

构建描述两种 ENSO 类型的新指数^{*1}

秦坚肇 王亚非

QIN Jianzhao WANG Yafei

中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室,北京,100081

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2013-08-30 收稿,2013-12-09 改回.

秦坚肇,王亚非. 2014. 构建描述两种 ENSO 类型的新指数. 气象学报, 72(3): 526-541

Qin Jianzhao, Wang Yafei. 2014. Construction of new indices for the two types of ENSO events. Acta Meteorologica Sinica, 72(3): 526-541

Abstract Taking into account the different equatorial Pacific sea surface temperature (SST) patterns obtained from a combined EOF-regression analysis for the Eastern Pacific type of ENSO (EP-ENSO) and the Centre Pacific type of ENSO (CP-ENSO), this study constructs I_{EP} (EP-ENSO Index) and I_{CP} (CP-ENSO Index) for the two types of ENSO. The analysis is performed for the period of 1950–2011 using the monthly mean Met Office Hadley Centre SST analyses data. Some conclusions are as follows. Firstly, the two indices are nearly orthogonal and the skewness coefficients for I_{EP} and I_{CP} are 1.56 and -0.43 , respectively. In addition, EP-ENSO and CP-ENSO show different periods. The former has two dominant periods, one is near the 2 year band and the other is near the 4–8 year band. The latter has two significant powers around the 2–4 year and 12 year band from 1965 to 1995. Therefore, low correlation, different leading periodicity and skewness are all desirable properties for the above defined indices to separate the EP and CP type of ENSO. Secondly, I_{EP} and I_{CP} indices can describe the location of SST anomalies in the mature period of the two types of El Niño and La Niña events. Thirdly, from the perspective of probability and statistics of random events, two types of El Niño and La Niña events are more strictly defined by using this pair of new indices, which could be applied to monitoring the two types of ENSO effectively and in real-time. Finally, the two new indices can also depict characteristics of the equatorial Pacific SST zonal propagation and evolution during ENSO events, their running lagged correlations capture different ENSO phase propagations and ENSO regime changes associated with the climate shift in 1976/1977. It is also noticed that most strong El Niño events belong to the EP type, but most strong La Niña events are to the CP type, and CP type of La Niña events tend to occur after the EP type of El Niño events.

Key words EP-ENSO, CP-ENSO, SST anomaly, Climate shift

摘要 利用英国气象局哈得来中心的 1950—2011 年月平均海表温度资料,采用联合回归-经验正交函数分解方法得到东部太平洋型 ENSO(东部型 ENSO)和中部太平洋型 ENSO(中部型 ENSO)的热带太平洋海温分布特点,进而定义了计算相对简单的东部型 ENSO 指数(I_{EP})和中部型 ENSO 指数(I_{CP})来分别描述两类 ENSO。研究结果表明:首先,构建的 I_{EP} 和 I_{CP} 的相关性很小,接近正交,而且 I_{EP} 和 I_{CP} 能够反映两类 ENSO 不一致的偏度和周期,因此,这对指数能够清楚地区分两类 ENSO。其次, I_{EP} 和 I_{CP} 这两个指数可以描述厄尔尼诺和拉尼娜事件成熟期主要海表温度异常区的位置。再次,应用 I_{EP} 和 I_{CP} 从随机事件概率统计的角度给出两类厄尔尼诺和拉尼娜事件较为严格的定义,以便实时有效地监测两类 ENSO。最后,利用新指数对两类 ENSO 的特征进行研究发现,强厄尔尼诺事件一般属于东部型,而强拉尼娜事件则为中部型,并且中部型拉尼娜事件

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB417202)、国家自然科学基金项目(41375091)、灾害天气国家重点实验室基本科研业务费。

作者简介:秦坚肇,主要从事海气相互作用研究。E-mail: jianzhaoqin999@163.com

通讯作者:王亚非,主要从事大尺度环流研究。E-mail: yfwang@cma.cma.gov.cn

发生的前期是东部型厄尔尼诺,此外,ENSO 的发生演变机制在 1976/1977 年前后发生了改变。

关键词 东部型 ENSO, 中部型 ENSO, 海表温度异常, 气候态转变

中图法分类号 P461

1 引言

厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)是热带太平洋上大尺度海-气相互作用的强烈体现,其对全球天气及气候变化具有重要影响。Bjerknes(1966, 1969)首先阐述了南方涛动和厄尔尼诺的物理联系及动力学机制,Rasmusson 等(1982)定义了一个典型的厄尔尼诺现象,其海表面异常升温起源于南美沿岸并向西传播到赤道太平洋。Philander(1983)统计 1950—1983 年的厄尔尼诺事件发现,虽然典型厄尔尼诺占绝大多数,但 1963 和 1982 年的厄尔尼诺事件并没有遵循典型厄尔尼诺的发生规律,而主要表现为海表异常升温首先出现在赤道中部太平洋,再向东传播到南美沿岸。近些年来,许多气象学者也陆续确认除了典型厄尔尼诺以外还存在一类中部太平洋升温的厄尔尼诺,美国国家海洋大气局(NOAA)2003 年据此提出用 Nino3.4 指数定义厄尔尼诺(<http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s2095.htm>),这主要考虑到 Nino3.4 区能够覆盖赤道中太平洋而避免遗漏这种非典型的厄尔尼诺现象。Larkin 等(2005a, 2005b)进一步根据这种定义将海表升温区域中心在日期变更线附近的厄尔尼诺命名为“日界线厄尔尼诺”。同样,Ashok 等(2007)将热带太平洋海表温度进行经验正交函数 EOF 分解成功得到前两个模态分别对应典型厄尔尼诺和中部太平洋升温的现象,并将后者命名为“厄尔尼诺 Modoki”。Kao 等(2009)进一步采用联合回归-经验正交函数分解方法分离两类 ENSO 得到更为清晰的结果,并将典型厄尔尼诺称为“东部型 ENSO”,将升温发生在赤道中部太平洋的现象称为“中部型 ENSO”。类似地,Li 等(2012)将热带太平洋海温异常进行经验正交函数分解得出的前两个模态相加或者相减得到两种海温异常分布类型,将此分别定义为中部型和东部型厄尔尼诺事件,研究发现这种分类方法可以较好地反映两类厄尔尼诺对中国东部气候的影响。Kug 等(2009)根据厄尔尼诺事件最大升温区的不同位置将升温主体区域在东部太平洋乃至中部太平洋的厄尔尼诺称为“冷舌厄尔尼诺”,而

将源于中部太平洋升温的厄尔尼诺称为“暖池厄尔尼诺”。Kug 等(2010)还通过数值模拟验证了暖池厄尔尼诺和冷舌厄尔尼诺的存在,并发现两类厄尔尼诺事件有着不同的物理演变机制。伴随着海表温度异常(SSTA)中心位置和物理演变机制的差异,两类 ENSO 所引起的环流异常及其气候效应也都表现出不同的空间分布特征(Weng, et al, 2007; Feng, et al, 2010, 2011a, 2011b; Gouirand, et al, 2013; Tedeschi, et al, 2013; Yadav, et al, 2013; 冯娟等, 2010)。因此,正确认识和监测上述两类 ENSO,对气候预测是至关重要的。

对于两类 ENSO 类型的判定,一般着眼于海表升温区的主要位置、整个变暖过程的演变特征、发现最初升温位置以及海表温度的分布类型等。许多学者(符淙斌等, 1985; 林学椿等, 1993; 唐佑民等, 1994; 赵永平等, 1998; Kug, et al, 2009)主要靠对比两者的相对位置和特点粗略判定 ENSO 类型,这是从定性方面来考量。也有的试图通过定义几组指数将其定量化,Ashok 等(2007)和 Li 等(2010)根据厄尔尼诺 Modoki 的热带太平洋海温分布呈三极子结构定义了厄尔尼诺 Modoki 指数和改进的厄尔尼诺 Modoki 指数;Ren 等(2011)对 Nino3、Nino4 指数进行坐标变换提出描述暖池厄尔尼诺和冷舌厄尔尼诺的 N_{WP} 和 N_{CT} 指数;类似地,Takahashi 等(2011)将常用的 Nino 指数(Nino3、Nino4、Nino3.4 和 Nino1+2)分别拟合两类 ENSO 并进行经验正交函数分解而得到的时间序列,构造成相互正交的 E 和 C 指数,并用来分别描述东部型 ENSO 和中部型 ENSO;另外,Yu 等(2011)发现两类厄尔尼诺次表层海洋温度的分布明显不同,进而选取赤道东部太平洋和赤道中部太平洋次表层海洋温度定义两类厄尔尼诺事件的次表层海温指数;陈圣劼等(2013)研究发现厄尔尼诺和厄尔尼诺 Modoki 的海-气耦合特征存在显著差异,进而选取上层热含量定义了 HCEI 和 HCEMI 指数来分别反映和区分两类厄尔尼诺与大气间的耦合特征。

相比之下,考虑到东部型 ENSO 和中部型 ENSO 与 Nino4 指数和 Nino1+2 指数相关系数较高的

特点, Kao 等(2009)提出的联合回归-经验正交函数分解方法可得到比较客观的 ENSO 分类, 并且可以采用各自第 1 模态的时间序列(PC1)分别描述东部型 ENSO 和中部型 ENSO, 这一对时间序列可以较好地描述两类 ENSO 事件的演变过程和成熟期变温强度, 但存在两个缺点: (1) 计算时间序列的过程较为复杂繁琐, (2) 判定标准比较含糊, 不便于监测两类 ENSO。此外, Ashok 等(2007)、Kao 等(2009)、Kug 等(2011)虽提及存在两类冷事件, 但没有对其进行关注, 而是过分关注两类暖事件, 不对冷事件分类进行研究显然是不全面的。为了补充或解决以上问题, 本研究拟在已有研究特别是 Kao 等(2009)对两类 ENSO 分类的基础上, 利用海表温度资料, 综合考虑热带太平洋异常海温的分布, 简化计算过程, 旨在定义新的指数来描述两类 ENSO, 并且试图利用新指数确定出更严格的判定标准从而划分和判定厄尔尼诺和拉尼娜的类型与强度, 进一步探讨东部型/中部型厄尔尼诺和东部型/中部型拉尼娜的演变特征, 为监测和预测两类 ENSO 提供新的方法和思路。

2 数据和方法

所用的资料取自英国气象局哈得来中心全球月平均的海温数据(Rayner, et al, 2003), 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间选取 1950 年 1 月—2011 年 12 月。近几十年在全球变暖的大背景下海温有明显的升高趋势, 为了消除这种变暖的趋势, 美国国家气象局气候预测中心(CPC)提出以 5 年为步长移动的海温 30 年滑动平均定义为海温气候态, 比如: 1946—1950 年的气候态选取 1931—1960 年的平均, 1951—1955 年的气候态选取 1936—1965 年的平均, 1956—1960 年的气候态选取 1941—1970 年的平均, …, 依次类推, 具体参考 http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml。

