

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.908



台湾东北部海域海表温度季节与年际异常及其对历史气候重建的启示

赵松^{1,3}, 常凤鸣^{1,2*}, 李铁刚^{2,4}, 庄丽华^{1,2}, 熊志方^{1,2}, 徐烨^{1,3}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266061

3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

4. 国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东青岛 266061

摘要: SST(海洋表层温度, sea surface temperature)的季节与年际异常对于认识现代全球变暖、重建历史时期气候变化以及探讨气候变化机制具有重要意义, 而台湾东北部海域 SST 季节与年际异常的研究却相对较少。为更好地理解现代全球变暖和历史气候变化, 利用 NOAA 的全球海表温度最优插值资料、Hadley 中心的全球海表温度数据以及 MEI 逐月指数, 分析了现代全球变暖背景下台湾东北部海域 SST 季节与年际异常及其控制因素。季节尺度上, 受东亚冬季风的影响, 研究海区的冬季 SST 变化比夏季更为剧烈, 冬季 SST 控制着该海域年均 SST 和 SST 季节性的变化。现代器测和古气候记录表明该现象在年际一百年尺度上可能一直存在。年际尺度上, SST 异常与 MEI 指数存在显著的 8 个月滞后相关性, ENSO(厄尔尼诺—南方涛动, El Niño-Southern Oscillation)事件通过东亚冬季风来影响研究海域的 SST 变化。在历史气候重建中区分气候变化的多尺度性和替代指标的季节性、认识历史气候对 ENSO 及东亚冬季风的响应特征和机制, 这将有助于进一步理解现代全球气候变暖的原因。

关键词: 海洋表层温度; 台湾东北部海域; 海洋地质; 东亚冬季风; 厄尔尼诺—南方涛动。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2018)03-0851-11

收稿日期: 2017-11-20

Seasonal and Inter-Annual Anomalies of Sea Surface Temperature Offshore Northeastern Taiwan and Its Implication to Historical Climate Reconstructions

Zhao Song^{1,3}, Chang Fengming^{1,2*}, Li Tiegang^{2,4}, Zhuang Lihua^{1,2}, Xiong Zhifang^{1,2}, Xu Ye^{1,3}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

3. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

Abstract: Seasonal and inter-annual anomalies of sea surface temperature (SST) are very important for recognizing modern global warming, reconstructing historical climate changes and discussing mechanisms of climate changes. However, the related researches of SST offshore northeastern Taiwan are not enough. Based on NOAA's monthly SST data, monthly SST data from Hadley Center and monthly Multivariate ENSO Index (MEI), the seasonal and inter-annual anomalies of SST and their influencing factors offshore northeastern Taiwan under the background of modern global warming are analyzed in order to further understand modern global warming and historical climate changes. On seasonal timescales, winter SST always displays greater

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41476041, 41230959); “全球变化与海气相互作用”专项项目 (Nos. GGASI-GEOGE-06-02, GASI-GEOGE-04); “中国科学院战略性先导科技”专项课题 (No. XDA10010305)。

作者简介: 赵松 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为古海洋与古环境。ORCID: 0000-0002-4943-573X. E-mail: zhaosong8501555@163.com

*** 通讯作者:** 常凤鸣, ORCID: 0000-0002-7786-3213. E-mail: chfm@qdio.ac.cn

引用格式: 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等, 2018. 台湾东北部海域海表温度季节与年际异常及其对历史气候重建的启示. 地球科学, 43(3): 851-861.

variation range than summer SST, and its influence on the annual mean SST and SST seasonality is more serious, which could be contributed to the effects of East Asian Winter Monsoon (EAWM). Modern instrumental data and paleoclimate records show that greater variabilities of winter SST than summer SST possibly also exist on the inter-annual-centennial timescales. On inter-annual timescales, the SST anomalies offshore northeastern Taiwan exhibit a good lag correlation to MEI Index indicating the significant effect of ENSO on SST anomalies through the robust role of EAWM. It is crucial to distinguish the different multi-scales of climate change and seasonal explanations of temperature proxies when reconstructing the past temperature variation. And, insight to the responses of historical climate to ENSO and EAWM would be helpful to further understand the cause of modern global warming.

Key words: sea surface temperature; offshore northeastern Taiwan; marine geology; East Asian Winter Monsoon; ENSO.

0 引言

20 世纪以来的全球变暖趋势已被广泛认同 (Solomon *et al.*, 2007; Stocker *et al.*, 2013), 对现代气候增暖的历史地位和归因的准确评估, 需要对过去更长时段内的气候变化历史有充分认识. 过去 2 000 年里, 地球气候的一些自然参数没有发生显著的变化, 对这一时段气候变化的研究是辨识当前全球变暖的自然和人为驱动贡献的科学基础, 对预估未来气候变化趋势具有重要意义. 经过几十年的研究积累, 有关过去 2 000 年全球气温变化的研究取得了突破性进展 (Ahmed *et al.*, 2013), 然而各大陆的温度变化过程也显示了明显的区域特征, 且由于代用指标的偏向性和公元 1500 年之前资料的缺乏, 全球和区域规模的温度重建结果依然存在很大的不确定性 (D'Arrigo *et al.*, 2008; Mann *et al.*, 2009; Ge *et al.*, 2010). 大量研究显示, 过去 2 000 年全球或区域性地存在着百年尺度的温暖期, 如罗马暖期 (约 550 BC~350 AD) 和中世纪暖期 (约 800 AD~1 300 AD) (Lamb, 1965, 1977; Yan *et al.*, 2011, 2015a). 有关这些历史暖期在不同区域的温度变化幅度和时间跨度仍然有很大的不确定性, 对于近千年以来温暖期的气候变化研究, 有助于更好地认识当今气候变暖的历史地位和原因.

此外, 海洋是气候系统的一个重要组成部分, 在全球和区域的气候变化中, 海洋的影响至关重要, 认识过去 2 000 年海洋的变化有助于理解现代气候变暖的本质. 目前, 与北半球大陆密集的古温度重建结果相比 (Ahmed *et al.*, 2013), 高分辨率、长时间跨度的海洋 (特别是热带、亚热带海区) 温度记录的匮乏, 极大地阻碍着对过去 2 000 年全球规模的温度变化幅度、过程和原因的评估 (Cunningham *et al.*, 2013). 利用各种代用指标在特定关键海区重建近千年来海洋温盐等参数的高分辨率变化依然是过

去 2 000 年气候研究中面临的巨大挑战. 其中全球变暖背景下器测数据的挖掘对于研究历史暖期的气候变化至关重要, 重建过去千年以来海洋表层温度 (SST) 的历史之前, 理清现代区域 SST (sea surface temperature) 变化特征和机制是非常有必要的.

