

南海西沙海域温度异常对厄尔尼诺 - 南方涛动活动的响应

刘成程^{1,2}, 张文超^{1,2}, 晏宏¹

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用 1958—2005 年西沙永兴岛气象观测站逐月气温资料、美国国家海洋大气部 (NOAA) 提供的 1866—2014 年逐月海表温度 (SST) 资料、逐月 ENSO 指数 (MEI)、南方涛动指数 (SOI) 分析了厄尔尼诺 - 南方涛动 (ENSO) 事件与南海西沙气温、海温异常的关系。1958—2005 年西沙群岛永兴岛观测站气温与 MEI 指数比较分析显示: 西沙群岛气温正距平百分率积累值阈值能较好地响应 75.00% 的中等及其以上强度厄尔尼诺事件; 西沙气温负距平百分率积累值阈值能较好地响应 100% 的中等及其以上强度拉尼娜事件。1866—2014 年西沙海域 SST 异常与同期 SOI 指数对比分析表明: 西沙 SST 正距平百分率积累值阈值能对 76.47% 的中等及其以上强度的厄尔尼诺有较好的响应; 西沙 SST 负距平百分率积累值阈值能对 79.41% 的中等及其以上强度的拉尼娜事件有较好的响应。该研究结果表明西沙气温、SST 距平百分率积累值阈值法能够得到中等及其以上强度 ENSO 事件的良好记录, 这为利用南海高分辨率珊瑚、砗磲重建所得到的古温度记录定量重建过去 ENSO 事件提供了可靠的科学依据。

关键词: 厄尔尼诺 - 南方涛动; 南海西沙; 温度异常; 定量重建

Relationship between El Niño-Southern Oscillation events and regional sea surface temperature anomalies around the Xisha Islands, South China Sea

LIU Chengcheng^{1,2}, ZHANG Wenchao^{1,2}, YAN Hong¹

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Background, aim, and scope El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the most important mode of interannual changes in global climate, and understanding past ENSO variability is essential for us to understand the ENSO mechanism and predict its future trend. The paleo-climate records from the South China Sea are ideal for the past ENSO reconstructions because of the significant impacts of ENSO on regional inter-annual climate variations. Indeed, the investigations of ENSO periodicity have been involved in some high resolution paleoclimate records derived from the $\delta^{18}\text{O}$ and Sr/Ca of biogenic carbonate. However, these studies only discussed the periodicity of

收稿日期: 2016-10-08; 录用日期: 2016-12-28

Received Date: 2016-10-08; Accepted Date: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41522305, 41403018)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41522305, 41403018)

通信作者: 晏宏, E-mail: yanhong@ieecas.cn

Corresponding Author: YAN Hong, E-mail: yanhong@ieecas.cn

引用格式: 刘成程, 张文超, 晏宏. 2017. 南海西沙海域温度异常对厄尔尼诺 - 南方涛动活动的响应 [J]. 地球环境学报, 8(2): 148–156.

Citation: Liu C C, Zhang W C, Yan H. 2017. Relationship between El Niño-Southern Oscillation events and regional sea surface temperature anomalies around the Xisha Islands, South China Sea [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(2): 148–156.

ENSO and few of them involved a more confident quantitative reconstructions. The essential difficulty is how to infer the ENSO signal from the South China Sea climate records which convolve the impacts from various components and aspects the highly dynamical climate system, such as the Asian monsoon, ENSO, Pacific Decadal Oscillation, and so on. In order to provide a detailed method for the quantitative ENSO reconstruction from the paleo proxy records, the modern observational data were first used to establish the relationship between ENSO events and regional temperature around the Xisha Islands, South China Sea, in this study. We analyzed the accumulated positive (negative) percentage of monthly temperature anomalies of Xisha to determine a suitable “ENSO threshold”. **Materials and methods** We used monthly air temperature from weather station, Yongxing Island, South China Sea and gridded sea surface temperature (SST) data sets of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.html>). The resolution of SST is $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, and we just chose the areas of $111^{\circ} - 113^{\circ} \text{W}$, $15^{\circ} - 17^{\circ} \text{N}$. We used Multivariate ENSO index (MEI) sets of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>) and Southern Oscillation Index (SOI) sets of University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/limind/SOI.signal.annstd.ascii>). Bandpass filtering of air-temperature and SST time series in this study were performed by using ORIGIN software. Definition of accumulated percentage of monthly temperature anomalies threshold is as follows: Threshold index $= \frac{A \times 2}{B + C}$, where A is the correct times of El Niño (La Niña) that recorded by accumulated positive (negative) percentage of monthly air-temperature anomalies of Xisha, B is times of accumulated positive percentage of monthly air-temperature anomalies of Xisha, C is times of El Niño (La Niña) events that recorded by MEI or SOI. While threshold index attain maximum, we choose the corresponding accumulated positive (negative) percentage of monthly air-temperature anomalies of Xisha as “ENSO threshold”. **Results** The analysis of the percentage of monthly air-temperature anomalies and monthly ENSO index (MEI) during 1958—2005 indicated that the accumulated positive percentage of monthly air-temperature anomalies threshold responded to 75% of moderate El Niño events, and the accumulated negative percentage of monthly air-temperature anomalies threshold responded to 100% of moderate La Niña events. The analysis of the percentage of monthly sea surface temperature anomalies and monthly Southern Oscillation Index during 1866—2014 indicated that the accumulated positive percentage of monthly SST anomalies threshold responded to 76.47% of moderate El Niño events, and the accumulated negative percentage of monthly SST anomalies threshold responded to 79.41% of moderate La Niña events. **Discussion** The significant correlations between ENSO events and the percentage of monthly temperature anomalies around Xisha Islands suggested that we can detect the past ENSO activity from the fossil coral and *Tridacna* shell based high-resolution paleo-SST records in the South China Sea. **Conclusions** Based on modern observation data, we developed a method to extract the ENSO information from the SST records of the South China Sea through accumulated percentage of monthly temperature anomalies threshold. **Recommendations and perspectives** We developed a quantitative method to extract past ENSO events from temperature records of the South China Sea and then we can apply this method in future to reconstruct the past ENSO variability from paleoclimate archives under different climate background, such as Little Ice Age, Roman Warm Period and so on.