本研究的海表温度异常是通过采用上述计算海温气候态的方法去除海温月平均趋势得到的。

采用的 Nino3、Nino4、Nino3.4 和 Nino1+2 指数分别是海表温度异常(SSTA)在 Nino3 (5°N — 5°S , 150° — 90°W)、Nino4 (5°N — 5°S , 160°E — 150°W)、Nino3.4 (5°N — 5°S , 170° — 120°W) 和 Nino1+2 区 (0 — 10°S , 90° — 80°W) 的区域平均。依据

Kao 等(2009)提出的联合回归-经验正交函数分解方法分离两类 ENSO: 首先计算海温异常和 Nino1+2 指数(Nino4 指数)的回归值, 然后计算海温异常与回归值的差从而得到残余海温异常, 最后通过残差海温异常做经验正交函数分解得到中部型(东部型) ENSO 海温主导模态的空间分布。

由 Nino3.4 指数确定的厄尔尼诺和拉尼娜事件, 是依据美国气候预测中心提出的定义确定的, 即 3 个月滑动平均 Nino3.4 区海温的正(负)距平不低于(不高于) 0.5°C (-0.5°C) 且至少持续 5 个月的现象称为厄尔尼诺(拉尼娜) (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)。

3 新指数构建

Li 等(2010)认为 Nino1+2 和 Nino4 指数都含有厄尔尼诺和厄尔尼诺 Modoki 的信号, 但前者偏重于典型厄尔尼诺而后者偏重于厄尔尼诺 Modoki; 另外, 由于 Nino3 区没有充分考虑西部太平洋暖池的作用且覆盖面积有限, 选用 Nino3 指数描述厄尔尼诺虽然能够排除厄尔尼诺 Modoki, 但不能完全捕获厄尔尼诺事件。Kao 等(2009)提出的联合回归-经验正交函数分解方法可以大致弥补这两点不足。首先使用联合回归-经验正交函数分解方法计算得到东部型和中部型 ENSO 的第 1 模态, 结果表明两类 ENSO 的此模态均通过 North 等(1982)显著性检验标准, 并且两者第 1 模态的方差贡献率分别为 39% 和 41%。从两类 ENSO 对应的海温第 1 模态的空间分布(图 1)可以看出, 东部型 ENSO 对应的热带太平洋海温呈偶极子结构, 即海温正异常中心在赤道太平洋南美沿岸, 而弱海温负异常中心在西太平洋暖池附近, 两者以日期变更线为界(图 1a); 而中部型 ENSO 对应的热带太平洋海温呈三极子结构, 即在赤道太平洋日界线附近为明显的海温正异常中心, 在 Nino1+2 区和赤道太平洋西岸是海温负异常中心(图 1b)。因此, 本研究定义 I_{EP} (东部型 ENSO 指数) 和 I_{CP} (中部型 ENSO 指数) 为

$$I_{EP} = A_{EP} \times T_{[A]} - B_{EP} \times T_{[B]} \quad (1)$$

$$I_{CP} = A_{CP} \times T_{[A]} - B_{CP} \times T_{[B]} - C_{CP} \times T_{[C]} \quad (2)$$

式(1)中, $T_{[A]}$ 和 $T_{[B]}$ 分别表示 A (5°S — 5°N , 110° — 80°W) 和 B (5°S — 10°N , 150°E — 180°) 范围内海温的区域平均。因为界定的海区有着不同的范围, 若

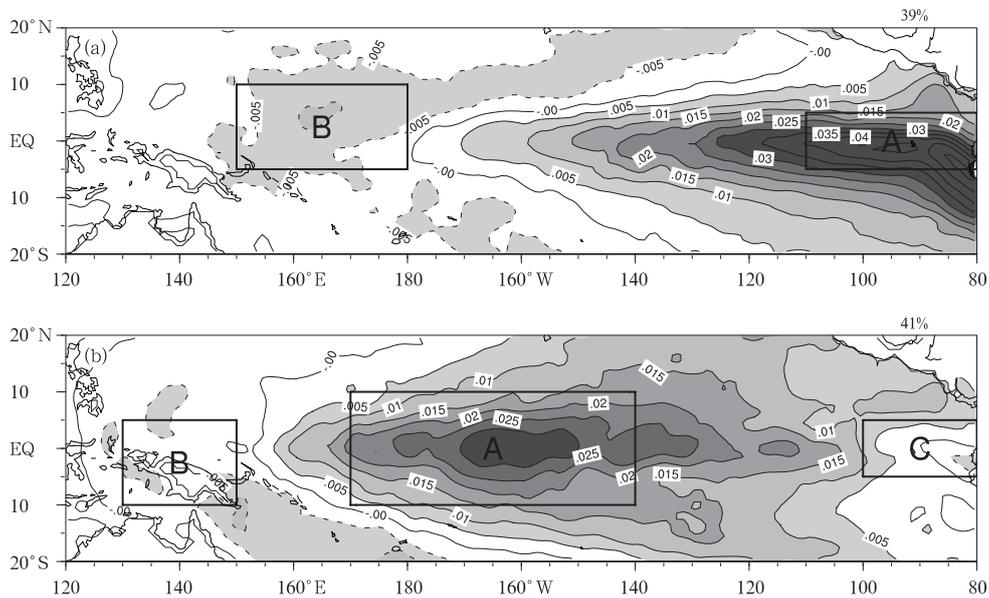


图 1 用联合回归-经验正交函数分解方法计算 1950—2011 年海温得到东部型 ENSO(a)和中部型 ENSO(b) 分别对应的第 1 模态空间分布(单位: $^{\circ}\text{C}$, 图中等值线间隔为 0.005°C , 右上方数表示各自的方差贡献率, 加粗的矩形范围表示新指数选定的区域)

Fig. 1 Leading EOF SST patterns (unit: $^{\circ}\text{C}$) obtained from the combined EOF-regression analysis based on the data for 744 months 1950 - 2011 for the Eastern Pacific type (a) and the Central Pacific type (b) of ENSO (contour interval is for 0.005°C , the fractions of variance of residual SST field explained by each EOF mode are indicated in the upper right-hand corner of each panel, bold rectangles represent the selected area for constructing the index)

均等权处理势必会加大范围较小海区的比重, 所以将单个海区面积和总面积之比作为指数的权重系数, 如 $A_{EP} = 2/5, B_{EP} = 3/5$ 。同理, 式(2)中 $T_{[A]}$ 、 $T_{[B]}$ 和 $T_{[C]}$ 分别表示 A ($10^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\text{E} - 140^{\circ}\text{W}$)、B ($10^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}, 130^{\circ} - 150^{\circ}\text{E}$) 和 C ($5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}, 100^{\circ} - 80^{\circ}\text{W}$) 范围内海温异常的区域平均, 其中, 权重系数 $A_{CP} = 10/15, B_{CP} = 3/15, C_{CP} = 2/15$ 。

利用前面的定义计算得到 1950—2011 年 I_{EP} 和 I_{CP} 的演变, 与东部型 ENSO 和中部型 ENSO 联合回归-经验正交函数分解得到的时间序列(PC1)相比较可以看出(图 2), 两者基本重合, 差异很小, 相关系数均可达到 0.94。其中, I_{EP} (图 2a) 和 I_{CP} (图 2b) 的偏度分别为 1.56 和 -0.43, 这种空间不对称性说明, 在东部型事件中强厄尔尼诺发生频率高于强拉尼娜, 与之相反, 在中部型事件中强拉尼娜发生频率高于强厄尔尼诺, 当然东部型拉尼娜和中部型厄尔尼诺事件也会经常发生, 这与 Kao 等(2009)指出的强东部型厄尔尼诺和强中部型拉尼娜发生更频繁一致。另外, I_{EP} 或 I_{CP} 还能体现 Nino3.4 指数定义的强厄尔尼诺和强拉尼娜事件, 例如: I_{EP} 中 1982/

1983、1997/1998 年强厄尔尼诺和 1954/1956、1970/1972、1988/1989 年强拉尼娜, I_{CP} 中 1965/1966、2009/2010 年强厄尔尼诺和 1973/1974、1974/1976、1988/1989、1998/2000、2007/2008、2010/2011 年强拉尼娜。此外, 计算得到 I_{EP} 和 I_{CP} 的相关系数只有 0.03, 比东部型、中部型的时间序列(PC1)的相关系数(-0.35)要小得多, 说明新指数 I_{EP} 和 I_{CP} 的相互依赖减小, 彼此更加接近正交。下面进一步分析 Nino3.4 指数判定的厄尔尼诺和拉尼娜事件与 I_{EP} 、 I_{CP} 的联系, 即研究不同强度的冷、暖事件类型的分布, 图 3 给出 1950—2011 年标准化 I_{EP} 、 I_{CP} 逐月散点分布, 点的大小和颜色深浅代表相应月份的 Nino3.4 指数的大小(点的大小与 Nino3.4 指数的绝对值成比例, 黑点、深灰点、浅灰点分别代表 Nino3.4 指数处于 $[1, +\infty)$ 、 $(-\infty, -1]$ 、 $(-1, 1)$), 即可代表事件的强度。可以看出, 标准化 Nino3.4 指数为 $[1, +\infty)$ (黑点)的月份主要在第一象限, 即此时 $I_{EP} > 0$ 且 $I_{CP} > 0$, 其中大多数月份靠近 I_{CP} 轴(纵轴), 而 Nino3.4 指数较大的月份较集中在 I_{EP} 轴(横轴), 相反, 标准化 Nino3.4 指数为 $(-\infty, -1]$ (深灰点)