台湾东北部海域位于中国东海与菲律宾海的交界处. 该区处于西北太平洋亚热带, 为全球南北气流、亚洲西向季风与东向信风的一个交汇处, 其气候对西北太平洋、东亚及南亚大气环流大尺度的变化十分敏感 (Chou *et al.*, 2011). 同时, 起源于北赤道流的黑潮流沿其东侧北上, 黑潮及其附近海域海温异常对全球气候有重要影响 (倪东鸿等, 2003; 赵永平和 McBean, 1995); 黑潮流速、流量的变化不仅与北赤道流的变异密切相关, 同时也受 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 活动的影响 (Yamagata *et al.*, 1985; Yasuda *et al.*, 1985; 袁耀初等, 2001), 其流经海区的温盐变化包含赤道季风、热带太平洋的信息 (Wang and Ding, 2006). 因此, 本文选取台湾东北部海域, 探讨该海区一百多年来 SST 季节与年际异常及其影响因素, 为将来重建过去千年区域气候变化提供现代器测资料的支持.

1 资料与方法介绍

本文所使用的台湾东北部海域 (图 1) 1982 年 1 月—2015 年 12 月逐月 SST 资料来自美国国家海洋和大气局 (NOAA) 提供的全球海表温度最优插值数据集 (NOAA_OI_SST_V2), 范围为 24°N~25°N、122°E~123°E, 水平分辨率为 1°×1° (Reynolds *et al.*, 2002); 1870 年 1 月—2015 年 12 月逐月 SST 资料来自英国气象局哈德莱中心 (Hadley) 提供的全球海表温度数据集 (HadISST1), 范围为 24°N~25°N、122°E~123°E, 水平分辨率为 1°×1° (Rayner, 2003). 台湾宜兰县 1936 年 1 月—2010 年

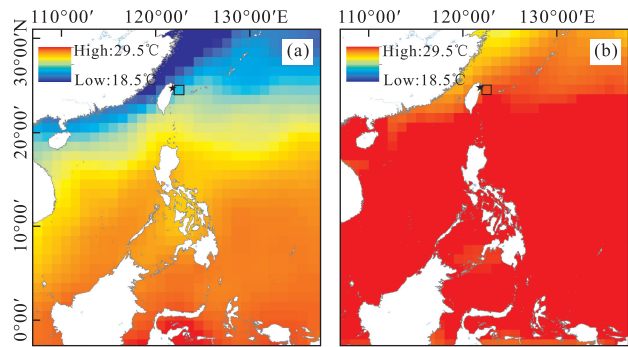


图 1 西北太平洋 2010 年 1 月(a)和 7 月(b)海面表层温度
Fig.1 Sea surface temperature (SST) of northwestern Pacific in January 2010 (a) and July 2010(b)
黑色方框:台湾东北部海域;黑色五角星:宜兰县气象站

12 月逐月气温资料来自台湾中央气象局. ENSO 资料选用美国国家海洋和大气局(NOAA)地球系统研究实验室(ESRL)公布的多变量 ENSO 指数,即 MEI (Multivariate ENSO Index)逐月指数.该指数是基于热带太平洋 6 个主要观测变量(海平面气压、地表径向与纬向风、海表面温度、地球表面气温以及天空总云量),通过计算而得到的一种检测 ENSO 变化的指数(Wolter and Timlin, 1993,1998).台湾东北部海域逐年 SST 季节性通过每年 7 月 SST 减去该年 1 月 SST 而得到(SST 季节性=该年 7 月 SST-该年 1 月 SST);逐月 SST 异常通过计算 Z-score 而得到 $[Z\text{-score}=(\text{月观测值}-\text{该月平均值})/\text{该月标准偏差}]$;台湾宜兰逐月气温距平百分率是在各月气温平均值的基础上计算得到,表达式为:气温距平百分率 $=(\text{月观测气温值}-\text{该月气温平均值})/\text{该月气温平均值}$.利用时间序列分析软件 Redfit3.8 对 1950—2010 年 MEI 逐月指数和台湾东北部海域逐月 SST 异常进行频谱分析,提取这两个时间序列的周期信息(Schulz and Mudelsee,2002).

2 台湾东北部海域 SST 季节与年际异常及其影响因素

2.1 区域温度长期变化特征

1870—2015 年台湾东北部海域年平均 SST 呈现出显著的上升趋势,通过了 99% 的置信度检验,140 多年以来 SST 上升速率为 $1.21\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ (图 2).笔者对台湾宜兰过去 70 多年来(1936—2010 年)气温资料的分析显示:该地区年均气温也表现出了明显的上升趋势,上升速率为 $1.46\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,同样通过

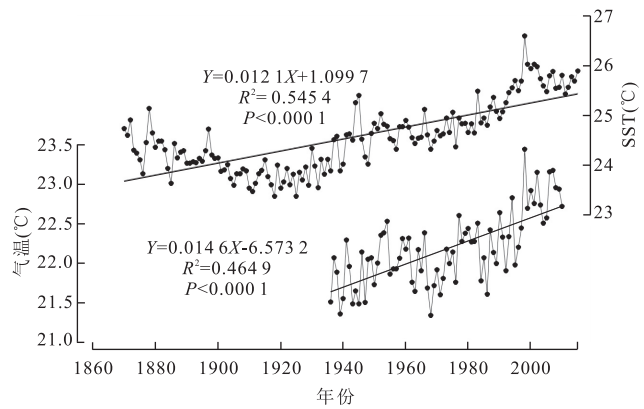


图 2 台湾东北部海域年均 SST(上)和台湾宜兰年均气温变化(下)
Fig. 2 Annual mean SST offshore northeastern Taiwan (up) and annual mean air temperature in Yilan County, Taiwan (down)

