

全球百年海表面温度年际和年代际变化特征分析

张锦婷¹, 刘秦玉^{1*}, 武术¹

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 海洋-大气相互作用与气候实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 利用 100 a (1903—2002 年) HadiSST 的逐月资料, 将全球海表面温度异常(SSTA)作为整体进行经验正交函数分解(EOF 分解), 提取了控制各大洋 SSTA 的主导模态和各大洋之间的联合模态, 分析了相应的空间分布和时间序列。研究表明: SSTA 变化最剧烈的海区是赤道中太平洋、西北大西洋湾流海区和北太平洋黑潮延伸体海区。热带太平洋厄尔尼诺和南方涛动是主导模态并具有 2~7 a 周期的年际变化; SSTA 变化第二主模态和第三主模态都是以大约 70 a 为周期的年代际变化为主的跨大洋联合模态。第二主模态的空间分布主要表现为中纬度北太平洋和北大西洋反位相、热带太平洋与北大西洋反位相的太平洋-北大西洋双偶极子型分布。SSTA 变化的第三模态主要呈现南北半球海洋反位相的特征, 为北太平洋-北大西洋-南大洋联合模态。第四模态基本上是反映各个不同海域特有的局地海洋-大气相互作用模态, 该模态的时间序列具有 1~4 a 周期的年际变化和约 9 a 周期的年代际变化。

关键词: 海表面温度; 经验正交函数; 主模态; 年际、年代际变化

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)04-0024-08

1 引言

海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 是海表热特征之一, 其会受到海洋内部和外部环境影响而产生变化, 而 SST 发生变化后又将进一步对大气产生影响。

吴爱明等^[1]对太平洋 SST 的年代际变化进行了研究, 发现热带太平洋和北太平洋 SST 均存在显著的年代际变化, 赤道地区相对较弱, 在时间结构上, 北太平洋 SST 变化更趋于低频。余贞寿等^[2]对热带太平洋 SST 进行研究发现, 热带太平洋 SST 存在 0.9~1.2 a 的变化、2~8 a 的年际变化、10~15 a 的年代际变化, 而厄尔尼诺和南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是热带太平洋 SST 年际变化的最强信号。周天军等^[3]对印度洋海温的研究表明, 印度洋特别是 20°S 以北的热带印

度洋 SST 的变化具有显著的整体一致性, 自 20 世纪 50 年代中期以来, 存在持续变暖的趋势, 赤道印度洋增暖了大约 0.6 °C。在 1976, 1986 年以及 1996 年间分别有一次跳跃性增温, 与太平洋 SST 变化趋势基本一致。晏红明等^[4]研究发现印度洋的海表温度变化相对于较大时间尺度的演变来说, 主要特征是由冷到暖的年代际变化, 50 年代至 60 年代为偏冷期, 70 年代为冷暖交替的过渡期, 80 年代至 90 年代为偏暖期, 此外印度洋海温东西热力场存在异常年际变化, 同 ENSO 有较密切的关系。谭言科等^[5]发现印度洋海温的变化主要存在全区符号一致的单极型和西部与东南部符号相反的偶极型, 它们具有显著的年际变化。Xie 等^[6]的文章曾提到赤道东部大西洋的显著周期是年变化, 南北热带大西洋的 SST 变化具有不对称的 8~12 a 的变化, 而北大西洋具有三极特征, 与北大西洋涛动 (North Atlantic Os-

收稿日期: 2009-05-09; 修订日期: 2009-12-01。

基金项目: 国家自然科学基金 (40676010; 40830106)。

作者简介: 张锦婷 (1985—), 女, 山东省德州市人, 美国华盛顿大学在职博士生, 主要从事海洋-大气相互作用研究。E-mail: jtzhang@uw.edu

* 通信作者: 刘秦玉 (1946—), 女, 河南省开封市人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋-大气相互作用研究。E-mail: liuqy@ouc.edu.cn

cillation,NAO)有密切的联系。Ruiz-Barradas 等^[7]在研究中发现热带大西洋存在年际(约 2.25 a)和年代际变化。赵珊珊等^[8]对热带大西洋的研究表明 SST 的年际变化主要表现为弱 ENSO 型,年代际变化表现为南北大西洋变化相反的偶极子型。以上研究绝大部分是针对不同海域 SST 的变化规律进行的。

