

李晓惠,徐峰,陈虹颖,等. 1980—2016年西太平洋暖池与 ENSO 循环过程的相关分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):85-94.

Li Xiaohui, Xu Feng, Chen Hongying, et al. Correlation analysis of the cycle process between the western Pacific warm pool and ENSO during 1980—2016[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(3): 85-94. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.010. (in Chinese)

1980—2016 年西太平洋暖池与 ENSO 循环过程的相关分析

李晓惠¹, 徐峰¹, 陈虹颖¹, 夏天竹², 涂石飞¹

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 2. 天津市滨海新区气象局, 天津 300457)

摘要: 利用 1980—2016 年海表温度(SST)、海平面气压场(SLP)、南方涛动指数(SOI)、平均海洋尼诺指数(ONI)等资料对近 37 a 发生的 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件进行统计分析,并用经验正交函数分析法以及小波分析方法研究西太平洋暖池与 ENSO 循环过程之间的作用机制。研究表明:近 37 a 来, Nino3.4 区的 SST 在厄尔尼诺(El Niño)现象发生时存在较大的正距平,采用 Nino3.4 区 SSTA 的大幅度突变作为指标,能够更好地反映 El Niño 事件的发生;El Niño 事件合成分析可知其形成过程中,西太平洋有一逐渐增强东移的暖中心;西太暖池东边界变化具有明显的年际变化特征,平均 3~4 a 经历一次循环,并出现变化周期延长的现象;海表温度的 EOF 能很好地预示 ENSO 的发生;通过小波分析可以看出暖池东边界对 ENSO 的发生有较好的预报意义。

关键词: 暖池; ENSO 循环; 经验正交函数分析; 小波分析

中图分类号: P461.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)03-0085-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.010

Correlation analysis of the cycle process between the western Pacific warm pool and ENSO during 1980—2016

LI Xiaohui¹, XU Feng¹, CHEN Hongying¹, XIA Tianzhu², TU Shifei¹

(1. College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Tianjin Binhai New Area Meteorological Bureau, Tianjin 300457, China)

Abstract The data of SST, SLP, SOI and ONI were used to analyze the ENSO events in the past 37 years from 1980 to 2016. By using empirical orthogonal function analysis and wavelet analysis methods, the mechanism of cycle process between the western Pacific warm pool and ENSO were studied. The results show that there exists a large positive anomaly in the Nino3.4 area SST during the El Niño occurrence, and the large abrupt change of the SSTA in Nino3.4 area can be used as an index to better reflect the El Niño event. El Niño event analysis shows that in its formation process, the western Pacific has a gradually enhanced and eastward moving warming center. Also, the eastern boundary of the Warm Pool has an obvious interannual variability feature, with each cycle for 3 to 4 years on average, and a gradually prolonged period; The EOF of sea surface temperature is a good indicator to forebode the occurrence of ENSO; Through the wavelet analysis, it is found that the eastern boundary of warm pool has a good forecasting significance for ENSO occurrence.

Key words warm pool; ENSO cycle; EOF analysis; wavelet analysis

收稿日期:2017-04-09; 修订日期:2017-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41475120);广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室项目

作者简介:李晓惠(1992—),女,硕士研究生,主要从事海洋与气候变化研究,470993666@qq.com。

通信作者:徐峰(1962—),男,博士,教授,主要从事大气物理学与大气环境、海洋气象研究,gdouxufeng@126.com。

引言

ENSO(El Niño-Southern Oscillation)循环过程是热带太平洋海气相互作用的重要现象,已经被认为是年际气候变化的最强信号。Bjerknes^[1]率先于1969年提出关于厄尔尼诺(El Niño)事件发生与沃克环流之间存在正反馈机制,ENSO现象的研究便开始成为科学家们研究的热点问题。

经过近半个世纪的研究,科学家们取得了诸多成果。Garcia^[2]通过实测资料分析表明,西太平洋海边温度场高值中心位置的变动对热带对流的时空变化具有较好的指示性。Philander^[3]通过全球海-气耦合模式研究,得出暖池海表温度场的变动,当暖池海表温度处于高值时的微小变化都会对全球大气环流的演变产生十分显著的影响。吴增茂等^[4]通过对比分析大西洋与西太平洋及东、西印度洋与东、西太平洋间的海温差异,对西太平洋暖池(以下简称“西太暖池”)区的形成原因进行了初步探索。黄荣辉等^[5-6]认为,热带西太平洋暖池的热状况变化使得该处上空大气对流层低层形成风场,该风场引起海洋中热量的重新分配,从而导致赤道中东太平洋和西太平洋的热状况随之发生变化。Wang et al.^[7]研究表明,在太平洋下沉支温跃层较浅的区域内,风应力对海面温度(SST)有重要影响,同时SST对风场辐散也比较敏感。李崇银^[8]认为,赤道西太平洋暖池是引发ENSO的本源,当赤道西太平洋暖池正次表层海温异常(SOTA)沿赤道温跃层东传到东太平洋,将导致El Niño的爆发;在海温异常东传的同时,将有负SOTA沿10°N和10°S两个纬度带向西传播,最终形成SOTA的循环,同样在拉尼娜(La Niña)爆发时也会形成SOTA循环。Ashok et al.^[9]研究指出,赤道中太平洋温跃层的变化与暖池东部低层异常强西风对暖水的向东输送和暖池西部经向风辐合关系密切。随着科学家们不断加深对ENSO循环机制的认识,有关信号通道等概念的提出受到了更多专家学者的关注。在众多信号通道理论中,李崇银和穆明权^[10]、巢纪平^[11]提出的信号通道理论是最为人所接受的,即诱发ENSO循环的重要机制是赤道西太平洋暖池次表层海温异常的变化及其沿赤道东传,因此认为维系ENSO循环的重要纽带便是赤道西太平洋暖池的海温异常变化。同时,ENSO循环又会反作用于西太平洋暖池。张启龙和翁学传^[12]通过对西太平洋暖池区的年际变化、季节变化等气候变化特征进行研