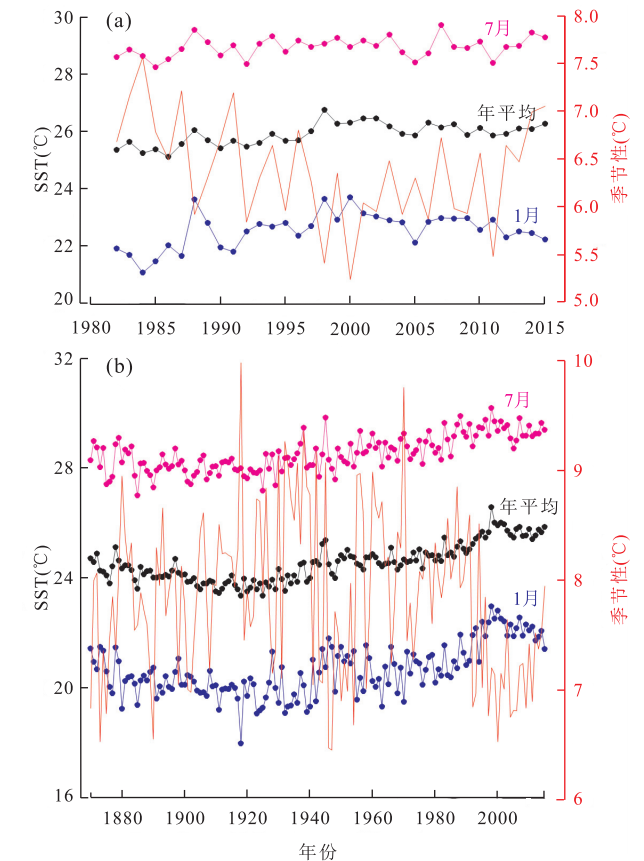


图 3 台湾东北部海域 7 月 SST(上)、年平均 SST(中)、1 月 SST(下)以及 SST 季节性变化(红线)
Fig.3 July (up), annual mean (middle), January (down) SST variation and SST seasonality (red line) offshore northeastern Taiwan
a.NOAA_OI_SST_V2;b.HadISST1

了 99% 的置信度检验(图 2),可见该区域局地气温变化趋势与海表温度具有良好的相关性.1870—

2015 年台湾东北部海域 SST 上升速率($1.21\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)与 1900—2008 年黑潮流域百年海表变暖速率($1.29\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)(Wu *et al.*, 2012a)相近,而略低于 1909—2010 年中国中东部百年 SST 上升速率($1.52\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)(Cao *et al.*, 2013).此外,无论是 SST 还是局地气温都表现了强烈的年际波动,过去 70 多年以来宜兰的最高年平均气温发生在 1998 年,达 $23.43\text{ }^{\circ}\text{C}$;过去 100 多年以来台湾东北部海域年平均 SST 最高值也出现在 1998 年,达 $26.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 2).可见,台湾东北部海域的海表温度和台湾宜兰的局地气温与全球绝大部分区域一样都显示出了 20 世纪以来的变暖趋势,但上升速率却表现了一定的海陆差异和区域性特征.

2.2 海表温度季节异常与东亚冬季风的联系

近 30 年来(1982—2015 年)台湾东北部海域夏季、冬季及年均 SST 的变化显示,夏季 SST 波动较小,而冬季 SST 波动较大,冬季 SST 的变化明显比夏季更为剧烈(图 3a),该现象同样存在于近 140 年以来(1870—2015 年)的 SST 变化之中(图 3b).对年平均 SST 分别与 1 月份 SST、7 月份 SST 做一元线性回归发现,1 月份 SST 与年平均 SST 的相关性($R^2=0.80, P<0.0001$)明显高于 7 月份 SST($R^2=0.58, P<0.0001$),说明冬季 SST 对年平均 SST 的影响比夏季更明显(图 4a, 4b).同时, SST 季节性分

别与年平均 SST、1 月份 SST、7 月份 SST 的一元线性回归结果也显示, SST 季节性与 1 月份 SST 具有最高的显著相关性($R^2=0.70, P<0.0001$),而年平均 SST 和 7 月份 SST 与 SST 季节性的相关性或显著性都比较差,说明该地区 SST 季节性变化主要受冬季 SST 控制(图 4c~4e).

台湾东北部海域位于西太平洋暖池西北边缘,夏季暖池北移,该海域夏季 SST 主要受西太平洋暖池状态的控制(图 1),而暖池核心区($>29\text{ }^{\circ}\text{C}$)夏季 SST 波动不大(Qu *et al.*, 2005),故研究海域夏季 SST 波动较小.台湾东北部海域地处东亚季风控制区,东亚季风异常对中国近海海表温度异常有重要影响(Wang *et al.*, 2002).观测资料发现,东亚冬季风异常对西北太平洋冬季 SST 存在显著的影响,冬季风增强(减弱),我国近海和黑潮流域 SST 下降(上升)(秦正坤和孙照渤, 2006).东亚冬季风通过调控海气热通量来影响我国东部近海 SST,冬季风增强时,偏强的东亚冬季风有利于寒潮和冷涌的出现,导致冷空气频繁地影响东亚边缘海,该海域海表感热、潜热和长波辐射通量都大幅增长,海水易于散热,从而导致 SST 下降;冬季风减弱时,海表感热、潜热和长波辐射通量变小,海水散热较少,因此 SST 易出现升温的趋势(梁巧倩等, 2006; 秦正坤和孙照渤, 2006).此外,冬季风异常能够驱动海流并产

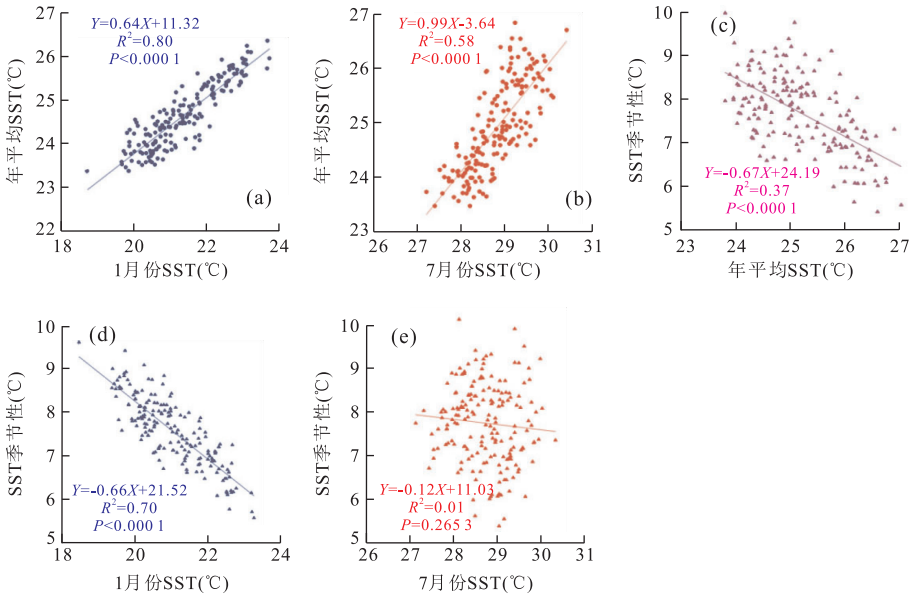


图 4 台湾东北部海域年平均 SST 与 1 月份 SST(a)、7 月份 SST(b)的线性回归,以及 SST 季节性与年平均 SST(c)、1 月份 SST(d)、7 月份 SST(e)的线性回归

Fig.4 The linear regressions of annual mean SST versus January SST (a), annual mean SST versus July SST (b), SST seasonality versus annual mean SST (c), SST seasonality versus January SST (d), SST seasonality versus July SST (e) offshore northeastern Taiwan