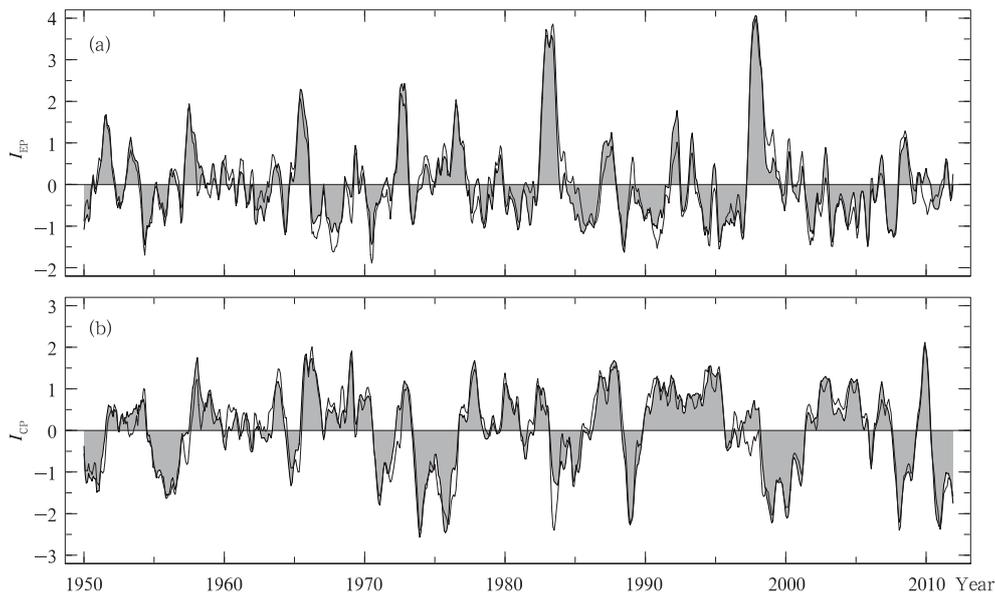


图2 1950—2011年标准化3个月滑动平均的逐月新指数(I_{EP}/I_{CP} , 填色)

和回归-经验正交函数分解的主成分 PC1(黑曲线)(a. 东部型 ENSO, b. 中部型 ENSO)

Fig. 2 Time evolution of normalized three-month running mean monthly new index (I_{EP}/I_{CP} , shaded) and PC1 (black line) from the combined EOF-regression from 1950 to 2011 (a. EP-ENSO, b. CP-ENSO)

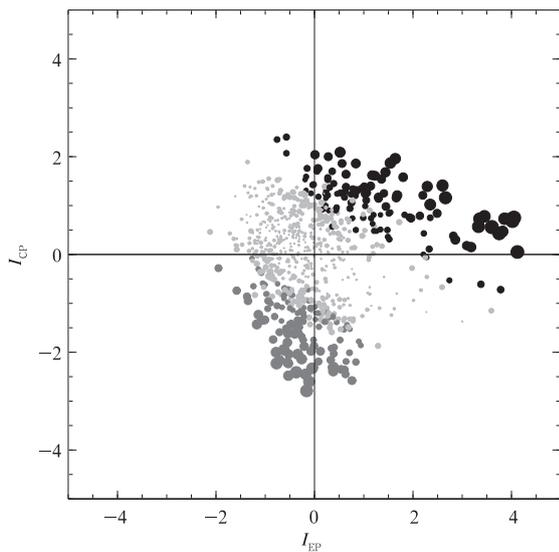


图3 1950—2011年标准化的逐月 I_{EP} - I_{CP} 散点分布 (散点的大小和标准化 Nino3.4 指数的绝对值成比例, 标准化 Nino3.4 指数 $[1, +\infty)$ (黑点)、 $(-\infty, -1]$ (深灰点)、 $(-1, 1)$ (浅灰点))

Fig. 3 Scatter plot of standardized monthly values of the I_{EP} and I_{CP} from 1950-2011

(The dot size is proportional to the value of standardized Nino3.4 SST index in the corresponding month.

The dot is colored in black if its Nino3.4 SST index is larger than 1 standard deviation, dark grey if the SST index is smaller than -1 standard deviation and light grey if the SST index is between -1 standard deviation and 1 standard deviation)

的月份主要在第三象限,即此时 $I_{EP} < 0$ 且 $I_{CP} < 0$, 其中绝大多数的月份和 Nino3.4 指数较大的月份均靠近 I_{CP} 轴,说明厄尔尼诺事件东部型和中部型均可,但强厄尔尼诺更倾向于东部型,而拉尼娜事件中 I_{EP} 均很小,这点在强拉尼娜中更明显,拉尼娜更倾向中部型。 I_{EP} 和 I_{CP} 之间较独立的关系,有助于 I_{EP} 和 I_{CP} 清楚地区分东部型 ENSO 和中部型 ENSO。

以往研究普遍认为 ENSO 的主周期是 3—6 年,而东部型 ENSO 和中部型 ENSO 的周期目前尚不清楚,图 4 给出 I_{EP} 和 I_{CP} 的小波能量和总能量谱。从 I_{EP} 小波能量谱可以看出,在 1975 年之前东部型 ENSO 主要表现为 2 年的周期振荡,1976/1977 年后出现了另一个 4—8 年的周期,这与 An 等(2000)提出 ENSO 周期在 1976/1977 年前后从 2 年转变为 4 年的观点一致;从 I_{EP} 小波总能量谱可以看出,1950—2011 年东部型 ENSO 的 3—8 年周期超过显著性为 5% 的红噪声标准谱检验,其中 5 年周期尤为显著(图 4a)。与东部型 ENSO 不同,中部型 ENSO 在 1950—1964 和 1996—2011 年这两个时段没有明显的周期,而在 1965—1995 年主要表现为 2—4 年和准 12 年的周期,说明中部型 ENSO 较东部型 ENSO 有强的年代际变化;而且中部型 ENSO 的 2—5

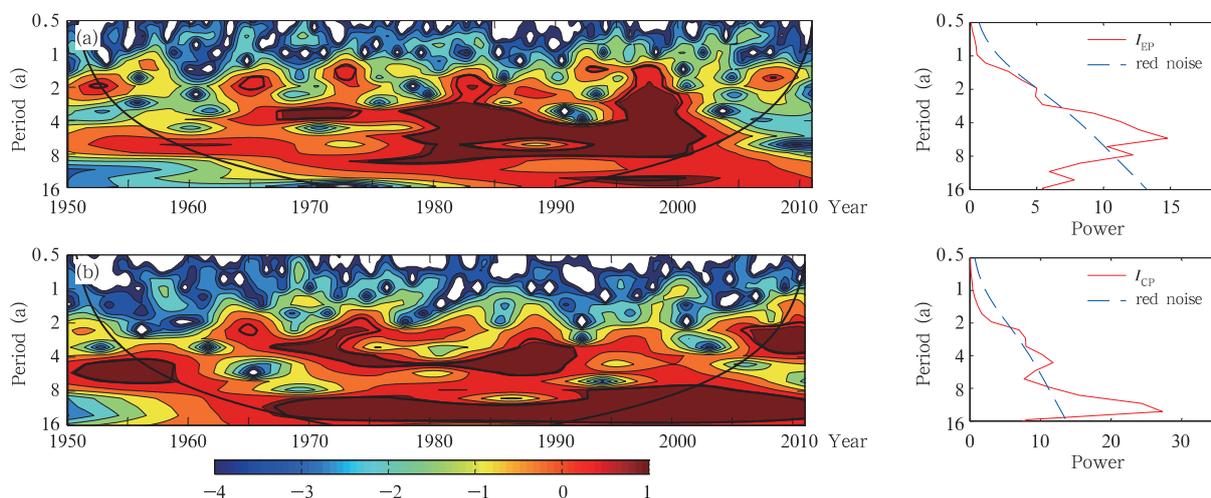


图 4 1950—2011 年标准化 3 个月滑动平均的 I_{EP} (a)、 I_{CP} (b) 的小波能量谱(左)

(粗线代表超过 5% 的显著性水平, 弧线以下是不确定的) 和小波总能量(右)(红色实线: 新指数, 蓝色虚线: 5% 的红噪声标准谱)

Fig. 4 Wavelet power spectrum (left) (using the Morlet wavelet) of the standardized three-month running mean monthly I_{EP} (a) and I_{CP} (b) in 1950 - 2011

(Below the curve regions indicate the cone-of-influence where it is uncertain, the thick black contour indicates that it is significant at the 95% confidence level, and the global wavelet power spectra (right) for I_{EP}/I_{CP} (solid-red line), the dashed-blue line is significant at the 95% confidence level for I_{EP}/I_{CP} , assuming a red noise process)

年和 8—16 年周期均超过显著性为 5% 的红噪声标准谱检验, 其中 4 年和 14 年周期最为突出(图 4b)。因此, I_{EP} 和 I_{CP} 能够清晰地分辨出两类 ENSO 的不同周期, 更加表明这两个指数可以有效地区分东部型和中部型 ENSO。

4 新指数对 ENSO 事件的分类和监测

4.1 用新指数对 ENSO 事件分类

前一节得出 I_{EP} 和 I_{CP} 能较清晰地区分两类 ENSO, 下面利用这两个指数判断已存在 ENSO 事件的类型, 特别是判定冷事件的类型。针对近些年来 ENSO 中部型事件多发的趋势, Nino3.4 指数被认为是较权威的监测指标, 所以首先根据 Nino3.4 指数确定厄尔尼诺和拉尼娜事件, 然后利用 I_{EP} 和 I_{CP} 区分东部型 ENSO 和中部型 ENSO。事件发生的高峰期是指 Nino3.4 指数达到极值的时间, 演变类型根据 I_{EP} 和 I_{CP} 的演变确定, 成熟类型是指事件在成熟期(高峰期当月和前后各一个月)的类型。表 1 和表 2 分别给出 1950—2011 年厄尔尼诺事件和拉尼娜事件的统计特征, 其中 18 个厄尔尼诺事件, 总持续时间是 157 个月, 占 742 个月的 21%, 平均每

个事件持续 8.7 个月, 而 14 个拉尼娜事件, 总持续时间达 187 个月, 占 742 个月的 25%, 平均每个事件持续 13.4 个月, 因此, 冷、暖事件的生命史(1 个厄尔尼诺事件持续期与 1 个拉尼娜事件持续期之和)大概是 22.1 个月, 即 1.84 年。

不同指数在特定事件中相关性的强弱在一定程度上可以反映其对此类事件的分类效果, 例如, Kug 等(2011) 计算得到 Nino3 和 Nino4 指数在冷、暖事件成熟期中的相关系数分别为 -0.28(厄尔尼诺)和 0.72(拉尼娜), 说明采用 Nino3 和 Nino4 指数能较清楚地区分两类厄尔尼诺, 但其区分两类拉尼娜的能力却很有限, 同理, 本研究计算得到厄尔尼诺和拉尼娜成熟期(高峰期当月和前后各一个月) I_{EP} 和 I_{CP} 的相关系数分别为 -0.52 和 -0.28, 因此, 与前者相比, I_{EP} 和 I_{CP} 这两个指数不仅能较好地判定东部型拉尼娜和中部型拉尼娜成熟期主要降温区的位置, 而且其对暖事件的分类也更清楚, 说明 I_{EP} 和 I_{CP} 能更有效地区分东部型 ENSO 和中部型 ENSO。仿照已有研究使用 Nino3 和 Nino4 指数相对大小判定厄尔尼诺(Yeh, et al, 2009; Kug, et al, 2009) 和拉尼娜(Yuan, et al, 2012) 事件的类型, 本研究根

