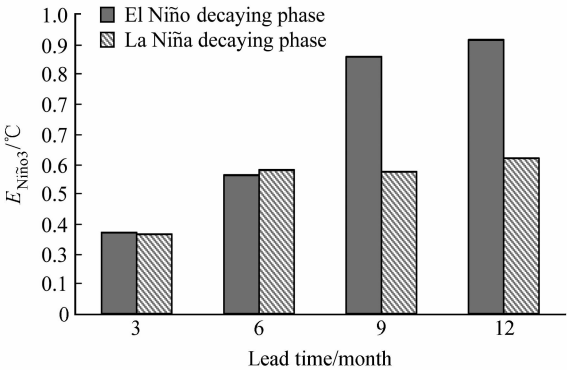


图 6 El Niño 事件和 La Niña 事件的 $E_{Niño3}$ 随提前预报时间的变化。初始时刻为 El Niño (1) 1 月和 La Niña (1) 1 月
Fig. 6 $E_{Niño3}$ of the El Niño event and La Niña event, as a function of lead time. For start month El Niño (1) Jan and La Niña (1) Jan

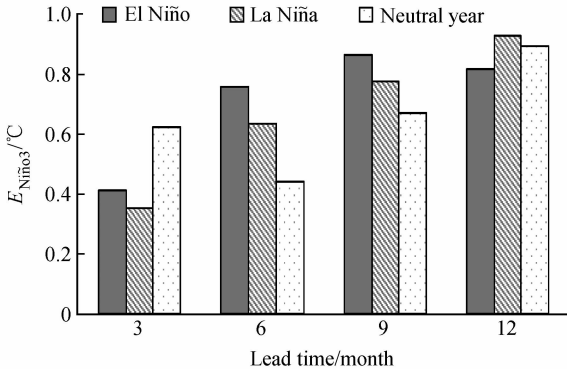


图 7 1972~1999 年 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份的 $E_{Niño3}$ 随提前预报时间的变化。初始时刻为 1 月
Fig. 7 $E_{Niño3}$ of the El Niño event, La Niña event and neutral year during 1972—1999, as a function of lead time. For start month Jan

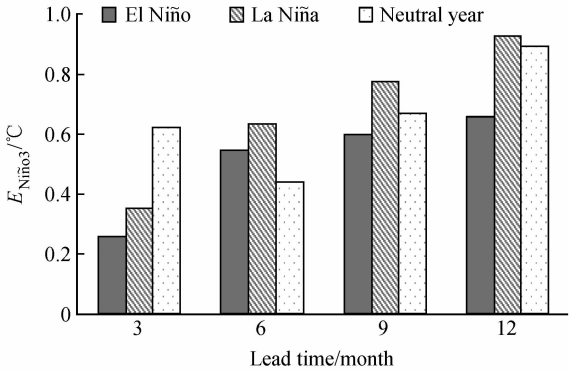


图8 同图7，但不包括 1997/1998 年 El Niño 事件
Fig. 8 As Fig. 7, except for 1997/1998 El Niño event

等^[25]的结果，可见造成图 7 结果与 Kirtman 等结果有差异的主要原因是 ZC 模式对 1997/1998 年 El Niño 事件的预报技巧尤其差。

上述结果表明，El Niño 事件生长期的预报不确定性比衰减期显著，即 El Niño 事件生长期比衰减期难预报；而我们又知道 El Niño 事件生长期容易发生 SPB 现象，或许这是导致 El Niño 事件生长期难预报的主要原因。虽然 La Niña 事件的衰减期在一定程度上存在着预报障碍，但生长期的预报不确定性却比衰减期显著。这可能是因为 La Niña 事件生长期的预报误差在各个季节几乎总是呈现增长趋势（见表 4），而衰减期的预报误差，除了在某一季节有较明显的增长外，几乎在其他季节都呈现衰减趋势或增长不明显（见表 10），从而导致 La Niña 事件生长期比衰减期难预报。本文结果还表明，尽管 El Niño 事件生长期有显著的预报障碍，但由于 La Niña 事件生长期的预报误差几乎总在各个季节呈增长趋势（见表 4），使得 La Niña 事件的生长期比 El Niño 事件生长期难预报；但 El Niño 事件衰减期的预报则比 La Niña 事件衰减期困难。可见，La Niña 事件生长期是最难预报的阶段。另外，不区分生长期和衰减期，综合比较了 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份的预报技巧，结果表明，ZC 模式关于 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份的预报技巧没有显著差别。这是和其他模式预报结果的不同之处。进一步研究发现，造成这种差异的主要原因是 ZC 模式关于 1997/1998 年 El Niño 事件的预报技巧尤其差。

