

一次“双谷”型 ENSO 冷事件的成功预测

李进^{1,2}, 丁婷³, 单晓龙¹, 钱维宏¹

(1. 北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国人民解放军 91867 部队, 浙江 义乌 322000; 3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 2011 年春季利用基于 Morlet 小波分析的余弦函数叠加法对中东太平洋的 ENSO 冷事件 (La Nina) 未来发展进行预测, 结果成功地预测出了一次呈现“双谷”型的 ENSO 冷事件发展过程。此方法拟合的 1980 年 1 月—2011 年 2 月的 Nino3.4 指数序列与原序列的相关系数为 0.68; 对 2000—2011 年间 7 次 ENSO 事件预测结果检验, 发现提前 3、6、9 和 12 个月时 Nino3.4 指数的平均预报相关系数 (R) 分别为 0.79, 0.81, 0.83 和 0.64, 平均预报技巧得分 (SS) 分别为 0.87, 0.80, 0.80 和 0.27。此方法具有计算简便, 易于运行, 预报时效稳定的特点, 特别在提前 6—9 个月时对 ENSO 的预测仍有较好效果。

关键词: Morlet 小波分析; 余弦函数叠加; Nino3.4 指数; ENSO 预测

中图分类号: P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0239(2012)06-0001-07

1 引言

19 世纪末南美洲太平洋沿岸渔民发现了 El Nino 现象, 接着 1928 年 Walker 发现南方涛动现象, 20 世纪 50 年代 Bjerknes 发现二者相关, 在 1985 年世界气象组织发起了为期十年的热带海洋-全球大气 (TOGA) 计划, 得到 ENSO 事件物理机制方面的许多新认识^[1], 随后由于大量海洋卫星观测及次表层浮标资料的应用使得人们对 ENSO 事件的认识越来越深入, 发现 ENSO 是年际尺度全球大气-海洋耦合的最强信号, 与全球特别是太平洋沿岸国家的洪涝、干旱、雨雪冰冻等灾害事件有联系^[2-5], 因此 ENSO 事件越来越受到全世界的广泛关注。

ENSO 事件是短期气候变化最重要的外强迫之一。现在的季和年尺度上 ENSO 预测主要有三种方法: 数理统计方法建立模型、气候动力学模式以及统计与动力相结合的方法^[6]。周广庆等^[7-8]利用中科院大气所 IAP 热带太平洋和全球大气耦合环流模式, 设计了“气候异常”初始化方案, 进行 ENSO 预测的系统性实验, 预测结果表明中东太平洋

Nino3 和 Nino3.4 距平序列预报相关技巧高于 0.52 的预测可持续 18 个月。张祖强等^[9]通过对 CZ 简化海气耦合模式中的混合层厚度进行加深从而显著提高模式对 ENSO 事件的预测能力。江志红等^[10]提出一种基于主分量典型相关分析的广义典型混合回归模式, 试验表明, 该模式方案性能稳定, 其总体预报技术水平已达到美国 CPC 气候诊断公报所用同类模式水平, 而此模式方案预报同类产品所需因子数远少于 CPC 方法。蒋国荣等^[11]利用 EOF 展开和神经网络方法进行 ENSO 预测, 研究结果表明两种方法结合对预测 ENSO 有较好的效果。刘科峰等^[12]采用小波分解和最小二乘支持向量机结合的方法建立 ENSO 的预测模型, 实验结果显示此模型可有效提高 ENSO 预测的预报精度。

虽然国内外在 ENSO 预测研究和业务方面投入了大量工作, 并取得不少成果, 但是, 目前科学家对 ENSO 的形成机制以及 ENSO 的发生发展物理过程仍存在多种不同理论, 使得目前 ENSO 的预测仍存在众多不足, 迄今为止没有一个模式能单独准确预测出所有 ENSO 事件的发生、发展和消亡, 而且不同模式对同一时期 ENSO 事件的预报结果经常