Key words: El Niño-Southern Oscillation; Xisha Islands; sea surface temperature anomalies; quantitative reconstruction

厄尔尼诺 - 南方涛动 (ENSO) 是热带太平洋地区海气系统年际气候变率的最强信号, 它的发生发展对全球大气环流乃至全球气候异常都有重要影响 (Dilley and Heyman, 1995; 陈桂英,

2000; Diaz et al, 2001; 琚建华和陈琳玲, 2003; Berkelhammer et al, 2014), 了解 ENSO 的变化历史、规律及机制对于预测未来气候变化具有重要意义。目前, ENSO 的短期预报已取得了一定的

进展,但对于长时间尺度及不同气候背景状态下(如全球变暖或者变冷)ENSO的变化趋势及动力机制的理解还非常有限(Driscoll et al, 2014; Ayling et al, 2015; Yan et al, 2016),主要的限制因素在于器测资料时间跨度较短,对于查明长时间尺度 ENSO 的变化规律和机制存在困难,因此如何利用高分辨率的珊瑚、砗磲、树轮等古气候资料定量重建过去 ENSO 的变化历史,并探讨 ENSO 在不同气候背景下、不同边界条件下的活动规律及其对全球气候的影响,是当前全球变化研究中的一个重要科学问题(Heydt et al, 2011; Welsh et al, 2011; McGregor et al, 2013; Batehup et al, 2015; Schollaen et al, 2015)。

南海是西太平洋最大的边缘海,已有研究表明南海气候年际异常变化与 ENSO 有密切关系(Chen et al, 2007; Zhou and Chan, 2007; Zhou et al, 2010)。Bin et al (2000)认为大气环流是南海气候和太平洋 ENSO 的桥梁,吕宋海峡水交换可以将 ENSO 信号传入南海(Qu et al, 2004),热带中东太平洋海温正异常(负异常)会导致南海-西太平洋的异常反气旋(气旋)的建立,从而导致了南海海温正(负)异常(林爱兰和张人禾, 2004)。

基于南海年际气候变化对 ENSO 快速且灵敏的响应(谭军等, 1995; Zhou and Chan, 2007),区域内的古气候资料具有被用来定量重建古 ENSO 变化的潜力。目前,南海已有大量高分辨率的珊瑚和砗磲古气候记录被报道,其中也有一些工作利用这些高分辨率的古气候记录进行了 ENSO 变化的讨论,但目前的讨论基本局限于周期分析(Correge et al, 2000; Ivany et al, 2011),很少涉及定量重建。一个重要的原因在于南海的气候记录同时受到季节(如季风、ITCZ)、年际(ENSO)和年代际(PDO等)气候信号的影响(晏宏等, 2010),从气候记录上并不能直观地观测到 ENSO 活动的变化。因此,怎样从复杂的气候记录中提取出 ENSO 信号,建立定量重建方法,是利用南海珊瑚、砗磲进行古 ENSO 定量重建中亟待解决的问题。

本研究利用现代气象资料,采用西沙距平百分率阈值法分析南海温度异常对于 ENSO 事件的响应,以反映南海温度距平百分率积累值阈值对于 ENSO 事件的记录情况,为利用南海高分辨率珊瑚、砗磲等代用资料定量重建过去 ENSO 事件提供一定科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料

(1) 南海西沙群岛永兴岛气象观测站(台站号 59981) 1958—2005 年逐月气温器测资料。

(2) 取自美国国家海洋大气部(NOAA) 1866—2014 年格点逐月平均海表温度(SST)资料(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.html>)(水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 选取了 1866—2014 年 111° — 113° W, 15° — 17° N 的格点 SST)。

(3) 美国国家海洋大气部(NOAA)地球系统研究实验室(ESRL)公布的多变量 ENSO 指数(MEI)。

(4) 美国大气研究高校协会 UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) 的南方涛动指数 SOI (Southern Oscillation Index) (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/SOI.signal.annstd.ascii>)。

1.2 方法

(1) 计算逐月温度距平百分率: 分别计算 1958—2005 年西沙永兴岛气象观测站气温资料、1866—2014 年 NOAA 逐月 SST 的距平百分率,并分别将两类温度距平百分率序列进行带通滤波处理,以消除噪声信号的干扰。

$$T_{\text{anomaly percentage}} = \frac{T_{\text{real}} - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $T_{\text{anomaly percentage}}$ 为温度距平百分率; T_{real} 为该月实际温度; T_{mean} 为该月平均温度。