徐建军等^[9]对印度洋-太平洋的海温的研究表明,近 50 a 中,印太地区的 SST 经历了 3 个状态,为 1956 年之前的冷态,1957—1976 年的过渡态和 1977 年之后的暖态。冷态表现为热带降温,中高纬度升温,暖态与之相反,同时 ENSO 与印太地区海温变化联系密切。武术等^[10]把热带太平洋、南海和印度洋作为整体研究的情况下发现,在热带太平洋上为 ENSO 模态;在热带印度洋上为对应于 ENSO 态的印度洋“单极型”模态。王晓悦等^[11]对全球以及三大洋 50 a 的 SST 进行了分析,结果表明各大洋之间呈现出较好的整体性、相关性以及大洋之间很好的协同关系,太平洋的主导地位非常突出。此外海温变化存在 3~4 a 的年际变化、5~10 a 准年代际变化、10 a 以及 10 a 以上的年代际变化;北太平洋与西印度洋同期海温变化负相关显著;赤道太平洋海温与滞后其 1 到 3 个月的西印度洋海温变化正相关关系非常明显。

某海域海洋-大气相互作用的异常海温信号可通过大气环流向全球传送,并通过海洋-大气相互作用影响其他海域的 SST,因此,全球海温的变化不应是孤立的,而是具有协同性。但是由于各大洋的海洋-大气相互作用以及海洋调整过程不同,各大洋又各具特色。为了进一步研究全球海洋 SST 变化的协同性及其各大洋的特殊性,本文对全球海洋 100 a 的 SST 进行了整体分析,从地球气候系统的角度讨论全球各大洋 SSTA 的年际和年代际变化规律。

2 资料与处理方法

本文采用的是 Hadley 中心海冰和海表面温度资料集(Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature Data Set)1903 年 1 月到 2002 年 12 月 100 a 的 SST 的月平均资料,空间范围是全球(89.5°S~89.5°N,0.5°~179.5°W 和 0.5°~179.5°E),分辨率是 1°×1°。

由于 SST 资料的时间序列比较长(每个空间点有 1 200 个时间点),全球范围内的空间点也比较多(180×360 个空间点),为了方便运算同时又不影响

分析,本文只分析全球 2°×2°网格点上的资料。

本文对去除了线性趋势的 SST 异常场(SST Anomaly,SSTA)进行了经验正交函数分解(EOF 分解)^[12],并运用 Morlet 小波分析^[13]和功率谱分析^[12]对相应模态的时间序列进行了周期分析。这样就得到相应的时间序列和空间矩阵,清楚地看到各周期随时间的变化情况和各主要周期。

3 全球 SSTA 的标准差分布

SSTA 的标准差较大的区域往往是较为活跃或容易发生变化的区域。由图 1 可以看出,标准差的高值主要出现在赤道中东太平洋、西北大西洋湾流海区和北太平洋黑潮延伸体海区,这说明了这些海区的 SSTA 变化比较剧烈。其中以赤道中东太平洋和西北大西洋最为显著,中心分别位于赤道 80°~120°W 和(43°N,45°W),且最大值均超过 1 °C。这是由于该海域是全球温跃层“露头区”,也是大气年际变化振幅的大值区,温跃层对海面风与热通量变化的响应对 SST 变化的影响也非常显著。北冰洋靠近陆地的海区,标准差值大于 0.6 °C,这表明该海区的 SST 变化也比较明显。而在印-太暖池地区的温跃层很深,海洋内部的变化不容易引起 SST 的变化。

4 全球海表面温度异常场的主要模态

4.1 厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的主导作用

对去除趋势项之后的 SSTA 进行分析后发现,全球 100 a 的 SSTA 的 EOF 第一模态的方差贡献达到 20.53%。其空间分布(见图 2a)表现为,在太平洋海区,赤道中东太平洋为正异常的高值中心,与南北太平洋中纬度海区呈负相关,这种空间分布与单独对太平洋 SSTA 做 EOF 分解得到的第一模态的空间分布型类似,该模态也是前人研究中指出的热带太平洋强迫中纬度太平洋的模态^[14]。该模态在热带印度洋呈现为“海盆一致模”,也就是印度洋海盆模态(Indian Ocean Basin Mode,IOBM),它是印度洋对太平洋 ENSO 的响应模态^[15-16]。在南海及菲律宾以东海域 SSTA 也与赤道东太平洋同号;热带大西洋则表现为除了赤道东大西洋 SSTA 与赤道东太平洋反相外,其余海域则同相。这是由于当 El Niño 事件出现后,加热的赤道东太平洋大气会出现 Kelvin 波的响应,这个异常信号会传到热带大西洋、印度洋,作用于当地的大气从而使得 SST 正异常^[17];此外赤道东太平洋 SST 正异常会引起赤道