5 ZC 模式预报技巧的年代际变化

上述结果表明，El Niño 事件生长期的 SPB 现象是 ENSO 预报的一个最显著的特征。自 1976 年以后，ENSO 的许多特征，包括振幅、周期和传播特征都发生了年代际变化^[26~28]。SPB 是 ENSO 预报的一个显著特征，那么伴随着 ENSO 的年代际变化，SPB 是否也发生了年代际变化？ENSO 可预报性有年代际变化吗？下面将基于 ZC 模式（LDEO1）的预报资料，简单探讨这些问题。

将 1972~1999 年分为 3 个时段，即 1972~1980 年、1981~1990 年和 1991~1999 年，这 3 个时段分别包括了两次 El Niño 事件。第 3 节的结果表明，在初始预报时刻为 El Niño (−1) 10 月和 El Niño (0) 1 月时，El Niño 事件生长期预报误差的发展存在最显著的季节依赖性，最大预报误差增长几乎总是出现在 AMJ 季节，发生了 SPB。为考察 El Niño 事件 SPB 是否发生年代际变化，分别合成 20 世纪 70、80 和 90 年代的 El Niño 事件，考察这些合成 El Niño 事件预报误差发展的斜率 k ，从而研究 El Niño 事件生长期预报误差发展的季节依赖性的年代际变化。

表 14 和 15 是各年代合成 El Niño 事件预报误差发展的斜率 k 。表中数据表明，90 年代合成的 El Niño 事件预报误差具有最为显著的季节变化，其次是 70 年代合成的 El Niño 事件；80 年代合成的 El Niño 事件预报误差的季节变化性最不明显。也就是说，ZC 模式预报 90 年代 ENSO 事件暖位相最困难，而预报 80 年代 ENSO 事件暖位相最容易。下面不区分 El Niño 事件、La Niña 事件及正常年份，通过统计相关系数方法，综合考察不同年代 SSTa 的可预报性。

表 16 给出了 ZC 模式关于 20 世纪 70、80 和 90 年代预报和观测的 Niño3 区 SSTa 相关系数。结果表明，这 3 个不同年代的统计相关预报技巧有显著差别。80 年代的相关系数最大，即预报技巧最高；90 年代的统计相关系数最小，预报技巧最差。可见，ZC 模式关于 Niño3 区 SSTa 的预报技巧发生了年代际变化。

表 14 初始预报时刻为 El Niño (−1) 10 月 20 世纪 70、80 和 90 年代合成的 El Niño 事件预报误差发展的斜率 k
Table 14 Slopes k of composite of El Niño event during 1970s, 1980s and 1990s, the start month is El Niño (−1) Oct

年代	JFM	AMJ	JAS
1972~1980	−5. 0360	3. 8355	−3. 9049
1981~1990	−3. 4599	0. 9106	−0. 9135
1991~1999	4. 8394	9. 2179	−3. 0804

表 15 同表 14，初始预报时刻为 El Niño (0) 1 月
Table 15 As Table 14, the start month is El Niño (0) Jan

年代	AMJ	JAS	OND
1972~1980	5. 8549	−2. 8699	−3. 9582
1981~1990	0. 9488	1. 1006	−0. 0780
1991~1999	10. 3264	−3. 3686	−2. 0522

表 16 不同年代的预报与观测的 Niño3 SSTA 的相关系数
Table 16 Correlation coefficient of predicted and observed Niño3 SSTA, as a function of lead time

年 代	提前时间/月			
	3	6	9	12
1972~1980	0. 7637	0. 6161	0. 4662	0. 3984
1981~1990	0. 6636	0. 6709	0. 6454	0. 5691
1991~1999	0. 4905	0. 1932	0. 1326	0. 2756