表 1 1950—2011 年厄尔尼诺事件的特征

Table 1 List of the El Niño events during 1950–2011

序列	年份	开始—结束时间	持续时间(月)	高峰期	演类类型	成熟类型
1	1951	1951 年 7 月—1951 年 12 月	6	1951 年 10 月(秋)	EP	EP
2	1957/1958	1957 年 5 月—1958 年 4 月	12	1958 年 1 月(冬)	MIX	CP
3	1963/1964	1963 年 6 月—1964 年 1 月	8	1963 年 11 月(秋)	CP	CP
4	1965/1966	1965 年 6 月—1966 年 4 月	11	1965 年 11 月(秋)	MIX	CP
5	{ 1968/1969 1969/1970	1968 年 11 月—1969 年 5 月	7	1969 年 1 月(冬)	CP	CP
6		1969 年 8 月—1970 年 1 月	6	1969 年 11 月(秋)	CP	CP
7	1972/1973	1972 年 6 月—1973 年 3 月	10	1972 年 11 月(秋)	MIX	EP
8	{ 1976/1977 1977/1978	1976 年 9 月—1977 年 2 月	6	1976 年 12 月(冬)	EP	EP
9		1977 年 9 月—1978 年 1 月	5	1977 年 11 月(秋)	CP	CP
10	1982/1983	1982 年 5 月—1983 年 6 月	14	1983 年 1 月(冬)	MIX	EP
11	1986/1988	1986 年 9 月—1988 年 2 月	18	1987 年 8 月(夏)	MIX	CP
12	1991/1992	1991 年 10 月—1992 年 6 月	9	1992 年 1 月(冬)	MIX	EP
13	1994/1995	1994 年 9 月—1995 年 2 月	6	1994 年 12 月(冬)	CP	CP
14	1997/1998	1997 年 5 月—1998 年 4 月	12	1997 年 12 月(冬)	EP	EP
15	2002/2003	2002 年 7 月—2003 年 2 月	8	2002 年 11 月(秋)	CP	CP
16	2004	2004 年 8 月—2004 年 12 月	5	2004 年 11 月(秋)	CP	CP
17	2006/2007	2006 年 9 月—2007 年 1 月	5	2006 年 11 月(秋)	CP	CP
18	2009/2010	2009 年 7 月—2010 年 3 月	9	2009 年 12 月(冬)	CP	CP

注:大括号表示相连的厄尔尼诺事件即 Nino3.4 指数在相邻事件中符号不变;MIX 表示混合型,EP 表示东部型,CP 表示中部型。

表 2 同表 1,只是对于拉尼娜事件

Table 2 As in Table 1 but for the La Niña events

序列	年份	开始—结束时间	持续时间(月)	高峰期	演变类型	成熟类型
1	1950/1951	1950 年 2 月—1951 年 3 月	14	1950 年 2 月(冬)	MIX	CP
2	1954/1956	1954 年 6 月—1956 年 12 月	31	1955 年 11 月(秋)	MIX	CP
3	1964	1964 年 7 月—1964 年 12 月	6	1964 年 11 月(秋)	MIX	CP
4	1970/1972	1970 年 7 月—1972 年 1 月	19	1971 年 2 月(冬)	MIX	CP
5	{ 1973/1974 1974/1976	1973 年 6 月—1974 年 6 月	13	1973 年 12 月(冬)	MIX	CP
6		1974 年 10 月—1976 年 3 月	18	1975 年 12 月(冬)	CP	CP
7	{ 1983/1984 1984/1985	1983 年 10 月—1984 年 2 月	5	1983 年 11 月(秋)	CP	CP
8		1984 年 10 月—1985 年 7 月	10	1984 年 12 月(冬)	CP	CP
9	1988/1989	1988 年 5 月—1989 年 6 月	14	1988 年 11 月(秋)	MIX	CP
10	1995/1996	1995 年 9 月—1996 年 2 月	6	1995 年 11 月(秋)	EP	EP
11	{ 1998/2000 2000/2001	1998 年 7 月—2000 年 7 月	25	2000 年 1 月(冬)	CP	CP
12		2000 年 10 月—2001 年 2 月	5	2000 年 12 月(冬)	CP	CP
13	2007/2008	2007 年 8 月—2008 年 5 月	10	2008 年 1 月(冬)	MIX	CP
14	2010/2011	2010 年 7 月—2011 年 5 月	11	2010 年 12 月(冬)	CP	CP

注:大括号表示相连的拉尼娜事件即 Nino3.4 指数在相邻事件中符号不变;MIX 表示混合型,EP 表示东部型,CP 表示中部型。

据事件成熟期(高峰期当月和前后各一个月) I_{EP} 和 I_{CP} 相对大小确定厄尔尼诺和拉尼娜事件的成熟类型(表 1 和表 2),对于厄尔尼诺,如果成熟期的 I_{EP} 大于 I_{CP} 则属于东部型,相反则为中部型,同样对于拉尼娜,如果成熟期 I_{EP} 小于 I_{CP} 则属于东部型,相反则为中部型。下面进一步探讨使用 I_{EP} 和 I_{CP} 的相对大小来判断具体事件成熟期类型的合理性,为此,综合考虑事件成熟期 I_{EP} 和 I_{CP} 的大小和成熟期赤道太平洋海温异常中心的位置。首先,图 5 给出厄尔尼诺和拉尼娜事件成熟期的 I_{EP} 、 I_{CP} 、Nino3.4 指数的

大小,厄尔尼诺事件(图 5a)中 1951、1972/1973、1982/1983、1997/1998 年成熟期 I_{EP} 明显大于 I_{CP} ,属于东部型厄尔尼诺;而 1963/1964、1968/1969、1977/1978、1994/1995、2002/2003、2004、2009/2010 年成熟期 I_{EP} 明显小于 I_{CP} ,属于中部型厄尔尼诺。拉尼娜事件(图 5b)中 1995/1996 年成熟期 I_{EP} 明显小于 I_{CP} ,属于东部型拉尼娜;而 1964/1965、1970/1972、1973/1974、1974/1976、1983/1984、1988/1989、1998/2000、2007/2008、2010/2011 年成熟期 I_{EP} 明显大于 I_{CP} ,属于中部型拉尼娜。其次,从厄尔

厄尔尼诺和拉尼娜事件成熟期热带太平洋海温的分布(图略)情况可以看出,成熟类型为东部型的厄尔尼诺和拉尼娜事件此时升温和降温中心位于东部太平洋,而成熟类型为中部型的厄尔尼诺和拉尼娜事件此时升温和降温中心位于中部太平洋,说明 I_{EP} 和 I_{CP} 能较好地描述两类冷、暖事件成熟期海温异常中心的位置和整个太平洋海温的分布特点。此外,从图 5a 还可以看出,成熟类型为东部型厄尔尼诺事件成熟期的 Nino3.4 指数比成熟类型为中部型厄尔尼诺事件成熟期的 Nino3.4 指数大,这意味着近几十年来较强的厄尔尼诺事件升温主体主要在赤道太平洋南美沿岸。此外,比较 Nino3.4 指数和 I_{EP} 、 I_{CP} 可以看出,除了 20 世纪最强的两次暖事件(1982/1983、1997/1998 年)外,其余的事件无论厄尔尼诺还是拉尼娜, Nino3.4 指数均较接近 I_{CP} , 说明 1950—2011 年海温异常升高(厄尔尼诺)和降低(拉尼娜)主要发生在中部太平洋。为了更直观地分析

1950—2011 年厄尔尼诺和拉尼娜事件成熟类型的分布,图 6 给出厄尔尼诺(表 1)和拉尼娜(表 2)事件成熟期的 I_{EP} 和 I_{CP} 散点分布,可以看出,此时厄尔尼诺和拉尼娜事件均集中在 I_{CP} 轴,即成熟期的升温(厄尔尼诺)类型中部型多于东部型,成熟期的降温(拉尼娜)类型较厄尔尼诺事件更集中于中部型,而且所有厄尔尼诺事件成熟期的 $I_{CP} > 0$,相反,拉尼娜事件成熟期的 $I_{CP} < 0$,意味着成熟期 I_{CP} 和 Nino3.4 指数的符号一致,并且计算得到逐月的 I_{CP} (I_{EP}) 和 Nino3.4 指数的相关系数分别为 0.83(0.55),相比之下, I_{CP} 与 Nino3.4 指数相关较强,因为在定义 I_{CP} 时,本研究选取了热带太平洋的 3 个关键区域,其中比重最大(权重系数为 10/15)的区域在太平洋中部($10^{\circ}\text{S}—10^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\text{E}—140^{\circ}\text{W}$),其范围与 Nino3.4 区($5^{\circ}\text{N}—5^{\circ}\text{S}, 170^{\circ}\text{W}—120^{\circ}\text{W}$)的范围大部分重叠,即可以用 I_{CP} 判断某一个事件是冷事件还是暖事件。

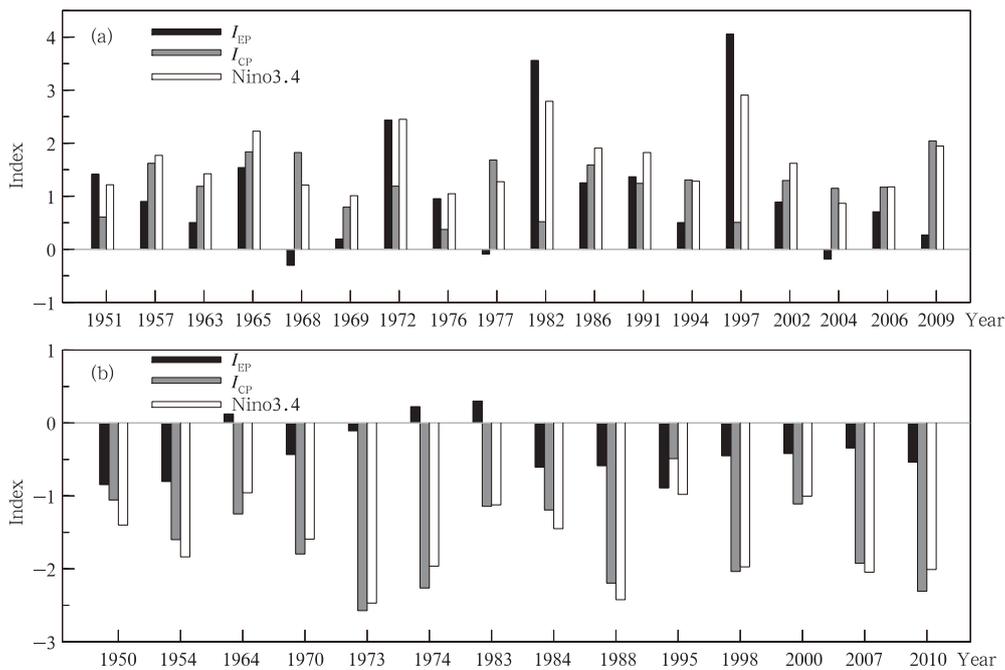


图 5 1950—2011 年根据 CPC 定义各个厄尔尼诺(a)和拉尼娜(b)事件在成熟期(高峰期当月和前后各一个月)的标准化 I_{EP} (黑)、标准化 I_{CP} (灰)、标准化 Nino3.4 指数(白)(横轴年份是事件开始的那年)

Fig. 5 Normalized- I_{EP} (black bar), normalized- I_{CP} (grey bar), normalized -Nino3.4 (white bar) values for the El Niño (a) and La Niña (b) years during 1950 - 2011

(The El Niño and La Niña events are obtained according to the definition of CPC.