大西洋东风加强,赤道东大西洋温跃层变浅,SST 负异常;以及南海冬季风减弱 SST 正异常^[18]。

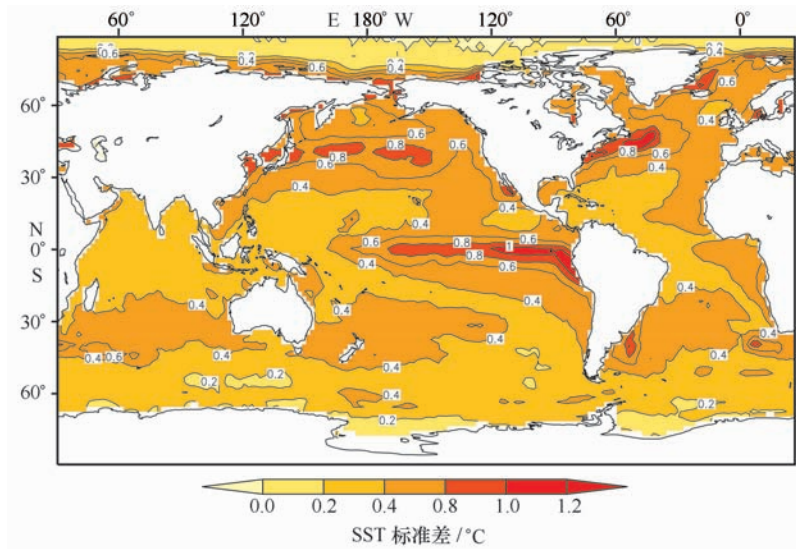


图 1 1903—2002 年全球 SSTA 标准差分布

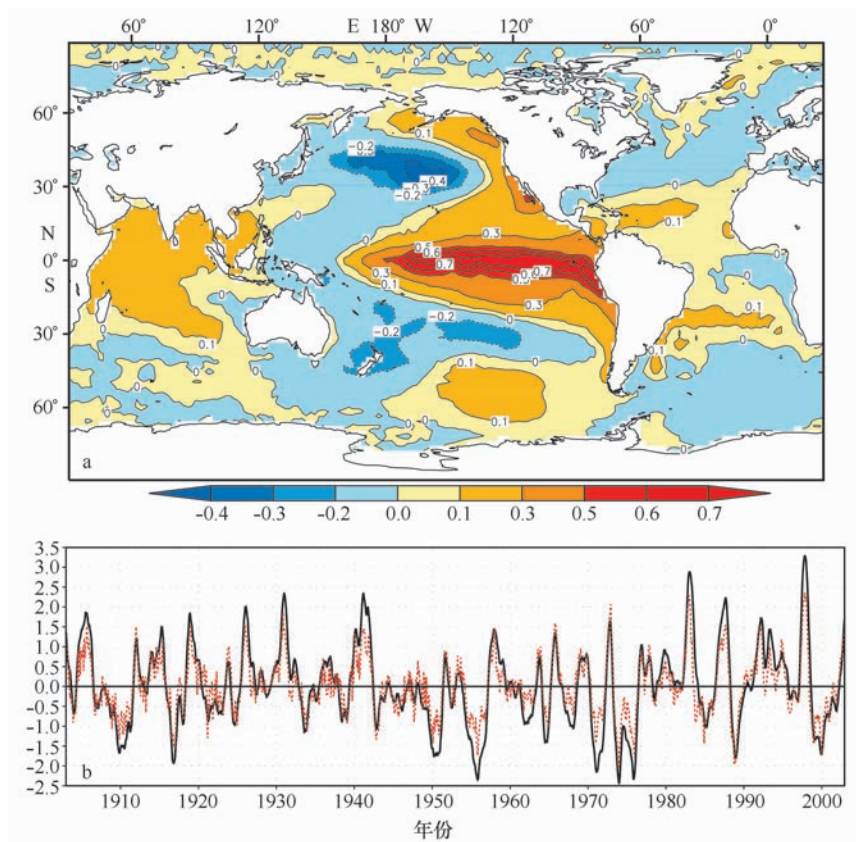


图 2 1903—2002 年全球 SSTA 的 EOF 分解第一模态的空间分布(a)和时间序列(b,黑线)、Nino3.4 区指数(b,红线)