关于 ENSO 预报技巧的年代际变化，其他一些数值模式也存在类似的情形^[29~31]。所以，猜测 ENSO 预报技巧的年代际变化可能不依赖于数值模式，是由 ENSO 本身的年代际变化所导致。因此，ENSO 的年代际变化可能也是影响其可预报性变化的主要原因之一。

6 结论与讨论

利用 Zebiak-Cane 模式（LDEO1）实际预报资料，对 ENSO 事件预报不确定性的季节依赖性进行了探讨，结果表明：在 El Niño 事件生长期，ZC 模式预报误差的发展具有明显的季节依赖性，预报误差的最大增长率出现在 AMJ，存在显著的 SPB。对于 El Niño 事件衰减期、La Niña 事件生长期和衰减期及正常年份，预报误差发展没有明显的季节依赖性。可见，El Niño 事件生长期的 SPB 是 ZC 模式预报 ENSO 的一个最显著的特征。

本文进一步考察了 ZC 模式可预报性在 ENSO 事件不同发展阶段的表现。对于 El Niño 事件，该模式在生长期的预报比衰减期困难，这可能是由于 El Niño 事件生长期的 SPB 现象所导致。对

于 La Niña 事件，虽然 ZC 模式在其衰减期存在一定程度的预报障碍，但由于生长期的预报不确定性几乎在各个季节呈增长趋势，使得模式在 La Niña 事件生长期的预报不确定性比衰减期更大。另外，本文结果还表明，该模式对 La Niña 事件生长期的预报比 El Niño 事件生长期难；在 El Niño 事件衰减期的预报则比 La Niña 事件衰减期困难。可见，ZC 模式关于 La Niña 事件生长期的预报技巧最差。在不区分生长期和衰减期的情形下，本文综合比较了 El Niño 事件、La Niña 事件和正常年份关于 SSTA 的预报技巧，但很难区分 ZC 模式对其预报技巧的高低，这和国际上一些文献关于其他模式预报技巧的研究结论有差异。对此，做了进一步分析，结果表明，造成这种差异的主要原因是 ZC 模式关于 1997/1998 年 El Niño 事件的预报技巧尤其差。

ZC 模式关于 ENSO 的预报技巧也存在年代际变化：在 20 世纪 80 年代，ZC 模式有较高的预报技巧，SPB 现象相对较弱；而在 70 和 90 年代，ZC 模式预报技巧明显低于 80 年代，同时伴有显著的 SPB。

ZC 模式作为第一个用于 ENSO 业务预报的动

力学模式,人们对其可预报性进行了大量的分析研究。一般来讲,影响模式的预报能力主要有两个因素:一是初始误差,另一是模式误差^[32]。Blumenthal^[33]和Goswami等^[34]用ZC模式研究了初始误差增长的季节依赖性,指出预报误差在春季增长最快;Chen等^[8,18]则改进ZC模式的初始场提高了其可预报性;端义宏等^[35]将四维变分同化技术用于ZC模式,提高ENSO的可预报性;岳彩军等^[36]以NCEP风应力距平替代FSU风应力距平作为ZC模式的初始强迫风场,提高了模式的预报能力。这些研究强调了初始场的精度在ENSO预报中的重要性。同时,另外一些研究考察了模式误差对ENSO可预报性的影响。例如,Seager等^[37]在ZC模式中加入潜热和太阳辐射通量,改进了对SST气候平均值的模拟;An等^[38]通过在ZC模式中包含西太平洋表面风距平的季节变化和平均温跃层深度的年循环,使ZC模式所产生的La Niña事件更接近于观测;钱维宏等^[39]对ZC模式的空间场结构进行了改进,使模式的预报技巧得到一定的提高;由此表明,减小模式误差在ENSO可预报性中也是相当重要的。上述研究只考虑初始误差或只考虑模式误差对ENSO可预报性的影响,本研究则同时考虑这两种误差导致的预报误差对ENSO可预报性的影响,并系统考察了ZC模式关于El Niño事件生长期和衰减期、La Niña事件生长期和衰减期以及正常年份的SS-TA预报的季节依赖性和可预报性。