The I_{EP} , I_{CP} , Nino3.4 indices are calculated using the Hadley SSTa covering the month in which the Nino3.4 index reaches the maximum (El Niño) or minimum (La Niña)

and the months before and after that, and the El Niño, La Niña years are referred to

as the years when the event begins, there are 18 El Niño cases and 14 La Niña cases during 1950 - 2011)

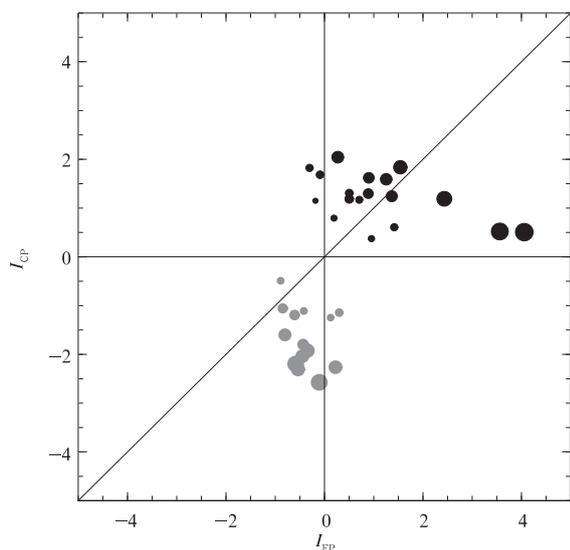


图6 厄尔尼诺(黑点)、拉尼娜(灰点)事件在成熟期(高峰期当月和前后各一个月)标准化的 I_{EP} 与 I_{CP} 的散点分布

(点的大小和成熟期标准化 Nino3.4 指数的绝对值成比例)
 Fig.6 Scatter plot of standardized values of the I_{EP} and I_{CP} obtained averaged over the period from the month before the climax to the month after the climax in the El Niño (black dot) and La Niña (grey dot) years (The dot size is proportional to the value of standardized Nino3.4 SST index in the corresponding mature phase to the event)

4.2 用新指数对 ENSO 事件监测

一般常将分类指数(如厄尔尼诺 Modoki 指数)和 Nino 指数(如 Nino3.4)结合起来判断厄尔尼诺或拉尼娜事件及其类型,而采用更简单的指数和判定标准以监测两类 ENSO 也是众多学者研究的内容(Li, et al, 2010; Yu, et al, 2011)。如上所述 I_{EP} 和 I_{CP} 近似正交,而且 I_{EP} 和 I_{CP} 能够描述东部型 ENSO 和中部型 ENSO 的演变,因此下面尝试以这两个指数对厄尔尼诺/拉尼娜进行判定和分类。

首先,给出 1950—2011 年 I_{EP} 和 I_{CP} 的概率分布直方图及其拟合的正态分布曲线(图 7), I_{EP} 为负值的累计概率为 0.54, 正值的累计概率为 0.37, 两者之比为 1.46, 呈现单峰结构, 其右端的长尾巴说明出现强东部型厄尔尼诺的概率要高于强东部型拉尼娜, 但总的来说, 东部型事件中拉尼娜出现概率高于厄尔尼诺(图 7a)。而 I_{CP} 为正值的累计概率为 0.52, 负值的累计概率为 0.40, 两者之比为 1.3, 也是单峰结构, 其左端的长尾巴说明强中部型拉尼娜出现的概率要高于强中部型厄尔尼诺, 但总体而言, 中部型事件中厄尔尼诺出现概率高于拉尼娜(图 7b)。从图 7 还可以看出, I_{EP} 和 I_{CP} 的频率分布均近似于正态分布, 可以近似认为东部型厄尔尼诺和东部型拉尼娜事件发生的概率几乎是同等的, 因此, I_{EP} 在东部型厄尔尼诺和东部型拉尼娜事件的定义

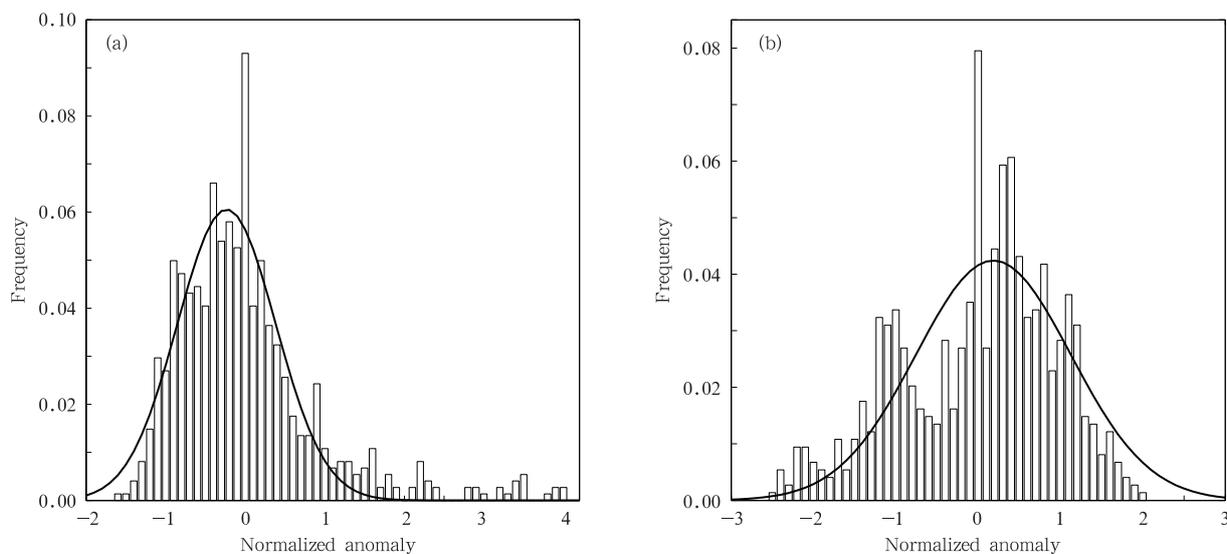


图7 1950—2011 年标准化 3 个月滑动平均逐月的 I_{EP} (a) 和 I_{CP} (b) 的概率直方图分布及其拟合的正态曲线
 (横坐标 0.2 指 $0.2 \leq I_{EP}(I_{CP}) < 0.3$ 的值, -0.2 指 $-0.3 < I_{EP}(I_{CP}) \leq -0.2$ 的值, 依次类推)

Fig.7 Histograms of the distribution for the normalized 3-month running mean monthly I_{EP} (a) and I_{CP} (b) from 1950 to 2011, also given is the corresponding normal distribution with the same variance (the abscissa 0.2 represents $0.2 \leq I_{EP}(I_{CP}) < 0.3$ value, likewise, -0.2 represents $-0.3 < I_{EP}(I_{CP}) \leq -0.2$ values, and so on)

上可以选择相同的阈值,同样, I_{CP} 在中部型厄尔尼诺和中部型拉尼娜事件的定义上也可以选择相同的阈值。

前面已指出冷暖事件的生命史为 1.84 年,而东部型 ENSO 最显著的周期为 5 年,所以东部型 ENSO 发生概率为 37% (1.84/5),从 I_{EP} 概率直方图(图 7a)可以看出,标准化 $I_{EP} \geq 0.7$ 或者 $I_{EP} \leq -0.7$ 的概率为 39%;而中部型 ENSO 最显著的周期为 4 年,所以发生中部型 ENSO 的概率为 46% (1.84/4),从 I_{CP} 概率直方图(图 7b)可以看出,标准化 $I_{CP} \geq 0.8$ 或者 $I_{CP} \leq -0.8$ 的概率为 47%。因此,假定标准化的 $I_{EP} \geq 0.7$ 或者 $I_{EP} \leq -0.7$ 且至少持续 4 个月为东部型厄尔尼诺或拉尼娜事件,同理,假定标准化的 $I_{CP} \geq 0.8$ 或者 $I_{CP} \leq -0.8$ 且至少持续 4 个月为中部型厄尔尼诺或拉尼娜事件。基于此标准,类似于表 1、2,统计得到 1950—2011 年东部型厄尔尼诺和东部型拉尼娜的总持续时间为 273 个月,所以东部型 ENSO 的发生率是 36.8% (273/742),接近上述由周期计算得到的东部型 ENSO 发生概率(37%);同样统计得到在 1950—2011 年中部型厄尔尼诺和中部型拉尼娜的总持续时间为 333 个月,所以中部型 ENSO 的发生率为 44.9% (333/742),同样接近上述由周期计算得到的中部型 ENSO 发生概率(46%),从而证明之前假定的合理性,即可以采用这种判定标准来监测两类 ENSO 事件。

进一步将基于上述判定标准得到的两类 ENSO 分别划分为强、中、弱三个等级(表 3),若厄尔尼诺或拉尼娜事件持续时间内存在标准化的 $I_{EP}(I_{CP}) \geq 2$ 或 $I_{EP}(I_{CP}) \leq -2$,则为强厄尔尼诺或拉尼娜事件;若厄尔尼诺或拉尼娜事件持续时间内所有标准化的 $I_{EP}(I_{CP}) \leq 1.5$ 或 $I_{EP}(I_{CP}) \geq -1.5$ 则为弱厄尔尼诺或拉尼娜事件;否则为中等强度的厄尔尼诺和拉尼娜事件。表 3 给出 1950—2011 年两类厄尔尼诺和拉尼娜事件的统计结果,结果表明强厄尔尼诺除 2009/2010 年以外其余的均为东部型,中等和弱厄尔尼诺绝大多数为中部型,而所有强拉尼娜都属于中部型,中等和弱拉尼娜较集中在东部型,这和 Sun 等(2009)得出的冷暖事件发生呈不对称性一致,即强厄尔尼诺主要升温区位于赤道太平洋东部,强拉尼娜主要降温区位于赤道太平洋中部,而弱事件正