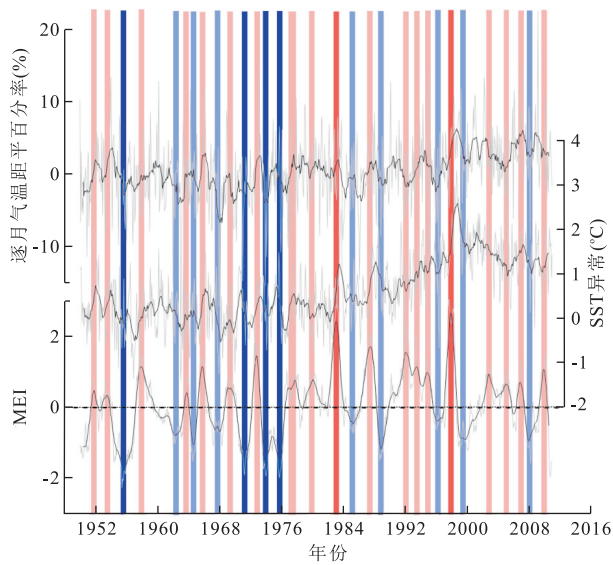


图 5 1950—2010 年台湾宜兰逐月气温距平百分率(上,黑线为 11 个月移动平均曲线)、台湾东北部海域逐月 SST 异常(中,黑线为 11 个月移动平均曲线)以及 MEI 逐月指数(下,黑线为 11 个月移动平均曲线)

Fig.5 Percentage of monthly air-temperature anomalies in Yilan County, Taiwan (up, black bold line denotes 11-months moving averages), monthly SST anomalies offshore northeastern Taiwan (middle, black bold line denotes 11-months moving averages), and monthly MEI index(down, black bold line denotes 11-months moving averages) in 1950—2010

(深)浅红色阴影:(超强)厄尔尼诺事件;(深)浅蓝色阴影:(超强)拉尼娜事件

生海流异常,继而通过海水辐合辐散和平流导致其海温发生相应的变化(吴国雄等,2000;秦正坤和孙照渤,2006).东亚冬季风是东海沿岸流冬季南下的主要驱动力,强烈的东亚冬季风必然会导致强劲的北方冷水团向南侵入(Pan *et al.*, 2012).冬季西太平洋暖池南移,受东北向东亚冬季风驱动,东海和南海明显存在一股沿岸南下的冷水团,呈“冷舌状”(图 1).可见,台湾东北部海域冬季 SST 变化、年平均 SST 变化以及 SST 季节性与起源于西伯利亚高压的东亚冬季风异常有密切的关系.

2.3 海表温度年际异常与 ENSO 的关系

ENSO 是发生在赤道中、东太平洋上复杂的大尺度海气相互作用事件,作为气候系统中仅次于季节变化的最强年际变率信号,ENSO 事件通过沃克环流及哈德莱环流,对中高纬度地区的天气和气候有重大影响(Wang, 2002).为考察 ENSO 背景下台湾东北部海域 SST 异常的变化,对 MEI 逐月指数分别与 SST 逐

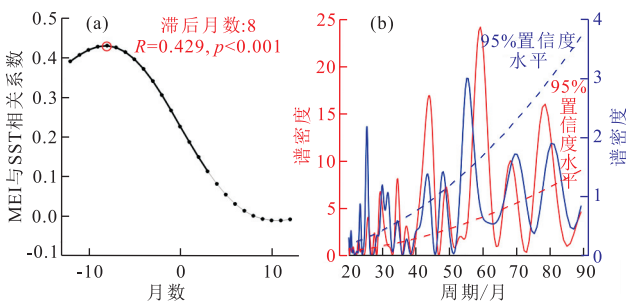


图 6 (a)MEI 与台湾东北部海域 SST 异常(11 个月移动平均处理后)滞后相关性(粗线代表大于 99%置信水平);(b)MEI 指数(11 个月移动平均处理后,红线)和台湾东北部海域 SST 异常(11 个月移动平均处理后,蓝线)的频谱分析

Fig.6 (a) Lagged correlation between MEI index and SST anomalies offshore northeastern Taiwan (thick curve indicates the $> 99\%$ confidence level; 11-month moving averages has been applied); (b) Spectral analysis of MEI index(red, after 11-month moving averages) and SST anomalies (blue, after 11-month moving averages)

月异常和宜兰逐月气温距平百分率做相关分析后发现,过去 60 年(1950—2010 年)以来 MEI 逐月指数与两者之间相关性显著,但是相关系数较小,分别为 $R=0.13(P<0.001)$ 和 $R=0.15(P<0.001)$.分别对逐月 SST 异常、气温距平百分率以及 MEI 指数做 11 个月的移动平滑后,相关性明显提高为 $R=0.23(P<0.001)$ 和 $R=0.30(P<0.001)$.El Niño 年(1951、1963、1972、1982/1983、1986/1987、1991/1992、1997/1998、2003/2004 等年份)台湾东北部海域 SST 和宜兰气温均出现正异常(偏暖);而 LaNiña 年(1954/1956、1964/1966、1970/1972、1973/1975、1984/1985、1988/1989、2008/2009 等年份)SST 和气温则多出现负异常(偏冷),但是 El Niño 事件超前于该地区的温度变化(图 5).此外,11 个月移动平滑后的 SST 异常与 MEI 指数的统计分析也显示出这一显著的相关性,且台湾东北部 SST 异常存在明显的滞后效应(图 6a).MEI 指数对 SST 异常分别做 12 个月的超前和滞后相关分析,结果显示当台湾东北部 SST 异常比 ENSO 滞后 8 个月时,两者出现了最大的正相关,相关系数为 $R=0.429(P<0.001)$,图 6a),表明 ENSO 滞后 8 个月对台湾东北部海域 SST 的影响达到最大.