有研究认为^[12,40~44],SPB与季节循环、ENSO事件以及初始误差有紧密联系,是由于海气耦合不稳定性导致的误差在春季快速增长造成的。这实际上属于预报误差发展的动力学问题。虽然许多文献采用大样本统计学的方法探讨该问题^[12,25,31],但该方法不能区分不同ENSO事件的SPB。为了考察1972~1999年间El Niño事件和La Niña事件预报不确定性的季节依赖性,本文从预报误差发展的角度出发,研究了ZC模式关于ENSO的可预报性。

本文的结果是基于ZC模式预报资料得到的,是否其他模式也有类似结果,需要进一步探讨研究。另外,Mu等^[17]的数值结果暗示,在不考虑ZC模式的模式误差时,ZC模式在El Niño事件的衰减期也有比较明显的SPB现象;而本文综合考

虑初始误差和模式误差的影响,其结果认为,El Niño衰减期没有显著的季节依赖性。由此推测,模式误差可能在El Niño的衰减期对ENSO可预报性影响比较大。当然,这些问题和推测需要在未来的工作中加以验证。为此,我们将用更多的模式和模式预报资料考察ENSO事件的可预报性,揭示模式误差对ENSO可预报性的影响,并探讨ENSO可预报性的年代际变化机制。

参考文献 (References)

- [1] 张人禾,周广庆,巢纪平. ENSO动力学与预测. 大气科学, 2003, **27**: 674~688
Zhang Renhe, Zhou Guangqing, Chao Jiping. On ENSO dynamics and its prediction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 674~688
- [2] 黄荣辉. 我国气候灾害的特征、成因和预测研究进展. 中国科学院院刊, 1999, **3**: 188~192
Huang Ronghui. Advance of the studies of the characteristics, cause of formation and prediction study for climate disaster in China. *Chinese Academy of Sciences Bulletin* (in Chinese), 1999, **3**: 188~199
- [3] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 1995. 461pp
Li Chongyin. *Introduction of Climate Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 461pp
- [4] 孙丞虎,李维京,任宏利,等. 一个ENSO动力-相似误差订正模式及其后报初检验. 大气科学, 2006, **30**: 965~976
Sun Chenghu, Li Weijing, Ren Hongli, et al. A dynamic-analogue error correction model for ENSO prediction and its initial hindcast verification. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 965~976
- [5] 周广庆,曾庆存. IAP ENSO预测系统预报技巧的时间依赖性及对1999年La Niña事件的预测. 气候与环境研究, 2000, **5**: 109~117
Zhou Guangqing, Zeng Qingcun. Time dependence of the forecast skills of IAP ENSO prediction system and the forecasts for the 1999's La Niña. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5**: 109~117
- [6] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [7] Webster P J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1995, **56**: 33~55
- [8] Chen D, Zebiak S E, Busalacchi A J, et al. An improved