(2) 距平百分率积累值: 带通滤波处理后的逐月正距平百分率(负距平百分率)分次累加求和。将距平百分率按照时间序列排列,从第一个正距平百分率开始进行(负距平百分率)累加,当出现负距平(正距平)百分率时,停止此次累加,记此次正距平(负距平)百分率积累过程为一次南海西沙暖事件(西沙冷事件),然后依次对随后各次南海西沙温度正距平(负距平)百分率进行累加。

(3) 正距平(负距平)百分率积累值阈值:

$$\text{阈值指数} = \frac{A \times 2}{B + C} \quad (2)$$

式中: A 为对应的正(负)距平百分率积累事件次数; B 为 MEI 或 SOI 指示的厄尔尼诺事件(拉尼娜事件)次数; C 为超过正(负)距平百分率积

累值阈值的事件次数。

试验所有正(负)距平百分率积累值, 计算阈值指数, 当该指数达到最大时, 记此时的正(负)距平百分率积累值为正(负)距平百分率积累值阈值。

2 结果与分析

2.1 西沙温度异常与 ENSO 事件的相关关系

已有研究表明南海西沙群岛永兴岛气象观测站 1958—2008 年气温与同期 MEI 指数有较好的相关关系, 相关性在滞后 4 月时达到最

大, 为 0.41 ($p < 0.0001$) (晏宏等, 2010)。本文对西沙 1866—2014 年格点 SST 数据与同期 SOI 指数进行相关性分析(图 1), 相关系数为 -0.234 ($p < 0.01$)。即两者呈负相关, 发生厄尔尼诺时, 西沙 SST 正异常, 拉尼娜时则相反。对 SOI 指数分别做 12 个月的超前和滞后相关性分析, 结果表明: 超前时相关系数绝对值迅速下降, 说明不存在任何超前效应, 而在滞后 6 月时, 相关性最大, 相关系数为 -0.5116 ($p < 0.01$), 在滞后 7 月甚至更长时间时, 相关性下降, 说明西沙 SST 对于 ENSO 的响应存在 6 个月的滞后。

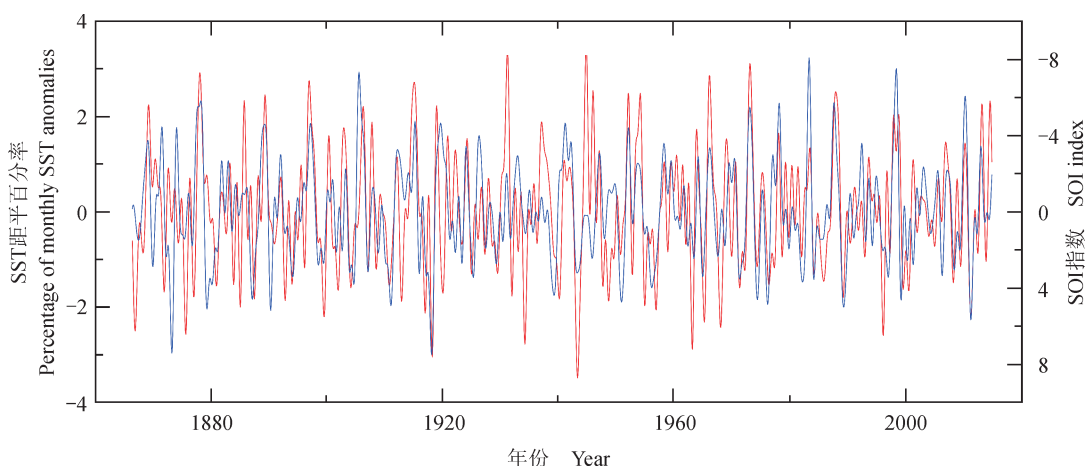


图 1 1866—2014 年西沙群岛海域带通滤波处理后的逐月 SST 距平百分率(红色折线)、带通滤波处理后的逐月 SOI 指数(蓝色折线)

Fig.1 Percentage of monthly SST anomalies (red line) after band-pass filtering around the Xisha Islands, South China Sea, and monthly SOI index (blue line) after band-pass filtering during 1866 and 2014