El Niño 事件一般冬季 12 月份达到成熟阶段,到次年春季就开始衰退,通常情况下次年春末夏初结束,夏季赤道中东太平洋将处于偏冷状态,秋季后

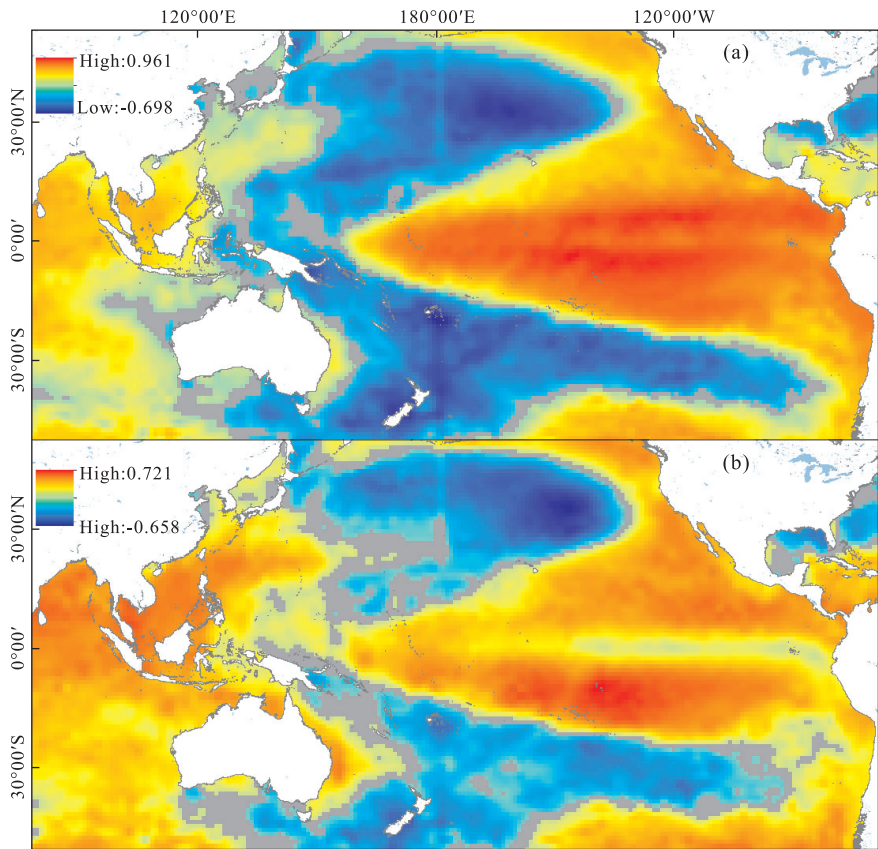


图 7 1950—2010 年 MEI 指数(a)、滞后 8 个月的 MEI 指数(b)与太平洋 SST 异常相关图

Fig.7 Spatial correlation coefficients between MEI index and Pacific SST anomalies (a), 8-months lagged MEI index and Pacific SST anomalies (b) for the period 1950—2010

灰色部分指示未通过 95%置信度检验

转为 LaNiña 事件的可能性大.当 El Niño 发生时,东太平洋温度上升,东西太平洋 SST 梯度降低,气压梯度也会减小,信风变弱;变弱的信风会造成上升流变弱、温跃层加深以及冷水输送变慢,东太平洋温度会进一步升高(Bjerknes, 1969).El Niño 事件中,赤道中东太平洋海表温度的大范围异常直接驱动全球大气环流的异常变化(Wang, 2002).受 El Niño 事件的影响,El Niño 发展年(中东太平洋 SST 异常偏暖)中国东海海温出现大范围的显著偏低现象,而 El Niño 衰退年东海海域海温较常年同期偏高(王智祖等, 2012).MEI 指数与太平洋 SST 异常(11 个月移动平均处理后)相关图显示,El Niño 鼎盛期台湾东北部海域 SST 与赤道中东太平洋 SST 正相关关系不明显,但滞后 8 个月的 MEI 指数与太平洋 SST 异常相关图却显示,台湾东北部海域(甚至整个西北太平洋)SST 与 MEI 指数的线性相关性显著升高,这说明 El Niño 对西北太平洋 SST 的影响存在明显的滞后效应(图 7).一般在次年的夏季(滞后 8 个月),El Niño 事件对台湾东北部海域 SST 的影

响达到最大.台湾东北部海域 SST 和台湾宜兰气温在 1998 年达到最近一百多年或几十年的最高值,而 1998 年正是 1997/1998 超强厄尔尼诺年的次年(图 2,图 5).此外,ENSO 特征之一为赤道太平洋 SST 在年际尺度上具有显著的 2~7 年周期变化,与此相应 1950—2010 年 MEI 指数主要存在 34、44、49、59、68、78 个月的显著周期.1950—2010 年逐月 SST 异常的频谱分析结果也得到了 34、43、48、55 个月的周期,且都通过了 95%的置信度检验(图 6b).以上结果都表明,在年际尺度上台湾东北部海域的 SST 异常与 ENSO 有着直接的联系,El Niño 发生时该海域 SST 异常偏暖,LaNiña 发生时 SST 异常偏冷.

大量的研究表明 ENSO 事件与东亚冬季风的变化有密切联系,El Niño 年东亚冬季风减弱,而 LaNiña 年东亚冬季风往往偏强(穆明权和李崇银, 1999;Wang *et al.*, 2000;Jhun and Lee, 2004;刘屹岷等, 2016).冬季 El Niño 盛行时,欧亚大陆大部分地区(尤其是中高纬地区)气温偏暖,导致海洋与陆地之间热力对比减弱,东亚地区出现南风异常,即冬

季风偏弱.此外,与 El Niño 相关的西太平洋反气旋环流的西南气流,从印度洋—南海—西太平洋输送异常多的水汽到中国东部,该反气旋的存在也会减弱东亚冬季风的强度(刘屹岷等,2016).El Niño 年东北季风减弱,从大陆带来的干冷空气显著减少,导致中国沿岸浅水区域净热通量变化为正值(海洋得热增多或失热减少),温度升高(秦正坤和孙照渤,2006).可见,台湾东北部海域 SST 异常与东亚季风和 ENSO 具有非常密切的联系,SST 异常与 ENSO 指数具有显著的正相关关系(图 5,图 6),在 El Niño 发生时该海域偏暖,ENSO 可能主要通过减弱东亚冬季风的强度使研究海域 SST 升高,并且表现为 SST 异常对 ENSO 指数响应的滞后.

3 海表温度异常对历史温暖期的启示

过去 2000 多年来,北半球中高纬及西太平洋地区存在两个显著的温暖期,即中世纪暖期和罗马暖期(Lamb,1965,1977;Yan *et al.*,2015a).由于绝大多数高分辨率的温度替代指标(如树轮、珊瑚、石笋等)时间跨度较短而且不连续,加上热带或亚热带海区高分辨率记录的严重缺乏,导致对历史温暖期的认识非常有限.前文分析表明,现代全球变暖背景下台湾东北部海域夏季 SST 主要受西太平洋暖池的热动力特征影响,冬季 SST 主要受东亚冬季风的影响,且东亚冬季风也是影响该区域 SST 季节性变化的主要因素.对全球 1 月份与 7 月份 SST 变化幅度的分析显示,在北半球 1 月份 SST 变化幅度比 7 月份大的地区主要分布在冬季偏北风活动频繁的区域(除北极以外),比如中国东海、南海近岸海域和北美东部、南部近岸海域(Yan *et al.*,2015a).因此,对这些地区历史温暖期 SST 重建结果的分析,应注意冬季与夏季 SST 年际变化的差异.