对该模态的时间序列的小波分析可以看出其变化周期为 2~7 a 左右(图略),也与 ENSO 的周期相

吻合。该时间序列与 Nino 3.4 区(5°S~5°N, 120°~170°W)的 SST 异常的相关系数高达 0.90

(见图 2b),也再一次印证了第一模态与 ENSO 的紧密关系。

以上结果均证实了全球 SSTA 年际变化的第一主要模态反映了 ENSO 现象的全球效应:发生在热带太平洋 SST 的年际变化可以通过“大气桥”的热力与动力作用影响全球海洋 SSTA 的年际变化

4.2 太平洋-大西洋联合偶极子模态

全球 100 年 SSTA 的 EOF 第二模态方差贡献为 6.62%,其空间分布如图 3a 所示,当赤道中东太平洋与北太平洋 SSTA 为正异常的高值中心时,赤道东大西洋与北大西洋负异常,在全球尺度上形成了太平洋-大西洋联合的双偶极子结构(一对偶极子在中纬度,另一对在热带)。大西洋 SSTA 的空间分布与泛大西洋年代际振荡的大西洋从北到热带大西洋的三极分布较一致^[19]。北太平洋和热带太平洋都有东西异常反号的特征,大西洋偏向于同相,印度洋的 SSTA 虽然有东西之间的差异,但整体同

相。总体来说太平洋和大西洋反相,共同构成了太平洋-大西洋联合模态。

赤道中东太平洋和赤道大西洋 SSTA 的反相会产生跨越南美大陆的纬向风异常,通过大气桥建立了赤道中东太平洋和赤道大西洋 SSTA 之间的联系^[20]。目前中纬度太平洋-大西洋的偶极子尚未被讨论,后者可能代表了中纬度大气环流异常信号共同影响海洋的结果。

该模态在 100 a 内可以分为 3 个阶段,分别是 1900—1927 年、1928—1963 年、1964—1995 年。可以看出,第 1 和第 3 个阶段北太平洋和赤道中东太平洋 SSTA 为正,北大西洋和热带大西洋为负;第 2 个阶段则相反,周期约为 70 a(图 3b)。对 SSTA 的 EOF 分解的第二模态相应的时间系数进行小波分析和功率谱分析后得到,该模态也有 2~8 a 年际变化,该周期变化在 80 年代比较明显(图略)。

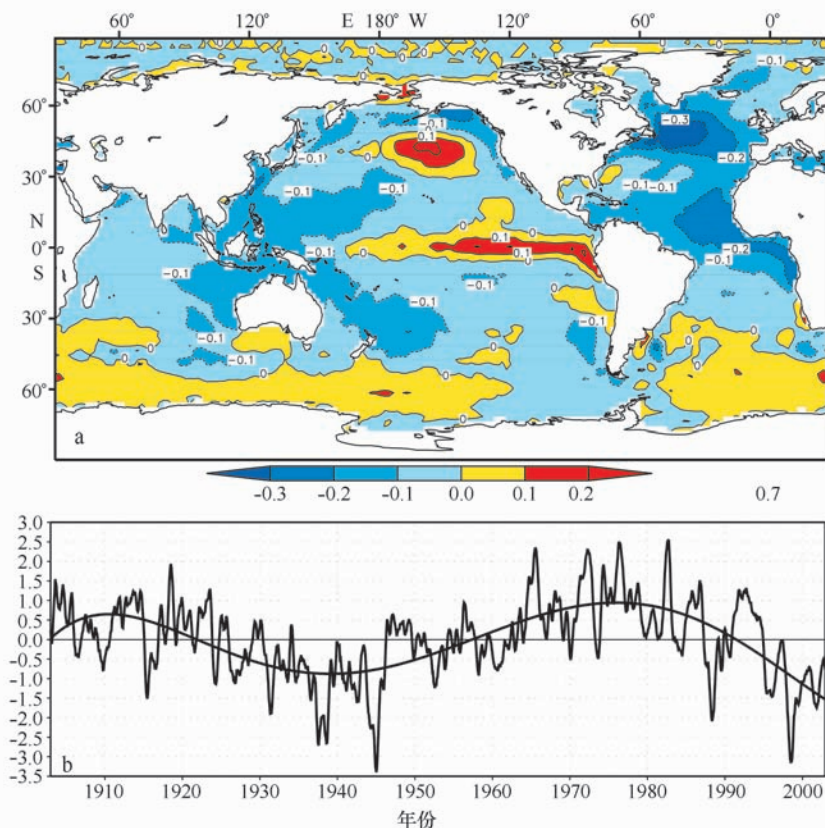


图 3 1903—2002 年全球 SSTA 的 EOF 分解第二模态空间分布(a)和时间序列(b)