2.2 西沙台站气温序列中 ENSO 的记录

2.2.1 西沙台站气温序列中的厄尔尼诺记录

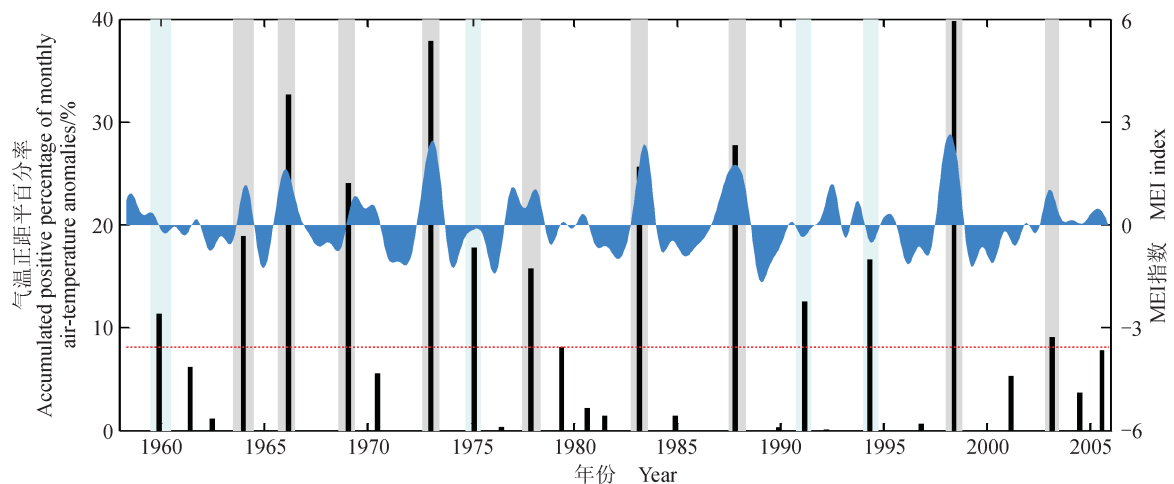
将西沙气温正距平百分率和滞后 4 个月的 MEI 指数进行对比研究, 结果表明西沙气温异常能够较为良好地响应 ENSO 事件。当气温正距平百分率积累值试验值取 8.14% 时, 西沙气温正距平百分率积累值超过阈值总共 13 次, 分别为: 1959—1960 年、1963—1964 年、1965—1966 年、1968—1969 年、1972—1973 年、1974—1975 年、1977—1978 年、1982—1983 年、1987—1988 年、1990—1991 年、1993—1995 年、1997—1999 年、2002—2003 年(图 2)。MEI 指数记录到的中等及其以上厄尔尼诺事件年份有 1958—1959 年、1963—1964 年、1965—1966 年、1968—1970 年、1972—1973

年、1976—1978 年、1982—1983 年、1986—1988 年、1991—1992 年、1993 年、1997—1998 年、2002—2005 年。两者记录虽然有一定差异, 但是也存在较好的一致性。其中 1963—1964 年、1965—1966 年、1968—1970 年、1972—1973 年、1976—1978 年、1982—1983 年、1986—1988 年、1997—1998 年、2002—2005 年共 9 次的厄尔尼诺事件均在西沙台站气温异常中有较好的反映。

对于 1993 年、1994—1995 年的厄尔尼诺事件, MEI 指数在 1993 年 2 月—1993 年 10 月持续为正值, 在 1993 年 11 月—1994 年 7 月出现负值, 随后在 1994 年 8 月—1995 年 4 月转为正值(较小), 而在西沙的气温记录中, 从 1993 年 5 月—1995 年 4 月一直处于气温正距平状态, 且积累值较大,

没有1993年11月—1994年7月拉尼娜状态的记录,因此1993年5月—1995年4月的正距平积累视作误判。1958年1月—1959年7月MEI出现正值,处于厄尔尼诺状态,而西沙台站在1959年4月—1960年10月呈现持续的气温正异常现象,西沙气温异常开始时间相对于MEI指数滞后过多,故将西沙台站气温1959年4月—1960年10月的正距平积累视作误判。另外,由图2可知,

1974—1975年、1990—1991年为明显误判。在此阈值下,阈值指数 $=9 \times 2 / (12 + 13) = 0.72$,达到最大。综上所述,MEI记录到的中等及其以上厄尔尼诺事件有3次未在西沙气温距平积累值中准确反映,而在西沙台站气温距平百分率积累值所记录到的13次厄尔尼诺事件中,有4次属于误判。在剔除误判后,西沙气象站气温距平积累值能对75% (9/12) 的厄尔尼诺事件做出较为准确的响应。



浅蓝色阴影表示此次气温正距平百分率积累值并非是厄尔尼诺导致;灰色阴影表示此次气温正距平百分率积累值是对厄尔尼诺的良好响应。Light blue shade meant the accumulated positive air-temperature anomalies was not the result of El Niño. Gray shade meant the accumulated positive air-temperature anomalies was the respond of El Niño.

图2 西沙台站气温正距平百分率积累值(黑色柱状图)及阈值(红色虚线)与MEI指数(蓝色面积图)对比分析
Fig.2 Accumulated positive percentage of monthly air-temperature anomalies of Xisha (bar graph), accumulated positive percentage of monthly air-temperature anomalies threshold (red line) and monthly MEI index (blue area)

2.2.2 西沙台站气温序列中的拉尼娜记录

当气温负距平百分率积累值试验值取 -8.76% 时,如图3所示,西沙负距平百分率积累值超过拉尼娜阈值总共13次。在西沙气温负距平百分率积累值中,1976—1977年的气温负距平百分率积累值与拉尼娜事件并无关系,属于误判。1978—1979年为弱拉尼娜,但西沙气温距平百分率积累值仍然将其记录了下来,可视为误判。1983—1986年间气温负距平百分率存在短暂正距平百分率打断期,但气温正距平百分率积累极小(1.4449%),因此可以忽略此次气温正距平百分率打断过程,将1983年11月—1984年9月与1985年3月—1986年2月作为1983—1986年拉尼娜事件的响应(即1983年11月—1984年9月