究,得出西太平洋暖池区热含量与南方涛动呈反位相变化,当El Niño发展时,西太平洋暖池东边界向东扩展,当转为La Niña发展时,西太平洋暖池则向西收缩。陈锦年等^[13-14]通过对太平洋海温场的变化特征进行了研究,得出赤道潜流在西太平洋暖池东传影响ENSO中起到重要作用。相关理论研究^[15-18]显示,在观测中平均时效的ENSO效应使暖池中心冷却,而使太平洋中心变暖。换句话说,ENSO降低了暖池最大海表温度,同时扩展了暖池的大小范围。

但对于ENSO的预测,目前仍然是一个非常困难的问题。本文拟根据黄荣辉和周连童^[19]在1989年提出的西太暖池的定义,利用1980—2016年月平均海表面温度场、气压场等资料,研究分析近37 a的ENSO循环特征,期望西太暖池指数能在一定程度上预测ENSO的循环规律。

1 资料与方法

1.1 资料

本文选用资料如下:

1)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的再分析资料ERA-Interim,分辨率0.125°×0.125°,取月平均海温(SST)及月平均海表面气压(SLP),覆盖时段:1980年1月—2016年12月。

2)美国国家气象局气候预测中心(CPC)提供的月平均南方涛动指数(SOI指数)和热带太平洋海温Nino3指数、Nino3.4指数和Nino4指数资料,覆盖时段:1980年1月—2016年12月;以及月平均海洋尼诺指数(ONI指数),覆盖时段:1980年1月—2016年12月。

3)美国国家气候数据中心(NCDC)提供的海洋大气综合数据集(ICOADS)资料,取月平均海温,覆盖时段:1980年1月—2016年12月。

1.2 处理方法

本文主要采用统计学方法,如滑动平均、小波分析及交叉小波相关分析方法、经验正交函数分解方法和相关分析等。

1.2.1 经验正交函数分解(EOF)方法

经验正交函数分解(EOF)方法,是一种很有效的多变量分析方法。利用经验正交函数(EOF)分析法,对暖池海域1980—2016年间年平均SST序列进行分析,用来确定SST场的时空变化特征。

1.2.2 小波分析及交叉小波分析

小波分析(wavelet analysis)方法是一种时间窗

和频率窗都可改变的时频局部化分析方法^[20]。采用小波功率谱与其红噪声总体谱比值可以检验给定信度条件下小波功率谱的显著性水平。但小波分析只能进行单个时间序列信号的讨论,对于多要素时间序列信号间的相互影响和时频相关性难以进行讨论。其中交叉小波分析的2种最基本方法是交叉小波变换(XWT)和小波相干谱(WTC)。

XWT 是将交叉谱分析与小波变换相结合的一种新的信号分析技术,进而从多时间尺度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系并揭示两个时间序列共同的高能量区以及位相关系^[21]。WTC 则是用来度量时频空间中两个时间序列局部相关的密切程度。为了解暖池与 ENSO 事件的相关关系,采用小波分析及交叉小波分析,获得暖池与 ENSO 各自的显著周期,进而进行相关分析。

2 1980—2016 年近 37 a 间 ENSO 事件分析

2.1 ENSO 频次分布

20 世纪 80 年代以来,ENSO 事件越来越受到人们的密切关注,其定义为 Nino 3.4 指数 3 个月滑动平均的绝对值至少连续 5 个月 $\geq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 判定为一次 El Niño 事件(La Niña 事件),同时数值 $\geq 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\leq -2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 判定为强 El Niño 事件(强 La Niña 事件)。因此算出 ENSO 事件,仅在 1980—2016 年间就发生了不同强度的 9 次 El Niño 事件和 6 次 La Niña 事件。这 9 次 El Niño 事件分别为:1982、1987、1991、1994、1997、2002、2004、2009 及 2015 年;6 次 La Niña 事件分别为 1985、1989、1996、1999、2008 及 2011 年。利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 资料,求出 1980—2016 年近 37 a 相对 1980—2016 年平均值的全球年平均海温的距平标准化序列以及 Nino3.4 区年平均海温的距平标准化序列。图 1 给出了近 37 a 全球年平均海温异常与 ENSO 事件的对应关系,由图可知,在 1980—2016 年逐年平均的全球海温距平序列中,1980—2016 年全球平均海温距平变化趋势是逐渐上升的,在前 15 a 里,虽然全球海温未达到平均值水平,但在 1987 年强 El Niño 事件发生时全球海温接近平均值,随之全球海温开始出现大于平均值的状态,与 ENSO 事件关系更为紧密的是 Nino3.4 区海温变化,基本能预兆 ENSO 事件的发生。从图上可以看出,Nino3.4 区海温与全球海温变化曲线之间存在一定相似的变化,且全球海温变化滞后于 Nino3.4 区海温变化,从而说明 ENSO 事件与全球海

温变化具有密切的联系,且 ENSO 事件发生的频率有一定的周期性,存在 3~4 a 的周期波动。

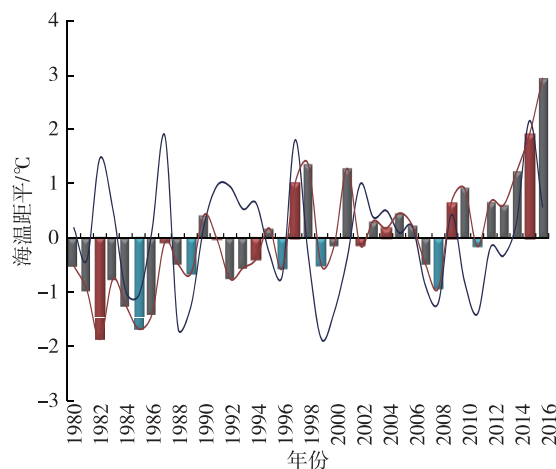


图1 1980—2016 年全球海温年平均距平变化(红色曲线表示全球海温距平变化,蓝色曲线表示 Nino3.4 区海温距平变化,红色柱状图表示 El Niño 事件,蓝色柱状图表示 La Niña 事件)