根据以上的分析和与第一主模态的比较表明,全球 SSTA 第二主模态是以 70 a 周期为主的模态,在太平洋与大西洋上都有较明显的信号,有可能是

太平洋年代际变化影响大西洋,也有可能是大西洋年代际变化影响太平洋。两者之间的关系尚未确定。在本文中我们称之为太平洋-大西洋联合双偶

极子模态,该模态是本文中第一次提出的模态,其他文章中未曾提及。

4.3 北太平洋-北大西洋-南大洋联合模态

全球 SSTA 第三模态的方差贡献为 5.42%,空间分布呈现北太平洋 SST 变化最大,北大西洋与北太平洋同位相,且南大洋变化较大的特征(图 4a),故称其为北太平洋-北大西洋-南大洋联合模态,与北太平洋中纬度 SST 正异常对应的是印度洋-太平洋暖池变冷,南太平洋为负异常,北大西洋的北部和南部为正异常,南大西洋负异常,印度洋整个海区均

为负异常。特别要注意的是,在南大洋南极绕极流海域 SST 异常振幅在该模态中较大,这表明北太平洋或北大西洋海温的变化可能与南极绕极流的变化有一定的联系。

从该模态时间序列(图 4b)的长期变化来看,整个 100 a 也可以分为 3 个阶段,分别是 1900—1942 年、1943—1970 年、1971—1995 年,在第 2 个阶段中,北太平洋为正异常。该模态的周期似乎也是大约 70 a。这个模态是否与热盐环流的变化有关,还需要进一步开展研究。

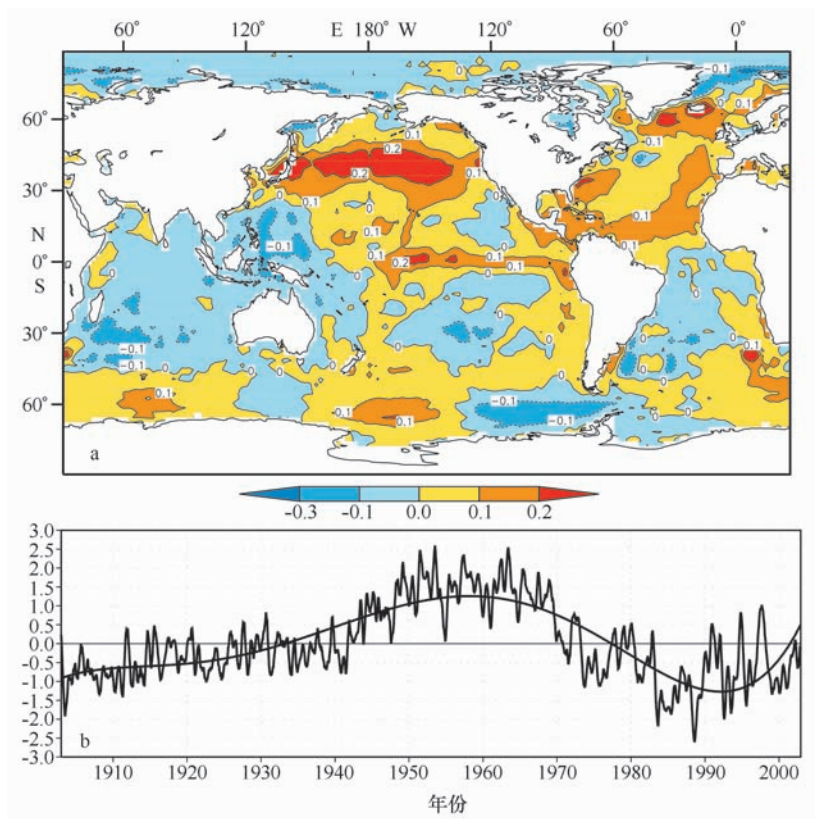


图 4 1903—2002 年全球 SSTA 的 EOF 分解第三模态空间分布(a),时间序列(b)

4.4 第四模态

第四模态所占方差贡献为 4.78%,从空间分布特征上来看,其主要表现了各大洋局地变化的一些特征(见图 5a)。

从第四模态的空间分布可以看到北太平洋呈现马蹄型异常海温分布(黑潮与黑潮延伸体海域 SST 负异常的周围有 SST 的正异常),与其相对应的是赤道东太平洋的 SST 负异常。这个模态在太平洋的空间分布类似于在扣除 El Niño 信息后中