与1985年3月—1986年2月认为是一次气温正距平百分率积累过程,而不是两次)。在此阈值下,阈值指数 $=10 \times 2 / (10 + 12) = 0.91$,达到最大。即MEI指数总共记录到中等及其以上拉尼娜事件共10次,在剔除西沙温度记录误判后,西沙气温距平百分率积累值可以对拉尼娜有100%的响应(10/10)。

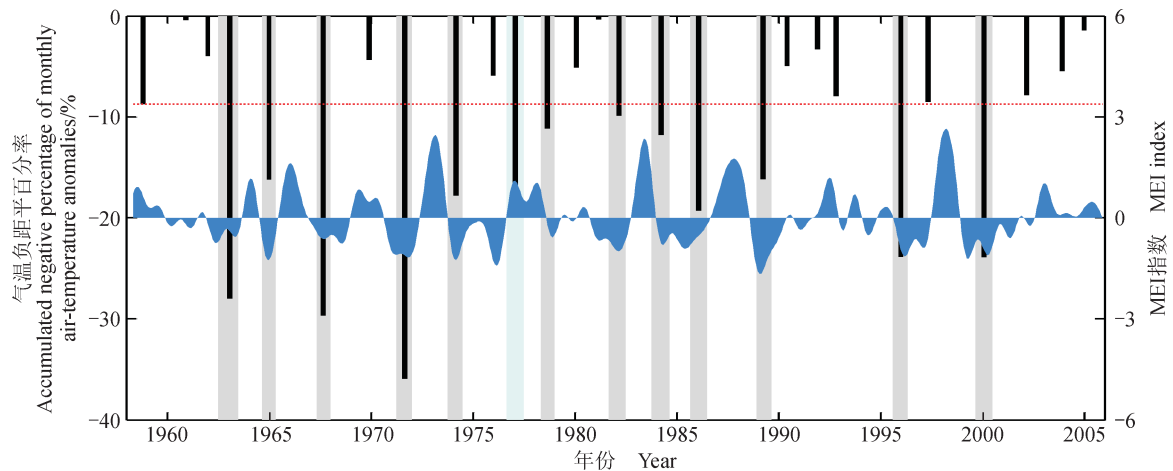
2.3 西沙1866—2014年格点SST中ENSO的记录

2.3.1 西沙1866—2014年格点SST序列中的厄尔尼诺记录

根据西沙1866—2014年间格点SST距平百分率积累值分析结果来看,西沙对厄尔尼诺事件有较为良好的响应。当西沙SST正距平百分率积累值试验值取 6.00% 时,正距平百分率积累值有35次

超过了阈值。与同期南方涛动指数对比分析, 可以看出其中有 6 次 (1921 年与 1922 年算作一次误判, 1944 年与 1946 年算作一次误判) 不属于对厄尔尼诺的响应, 有 3 次虽然对应 SOI 指数为负值, 但 SOI 指数并不足以导致相对较大的西沙 SST 正距平百分率积累值, 以上情况均可判为西沙 SST

正距平百分率积累值对厄尔尼诺的误判。西沙 SST 异常存在多种因素, 不单纯是厄尔尼诺的影响, 由图 4 可见部分西沙 SST 正距平百分率积累值很大, 但所对应的 SOI 指数却在 0 附近或其负指数持续时间很短, 部分 SOI 指数偏移很大, 但相对应的西沙 SST 正距平百分率积累值很小, 甚至并未超过阈值。



浅蓝色阴影表示此次气温负距平百分率积累值并非拉尼娜导致; 灰色阴影表示此次气温负距平百分率积累值是对拉尼娜的良好响应; 橘黄色阴影表示虽然同期拉尼娜较弱, 但西沙气温负距平百分率积累值仍然超过了负距平百分率积累值阈值。

Light blue shade meant the accumulated negative air-temperature anomalies was not the result of La Niña. Grey shade meant the accumulated negative air-temperature anomalies was the respond of La Niña. Yellow shade meant although the La Niña was weak over that period, the negative air-temperature anomalies still exceeded the threshold.

图3 西沙台站气温负距平百分率积累值 (黑色柱状图) 及阈值 (红色虚线) 与 MEI 指数 (蓝色面积图) 对比分析

Fig.3 Accumulated negative percentage of monthly air-temperature anomalies of Xisha (bar graph), accumulated negative percentage of monthly air-temperature anomalies threshold (red line) and monthly MEI index (blue area)

在此阈值下, 阈值指数 = $26 \times 2 / (34 + 35) = 0.7536$, 达到最大。南方涛动指数所反应出的中等及中等强度以上的厄尔尼诺事件有 34 次, 而西沙 SST 距平百分率积累值准确记录到的中等及其以上的厄尔尼诺事件有 26 次 (1957 年 8 月—1958 年 8 月与 1959 年 4 月—1960 年 11 月两次距平百分率积累值为 1957 年 3 月—1959 年 8 月一次厄尔尼诺的响应, 1911 年 9 月—1912 年 6 月与 1914 年 3 月—1915 年 12 月两次距平百分率积累值为 1911 年 4 月—1915 年 5 月厄尔尼诺的响应), 即西沙 SST 对 76.47% (26/34) 的中等及其以上强度的厄尔尼诺事件有良好的响应。