Fig.1 Average SST anomaly change in 1980–2016(the red curve indicates the global SST anomaly, the blue curve indicates SST anomaly of Nino 3.4, the histogram indicates the El Niño(red cylindrical) and La Niña(blue cylindrical) events)

2.2 SOI 指数与 ONI 指数分析

利用美国国家气象局气候预测中心(CPC)提供的 1980—2016 年 SOI 指数和 ONI 指数月平均资料,对各月指数资料进行 3 个月滑动平均后作距平处理。图 2 反映了近 37 a 的 ENSO 事件的发生情况,结果表明,SOI 指数负距平或 ONI 指数正距平绝对值较大时对应发生 El Niño 事件,尤其 1983、

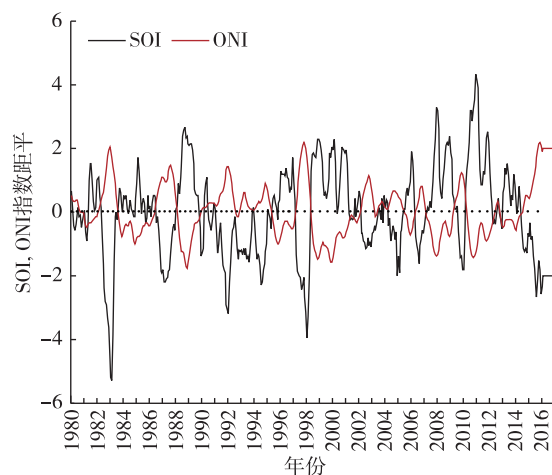


图2 1980—2016 年 SOI 与 ONI 指数距平变化

Fig.2 The changes of SOI index and ONI index anomalies in 1980–2016

1987、1998 和 2015 年达到较大峰值,对应均发生了较强的 El Niño 事件,说明 SOI 和 ONI 可以作为 ENSO 事件发生时的表征,且 ONI 作为 ENSO 事件表征较为稳定。同时,也可反映出 SOI 指数与 ONI 指数存在明显的负相关关系,两者的相关系数达到 -0.853 ,结果表明,气压场与温度场之间存在高度的负相关关系。

2.3 Nino 海区 SST 特征

利用美国国家气象局气候预测中心(CPC)提供的 1980—2016 年热带太平洋海温 Nino3 指数、Nino3.4 指数和 Nino4 指数资料,分别对 Nino3 区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$)、Nino3.4 区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$)和 Nino4 区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{W}$)近 37 a 的 SST 进行滑动平均处理后,对其进行距平处理,如图 3 所示。结果表明:Nino3 区和 Nino3.4 区的 SST 在 El Niño 现象发生时都存在较大的正距平,例如:1983、1987、1998 和 2015 年变化幅度最大,对应发生强 El Niño 事件。Nino3 和 Nino3.4 区的 SSTA 变化具有较好的一致性,但可看出 Nino3.4 区 SSTA 变化对突变的指示相对来说较为稳定,亦更明显。由此可见,采用 Nino3.4 区 SSTA 的大幅度突变作为指标,能够较好地反映 El Niño 事件的发生。

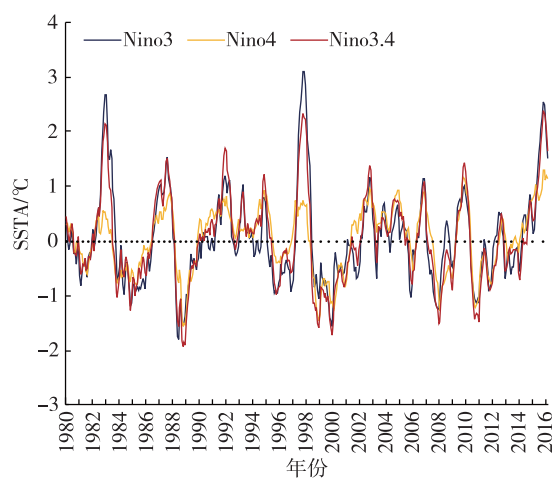


图3 Nino 区 1980—2016 年平均海表温度距平(SSTA)变化

Fig.3 The average sea surface temperature anomaly (SSTA) change in Nino area in 1980—2016

2.4 ENSO 事件合成分析

利用 ECMWF 提供的月平均海温资料对全部 El Niño 事件进行合成分析,从每次 El Niño 事件过程中选出 SST 异常变化值最大的月作为 El Niño 最强月,其中 El Niño 最强月份分别是 1983 年 1 月、1987 年 8 月、1992 年 1 月、1994 年 12 月、1997 年 11 月、

2002 年 11 月、2004 年 9 月、2006 年 11 月、2009 年 12 月和 2015 年 12 月,从而得到 El Niño 事件生成过程中 8 个月的 SST 距平逐月演变情况(图 4)。用这 8 个 El Niño 月的全球 SST 距平格点值相加取平均,就能得到一套完整的 El Niño 形成和消亡全过程的全球 SST 距平演变图。其中,EL-6 为 El Niño 事件增温至最强月之前第 6 个月合成的 SST 距平分布。由图可见,EL-6 时在东太平洋赤道附近有 0.7°C 暖中心,西太平洋赤道以北亦有一暖中心,而北太平洋和南太平洋表现为冷区,到 EL-5 时赤道太平洋暖中心开始发展增强,经过 EL-4、EL-3、EL-2 进一步发展,到 EL-1 暖中心开始东移,范围逐渐扩大,直至 El Niño 进入成熟阶段,此时暖中心东边界延伸至 150°W 附近。由此可见,在 El Niño 形成过程中,西太平洋上有个明显的增暖中心,且为东移性的增暖中心,从而反映了西太平洋海温异常对海洋 ENSO 事件的响应。