收稿日期: 2012-03-09

作者简介: 李进 (1980-), 男, 在读硕士, 研究方向为气候学。E-mail: li_jin@pku.edu.cn

相差较大。Barnston 及 He 计算了各种模式预测 1996 年 6 月—1998 年 3 月的 SST 及观测值的相关系数, 将他们的结果进行归类^[13], 发现其中动力模式的平均相关系数为 0.49, 而统计模式的相关系数平均为 0.66, 显示这段时间内 SST 预测的模式中统计模式的平均分相对稍高一些。Sardeshmukh^[14] 和 Peng^[15] 对比多个利用 SSTA 影响进行季度预报的模式, 结果发现统计模式相对或有更好的预报技巧。Oldenborgh^[16] 比较欧洲 ECMWF 动力模式与统计模式在 1981—2001 年间 ENSO 预测后报中的预报技巧, 发现动力模式在 ENSO 预测“春季屏障”方面要好于统计模式, 但是一旦 ENSO 事件在北半球夏季形成后, 则统计模式在后续的 ENSO 预测中要好于动力模式, 特别是在提前较长月份时。现在虽然随着越来越多海洋观测资料的应用及动力学模式的不断完善, 动力学模式的 ENSO 预测已取得很大改进, 但 ENSO 事件的时间点和强度预测对所有动力模式仍是个严峻的挑战。从而说明在 ENSO 预测时当动力模式的预测水平未有长足改进时, 只要在充分考虑物理机制或气候系统某些方面的整体特征基础上, 采用适当的数理统计预测模式和方案, 仍不失为一种有效的途径。

2011 年 3 月 14 日北京大学受邀参加了国家海洋环境预报中心的“2011 年春季 ENSO 预测会商”会议, 这次会商是在前冬(2010/2011 年冬季)中东太平洋已呈现 La Nina 状态的形势下开展的, 会商中多个模式包括美国 CPC 的某些模式^[17] 对 2011 年春季 ENSO 事件未来 3—6 个月的预测结果较好, 但在夏季以后 ENSO 指数的发展趋势上分歧严重, 其中北京大学利用自己的预测方法成功预测出在 2011 年秋季 ENSO 将重新进入冷位相, Nino3.4 指数将呈现出一个“双谷”型的结构。

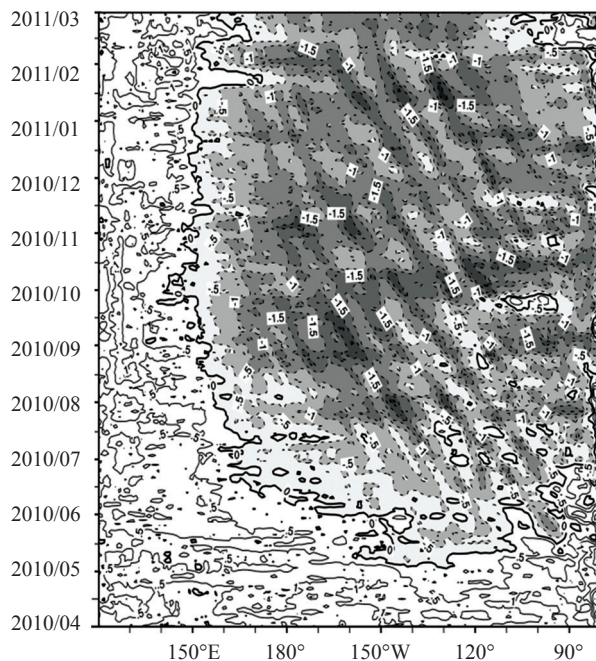
2 资料及方法

本文所分析资料为美国 NOAA 的全球高分辨率($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 日平均 OI SST^[18] 和次表层月平均 GODAS 数据(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>), 以及 CPC 1980—2011 年月平均的 ERSST.V3B Nino3.4 指数。

ENSO 事件的发生发展和强度通常使用中东太平洋的 Nino 指数来描述。Trenberth^[19] 认为在中东

太平洋的 Nino 区域选取上, Nino3.4 区 SSTA 指数比以往惯用的 Nino3 区的 SSTA 指数更适合, 因为 Nino3.4 区涵盖了较多往西的范围, 而在这些区域海气交互作用甚为活跃, 对 ENSO 发展过程具有重要意义。进入 21 世纪以来由于 ENSO 事件出现一些新的变化, 即: 东太平洋的增温或降温中心不断在向中太平洋移动, 人们对假 El Nino 事件^[20] 的研究越来越多, 并越来越多地采用 Nino3.4 指数。例如, 美国 CPC 的 ENSO 每周预测简报便开始用 Nino3.4 指数监测预测 ENSO 事件的发展状态。