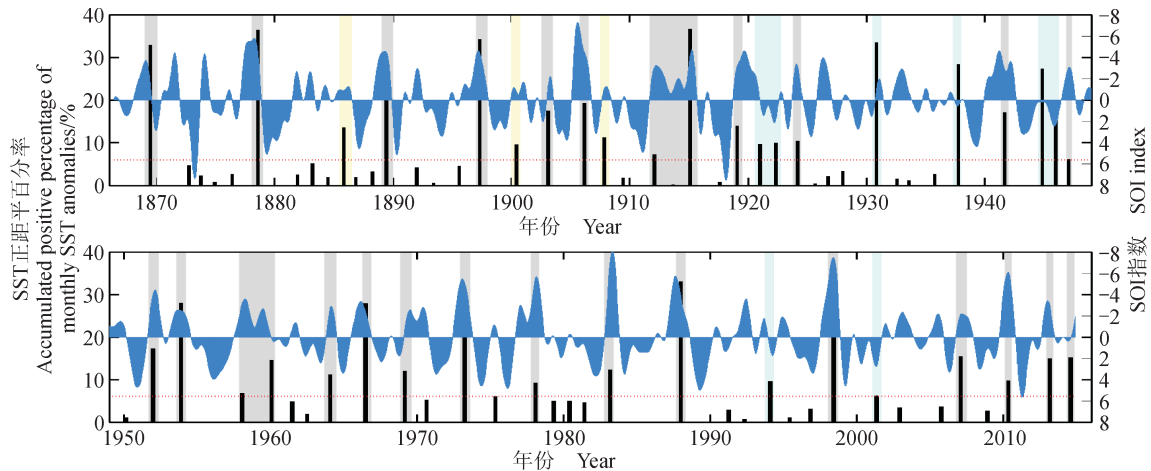
2.3.2 西沙 1866—2014 年格点 SST 序列中的拉尼娜记录

当西沙 SST 负距平百分率积累值试验值取 -7.07% 时, 根据图 5 分析得知, 西沙在 1866 年

至 2014 年间, 总共有 36 次西沙 SST 负距平百分率积累值超过阈值, 其中有 4 次不是对拉尼娜的响应 (1883 年 8 月—1885 年 5 月算作一次, 期间 1884 年 5 月—1884 年 9 月的正距平持续时间短, 且积累值小), 有 5 次虽然对应 SOI 指数为正值, 但 SOI 指数并不足以导致大的西沙 SST 负距平百分率积累值, 如 1875 年 3 月—1876 年 2 月西沙 SST 负距平百分率积累值为 -19.1402%, 相对应时期 SOI 表现为拉尼娜, 但拉尼娜强度弱, 不足以导致如此大的温度负异常, 1876 年 9 月—1877 年 6 月、1931 年 10 月—1932 年 5 月、1933 年 10 月—1934 年 8 月和 2003 年 8 月—2005 年 5 月均为类似情况, 均视作误判。1866 年至 2014 年间, 根据南方涛动指数的记录, 总共有 34 次中等及其以上强度的拉尼娜发生, 西沙 SST 负距平百分率积累值较为良好地响应了其中 27 次 (1892 年和 1894 是对同一年的响应;

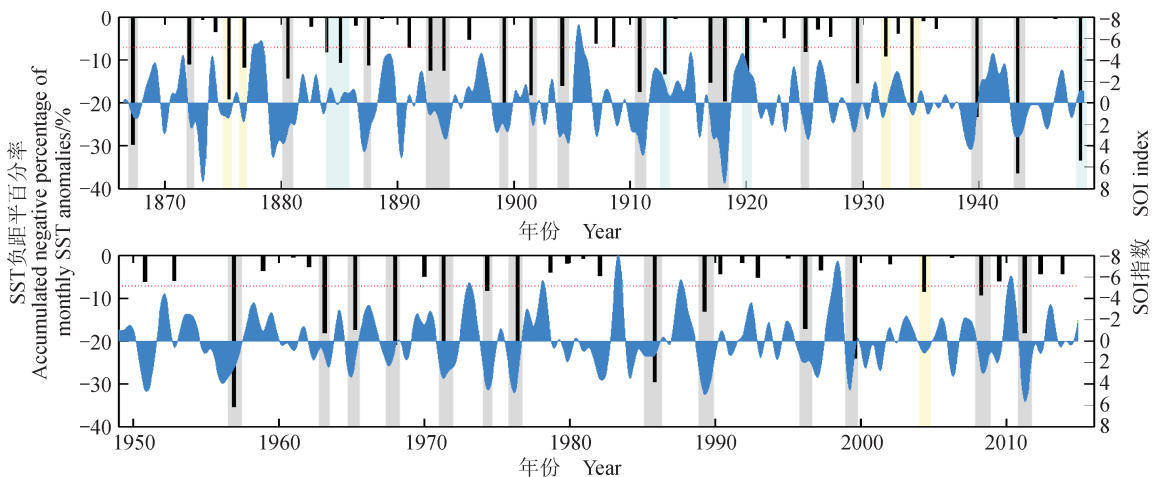
1916 年和 1918 年是对同一响应的), 即西沙 SST 负距平百分率积累值良好地响应了 79.41% 的中等及以上拉尼娜事件。在阈值取 -7.07% 的情况下, 阈值指数 $=27 \times 2 / (34 + 36) = 0.7$, 达到最大。从图 5 来看, 1938 年 11 月—1940 年 8 月西沙 SST 负距平百