3 1980—2016 年西太平洋暖池变化特征分析

3.1 西太平洋暖池指数建立

暖池地区范围的定义与表征一直是个颇具争议的问题,目前仍没有一个统一的定义,有些研究将暖池范围规定在某一固定的经纬度区域^[22-26];有些研究则采用某一海面温度阈值的等温线所包围的区域为暖池范围,例如 28°C 、 28.5°C 或 29°C 等温线^[27-29]。在参考前人的研究基础上,本文选取 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 、 $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 作为西太平洋暖池区域,西太暖池定义为该区域内海表温度大于 28.5°C 等温线所包围的海域。暖池的经向移动对热带内部能量再分配有着极其重要的影响,进而影响 ENSO 的年际变化,而描述暖池经向移动的一个重要因子便是暖池东边界。在对数据的处理中可以看出,西边界经度变化不及东边界变化剧烈,因此为定量表征和描述西太平洋暖池的强弱和位置与 ENSO 之间的关系,对西太暖池定义 2 个指数,分别是东边界经度指数、东边界面积指数。

1) 东边界经度指数:根据多年平均暖池东边界位于 150°W 附近,取 $160^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 范围内暖池东边界最东的两个经度的平均值,并与 150°W 作距平处理后定义为暖池东边界经度指数。

2) 东边界面积指数:取 $160^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 范围内大于 28.5°C 网格点数并进行标准化后定义为暖池东边界面积指数。

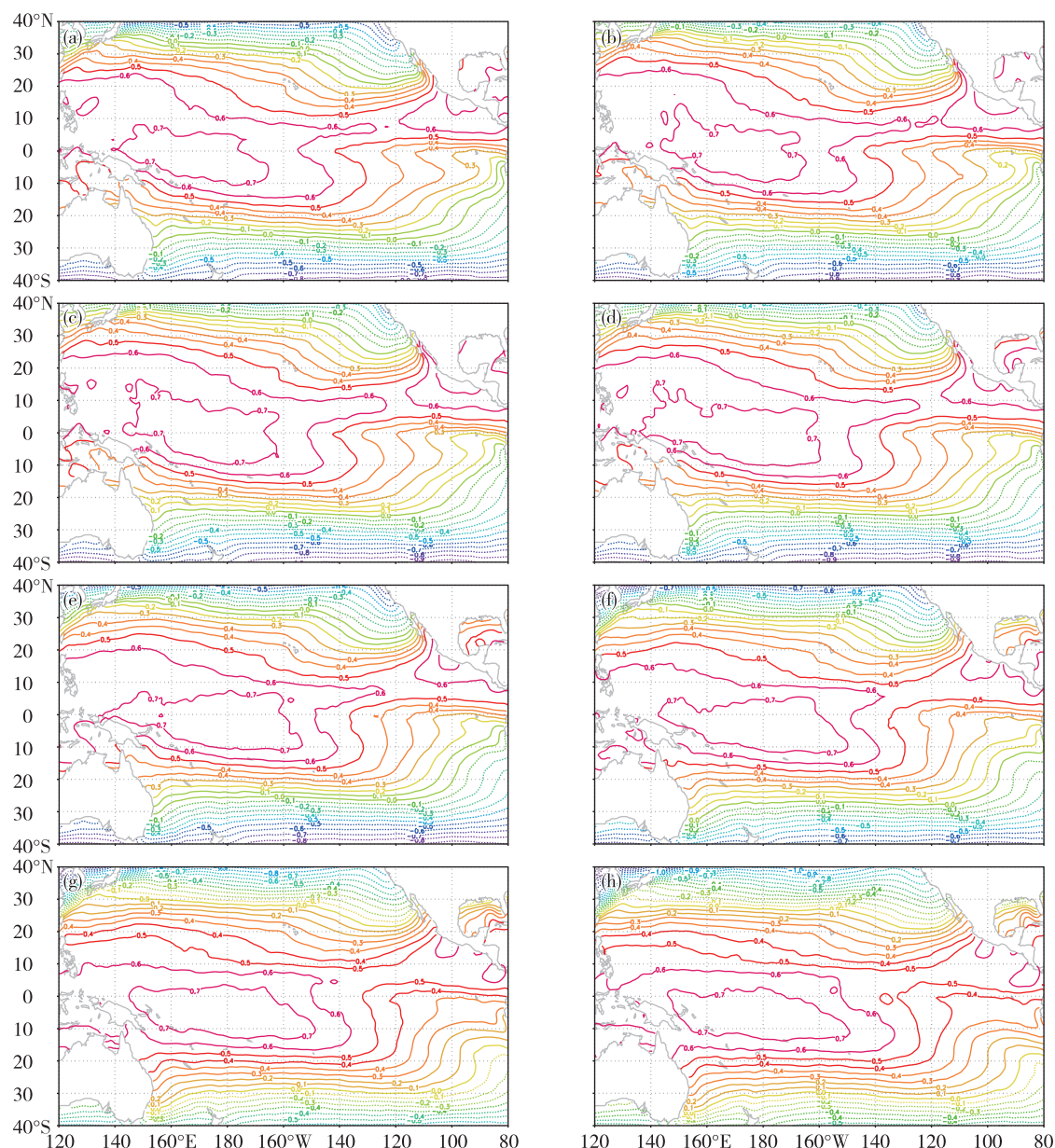


图4 El Niño 事件过程的 SST 距平合成 (a.EL-6,b. EL-5,c.EL-4,d. EL-3,e. EL-2,f. EL-1,g. EL+0,h. EL+1)

Fig.4 The composite SST anomaly during El Niño event processes (a.EL-6, b. EL-5, c.EL-4, d. EL-3, e. EL-2, f. EL-1, g. EL+0, h. EL+1)