好相反。

由 I_{EP} 和 I_{CP} 确定的强厄尔尼诺、拉尼娜事件和由 Nino3.4 指数得出的结果比较一致,不一致的地方主要体现在强度较弱的极少数厄尔尼诺和拉尼娜事件。表 1、2 统计的由 Nino3.4 指数确定的厄尔尼诺和拉尼娜事件的演变类型取决于整个事件中赤道太平洋海温异常的演变,采用 I_{EP} 和 I_{CP} 的新标准将厄尔尼诺和拉尼娜事件的演变类型分为东部型(EP)、中部型(CP)、混合型(MIX)3 类,上述已给出东部型厄尔尼诺、拉尼娜事件和中部型厄尔尼诺、拉尼娜事件的定义,所谓混合型厄尔尼诺(拉尼娜)是指某一事件既是东部型厄尔尼诺(拉尼娜)又是中部型厄尔尼诺(拉尼娜),或者既不是东部型厄尔尼诺(拉尼娜)又不是中部型厄尔尼诺(拉尼娜)。下面进一步举例分析 I_{EP} 和 I_{CP} 的新标准对事件演变过程的监测能力,例如,1990—1992 年厄尔尼诺事件的演变类型是混合型,从此事件标准化 I_{EP} 和 I_{CP} 的演变特征(图 8a)可以看出, I_{CP} 从 1990 年 8 月开始超过 0.8 且一直持续到 1992 年 4 月,而 I_{EP} 从 1991 年 11 月开始超过 0.7 且持续到 1992 年 6 月,此时 I_{EP} 大于 I_{CP} ,所以,1990—1992 年厄尔尼诺事件是由 1990/1991 年的中部型厄尔尼诺和 1991/1992 年的混合型厄尔尼诺(强东部型厄尔尼诺和弱中部型厄尔尼诺)构成。从 1990—1992 年太平洋海温的演变情况(图略)可以看出,1990/1991 年厄尔尼诺在中部太平洋升温,而其在东部太平洋的东部 Nino1+2 区降温,1991/1992 年东部型厄尔尼诺由于受到前期 1990/1991 年中部型厄尔尼诺的干扰,使其演变成混合型,迄今只有 Li 等(2010)提出的改进的厄尔尼诺 Modoki 指数和本研究提出的 I_{CP} 能够识别 1990/1991 年这个中部型厄尔尼诺事件。此外,1988/1989 年拉尼娜事件(图 8b), I_{EP} 从 1988 年 1 月开始小于 0,到 3 月 I_{EP} 达到小于 -0.7 且持续到 9 月,而 I_{CP} 从 1988 年 5 月开始小于 0,到 8 月 I_{CP} 达到小于 -0.8 且持续到 1989 年 7 月,所以,1988/1989 年拉尼娜事件是由前期东部型拉尼娜和后期中部型拉尼娜所构成的混合型拉尼娜。从 1988—1989 年热带太平洋海温的演变特征(图略)可以看出,此事件自南美沿岸开始降温,随后逐渐向西发展,属于东部型拉尼娜,此后东部负海温异常逐渐恢

复,而中部太平洋负海温异常增强,此时为中部型拉尼娜。总的来说, I_{EP} 和 I_{CP} 可以很好地描述热带太平洋海温异常的演变,而且 I_{EP} 和 I_{CP} 的新判定标准能够有效、精确地捕捉到两类 ENSO。

表 3 根据 I_{EP} 和 I_{CP} 指数确定的 1950—2011 年厄尔尼诺和拉尼娜事件
Table 3 List of the EP and CP type of El Niño and La Niña events from 1950 – 2011

	东部型	中部型
厄尔尼诺	1951、1953、1957/1958、 1965/1966 、 1972/1973 、 1976/1977、 1982/1983 、1986/1987、1991/1992、 1997/1998 、2008*	1957/1958、1963/1964、1965/1966、1968/1969、 1972/1973、1977/1978、1979/1980、1982、 1986/1988、(1990/1992、1993、1994/1995)、 (2002/2003、2004/2005)、2006、 2009/2010
拉尼娜	1950、(1954、1955)、1964、(1966、1967/1968)、 1970、1973、1978、(1980/1981、1981)、 1985/1986、(1988、1989/1990、1990/1991*)、 1994*、(1995/1996、1996/1997)、2001/2002、 (2003*、2004*、2005)、2007	1950/1951、1955/1956、1964、1970/1971、 (1973/1974 、 1975/1976)、(1983、1984/1985)、 1988/1989 、(1998/2000 、2001)、 2007/2009 、 2010/2011

注:黑体为强厄尔尼诺/拉尼娜,斜体为中等强度的厄尔尼诺/拉尼娜,其余为弱厄尔尼诺/拉尼娜,圆括号代表事件是连续的,星号表示表面上为东部型厄尔尼诺(拉尼娜)实际为中部型拉尼娜(厄尔尼诺)。

Notes:bold digits indicate strong events, italic digits represent moderate events, and the rest is for weak events, parentheses represents an event that is linked to the another, namely the adjacent event I_{EP}/I_{CP} symbols are unchanged, single asterisks show that El Niño (La Niña) events appear to be EP type, but are actually CP type of La Niña (El Niño).

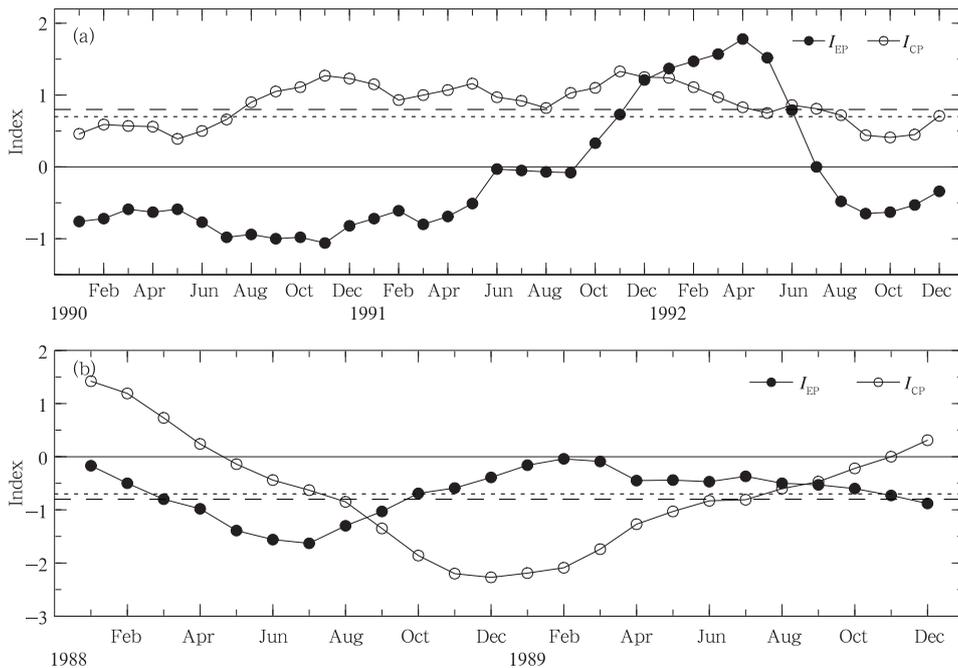


图 8 1990—1992 年暖事件(a)和 1988—1989 年冷事件(b)标准化 3 个月滑动平均逐月 I_{EP} 和 I_{CP} 的演变(图中的实线为 0,

(a)中点虚线为 0.7 标准偏差,长虚线为 0.8 标准偏差,

(b)中点虚线为 -0.7 标准偏差,长虚线为 -0.8 标准偏差)

Fig. 8 Time evolution of the normalized 3-month running mean monthly I_{EP} and I_{CP} during warm events of (a) 1990 – 1992 and cold events of (b) 1988 – 1989

(The solid line is for a 0, the dotted-dashed line is for a 0.7 standard deviation and long-dashed line is for a 0.8 standard deviation in (a), and the dotted-dashed line is for a -0.7 standard deviation and long-dashed line is for a -0.8 standard deviation in (b))

5 新指数反映两类 ENSO 的特征

4.2 节利用 I_{EP} 和 I_{CP} 的判定标准统计了 1950—2011 年 4 种 ENSO 事件(表 3),即东部型厄尔尼诺/拉尼娜和中部型厄尔尼诺/拉尼娜,下面通过合成分析来研究两类 ENSO 事件的发展演变特征。首先,东部型厄尔尼诺(图 9a)事件中赤道东部太平洋在高峰期前 18 个月是负海温异常,至前 6 个月变成正海温异常并逐渐西传,且一直持续到高峰期过后 10 个月,到 12 个月又恢复到负海温异常,整个过程中东部太平洋正海温异常等值线梯度较大且呈现横向“V”形分布,说明东部型厄尔尼诺由东向西发展,由西向东衰退;这点也可以从 6 种指数的时间演变特征看出,Nino1+2 和 I_{EP} 几乎重合,各指数在事件发展时达到大于 0.5 个标准偏差(厄尔尼诺爆发)的先后顺序为:Nino1+2(I_{EP})、Nino3、Nino3.4、Nino4、 I_{CP} ,说明此时升温从 Nino1+2 区开始并逐渐西传,而各个指数在事件衰亡时达到小于 0.5 个标准偏差的顺序与其发展时正好相反,即东部型厄尔尼诺事件发展时由东向西传播,而衰退时自西向东萎缩。其次,东部型拉尼娜(图 9b)事件中赤道东太平洋的东部在前期 6 个月最先开始出现负海温异常,此后负海温异常逐渐增强且明显向西伸展;各指数在事件发展期达到小于 -0.5 个标准偏差的先后顺序与其在东部型厄尔尼诺发展期相同,而各指数在事件衰亡期达到大于 -0.5 个标准偏差的先后顺序与其在东部型厄尔尼诺衰亡期相反,即东部型拉尼娜的发展和衰退过程都是由东向西过渡。再次,中部型厄尔尼诺(图 9c)事件 140°E 附近在高峰期前 12 个月最先开始出现弱的正海温异常,之后正海温异常一直向东发展且逐渐增强可到达东太平洋的西部,高峰期后 5 个月赤道南美沿岸正海温异常开始逐渐消失,且其向西延伸,与东部型厄尔尼诺相比,整个过程中正海温异常等值线梯度较小并且呈东西分布;从各个指数的时间演变情况可以看出,在事件发展时除 Nino1+2 和 I_{EP} 外,其他指数几乎在同一时间达到大于 0.5 个标准偏差,但在衰亡期其达到小于 0.5 个标准偏差的先后顺序为 Nino1+2、Nino3、Nino3.4、Nino4、 I_{CP} ,说明中部型厄尔尼诺发展过程无明显的传播,而衰亡时由东向西逐渐撤退。最后,中部型拉尼娜(图 9d)事件赤道东部太平洋在高峰期前期 18—9 个月出现正海温异常且最大强度