分率积累值有错判的嫌疑, 但观察相对应的 SOI 值可以发现, 在 1937 年 2 月—1939 年 7 月这一时期内 SOI 值为正值, 处于中等拉尼娜状态, 从两者时间上来看, 西沙 SST 负异常与拉尼娜的影响分不开, 可将该次负距平百分率积累判为对拉尼娜的响应。



浅蓝色阴影表示此次 SST 正距平百分率积累值并非厄尔尼诺导致; 灰色阴影表示此次 SST 正距平百分率积累值是对厄尔尼诺的良好响应; 黄色阴影表示虽然同期厄尔尼诺较弱, 但西沙 SST 正距平百分率积累值仍然超过了 SST 正距平百分率积累值阈值。
Light blue shade meant the accumulated positive SST anomalies was not the result of El Niño. Grey shade meant the accumulated positive SST anomalies was the respond of El Niño. Yellow shade meant although the El Niño was weak over that period, the positive SST anomalies still exceeded the threshold.

图 4 西沙群岛海域 SST 正距平百分率积累值 (黑色柱状图) 及阈值 (红色虚线) 与 SOI 指数 (蓝色面积图) 对比分析
Fig.4 Accumulated positive percentage of monthly SST anomalies of Xisha (bar graph), accumulated positive percentage of monthly SST anomalies threshold (red line) and monthly SOI index (blue area)



浅蓝色阴影表示此次西沙 SST 负距平百分率积累值并非拉尼娜导致; 灰色阴影表示此次西沙 SST 负距平百分率积累值是对拉尼娜的良好响应; 橘黄色阴影表示虽然同期拉尼娜较弱, 但西沙 SST 负距平百分率积累值仍然超过了西沙 SST 负距平百分率积累值阈值。
Light blue shade meant the accumulated negative percentage of SST anomalies was not the result of La Niña. Grey shade meant the accumulated negative SST anomalies was the respond of La Niña. Yellow shade meant although the La Niña was weak over that period, the negative SST anomalies still exceeded the threshold.

图 5 西沙群岛海域 SST 负距平百分率积累值 (黑色柱状图) 及阈值 (红色虚线) 与 SOI 指数 (蓝色面积图) 对比分析
Fig.5 Accumulated negative percentage of monthly SST anomalies of Xisha (bar graph), accumulated negative percentage of monthly SST anomalies threshold (red line) and monthly SOI index (blue area)

3 讨论与结论

1958—2005 年, 西沙群岛永兴岛气象观测站气温距平百分率积累值与 MEI 指数比较分析显示: 西沙气温正距平百分率积累值阈值能较为良好地反应 75.00% 的中等及其以上强度厄尔尼诺事件, 厄尔尼诺阈值指数为 0.72; 西沙气温负距平百分率积累值阈值能较好地反应 100% 的中等及其以上强度拉尼娜事件, 拉尼娜阈值指数为 0.91。1866—2014 年, 西沙群岛海域 SST 异常与同期 SOI 指数对比分析表明: 西沙 SST 正距平百分率积累值阈值能对 76.47% 的中等及其以上强度的厄尔尼诺有较为良好的响应, 厄尔尼诺阈值指数为 0.7536; 西沙 SST 负距平百分率积累值阈值能对 79.41% 的中等及其以上强度的拉尼娜事件有较为良好的响应, 拉尼娜阈值指数为 0.77。在 1958—2005 年和 1866—2014 年的记录中, 对于厄尔尼诺和拉尼娜, 西沙气温、SST 距平百分率积累值均有较为良好的响应。虽然仍然有误判的情况, 且有部分 ENSO 事件并不能在西沙气温、SST 异常中有所响应, 但总体来看, 中等及其以上强度 ENSO 事件与西沙气温、SST 距平百分率积累值有良好的对应关系。因此, 利用西沙气温、SST 距平百分率积累值阈值来判定是否出现 ENSO 现象是较为可靠的。计算西沙气温、SST 距平百分率积累值, 取阈值指数最大时所对应的距平百分率积累值作为 ENSO 的阈值, 超过此阈值则认为是 ENSO 信号。这种西沙气温、SST 距平百分率积累值阈值法能够正确记录 70% 的中等及其以上强度的 ENSO 事件: 对西沙台站 1958—2005 年逐月气温资料采用温度距平百分率积累值阈值法正确建立了 9 次中等及其以上强度厄尔尼诺事件与 10 次中等及其以上强度拉尼娜事件, 即建立了 75% 的厄尔尼诺事件与 100% 的拉尼娜事件 (如图 2、图 3); 对西沙 1866—2014 年逐月格点 SST 资料采用温度距平百分率积累值阈值法正确建立了 26 次中等及其以上强度厄尔尼诺事件与 27 次中等及其以上强度拉尼娜事件, 即建立了 76.47% 的厄尔尼诺事件与 79.41% 的拉尼娜事件 (如图 4, 图 5)。

对于现代气候资料的分析表明, 南海气温、SST 距平百分率积累值阈值可以较为有效地重建中等及其以上强度的 ENSO 事件, 在现代气候资料分析的基础上, 利用西沙群岛海域高分辨率的砗磲、珊瑚等替代性指标记录所得到的 SST 序列