在年际尺度上,冬季与夏季 SST 变化幅度的不同也表现在南海北部现代和中全新世珊瑚的氧同位素记录中(Peng *et al.*,2003;Sun *et al.*,2005),现代暖期南海北部冬季 SST 年际变化幅度较大,海南岛珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化反映了冬季 SST 的年际变化,进而指示东亚冬季风强度(Peng *et al.*,2003).中全新世海南岛冬季珊瑚氧同位素的年际变化主要受控于冬季 SST,夏季珊瑚氧同位素的年际变化主要受控于夏季降水,而受夏季 SST 的影响很小,这说明南海北部夏季 SST 相对冬季 SST 年际变化较小(Sun *et al.*,2005).在百年尺度上,过去千年 SST 的

集成记录显示,南海北部不同冷暖期 SST 的季节性大小是动态变化的,寒冷期 SST 季节性比较大,温暖期 SST 季节性比较小,这主要是冬季 SST 变化幅度大于夏季 SST 变化幅度导致的(Yan *et al.*,2015a).南海北部高分辨率的砗磲 Sr/Ca 海表温度记录也显示,在罗马暖期和中世纪暖期南海北部的年均 SST、夏季 SST、冬季 SST 都分别比现代该地区的年均 SST、夏季 SST、冬季 SST 要高(Yan *et al.*,2014b,2015a,2015b),但是这两个历史暖期相对现代暖期而言冬季 SST 与夏季 SST 变暖幅度却不同.这两个历史暖期的西太平洋暖池变强(夏季 SST 变高),东亚冬季风变弱(冬季 SST 变高),但是冬季 SST 比夏季 SST 升高幅度更大,因此 SST 的季节性变小(Yan *et al.*,2015b).这说明在过去的温暖期,西太平洋暖池变化不大,东亚冬季风却显著减弱(Yan *et al.*,2015b),西伯利亚高压指数也显示中世纪暖期东亚冬季风明显减弱(Meeker and Mayewski,2002).这些结果表明,南海北部的冬季 SST 变化幅度不仅在年际尺度上比夏季 SST 变化幅度要大,而且在百年尺度上这种现象可能同样存在,冬季 SST 变化幅度较大与东亚冬季风强弱的变化密不可分.

SST 季节性大小与气候平均态的关系在阿拉伯半岛近岸海域、北美缅因湾、苏格兰东北海域也有发现(Wanamaker *et al.*,2011;Surge and Barrett,2012;Naidu *et al.*,2014),阿拉伯半岛近岸海域的中世纪暖期冬季 SST 相对小冰期冬季 SST 的升高幅度比夏季 SST 的升高幅度要大,表现为中世纪暖期的季节性比较小.北美缅因湾中世纪暖期的冬季 SST 相对小冰期的冬季 SST 变暖,但是夏季 SST 反而变冷,表现为中世纪暖期的季节性比较小.苏格兰东北海域中世纪暖期的冬季 SST 相对现代暖期的冬季 SST 变冷,但是夏季 SST 反而变暖,表现为中世纪暖期的季节性比较大.可见,SST 季节性大小与气候平均态的关系在不同地区是不一样的,为了更好地理解该现象,需要开展更多的高分辨率 SST 重建工作.在多指标气候记录的集成研究中,绝大多数的替代指标由于缺乏足够的时间分辨率而无法识别其温度的季节代表性,这些结果可能与年平均温度有很大的出入(Jansen *et al.*,2007;Ekaykin *et al.*,2014).因此,在季节性变化较大的地区,集成结果会存在很大的不确定性,比如关于 20 世纪是否是过去 1300 年以来最暖时期的争议(Jansen *et al.*,2007;Wu *et al.*,2012b;Ahmed *et al.*,2013;Yan

et al., 2014b). 过去千年全球各纬度的 SST 重建显示, 中世纪暖期的温度与现代暖期的温度相当, 甚至更高 (Jacoby *et al.*, 2004; Oppo *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2012a; Cunningham *et al.*, 2013), 但与近十年北半球大陆的古温度集成结果相矛盾 (Jansen *et al.*, 2007; Mann *et al.*, 2008; Ahmed *et al.*, 2013), 这可能就是替代指标的季节性不明确造成的。可见, 在历史气候变化研究中要区分气候变化的多尺度性和替代指标的季节性。此外, 作为最近的两次历史温暖期, 罗马暖期和中世纪暖期的气候经常与现代暖期的气候做对比, 以辨别自然强迫与人为强迫对气候变化的相对贡献。在现代暖期, 台湾东北部海域 SST 年际异常明显地受到 ENSO 影响, 东亚冬季风可能是 ENSO 影响该海域 SST 的中间桥梁; 而南海北部高分辨率的 SST 记录也指示, 罗马暖期和中世纪暖期其 SST 存在明显 ENSO 周期 (Yan *et al.*, 2014a, 2016), 因此, 在过去千年温暖期的气候变化研究中, 应注重对 ENSO 事件和东亚冬季风所起作用的关注。

4 结论

利用台湾东北部海域逐月 SST 数据, 结合逐月 MEI 指数资料, 对现代全球变暖背景下台湾东北部海域 SST 季节与年际异常及其原因的分析得出以下主要结论:

(1) 台湾东北部海域 SST 和台湾宜兰局地气温均呈现出显著的 20 世纪变暖趋势, 一百多年以来该海域冬季的 SST 波动远大于夏季, 年均 SST 和 SST 季节性主要受冬季 SST 的影响; 东亚冬季风是影响该海区冬季 SST、年平均 SST 以及 SST 季节性的主要因素。

(2) 过去 60 年 (1950—2010 年) 以来, El Niño 年台湾东北部海域 SST 出现正异常 (偏暖), 而 La Niña 年则多出现负异常 (偏冷), SST 异常与 MEI 指数之间存在明显的滞后相关性, SST 异常比 ENSO 滞后约 8 个月时间。在年际尺度上, 1950—2010 年该海域 SST 异常表现了明显的 ENSO 周期, ENSO 可能通过减弱或增强东亚冬季风来影响该海区冬季 SST。

(3) 现代台湾东北部海域冬季 SST 年际变化幅度比夏季大的现象也存在于古气候记录中的年际一百年尺度上, 但不同地区 SST 季节性大小与气候平均态的关系是不一样的。