本文采用基于小波分析的余弦函数叠加法, 此方法是在序列子波分解趋势法^[21] 基础上进行改进后的一种方法, 中国科学院青岛海洋所曾用序列子波分解趋势法成功提前预报出了 21 世纪初的第一次 ENSO 事件^[22]。文中通过对 Nino 3.4 指数时间序列做 Morlet 小波分析^[23], 选取若干个显著周期生成余弦函数, 进而对 Nino3.4 指数序列进行最大化满足原序列的拟合, 使得拟合的偏差平方最小化。每个函数分量的时间演变具有规律性, 根据这一规律变化的特性, 对各函数分量做外推预测。每个函数分量的外推叠加就是要预报的未来 Nino 3.4 指数的发展变化。



(实线表示正的 SSTA, 虚线和阴影区表示负的 SSTA, 间隔 0.5°C)

图 1 2010 年 4 月—2011 年 2 月赤道太平洋 (5°S — 5°N) SSTA 时间经度图

3 赤道太平洋的现状

3.1 2011年春季赤道太平洋 La Nina 状态的演变过程

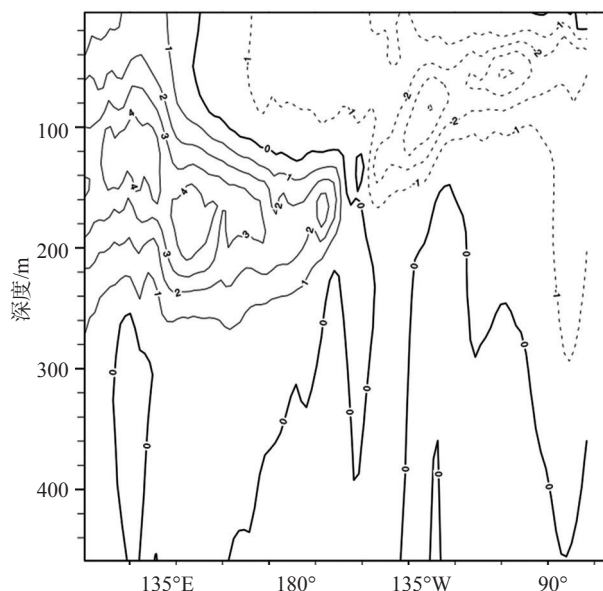
图1中可看出2011年春季的La Nina事件起于2010年5—6月份,首先在赤道中东太平洋(150° — 110° W)出现负的海洋表面温度异常(Sea Surface Temperature Anomalies, SSTA),接着负的SSTA区开始不断向东向西扩展,至2010年10—12月这次La Nina事件逐渐发展到最强时期,负的SSTA区扩展到 150° E以东的大片赤道太平洋,2011年1月开始赤道中东太平洋的负SSTA强度逐渐开始减弱,到2011年2月为止赤道中东太平洋仍维持负的La Nina状态。

3.2 赤道太平洋海平面温度异常分布

2011年2月中低纬度太平洋SSTA的分布(见图2),表明赤道中东太平洋仍受负的SSTA控制,负的SSTA中心值低于 -2.0°C ,中低纬度太平洋的正SSTA呈现出明显的“马鞍”型,从赤道西太平洋“暖池”区向南北纬伸展。

3.3 赤道太平洋次表层温度异常分布

2011年2月赤道太平洋次表层温度异常(Sub-surface Temperature Anomalies, STA)分布(见图3)可看出在中东太平洋负的STA的中心向上移动,已快接近海洋表面;而西太平洋“暖池”底层的正STA中心已向东伸展通过了日界线。



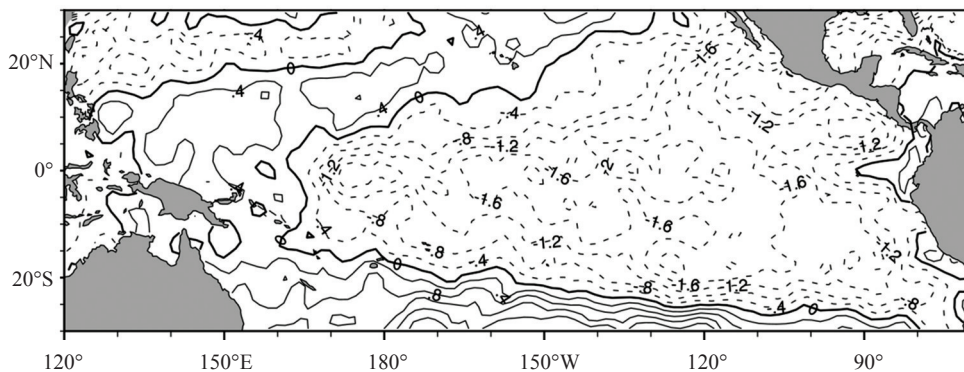
(实线表示正的STA,虚线表示负的STA,间隔 1.0°C)