可达 0.5℃,呈东部型厄尔尼诺正海温异常的分布,说明中部型拉尼娜事件发展的前期为东部型厄尔尼诺,Yu 等(2010)研究得出热带外海表气压场的变化有利于东部型厄尔尼诺转变成中部型拉尼娜,正海温异常逐渐消失后在东太平洋的西部出现负海温异常,一直持续并逐渐增强,直到高峰期赤道中部太平洋为负海温异常中心,且中心北侧等值线近乎东西分布;从各个指数时间演变可以看出,类似于中部型厄尔尼诺,中部型拉尼娜发展期除 Nino1+2 和 I_{EP} 外,其他指数基本同时达到小于 -0.5 个标准偏差,但其衰亡期各个指数由东向西依次达到大于 -0.5 个标准偏差,说明其发展过程没有明显传播,而衰退过程由东向西萎缩。此外,与图 9 类似,本研究将冷暖事件按强度等级(强、中、弱)分别研究其发展演变特征(图略),对比不同强度同类事件的合成结果,发现海温异常的中心位置只取决于事件的类型,强度并不起作用,只是海温异常中心的大小随着事件强度的减弱有所减小,虽然不同强度事件的传播演变过程不尽相同,但总的来说东部型厄尔尼诺(拉尼娜)事件的发展过程倾向于由赤道东部太平洋南美沿岸开始而后向西传播,衰亡过程则倾向于由西向东(由东向西)撤退;中部型厄尔尼诺(拉尼娜)事件的发展过程无明显的传播,而衰亡过程则倾向于由东太平洋逐渐向赤道中部太平洋撤退,这与不区分强度得到的结论基本吻合。从图 9 还可以看出,Nino3.4 指数大小一般在 I_{EP} 和 I_{CP} 之间,说明其不仅可以捕捉到两类 ENSO 的信号,还可以反映整个赤道太平洋的海温变化,只是不能准确地区分两类 ENSO(Trenberth, et al, 2001),而对比上述 4 种事件在其整个生命周期内热带太平洋海温异常和指数的时间演变情况,可以看出, I_{EP} 和 I_{CP} 能够清晰地分辨两类 ENSO 的发展演变特征,并且指示两类 ENSO 生命期的各个阶段。

下面通过 I_{EP} 和 I_{CP} 这两个指数的超前-滞后滑动相关(Trenberth, et al, 2001; Ren, et al, 2011)研究 ENSO 的年代际演变特征,从 I_{EP} 和 I_{CP} 181 个月(大概 15 年)超前-滞后滑动相关系数的分布特征(图 10a)可以看出,在 1975/1976 年之前, I_{EP} 超前 I_{CP} 0—12 个月时两者成正相关,超前 5 个月的相关系数最大,说明在 1975/1976 年之前, ENSO 主要表现为从赤道太平洋东部向西部传播, I_{EP} 滞后 I_{CP} 3—12 个月时两者成负相关,滞后 8 个月的相关系数最小,

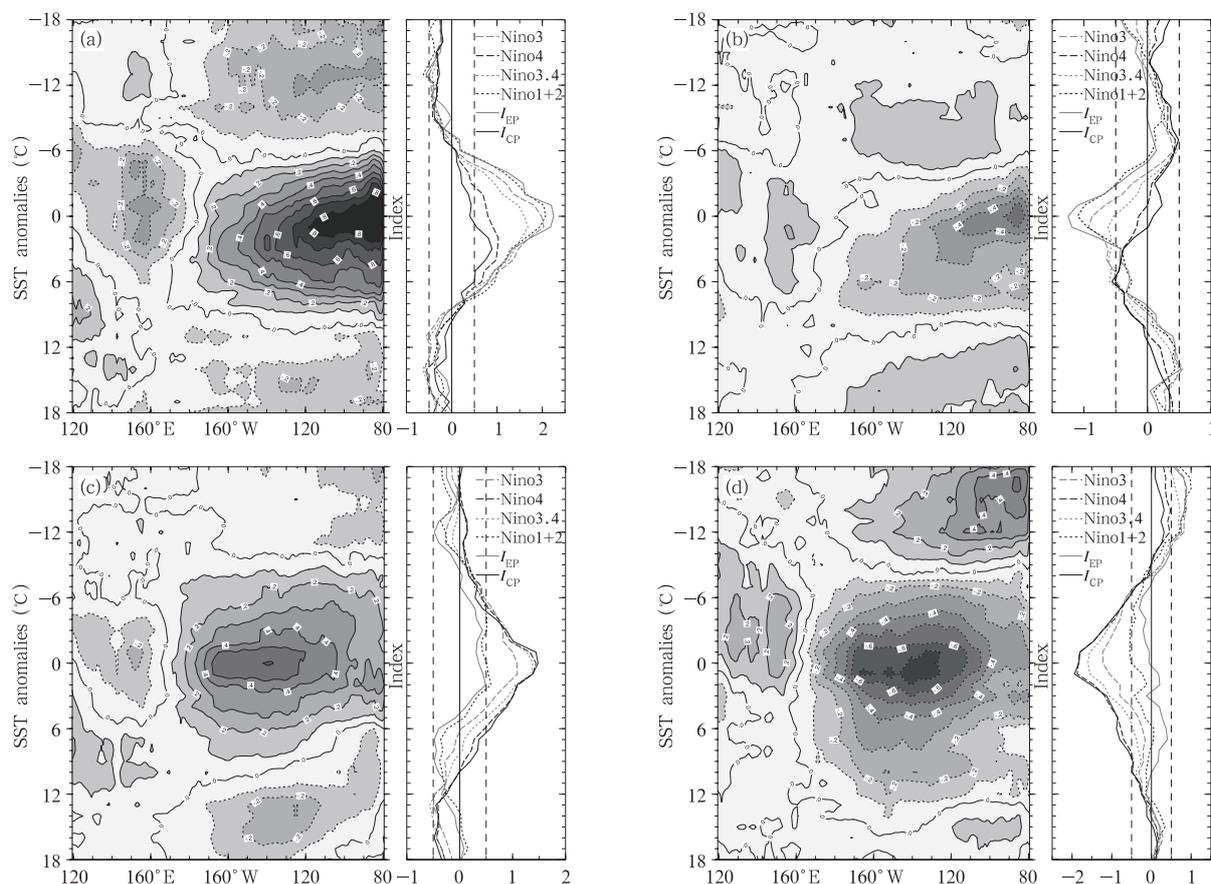


图9 赤道太平洋(20°S—20°N)海温异常(等值线间隔:0.1°C)经向-时间剖面及其标准化的 Nino3、Nino4、Nino3.4、Nino1+2 指数、 I_{EP} 、 I_{CP} 的时间演变
(a. 东部型厄尔尼诺, b. 东部型拉尼娜, c. 中部型厄尔尼诺, d. 中部型拉尼娜; 图中三条直线分别为 ± 0.5 (虚线) 和 0 (实线), 合成的中心时间为 I_{EP} (东部型 ENSO) 和 I_{CP} (中部型 ENSO) 在事件中达到极值的月份)

Fig. 9 Composite life cycle of SST anomalies (contour interval: 0.1°C) along the equatorial (20°S—20°N) Pacific and the evolution of the corresponding normalized-Nino3 SST index, normalized-Nino4 SST index, normalized-Nino3.4 SST index, normalized-Nino1+2 SST index, normalized- I_{EP} , and normalized- I_{CP} for (a) EP type of El Niño events, (b) EP type of La Niña events, (c) CP type of El Niño events, and (d) CP type of La Niña events

(The center month of the composite is the month in which peak value of the new index (I_{EP} or I_{CP}) occurs, the straight lines denote ± 0.5 standard deviation (dashed line) and 0 standard deviation (solid line), respectively)

此期间正、负相关强度相同;1977—1997年, I_{EP} 超前 I_{CP} 4—12个月时两者成负相关,超前10个月的相关系数最小, I_{EP} 滞后 I_{CP} 2—12个月时两者成正相关,滞后6个月的相关系数最大,此期间负相关明显强于正相关,说明在这段时间内 ENSO 主要表现为从赤道太平洋中西部向东传播;1998—2002年 I_{EP} 与 I_{CP} 的超前滞后相关性均为较弱的负相关,这与期间发生了强拉尼娜事件有一定的关系。以上说明

ENSO 的发生、演变机制在 1976/1977 年发生了比较明显的气候态转变,在此之前 ENSO 是强的向西传播,之后是弱的向东传播,可见 I_{EP} 和 I_{CP} 可以很好地反映这种气候态的转变。

从图 10a 中提取两个指数正(负)位相后再分别做超前-滞后滑动相关,得到相关系数的分布情况(图 10b、c),在 1976/1977 年之前 ENSO 暖位相主要表现为较强的向西传播,在此之后则表现为东传

(图 10b),而中部型厄尔尼诺事件的发展过程正好为由西向东传播,也就是说 1976/1977 年以后中部型厄尔尼诺发生频率增大,这一点也可以从表 1 和表 3 中看出,即对于厄尔尼诺事件来说在 1976/1977 年之前以东部型厄尔尼诺为主,而在此之后以中部型厄尔尼诺为主,这与 Kao 等(2009)、Yeh 等(2009)的研究结论一致,发生这种改变的物理机制

可能与全球变暖导致赤道太平洋海表温度纬向梯度减弱或温跃层变平有关(Yeh, et al, 2009; Ashok, et al, 2007),因此在全球变暖的大背景下中部型厄尔尼诺应得到更多重视。而对于 ENSO 冷位相没有出现明显的气候态转变,一直都为弱的向西传播(图 10c)。