3.2 西太平洋暖池变化特征

利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 1980—2016 年海表温度月平均资料进行处理, 分别得到暖池东边界经度距平值、东边界面积指数。由西太暖池东边界经度距平 (图 5a) 可以看出, 近 37 a 来暖池东边界变化具有较明显的年际变化特征, 平均 3~4 a 经历一次循环, 并出现变化周期延长的现象。图 5a 中出现峰值的年份分别为 1982、1987、1991、1994、1997、2002、2004、2009 和 2015 年, 暖池的东边界有所延伸, 这些年份正好是 El Niño 年, 其

中, SST 在 28.5 °C 以上区域的东边界经度点有 4 次甚至延伸至 140~130°W, 分别是: 1982、1987、1997、2015 年, 且这 4 a 均发生了强的 El Niño 事件。图 5a 中出现谷值的年份分别为 1985、1989、1996、1999、2008 和 2011 年, 暖池的东边界有所退缩, 此时正好是 La Niña 事件发生的年份, 其中谷值最大的 1989 和 2011 年, 这两年均发生了强 La Niña 事件。因此用暖池的东边界点可以很好地预示 ENSO 的发生时间及强度。

由西太暖池东边界面积指数 (图 5b) 可以看出,

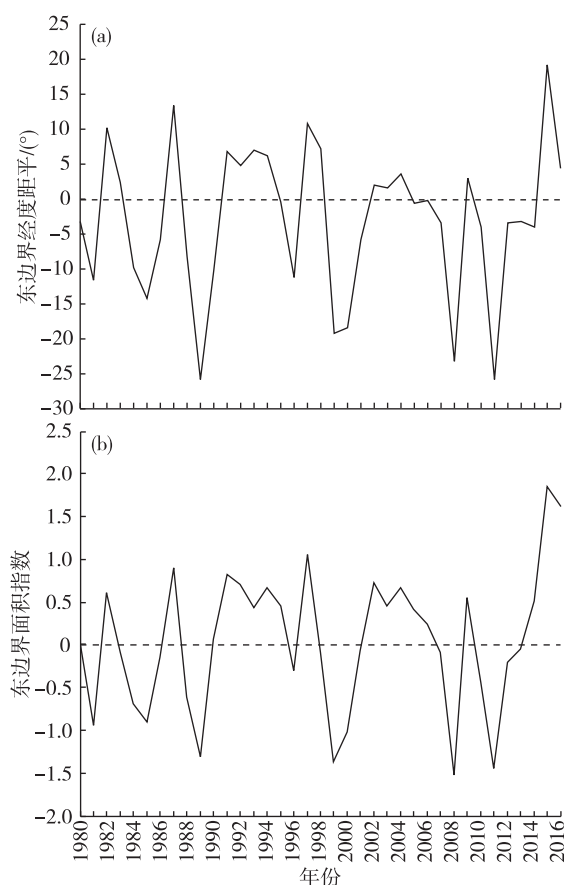


图5 1980—2016年西太平洋暖池变化 (a. 东边界经度距平, b. 东边界面积指数)

Fig.5 Western Pacific warm pool anomaly change in 1980–2016 (a. eastern boundary longitude anomaly; b. eastern border area index)

近37 a来暖池东边界面积指数具有较明显的年际变化特征,4~5 a的周期循环,同样也出现了变化周期延长现象。其中,共发生了9次东边界面积明显的扩张,分别是1982、1987、1991、1994、1997、2002、2004、2009和2015年,这些年份均发生了El Niño事件,且都在El Niño事件开始发生时有一定的响应;6次大范围的缩减,分别是1981、1985、1989、1999、2008和2011年,这些年份除了1981年外均发生了La Niña事件,但各个最值之间区别不甚明显,且不能在1996年时很好地反映其发生了La Niña事件,因此可以推测出暖池在El Niño发生时的面积扩张不只有经向扩张还有纬向扩张,所以对El Niño事件的强度响应不明显,反之亦然。由此得出,暖池东边界面积指数对于能预测ENSO发生的时间,有较好的响应,但对于强度的响应不及暖池东边界经度对强度响应明显。

4 西太平洋暖池与 ENSO 的相互作用机制

为了研究暖池与 ENSO 的相互作用机制,本文分别对太平洋地区($120^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{W}$, $40^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{N}$)海表温度(SST)距平场进行时空特征和时频特征分析。

4.1 时空特征

本文利用此方法对太平洋暖池海域年平均 SST 场用 EOF 进行时空分解,并通过 Monte Carlo 算法检验后发现,EOF 前 2 个模态在 95% 的置信水平下具有统计显著性,方差贡献率分别为 46.24% 和 13.14%,两个模态累积方差贡献率达到 59.38% (接近 60%),并且可以看出第一模态的方差贡献占绝对优势。因此,本文主要对 EOF 的前 2 个模态进行分析。

4.1.1 第一特征向量场的时空特征

第一特征向量场(EOF₁型)(图 6a)的空间特征主要呈现东、西两个高值变异中心。在热带太平洋中,暖池 SST 异常值以 160°E 为界分为东、西两部分。暖池东部为正值变异区,最大正值变异中心位于 $170^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$ 的赤道附近,与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)所定义的 Nino3 以及 Nino3.4 区中心位置相一致,表明此处为热带暖池海域 SST 场年际变化最显著的海区。除了从太平洋东岸墨西哥西海岸是正值波动外,其余海域呈现负值变异区,中心强度不及正值异常区大。因此暖池西部 SST 的年际变化与东部 SST 呈反相位变化。EOF₁型反映了暖池 SST 场年际的主要变化,能很好地显示出由大尺度海气系统异常所导致的异常变化。从第一模态的时间变化系数(图 6b)可知,时间系数为正时,空间分布为正值的海域 SST 将异常偏暖,空间分布为负的海域 SST 将异常偏冷。时间变化系数图出现的峰值年份分别为 1982、1987、1992、1997、2002、2004、2009 及 2015 年,这些年份都与 El Niño 事件发生时间大致吻合,并且在峰值最大的 1982、1987、1997 及 2015 年都是强 El Niño 年;时间系数呈现大的谷值年份有 1985、1989、1996、1999、2008 及 2011 年,这些年份均与 La Niña 事件相吻合,并且在谷值最大的 2008 及 2011 年是强 La Niña 年。由此可见,EOF₁时间变化系数的年际变化和太平洋中大尺度海气系统的异常变化之间有着较好的对应关系。从时间变化系数图中还可以看出该海域 SST 具有 4~5 a 的振荡周期,这一变化周期与 ENSO 循环变化周期相类似。因此 EOF₁型的时空特征,可认为是暖