References

- Ahmed, M., Anchukaitis, K. J., Asrat, A., et al., 2013. Continental-Scale Temperature Variability during the Past Two Millennia. *Nature Geoscience*, 6(5): 339—346. <https://doi.org/10.1038/ngeo1797>
- Bjerknes, J., 1969. Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific 1. *Monthly Weather Review*, 97(3): 163—172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:atfep>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:atfep>2.3.co;2)
- Cao, L. J., Zhao, P., Yan, Z. W., et al., 2013. Instrumental Temperature Series in Eastern and Central China Back to the Nineteenth Century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15): 8197—8207. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50615>
- Chou, M. D., Wu, C. H., Kau, W. S., 2011. Large-Scale Control of Summer Precipitation in Taiwan. *Journal of Climate*, 24(19): 5081—5093. <https://doi.org/10.1175/2011jcli4057.1>
- Cunningham, L. K., Austin, W. E., Knudsen, K. L., et al., 2013. Reconstructions of Surface Ocean Conditions from the Northeast Atlantic and Nordic Seas during the Last Millennium. *the Holocene*, 23(7): 921—935. <https://doi.org/10.1177/0959683613479677>
- d'Arrigo, R., Wilson, R., Tudhope, A., 2008. The Impact of Volcanic Forcing on Tropical Temperatures during the Past Four Centuries. *Nature Geoscience*, 2(1): 51—56. <https://doi.org/10.1038/ngeo393>
- Ekaykin, A. A., Kozachek, A. V., Lipenkov, V. Y., et al., 2014. Multiple Climate Shifts in the Southern Hemisphere over the Past Three Centuries Based on Central Antarctic Snow Pits and Core Studies. *Annals of Glaciology*, 55(66): 259—266. <https://doi.org/10.3189/2014aog66a189>
- Ge, Q. S., Zheng, J. Y., Hao, Z. X., et al., 2010. Temperature Variation through 2000 Years in China: An Uncertainty Analysis of Reconstruction and Regional Difference. *Geophysical Research Letters*, 37(3): 93—101. <https://doi.org/10.1029/2009gl041281>
- Jacoby, G., Solomina, O., Frank, D., et al., 2004. Kunashir (Kuriles) Oak 400-Years Reconstruction of Temperature and Relation to the Pacific Decadal Oscillation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209(1—4): 303—311. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.015>
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K. R., et al., 2007. Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom

- and New York, New York, 434—497.
- Jhun, J. G., Lee, E. J., 2004. A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon. *Journal of Climate*, 17 (4): 711—726. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0711:aneawm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0711:aneawm>2.0.co;2)
- Lamb, H. H., 1965. The Early Medieval Warm Epoch and Its Sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1: 13—37. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(65\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(65)90004-0)
- Lamb, H. H., 1977. *Climate: Present, Past and Future*. Methuen, London.
- Liang, Q. Q., Jian, M. Q., Peng, Y. G., et al., 2006. Impacts of East Asian Winter Monsoon on Sea Surface Temperature in Northwestern Pacific. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(6): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. M., Liu, B. Q., Ren, R. C., et al., 2016. Current Super El Niño Event and Its Impacts on Climate in China in Spring and Summer. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 31 (2): 241—250 (in Chinese with English abstract).
- Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., et al., 2008. Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (36): 13252—13257. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805721105>
- Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., et al., 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326 (5957): 1256—1260. <https://doi.org/10.1126/science.1177303>
- Meeker, L. D., Mayewski, P. A., 2002. A 1400-Year High-Resolution Record of Atmospheric Circulation over the North Atlantic and Asia. *The Holocene*, 12 (3): 257—266. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl542ft>
- Mu, M. Q., Li, C. Y., 1999. ENSO Signals in the Interannual Variability of East-Asian Winter Monsoon. Part I: Observed Data Analyses. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 23(3): 276—285 (in Chinese with English abstract).
- Naidu, P. D., Nitsuma, N., Naik, S., 2014. Oxygen Isotopic Analyses of Individual Planktic Foraminifera Species: Implications for Seasonality in the Western Arabian Sea. *Climate of the Past Discussions*, 10 (5): 3661—3688. <https://doi.org/10.5194/cpd-10-3661-2014>
- Ni, D. H., Sun, Z. B., Chen, H. S., et al., 2003. Spatial/Temporal Features of SSTA in Kuroshio Current Region and Its Relations to General Circulation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 26(6): 740—748 (in Chinese with English abstract).
- Oppo, D. W., Rosenthal, Y., Linsley, B. K., 2009. 2 000-Year Long Temperature and Hydrology Reconstructions from the Indo-Pacific Warm Pool. *Nature*, 460 (7259): 1113—1116. <https://doi.org/10.1038/nature08233>
- Pan, A. J., Wan, X. F., Guo, X. G., et al., 2012. Responses of the Zhe-Min Coastal Current Adjacent to Pingtan Island to the Wintertime Monsoon Relaxation in 2006 and Its Mechanism. *Science China Earth Sciences*, 56(3): 386—396. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4429-9>
- Peng, Z. C., Chen, T. G., Nie, B. F., et al., 2003. Coral $\delta^{18}\text{O}$ Records as an Indicator of Winter Monsoon Intensity in the South China Sea. *Quaternary Research*, 59 (3): 285—292. [https://doi.org/10.1016/s0033-5894\(03\)00042-5](https://doi.org/10.1016/s0033-5894(03)00042-5)
- Qin, Z. K., Sun, Z. B., 2006. Influence of Abnormal East Asian Winter Monsoon on the Northwestern Pacific Sea Temperature. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 30 (2): 257—267 (in Chinese with English abstract).
- Qu, T. D., Du, Y., Stachan, J., et al., 2005. Sea Surface Temperature and Its Variability in the Indonesian Region. *Oceanography*, 18 (4): 50—61. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.05>
- Rayner, N. A., 2003. Global Analyses of Sea Surface Temperature, Sea Ice, and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D14): 1—29. <https://doi.org/10.1029/2002jd002670>
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., et al., 2002. An Improved In-Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *Journal of Climate*, 15 (13): 1609—1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:aisas>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:aisas>2.0.co;2)
- Schulz, M., Mudelsee, M., 2002. REDFIT: Estimating Red-Noise Spectra Directly from Unevenly Spaced Paleoclimatic Time Series. *Computers & Geosciences*, 28 (3): 421—426. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(01\)00044-9](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(01)00044-9)
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al., 2007. IPCC, 2007. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, New York.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., et al., 2013. IPCC, 2013. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Cli-*