图3 2011年2月赤道太平洋(5°S — 5°N)STA分布

4 2011年春季ENSO事件的预测

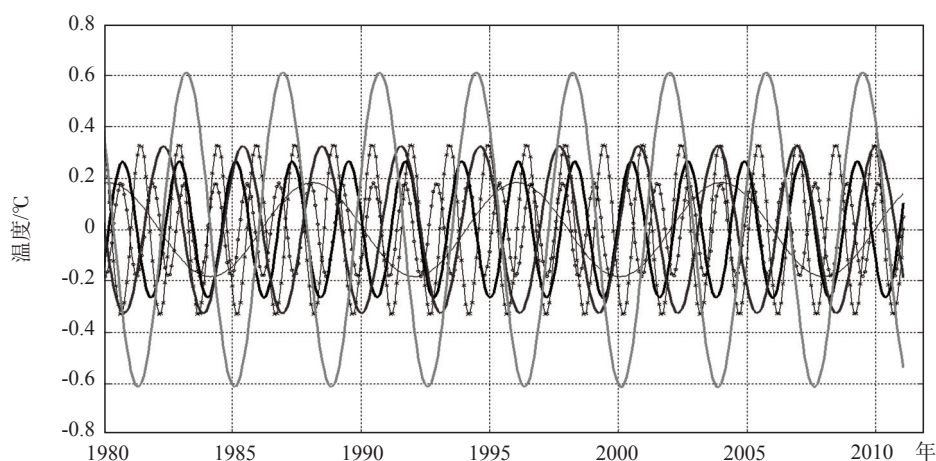
4.1 Nino3.4指数的Morlet小波分析和余弦函数分解

通过对1980年1月—2011年2月Nino3.4指数的Morlet小波分析,表明1980年1月—2011年2月间Nino3.4指数在年际尺度上存在2—8年左右的显著性周期。2005年之前显著主要在3—6年范围内,而2005年以来Nino3.4指数的显著周期主要集中在2—4年(见图4)。



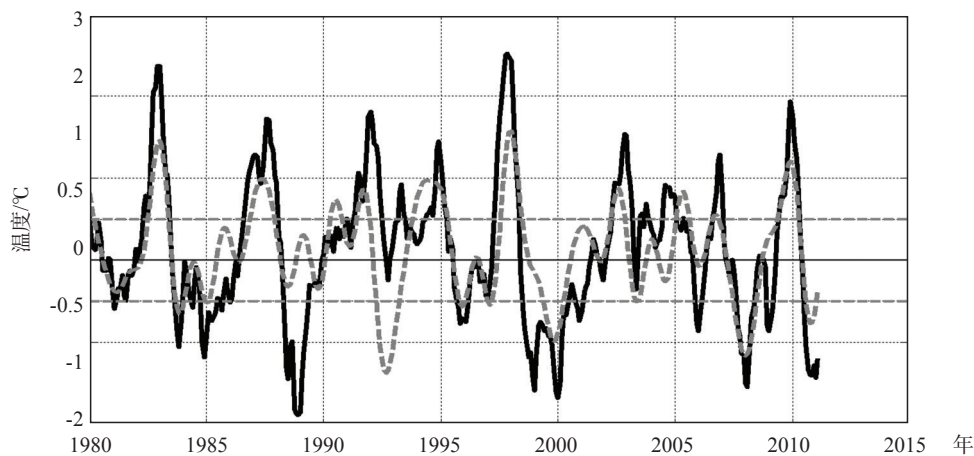
(实线表示正的SSTA,虚线表示负的SSTA,间隔 0.4°C)