池海域 SST 场异常的年际变化型,并且能很好地预示 El Niño 年的发生。

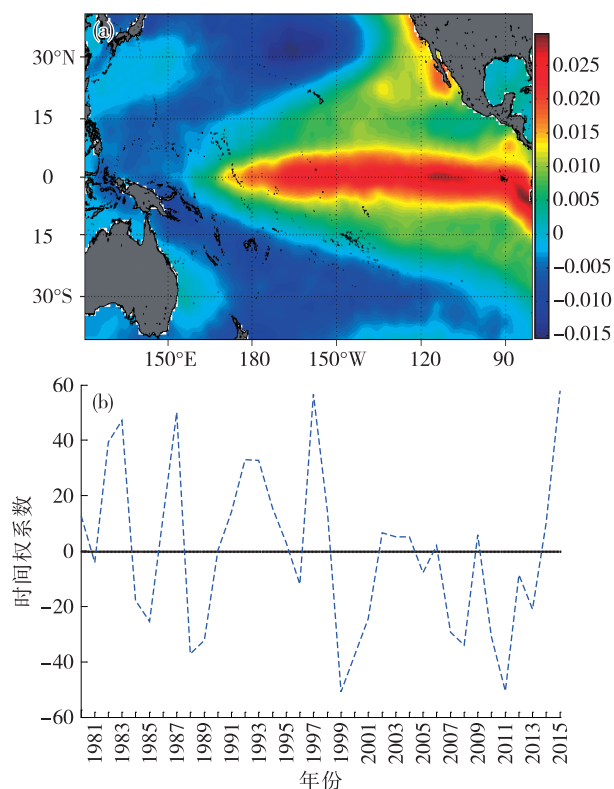


图6 第一模态特征向量的空间分布(a)和时间系数(b)
Fig.6 Spatial pattern (a) and principal components (b) of the first mode

4.1.2 第二特征向量场的时空特征

第二特征向量场(EOF_2 型)(图7a)的空间特征与第一特征向量场(EOF_1 型)的空间特征有相似的地方,整体正负值异常区相反。在暖池东部,与 EOF_1 型的正值变异区相对应的地方有一范围相对较小的负值变异区以及在日本海附近有较大的负值变异中心,除此之外的全部海域均为正值变异区,分别在东北太平洋以及东南太平洋处有两个最大正值变异中心。由第二模态的时间变化系数(图7b)可以看出,该海域 SST 前 15 a 的年际变化几乎为正,当数值变化有上升趋势时,表明空间分布为正值区 SST 将逐渐增温到最大值;在最近的 20 a 的时间变化系数均为负值,当数值变化有下降趋势时,表明空间分布为正值区 SST 将逐渐降温到最小值。可以看出,近 37 a 海表温度的大致变化,与太平洋涛动(PDO)相对应,因此前 15 a 中 PDO 处于暖位相状态,后 20 a 中 PDO 处于冷位相状态,在 PDO 转为冷位相时,1999 年爆发了最强的 La Niña 事件,表明 PDO 与 ENSO 事件有着极其密切的关

系,会影响 ENSO 事件的发生。因此 EOF_2 型又可称为暖池海域 SST 场异常的年代际变化型。

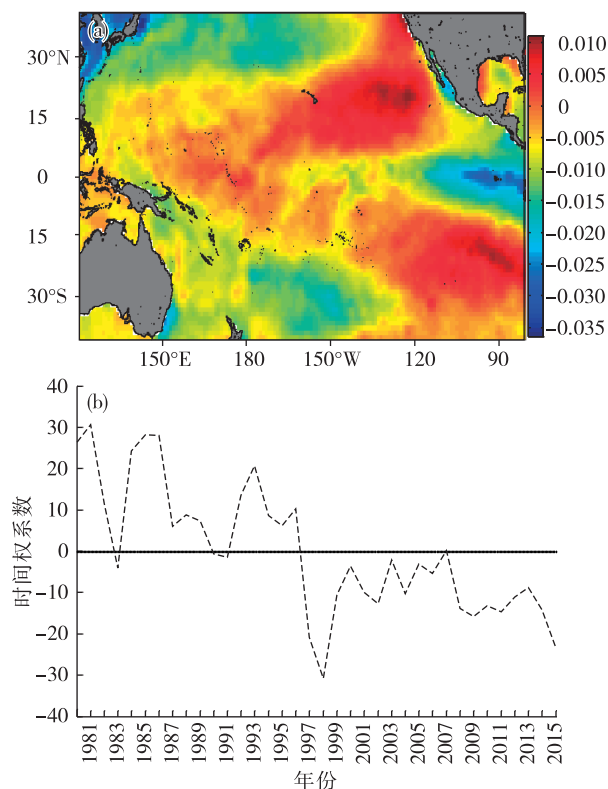


图7 第二模态特征向量的空间分布(a)和时间系数(b)
Fig.7 Spatial pattern (a) and principal components (b) of the second mode

4.2 时频分析

为了讨论暖池东边界经度和 ENSO 变化的周期特征,本文对暖池东边界经度的距平值以及表征 ENSO 的 ONI 进行了小波变换及交叉小波分析。

4.2.1 小波实部功率谱

图8a为 ONI 指数的小波实部交换以及功率谱,红色越深,表示海表温度距平异常升高,可能发生 El Niño 事件;蓝色越深,表示海表温度距平异常降低,可能发生 La Niña 事件。图中显示出 ONI 指数在整个时间频率域上表现出多时间尺度的时间振荡周期特征。从图上清楚地看出,ONI 具有 2~6 a 主周期且通过显著性检验,以及 10~14 a 次周期振荡。2~6 a 的周期振荡在近 37 a 中变化比较稳定,无论是正或者负中心都在 5 a 左右,振幅变化不大。10~14 a 次周期振荡变化也比较稳定,代表着 ENSO 的年代际变化。