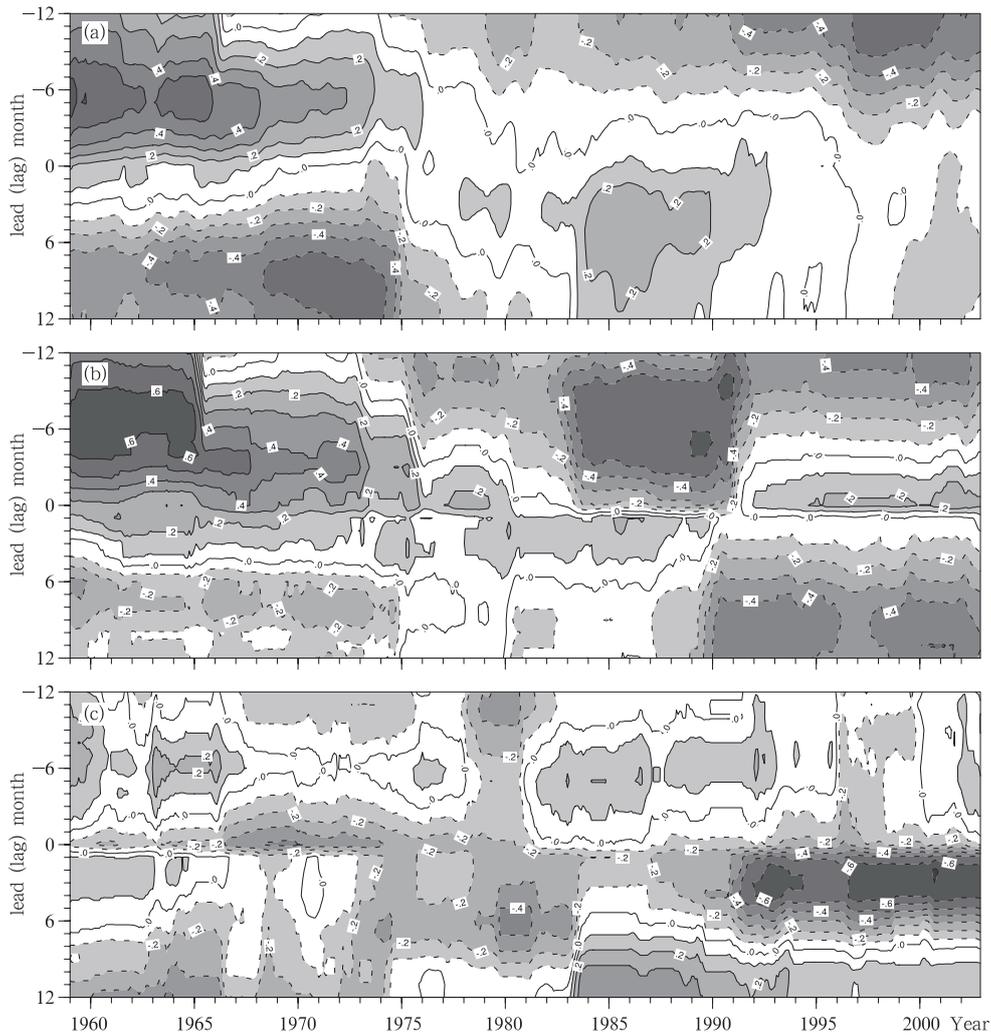


图 10 181 个月(约 15 年)的 I_{EP} 和 I_{CP} 超前(滞后)(a)及其正位相(b)、负位相(c)的滑动相关系数(纵坐标负(正)为 I_{EP} 超前(滞后) I_{CP} 的月份,相关系数大于 0.1 的填色)

Fig. 10 (a) Running cross lead (lag) correlation of I_{EP} with I_{CP} as 181-month running means (about 15 years) and partial lead (lag) correlations for (b) positive and (c) negative phases of I_{EP} and I_{CP} ; in calculating the partial correlations, the durations of positive or negative phases of these indices are determined by the index that leads. Negative lag means I_{EP} leads, and positive lag means I_{CP} leads. Values exceeding 0.1 in magnitude are shaded

6 讨论和结论

采用联合回归-经验正交函数分解方法得到两类 ENSO 热带太平洋海温异常分布类型,在此基础上,利用海温资料快捷创建了两个用于区别东部型和中部型 ENSO 事件的指数,即 I_{EP} 和 I_{CP} ,这两个指数有如下特点:

(1)在保证物理依据清楚明确的基础上,新 I_{EP} 和 I_{CP} 分别基于东部型厄尔尼诺热带太平洋海温分布的偶极子和中部型厄尔尼诺的三极子结构而构建,极大地简化了计算过程。

(2) I_{EP} 和 I_{CP} 的相关系数只有 0.03,近乎正交,这种性质较适合区分两类 ENSO。

(3)利用 I_{EP} 和 I_{CP} 对 ENSO 进行分类,得出在厄尔尼诺成熟期时 I_{EP} 和 I_{CP} 的相关系数为 -0.52 ,且超过了 0.10 的显著性检验标准,在拉尼娜成熟期时相关系数是 -0.28 ,因此,新指数能够有效地判定东部型/中部型厄尔尼诺和东部型/中部型拉尼娜成熟期时主要变温位置以及海温异常的分布类型,也能更为清楚地区分两类暖事件。

(4)利用 I_{CP} 和 I_{EP} 的新定义标准来判定东部型 ENSO 和中部型 ENSO,几乎能全部捕捉到 NOAA 定义的厄尔尼诺和拉尼娜事件并进行实时分类,能够更加精细地监测东部型 ENSO 和中部型 ENSO。

(5)利用 I_{EP} 和 I_{CP} 来描述 ENSO 事件的发展演变机制,东部型厄尔尼诺表现为在发展时期赤道太平洋海温由东向西延伸,在衰退时期由西向东萎缩,而中部型厄尔尼诺与东部型厄尔尼诺相反。同时,利用 I_{EP} 和 I_{CP} 也能得出在 1976/1977 年前后 ENSO 的发生机制发生了改变,并且这种气候态的转变主要体现在暖事件上。

新指数 I_{EP} 和 I_{CP} 分别基于两类 ENSO 关键海区海温异常的区域平均而创建,能较好地反映 ENSO 事件在成熟期赤道太平洋海温的分布特征和整个事件过程中赤道太平洋海温的演变情况,同时也能表征两类 ENSO 对中国气候影响的差异,可作为研究两类 ENSO 本质、物理机制、时空演变特征、气候效应方面的诊断工具。 I_{EP} 和 I_{CP} 新判定标准能够对东部型 ENSO 和中部型 ENSO 进行监测分类研究,可以进一步利用新指数来预测两类冷暖事件。

参考文献

陈圣劼,何金海,吴志伟. 2013. 一种新的 El Niño 海气耦合指数.

- 大气科学, 37(4): 815-828
- 冯娟,管兆勇,王黎娟等. 2010. 夏季热带中太平洋 SST 异常型与中国东部夏季气候异常的关系. 大气科学学报, 33(5): 547-554
- 符淙斌,弗莱彻. 1985. 厄尔尼诺(El Niño)时期赤道增温的两种类型. 科学通报, 30(8): 596-599
- 林学椿,于淑秋. 1993. 厄尔尼诺与我国汛期降水. 气象学报, 51(4): 434-441
- 唐佑民,刘书华. 1994. 两类 El Niño 事件太平洋海温异常时空结构的分析. 热带气象学报, 10(2): 130-139
- 赵永平,陈永利. 1998. 两类 ENSO 事件前期的热带太平洋海温距平场. 热带气象学报, 14(3): 226-232
- An S I, Wang B. 2000. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. J Climate, 13(12): 2044-2055
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. J Geophys Res, 112 (C11): C11007, doi: 10.1029/2006JC003798
- Bjerknes J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus, 18(4): 820-829
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Wea Rev, 97(3): 163-172
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. J Geophys Res, 115(D24): D24122, doi: 10.1029/2010JD014761
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011a. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. Int J Climatol, 31(14): 2091-2101
- Feng J, Li J. 2011b. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China. J Geophys Res, 116(D13): D13102, doi: 10.1029/2010JD015160
- Gouirand I, Moron V, Hu Z Z, et al. 2013. Influence of the warm pool and cold tongue El Niño on the following Caribbean rainy season rainfall. Climate Dyn, doi: 10.1007/s00382-013-1753-5
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. J Climate, 22(3): 615-632
- Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. J Climate, 22(6): 1499-1515
- Kug J S, Choi J, An S I. 2010. Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL 2.1 coupled GCM. J Climate, 23(5): 1226-1239
- Kug J S, Ham Y G. 2011. Are there two types of La Niña? Geophys Res Lett, 38(16): L16704, doi: 10.1029/2011GL048237
- Larkin N K, Harrison D E. 2005a. On the definition of El Niño and associated seasonal average U. S. weather anomalies. Geophys Res Lett, 32(13): L13705, doi: 10.1029/2005GL022738
- Larkin N K, Harrison D E. 2005b. Global seasonal temperature and

- precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophys Res Lett*, 32(16): L16705
- Li G, Ren B H, Yang C Y, et al. 2010. Indices of El Niño and El Niño Modoki: An improved El Niño Modoki index. *Adv Atmos Sci*, 27(5): 1210-1220
- Li S, Wang Q. 2012. A new approach for classifying two types of El Niño events. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 5(5): 414-419
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon Wea Rev*, 110(7): 699-706
- Philander S G H. 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 302(5906): 295-301
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon Wea Rev*, 110(5): 354-384
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108(D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- Ren H L, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO. *Geophys Res Lett*, 38(4): L04704, doi: 10.1029/2010GL046031
- Sun F P, Yu J Y. 2009. A 10-15-yr modulation cycle of ENSO intensity. *J Climate*, 22(7): 1718-1735
- Takahashi K, Montecinos A, Goubanova K, et al. 2011. ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophys Res Lett*, 38(10): L10704, doi: 10.1029/2011GL047364
- Tedeschi R G, Cavalcanti I F A, Grimm A M. 2013. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. *Int J Climatol*, 33(6): 1382-1400
- Trenberth K E, Stepaniak D P. 2001. Indices of El Niño evolution. *J Climate*, 14(8): 1697-1701
- Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn*, 29(2): 113-129
- Yadav R K, Ramua D A, Dimri A P. 2013. On the relationship between ENSO patterns and winter precipitation over North and Central India. *Global Planetary Change*, 107: 50-58
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514
- Yu J Y, Kim S T. 2010. Relationships between extratropical sea level pressure variations and the Central Pacific and Eastern Pacific types of ENSO. *J Climate*, 24(3): 708-720
- Yu J Y, Kao H Y, Lee T, et al. 2011. Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events. *Theor Appl Climatol*, 103(3): 337-344
- Yuan Y, Yan H M. 2012. Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere. *Chin Sci Bull*, 58(3): 406-415