图2 2011年2月中低纬度(30°S — 30°N)太平洋的SSTA分布



(带圆点的黑色细线为1.2年周期的函数分量($0.18\cos(5.13t+221.28)$)); 带x号的黑色细线为1.5年周期的函数分量($0.33\cos(4.19t+1.36)$); 黑色粗实线为2.2年周期的函数分量($-0.26\cos(2.86t-14.41)$); 50%灰度粗实线为3.1年周期的函数分量($0.33\cos(2.04t-160.08)$); 80%灰度粗实线为3.8年周期的函数分量($0.62\cos(1.67t-37.94)$); 黑色细线为8.0年周期的函数分量($0.17\cos(0.78t+237.15)$))

图4 1980年1月—2011年2月Nino3.4指数基于小波分析的6个余弦函数



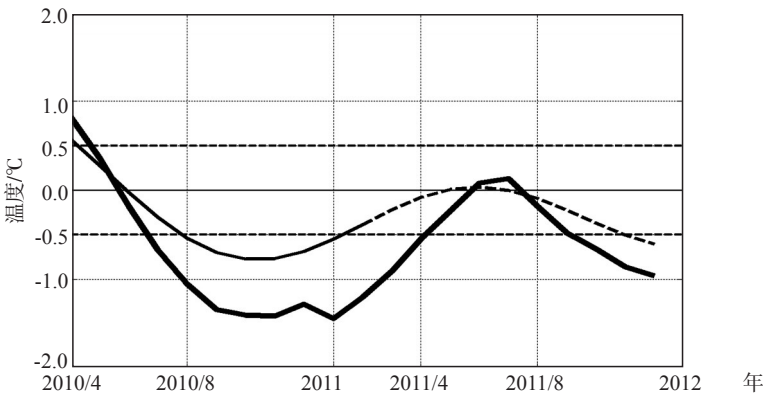
(粗实线为原序列, 虚线为拟合序列, 正负0.5℃处的粗虚横线为ENSO事件的临界值线)

图5 1980年1月—2011年2月Nino3.4指数原序列与6条余弦函数线性叠加的拟合序列

根据1980年以来Nino3.4指数的小波分析结果及最大化满足原序列的原则可将Nino3.4序列分解为图5当中的6条余弦函数, 其周期分别为1.2年、1.5年、2.2年、3.1年、3.8年和8.0年。

对比由这6条余弦函数叠加拟合的Nino3.4指数序列和原序列(见图5), 发现拟合序列共出现10次El Nino过程, 其中有8次El Nino过程拟合正确, 1990—1991年和2005—2006年两次过程是虚

假的, 而2004年—2005年的过程未拟合出; 拟合序列中共出现5次La Nina过程, 其中拟合出4次La Nina过程, 1993—1994年为虚假过程, 而1984—1985年和1988—1989年的两次过程未拟合出, 这主要是因为2000年以来ENSO事件周期发生变化, 而在选取余弦函数拟合周期时要重点反映最近5—10年的周期。Nino3.4指数原序列与拟合序列的相关系数为0.68。



(粗实线为 Nino3.4 指数的原序列, 细实线为拟合的序列, 细虚线为预测序列, 正负 0.5℃ 处的粗虚横线为 ENSO 事件的临界值线)

图6 2010年4月—2011年11月 Nino3.4 指数的原序列与6条余弦函数线性叠加的拟合及向后预测的序列

4.2 2011年春季 ENSO 预测与后期检验

图6为2010年4月—2011年11月 Nino3.4 指数的原序列与6条余弦函数叠加的拟合和预测序列, 图中 La Nina 状态于2010年11—12月已发展到最强阶段, 之后 Nino3.4 指数开始上升, 2011年2月份已处于 La Nina 状态的快速衰退期。2011年2月时由6条余弦函数向后预测 Nino3.4 指数的线性叠加序列表明到5—6月份时指数将要上升至0℃附近, 接下来 Nino3.4 指数又开始下降, 到2011年秋季时开始又进入新的 La Nina 状态。

通过对比2011年2月开始的 Nino3.4 指数原序列和经余弦函数叠加法预测的序列, 发现由6条余弦函数线性叠加的预测序列成功地预测出了 ENSO 事件未来的发展趋势, 揭示出 Nino3.4 指数将再次下降, 未来将会进入“双谷”型的第二个谷值。而在2011年3月份时美国 CPC 大多数模式结果存在较大分歧, 许多模式并未预测出这次 ENSO 事件会发展为“双谷”型, 部分模式预测未来将进入 El Nino 状态, 部分预测未来进入中性状态。但余弦函数叠加预测法在 ENSO 事件发生结束的具体时间点上仍存在一定误差。