图8b为暖池东边界经度的小波实部交换以及功率谱,红色越深,表示暖池东边界越偏东;蓝色越深,表示暖池东边界越偏西。图中显示出暖池

东边界经度在整个时间频率域上表现出多时间尺度的时间振荡周期特征。可以看出暖池东边界经度与 ONI 指数的小波实部变换图非常相似,基本特征也大致一样。暖池东边界经度同样具有 3~

6 a 的主周期并具有一定的显著性,以及 10~14 a 次周期振荡,代表了暖池东边界的年代际变化。由此可知,暖池东边界能很好地预示 ENSO 事件的发生。

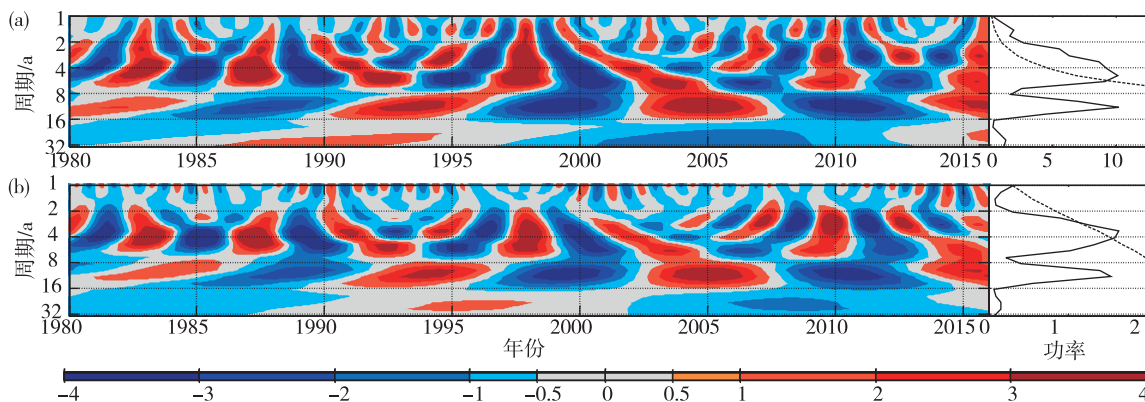


图 8 ONI 指数小波实部功率谱(a)和暖池东边界经度小波实部功率谱(b)

Fig.8 The real part of the wavelet power spectrum of ONI index (a) and warm pool longitude east boundary (b)

4.2.2 交叉小波变换与小波相干

通过交叉小波变换与小波相干谱分析暖池东边界经度与 ONI 指数之间的位相关系,由图 9 可以看出暖池东边界经度与 ONI 有很好的相关关系,在近 37 a 中最显著振荡周期为 2~6 a,暖池东边界经

度与 ONI 在其显著的共同高能量区域几乎呈同相位关系。暖池东边界领先于 ONI 指数 45° ,表示有几乎相同的位相变化,意味着暖池东边界经度将比 ONI 所代表的 ENSO 活动超前 1/8 周期。只是在 1~2 a 准周期振荡时,箭头由前 15 a 暖池东边界稍

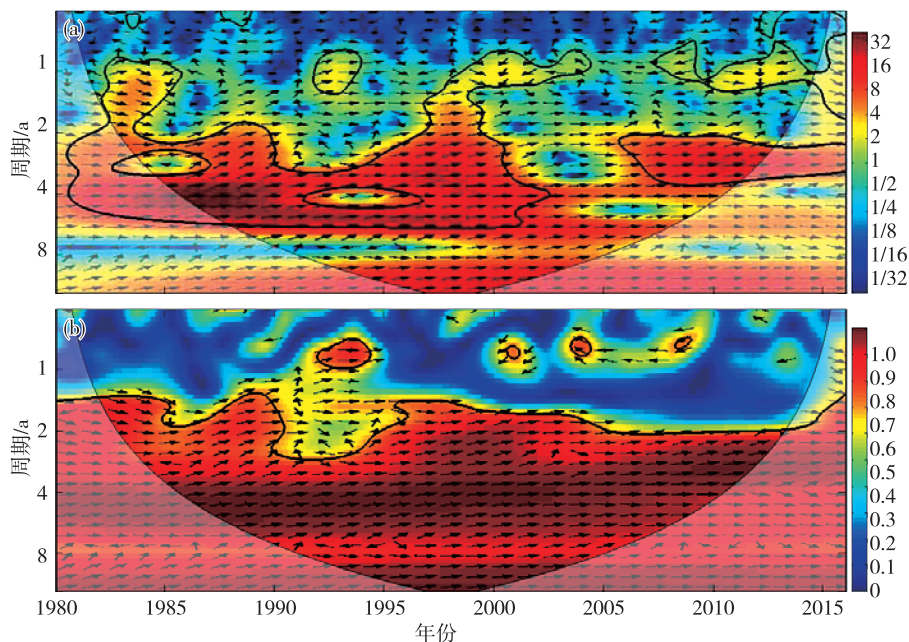


图 9 暖池东边界经度和 ONI 指数的交叉小波交换谱(a)和小波相干谱(b)(箭头表示相位差;细黑线表示为影响锥曲线,该曲线以外的功率谱由于受到边界效应的影响不予考虑;粗黑线包围的范围表示两个时间序列的相关程度通过了 0.05 显著性水平的红噪声标准谱检验)

Fig.9 Exchange cross wavelet spectrum (a) and wavelet coherence spectrum (b) of warm pool eastern boundary longitude and ONI index (arrows: relative phase differences; The thin black line indicates the influence of the cone curve; The parts surrounded by the thick black line indicates that the correlation of the two time series passes the red noise standard spectrum test at 0.05 significance level)