按温度距平百分率积累值阈值法对过去 ENSO 事件进行重建具有可靠的科学依据。

参考文献

- 陈桂英. 2000. El Niño 和 La Niña 冬季增强型和减弱型及其对中国夏季旱涝的影响 [J]. *应用气象学报*, 11(2): 154–164. [Chen G Y. 2000. Influences of winter-strengthen pattern and winter-weaken pattern of El Niño and La Niña on drought/flood in summer over China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 11(2): 154–164.]
- 据建华, 陈琳玲. 2003. ENSO 对云南地区降水影响的年代际变化 [J]. *热带气象学报*, 19(2): 191–196. [Ju J H, Chen L L. 2003. The influence of ENSO events upon Yunnan precipitation and its interdecadal variations [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 19(2): 191–196.]
- 林爱兰, 张人禾. 2004. ENSO 对南海海温异常影响的机理分析 [C]// 中国气象学会 2004 年年会会议论文集. [Lin A L, Zhang R H. 2004. Mechanism of the ENSO impact upon the South China Sea SST anomaly [C]// Proceedings of the Symposium of Chinese Meteorological Society in 2004.]
- 谭军, 周发琇, 胡敦欣, 等. 1995. 南海海温异常与 ENSO 的相关性 [J]. *海洋与湖沼*, 26(4): 377–382. [Tan J, Zhou F X, Hu D X, et al. 1995. The correlation between SST anomaly in the South China Sea and ENSO [J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 26(4): 377–382.]
- 晏宏, 孙立广, 刘晓东, 等. 2010. 近 50 年来南海西沙群岛海域气候异常的 ENSO 效应 [J]. *热带海洋学报*, 29(5): 29–35. [Yan H, Sun L G, Liu X D, et al. 2005. [Relationship between ENSO events and regional climate anomalies around the Xisha Islands during the last 50 years [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(5): 29–35.]
- Ayling B F, Chappell J, Gagan M K, et al. 2015. ENSO variability during MIS 11 (424–374 ka) from *Tridacna gigas* at Huon Peninsula, Papua New Guinea [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 431: 236–246.
- Bathup R, McGregor S, Gallant A J E. 2015. The influence of non-stationary ENSO teleconnections on reconstructions of paleoclimate using a pseudoproxy framework [J]. *Climate of the Past Discussions*, 11(4): 3853–3895.
- Berkelhammer M, Sinha A, Mudelsee M, et al. 2014. On the low-frequency component of the ENSO- Indian monsoon

- relationship: a paired proxy perspective [J]. *Climate of the Past*, 9(3): 733–744.
- Bin W, Renguang W, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 13(9): 1517–1536.
- Chen J M, Li T, Shih C F. 2007. Fall persistence barrier of sea surface temperature in the South China Sea associated with ENSO [J]. *Journal of Climate*, 20(2): 158–172.
- Correge T, Delcroix T, Recy J, et al. 2000. Evidence for stronger El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral [J]. *Paleoceanography*, 15(4): 465–470.
- Diaz H F, Hoerling M P, Eischeid J K. 2001. ENSO variability, teleconnections and climate change [J]. *International Journal of Climatology*, 21(15): 1845–1862.
- Dilley M, Heyman B N. 1995. ENSO and disaster: Droughts, floods and El Niño/Southern Oscillation warm events [J]. *Disasters*, 19(3): 181–193.
- Driscoll R, Elliot M, Russon T, et al. 2014. ENSO reconstructions over the past 60 ka using giant clams (*Tridacna*, sp.) from Papua New Guinea [J]. *Geophysical Research Letters*, 41(19): 6819–6825.
- Heydt A S V D, Nnafie A, Dijkstra H A. 2011. Cold tongue/ Warm pool and ENSO dynamics in the Pliocene [J]. *Climate of the Past*, 7(2): 903–915.
- Ivany L C, Brey T, Huber M, et al. 2011. El Niño in the Eocene greenhouse recorded by fossil bivalves and wood from Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 38, L16709. DOI:10.1029/2011GL048635.
- Mcgregor H V, Fischer M J, Gagan M K, et al. 2013. A weak El Niño/Southern Oscillation with delayed seasonal growth around 4,300 years ago [J]. *Nature Geoscience*, 6(11): 949–953.
- Qu T, Kim Y Y, Yaremchuk M, et al. 2004. Can Luzon Strait Transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? [J]. *Journal of Climate*, 17(18): 3644–3657.
- Schollaen K, Karamperidou C, Krusic P J, et al. 2015. ENSO flavors in a tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ record of *Tectona grandis* from Indonesia [J]. *Climate of the Past Discussions*, 10(5): 1325–1333.
- Welsh K, Elliot M, Tudhope A, et al. 2011. Giant bivalves (*Tridacna gigas*) as recorders of ENSO variability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(3/4): 266–270.
- Yan H, Liu C C, Zhang W C, et al. 2016. ENSO variability around 2000 years ago recorded by *Tridacna gigas*, $\delta^{18}\text{O}$ from the South China Sea [J]. *Quaternary International*, Available online 31 May 2016, In Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2016.05.011>.
- Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al. 2010. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(4): 832–844.
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset [J]. *International Journal of Climatology*, 27(2): 157–167.