表1 2000—2011年 ENSO 事件预测评估

ENSO 事件	预报时效				
	评估方法	提前3个月	提前6个月	提前9个月	提前12个月
2000—2001 年 La Nina	R	0.75	0.89	0.89	0.60
	SS	1	0.85	0.85	-0.23
2002—2003 年 El Nino	R	0.66	0.56	0.73	0.50
	SS	0.85	0.85	0.85	0.23
2004—2005 年 El Nino	R	0.67	0.65	0.82	0.16
	SS	0.69	0.69	1	0.69
2006—2007 年 El Nino	R	0.77	0.77	0.77	0.73
	SS	0.69	0.69	0.85	0.54
2007—2008 年 La Nina	R	0.94	0.92	0.86	0.78
	SS	1	0.85	0.85	-0.23
2009—2010 年 El Nino	R	0.77	0.90	0.77	0.74
	SS	0.85	0.85	0.69	0.69
2010—2011 年 La Nina	R	0.98	0.99	0.97	0.96
	SS	1	0.85	0.54	0.23
平均评分	\bar{R}	0.79	0.81	0.83	0.64
	\bar{SS}	0.87	0.80	0.80	0.27

注: R 表示相关系数, SS 表示技巧评分

5 ENSO事件的历史预测检验

2000—2011年间中东太平洋发生了4次El Nino事件和3次La Nina事件,通过计算这些事件发生后1年内Nino3.4指数的预测和观测值的相关系数(R)和预报技巧得分(SS)^[24],表1给出基于小波分析的余弦函数叠加法在不同预报时效下对这些ENSO事件的预测结果,其中计算预报技巧得分时规定预报误差在0.5℃以内视为正确。结果表明提前3、6、9和12个月时Nino3.4指数的平均预报相关系数分别为0.79, 0.81, 0.83和0.64,平均预报技巧得分(SS)分别为0.87, 0.80, 0.80和0.27。可见此方法在提前9个月以内对ENSO事件的预测时效是稳定的,而提前12个月时的预测效果衰减很快,但是对Nino3.4指数的发展趋势仍有一定的参考意义。

6 讨论

(1) 基于小波分析的余弦函数叠加法具有操作简便,易于运行,预报时效稳定的特点,特别在提前6—9个月时对ENSO的预测仍有较好效果。在多次参加国家海洋环境预报中心一年春秋两季组织的ENSO会商实践中,此方法已表现出对ENSO未来趋势较好的预测能力;

(2) 利用余弦函数叠加法对1980年1月—2011年2月Nino3.4指数进行拟合,拟合序列与原序列的相关系数为0.68。2000—2011年间7次ENSO事件的预测结果检验发现提前3、6、9和12个月时Nino3.4指数的平均预报相关系数分别为0.79, 0.81, 0.83和0.64,平均预报技巧得分(SS)分别为0.87, 0.80, 0.80和0.27。说明此方法在提前9个月以内对ENSO事件的预测时效是稳定的,而提前12个月时的预测效果衰减很快,但对Nino3.4指数的发展趋势仍有一定的参考意义;

(3) 基于小波变换对Nino3.4指数的分析,选取显著周期时要重点关注最近5—10年ENSO事件的显著周期,这是因为ENSO事件的显著周期存在有年代际的变化趋势;在最大化满足原序列拟合的原则下要增加最近5—10年ENSO显著周期余弦函数的个数,这样拟合出的时间序列便会在最近

几年与原序列的拟合度达到较高的一致性,从而保证向后预测的Nino3.4指数能准确地表现出ENSO事件的发展;

(4) 对比Nino3.4指数的原序列与拟合或预测序列发现由6条余弦函数线性叠加的序列总体在强度上要比原序列弱,因此今后需对所拟合或预测出的序列进行人工订正,从而提高ENSO强度和发生发展时间点上的预报水平。