滞后于 ONI, 2000 年后箭头指向下, 表示暖池滞后于 ONI 所代表的 ENSO 活动 90° , 整个 ENSO 过程大致会需要 1~2 a。因此说明暖池东边界经度与 ENSO 活动是同步的, 在出现海温异常时, 暖池东边界便会东伸或者西缩, 所对应的便是 El Niño 事件或者 La Niña 事件的发生。

5 结论

1) Nino3.4 区的 SST 在 El Niño 现象发生时存在较大的正距平, 采用 Nino3.4 区 SSTA 的大幅度突变作为指标, 能够更好地反映 El Niño 事件的发生。

2) El Niño 事件形成过程中, 西太平洋有一暖中心增强逐渐东移, 反映了西太平洋海温异常对 ENSO 事件的响应。

3) 近 37 a 来, 西太暖池东边界变化具有明显的年际变化特征, 平均 3~4 a 经历一次循环, 并出现变化周期延长的现象。其中, SST 在 28.5°C 以上区域的东边界经度点有 4 次甚至延伸至 $140\sim 130^\circ\text{W}$, 分别是: 1982、1987、1997、2015 年, 而且这 4 次均发生了强 El Niño 事件。

4) 西太暖池东边界经度能很好地响应 ENSO 事件的发生时间及强度, 暖池东边界面积指数能较好地响应 ENSO 事件发生时间, 但对强度的响应不及暖池东边界经度对强度的响应明显。

5) 暖池海域 SST 场的主要模态有年际变化以及年代际变化这两种类型, 第一模态能很好地预示 ENSO 的发生。

6) 通过小波分析可以看出, 暖池东边界与 ENSO 具有相同的周期, 且暖池东边界与 ONI 指数存在 $1/8$ 周期的超前关系, 因此暖池的纬向移动对 ENSO 的发生有较好的预报意义。

参考文献:

- [1] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. Mon Wea Rev, 1969, 97 (3): 163-172.
- [2] Garcia. Equatorial Pacific convective activity during the last three ENSO events [J]. Trop Ocean-Atmos Newsl, 1983(21): 6-7.
- [3] Philander S G. The Southern Oscillation: Variability of the tropical atmosphere [J]. International Geophysics, 1990 (46): 9-57.
- [4] 吴增茂, 吴德星, 盛立芳. 赤道西太平洋暖池形成原因探讨 [J]. 青岛海洋大学学报, 1993(S2), 147-152.
- [5] 黄荣辉, 张人禾. ENSO 循环与东业季风环流相互作用过程的诊断研究 [C] // 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 1997: 93-109.
- [6] 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 热带西太平洋纬向风异常对 ENSO 循环的动力作用 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(8): 697-704.
- [7] Wang Z R, Wu D X, Chen X E, et al. ENSO indices and analyses [J]. Adv Atmos Sci, 2013, 30(5): 1491-1506.
- [8] 李崇银. 关于 ENSO 本质的进一步研究 [J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 160-174.
- [9] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. J Geophys Res, 2007, 112(C11): C11007. DOI: 10.1029/2006JC003798.
- [10] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋次表层海温异常 [J]. 大气科学, 1999, 23(5): 513-521.
- [11] 巢纪平. ENSO 热带海洋和大气中和谐的海气相互作用现象 [J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 1-8.
- [12] 张启龙, 翁学传. 热带西太平洋暖池表层热含量分析 [J]. 高原气象, 1999, 18(4): 584-589.
- [13] 陈锦年, 王宏娜, 吕心艳. 西太平洋暖池时空分布特征及其与 ENSO 的关系 [J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 10-19.
- [14] 陈锦年, 王宏娜. 西太平洋暖池热状况变化特征及其东传过程 [J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(6): 669-673.
- [15] Rodgers K B, Friederichs P, Latif M. Tropical Pacific decadal variability and its relation to decadal modulation of ENSO [J]. J Climate, 2004, 17(19): 3761-3774.
- [16] Schopf P S, Burgman R J. A simple mechanism for ENSO residuals and asymmetry [J]. J Climate, 2004, 19(13): 3167-3179.
- [17] Sun D Z. The diabatic and nonlinear aspects of the El Niño-Southern Oscillation: Implications for its past and future behavior [M] // Climate dynamics: Why does climate vary?. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2010: 79-104.
- [18] Liang J, Yang X Q, Sun D Z. The effect of ENSO events on the tropical Pacific mean climate: Insights from an analytical model [J]. J Climate, 2012, 25(21): 7590-7606.
- [19] 黄荣辉, 周连童. 关于我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 1-9.
- [20] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(1): 61-78.
- [21] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Nonlinear Proc Geoph, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [22] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响 [J]. 大气科学, 1994, 18

- (4):456-465.
- [23] 张启龙,翁学传,颜廷壮.西太平洋暖池海域 SST 场的时空特征[J].海洋与湖沼,2001,32(4):349-354.
- [24] 金祖辉,陈隽.西太平洋暖池区海表水温暖异常对东亚夏季风影响的研究[J].大气科学,2002,26(1):57-68.
- [25] 张增信,刘宣飞,腾代高.西太平洋暖池海温分布型及其与东亚大气环流的关系[J].南京气象学院学报,2005,28(6):746-754.
- [26] McPhaden M J, Picaut J. El Niño-Southern Oscillation displacements of the western equatorial Pacific warm pool [J].Science,1990,250(4986):1385-1388.
- [27] 李克让,周春平,沙万英.西太平洋暖池基本特征及其对气候的影响[J].地理学报,1998,53(6):511-519.
- [28] Tudhope A W, Chilcott C P, Mcculloch M T, et al. Variability in the El Nino-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle[J].Science,2001,291(5508):1511-1517.
- [29] Wang C, Enfield D B. The tropical western hemisphere warm pool [J]. Geophys Res Lett, 2001, 28(8):1635-1638.