- mate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, New York, USA.
- Sun, D. H., Gagan, M. K., Cheng, H., et al., 2005. Seasonal and Interannual Variability of the Mid-Holocene East Asian Monsoon in Coral $\delta^{18}\text{O}$ Records from the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 237 (1–2): 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.022>
- Surge, D., Barrett, J. H., 2012. Marine Climatic Seasonality during Medieval Times (10th to 12th Centuries) Based on Isotopic Records in Viking Age Shells from Orkney, Scotland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 350–352: 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.07.003>
- Wanamaker, A. D., Kreutz, K. J., Schöne, B. R., et al., 2011. Gulf of Maine Shells Reveal Changes in Seawater Temperature Seasonality during the Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 302 (1–2): 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.06.005>
- Wang, B., Ding, Q. H., 2006. Changes in Global Monsoon Precipitation over the Past 56 Years. *Geophysical Research Letters*, 33 (6): 272–288. <https://doi.org/10.1029/2005gl025347>
- Wang, B., Wu, R. G., Fu, X., 2000. Pacific-East Asian Teleconnection: How does ENSO Affect East Asian Climate? *Journal of Climate*, 13 (9): 1517–1536. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:peathd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:peathd>2.0.co;2)
- Wang, C. Z., 2002. Atmospheric Circulation Cells Associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 15 (4): 399–419. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0399:accawt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0399:accawt>2.0.co;2)
- Wang, D. X., Xie, Q., Du, Y., et al., 2002. The 1997–1998 Warm Event in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47 (14): 1221–1227. <https://doi.org/10.1007/bf02907614>
- Wang, Z. Z., Zuo, J. C., Chen, M. X., et al., 2012. Relationship between El Niño and Sea Surface Temperature Variation in Coastal Region of Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 40 (4): 461–468 (in Chinese with English abstract).
- Wolter, K., Timlin, M. S., 1993. Monitoring ENSO in COADS with a Seasonally Adjusted Principal Component Index. In: 17th Climate Diagnostics Workshop, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, Norman, 52–57.
- Wolter, K., Timlin, M. S., 1998. Measuring the Strength of ENSO Events: How does 1997/98 Rank? *Weather*, 53 (9): 315–324. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x>
- Wu, G. X., Wei, Y., Liu, H., 2000. Impacts of Persistently Strong Asian Winter Monsoon on Equatorial Sea Surface Temperature Anomaly as Simulated in Climate Model. *Acta Meteorologica Sinica*, 58 (6): 641–652 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. X., Cai, W. J., Zhang, L. P., et al., 2012a. Enhanced Warming over the Global Subtropical Western Boundary Currents. *Nature Climate Change*, 2 (3): 161–166. <https://doi.org/10.1038/nclimate1353>
- Wu, W. C., Tan, W. B., Zhou, L. P., et al., 2012b. Sea Surface Temperature Variability in Southern Okinawa Trough during Last 2 700 Years. *Geophysical Research Letters*, 39 (14): 36–57. <https://doi.org/10.1029/2012gl052749>
- Yamagata, T., Shibao, Y., Umatani, S. I., 1985. Interannual Variability of the Kuroshio Extension and Its Relation to the Southern Oscillation/El Niño. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 41 (4): 274–281. <https://doi.org/10.1007/bf02109276>
- Yan, H., Liu, C., Zhang, W., et al., 2016. ENSO Variability around 2 000 Years Ago Recorded by *Tridacna Gigas* $\delta^{18}\text{O}$ from the South China Sea. *Quaternary International*, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.05.011>
- Yan, H., Soon, W., Wang, Y. H., 2015a. A Composite Sea Surface Temperature Record of the Northern South China Sea for the Past 2 500 Years: A Unique Look into Seasonality and Seasonal Climate Changes during Warm and Cold Periods. *Earth-Science Reviews*, 141: 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.12.003>
- Yan, H., Sun, L. G., Shao, D., et al., 2015b. Seawater Temperature Seasonality in the South China Sea during the Late Holocene Derived from High-Resolution Sr/Ca Ratios of *Tridacna Gigas*. *Quaternary Research*, 83 (2): 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.12.001>
- Yan, H., Sun, L. G., Shao, D., et al., 2014a. Higher Sea Surface Temperature in the Northern South China Sea during the Natural Warm Periods of Late Holocene than Recent Decades. *Chinese Science Bulletin*, 59 (31): 4115–4122. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0317-3>
- Yan, H., Wang, Y. H., Sun, L. G., 2014b. High Resolution Oxygen Isotope and Grayscale Records of a Medieval Fossil Giant Clam (*Tridacna Gigas*) in the South China Sea: Physiological and Paleoclimatic Implications. *Acta Oceanologica Sinica*, 33 (8): 18–25. <https://doi.org/10.1007/s13131-014-0399-4>
- Yan, H., Sun, L. G., Wang, Y. H., et al., 2011. A Record of the

- Southern Oscillation Index for the Past 2 000 Years from Precipitation Proxies. *Nature Geoscience*, 4 (9): 611—614, <https://doi.org/10.1038/ngeo1231>
- Yasuda, L., Yoon, J. H., Sugimoto, N., 1985. Dynamics of the Kuroshio Large Meander—Barotropic Model. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 41: 259—273.
- Yuan, Y. C., Liu, Y. G., Su, J. L., 2001. Variability of the Kuroshio In the East China Sea during El Niño to La Niña Phenomenon of 1997 and 1998. *Chinese Journal of Geophysics*, 44 (2): 199—210 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. P., McBean, G. A., 1995. Air-Sea Interaction between the Kuroshio Region Marine Heating Anomaly and Northern Hemisphere Atmospheric Circulation. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26 (4): 383—388 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 梁巧倩, 简茂球, 彭勇刚, 等, 2006. 东亚冬季风异常对西北太平洋海温的影响. *热带海洋学报*, 25 (6): 1—7.
- 刘屹岷, 刘伯奇, 任荣彩, 等, 2016. 当前重大厄尔尼诺事件对我国春夏气候的影响. *中国科学院院刊*, 31 (2): 241—250.
- 穆明权, 李崇银, 1999. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息: I. 观测资料分析. *大气科学*, 23 (3): 276—285.
- 倪东鸿, 孙照渤, 陈海山, 等, 2003. 冬季黑潮区域 SSTA 的时空演变及其与大气环流的联系. *南京气象学院学报*, 26 (6): 740—748.
- 秦正坤, 孙照渤, 2006. 冬季风异常对西北太平洋海温影响的区域性特征. *大气科学*, 30 (2): 257—267.
- 王智祖, 左军成, 陈美香, 等, 2012. 黄、东海沿海海表温度变化与厄尔尼诺的关系. *河海大学学报*, 40 (4): 461—468.
- 吴国雄, 尉艺, 刘辉, 2000. 东亚持续强冬季风影响赤道海表温度初始异常的数值试验研究. *气象学报*, 58 (6): 641—652.
- 袁耀初, 刘勇刚, 苏纪兰, 2001. 1997—1998 年 El-Niño 至 La-Niña 期间东海黑潮的变异. *地球物理学报*, 44 (2): 199—210.
- 赵永平, McBean, G. A., 1995. 黑潮海域海洋异常加热与北半球大气环流的相互作用. *海洋与湖沼*, 26 (4): 383—388.