参考文献

- [1] 王绍武. 现代气候学研究进展[M]. 北京:气象出版社, 2001: 458.
- [2] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Nino/Southern Oscillation[J]. Science, 1983, 222: 1195-1202.
- [3] 臧恒范, 王绍武. 赤道东太平洋水温对低纬大气环流的影响[J]. 海洋学报, 1984, 6: 16-24.
- [4] 陈烈庭. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响[J]. 大气科学, 1997, 1: 1-12.
- [5] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(5): 449-459.
- [6] 陈奕德, 张韧, 蒋国荣. 近年来国内ENSO研究概述[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 634-641.
- [7] 周广庆, 李旭, 曾庆存. 一个可供ENSO预测的海气耦合环流模式及1997/1998 ENSO的预测[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 349-357.
- [8] Zhou G, Zeng Q. Predictions of ENSO with a Coupled GCM[J]. Adv Atmos Sci, 2001, 18(4): 587-603.
- [9] 张祖强, 赵宗慈, 于占江. 简化ENSO预测模式的改进试验. 热带气象学报[J], 2004, 20(4): 337-345.
- [10] 江志红, 丁裕国, 周琴芳. 用于ENSO预测的一种广义典型混合回归模式及其预报试验[J]. 热带气象学报, 1999, 15(4): 322-329.
- [11] 蒋国荣, 张韧, 沙文钰. 用EOF展开和人工神经网络方法预测ENSO的研究[J]. 海洋预报, 2001, 18(3): 1-11.
- [12] 刘科峰, 张军, 陈奕德等. 基于小波分解和支持向量机的ENSO预测试验[J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12(5): 531-535.
- [13] 王绍武. 美国第23届气候诊断与预测年会[J]. 气象科技, 1999, 3: 1-10.
- [14] Sardeshmukh P D, Compo G P and Penland C. Changes of probability associated with El Niño[J]. J Climate, 2000, 13: 4268-4286.
- [15] Peng P, Kumar A, Barnston A G and et al. Simulation skills of the SST-forced global climate variability of the NCEP-MRF9 and Scripps-MPI ECHAM3 models[J]. J Climate, 2000, 13: 3657-3679.
- [16] Oldenborgh G J, Balmaseda M A, Ferranti L and et al. Did the ECMWF Seasonal Forecast Model Outperform Statistical ENSO Forecast Models over the Last 15 Years?[J]. J Climate, 2005, 18: 3240-3249.

- [17] Climate Prediction Center. ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions[R]. 2011[2011-2-28].<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>
- [18] Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily High-resolution Blended Analyses for Sea Surface Temperature[J]. *J Climate*, 2007,20:5473-5496, (DOI: 10.1175/2007JCLI1824.1).
- [19] Trenberth K E, The definition of El Nino[J], *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78(12):2771-2777.
- [20] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- [21] 钱维宏,朱亚芬,叶谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率[J]. *科学通报*,1998,43(10):1098-1102.
- [22] 钱维宏.全球气候系统[M].北京:北京大学出版社,2009:201.
- [23] Torrence C, Gilbert P C, A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998,79:61-78.
- [24] 王绍武,朱锦红. 短期气候预测的评估问题[J]. *应用气象学报*, 2000,11(S):1-10.

A successful prediction for ENSO cold event with a “double trough” pattern

LI Jin^{1,2}, DING Ting², SHAN Xiao-long¹, QIAN Wei-hong¹

(1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871 China; 2. 91867 Troops of PLA, Yiwu 322000 China; 3. National Climate Center, Beijing 100081 China)

Abstract: In the spring of 2011, a development course of ENSO cold phase with “double trough” pattern is successfully predicted in the central and eastern Pacific with cosine function superposition based on Morlet wavelet analysis. The relative coefficient of fitting sequence with this method and original sequence of Nino3.4 index from the Jan. 1980 to Feb. 2011 is 0.68. In the prediction tests of seven ENSO events from 2000 to 2011, the average forecasting relative coefficients(R) are 0.79, 0.81, 0.83 and 0.64 respectively, and the average forecasting skill scores(SS) are 0.87, 0.80, 0.80 and 0.27 for 3, 6, 9 and 12 months ahead of ENSO event. The forecasting method is simple to use, easy to run, stabilize to forecast, especially it shows good performance to forecast ENSO event ahead 6—9 months.

Key words: Morlet wavelet analysis; cosine function superposition; Nino3.4 index; ENSO forecasting