- procedure for El Niño forecasting: Implications for predictability. *Science*, 1995, **269**: 1699~1702
- [9] Samelson R G, Tziperman E. Instability of the chaotic ENSO: The growth-phase predictability barrier. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 3613~3625
- [10] Xue Y, Cane M A, Zebiak S E. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part I: Optimal growth in seasonal background and ENSO cycles. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 2043~2056
- [11] Lau K M, Yang S. The Asian monsoon and predictability of the tropical ocean-atmosphere system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 945~957
- [12] Moore A M, Kleeman R. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 1405~1446
- [13] Torrence C, Webster P J. The annual cycle of persistence in the El Niño/Southern Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 1985~2004
- [14] Clarke A J, Van Gorder S. The connection between the boreal spring Southern Oscillation persistence barrier and biennial variability. *J. Climate*, 1999, **12**: 610~620
- [15] Yu J Y. Enhancement of ENSO's persistence barrier by biennial variability in a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L13707, doi:10.1029/2005GL023406
- [16] Mu M, Duan W S, Wang B. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D10113, doi:10.1029/2005JD006981
- [17] Mu M, Xu H, Duan W S. A kind of initial errors related to "spring predictability barrier" for El Niño events in Zebiak-Cane model. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L03709, doi:10.1029/2006GL027412
- [18] Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 2004, **428**: 733~736
- [19] McPhaden M J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (9): doi:10.1029/2003GL016872
- [20] Wang B, Fang Z. Chaotic oscillation of tropical climate: A dynamic system theory for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2786~2802
- [21] Zebiak S E, Cane A. A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2278
- [22] Cane M A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecasts of El Niño. *Nature*, 1986, **321**: 827~832
- [23] Woodruff S D, Lubker S J, Wolter K, et al. Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) release 1a; 1980-1992. *NOAA Earth System Monitor*, 1993, **4**: 4~8
- [24] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses. *J. Climate*, 1994, **7**: 929~948
- [25] Kirtman B P, Shukla J, Balmaseda M, et al. Current Status of ENSO Forecast Skill: A Report to the Climate Variability and Predictability (CLIVAR) Numerical Experimentation Group (NEG), CLIVAR Working Group on Seasonal to Interannual Prediction, Climate Variability and Predictability, Southampton Oceanography Centre, Southampton, UK, 2002
- [26] Wang B. Interdecadal changes in El Niño in the last four decades. *J. Climate*, 1995, **7**: 267~285
- [27] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J. Climate*, 1997, **10** (5): 1004~1020
- [28] Torrence C, Webster P J. Inherent limits to interannual predictability? Proceedings of the 20th Annual Climate Diagnostics Workshop, Seattle, Washington, 1995, 390~393
- [29] Ji M, Leetmaa A, Kousky V E. Coupled model predictions of ENSO during the 1980s and the 1990s at the National Centers for Environmental Prediction. *J. Climate*, 1996, **9**: 3105~3120
- [30] Kirtman B P, Zebiak S E. ENSO simulation and prediction with a hybrid coupled model. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 2620~2641
- [31] Balmaseda M A, Davey M K, Anderson D L T. Decadal and seasonal dependence of ENSO prediction skill. *J. Climate*, 1995, **8**: 2705~2715
- [32] Mu M, Duan W S, Wan J C. The predictability problems in numerical weather and climate prediction. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2002, **19**: 191~204
- [33] Blumenthal M B. Predictability of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1991, **4**: 766~784
- [34] Goswami B N, Shukla J. Predictability of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1991, **4**: 3~22
- [35] 端义宏, 梁旭东, 李永平, 等. 四维变分同化技术在优化 Z-C 预测模式初始场中的应用试验. *气象学报*, 2000, **58**: 524~533
- Duan Yihong, Liang Xudong, Li Yongping, et al. Application of the four-dimensional variational data assimilation technique on optimizing the initial conditions of Z-C model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**: 524~533
- [36] 岳彩军, 陆维松, 李清泉. 初始强迫风场对 Zebiak-Cane 海气耦合模式预报能力的影响研究. *热带气象学报*, 2005, **21**: 506~516
- Yue Caijun, Lu Weisong, Li Qingquan. The effect of initialization impact wind on Zebiak-Cane coupled ocean-atmosphere model predictability. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 506~516
- [37] Seager R, Zebiak S E, Cane M A. A model of the tropical

- Pacific sea surface temperature climatology. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 1265~1280
- [38] An S I, WANG B. Mechanisms of locking of the El Nino and La Niña mature phases to boreal winter. *J. Climate*, 2001, **14**: 2164~2176
- [39] 钱维宏, 李立, 王绍武. 改进 Zebiak-Cane 耦合模式的空间结构. 大气科学, 1998, **22**: 257~264
Qian Weihong, Li Li, Wang Shaowu. An improved Zebiak-Cane model for simulating the spatial structure of wind field. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22**: 257~264
- [40] Chen Y, Battisti D S, Palmer T N, et al. A study of the predictability of tropical Pacific SST in a coupled atmosphere-ocean model using singular vector analysis: The role of the annual cycle and the ENSO cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 831~845
- [41] Oldenborgh van G J, Burgers G, Venzke S, et al. Tracking down the ENSO oscillator with an adjoint OGCM. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127** (7): 1477~1495
- [42] Goswami B N, Rajendran K, Sengupta D. Source of seasonality and scale dependence of predictability in a coupled ocean-atmosphere model. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 846~858
- [43] Fan Y, Allen M R, Anderson D L T, et al. How predictability depends on the nature of uncertainty in initial conditions in a coupled model of ENSO. *J. Climate*, 2000, **13**: 3298~3313
- [44] Tang Y M, Kleeman R, Moore A M, et al. The use of ocean reanalysis products to initialize ENSO predictions. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: 1694, doi: 10.1029/2003GL017664