纬度 11—2 月的马蹄型模态^[21]的空间分布和热带太平洋的经向模^[22]空间分布。热带大西洋 SSTA 呈现经向模,北大西洋的南北部为正异常,中部为负异常,呈三极状态,与 NAO 有关^[6]。与北太平洋马蹄型中心负异常海温分布对应的南大西洋、印度洋基本都是负异常。综合来讲,这个模态在北太平洋的分布与扣除 El Niño 变化后北太平洋冬春季 SSTA 的主模态分布类似,也与热带太平洋经向模的分布型类似。该模态在印度洋仍然没

有明显的变化的海域。

从该模态对应的时间序列(见图 5b)和对应的

功率谱分析(图略)可以看出,该模态对应主要周期为 1~4 a 和大约 9 a 的变化。

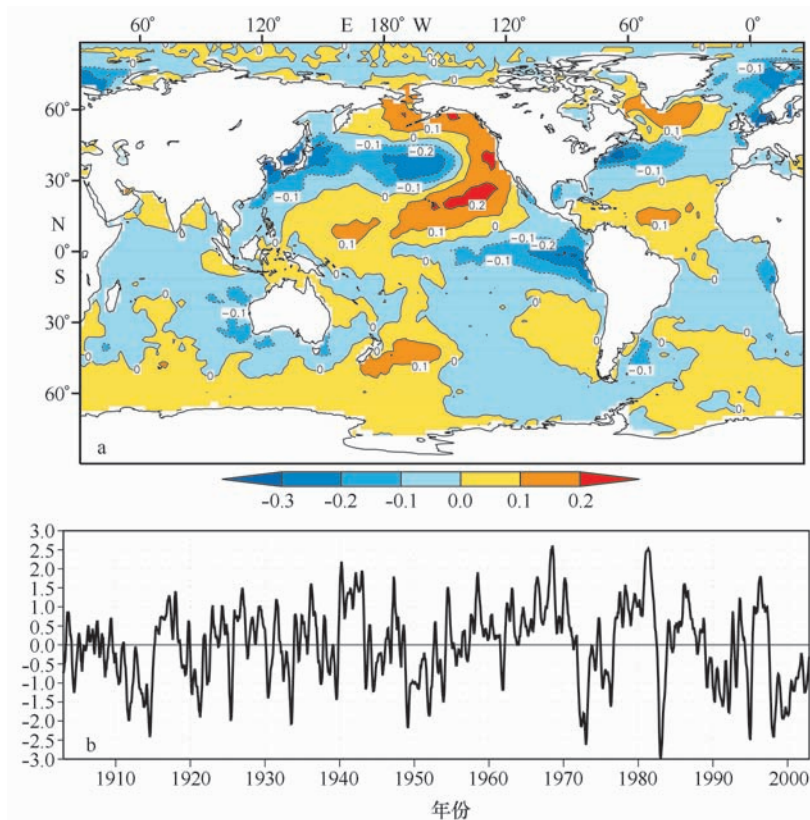


图 5 1903—2002 年全球 SSTA 的 EOF 分解第四模态空间分布(a)和时间序列(b)

5 结论与讨论

通过对近 100 a 全球 SSTA 的时空变化特征分析,可以得到以下全球 SSTA 年际和年代际变化的主要特征:

(1)海表面温度异常变化最剧烈的海区主要出现在赤道中东太平洋、西北大西洋湾流海区 and 北太平洋黑潮延伸体地区。全年海表面温度异常的 EOF 分解第一主要模态是与热带太平洋 ENSO 循环有关系的全球 SST 异常,具有 2~7 a 周期的年际变化;该模态在全球海洋 SST 年际变化中起到主导作用。

(2)海表面温度异常的第二主模态和第三主模态都是以大约 70 a 周期的年代际变化为主的跨大洋的联合模态。第二主模态为太平洋-大西洋双偶极子模态:在 SST 的变化中中纬度北太平洋和北大西洋反位相,热带太平洋与大西洋反位相;大西洋海表面温度异常为“三极”结构,印度洋为海盆一致模

态。海表面温度异常的第三模态呈现南北半球海洋反位相的特征。北太平洋 SST 变化最大,北大西洋与北太平洋同位相,且南大洋变化较大的特征,称该模态为北太平洋-北大西洋-南大洋联合模态,该模态有可能与热盐环流有关。该两个模态的发现,提醒我们周期大约 70 a 的变化可能与两个以上的大洋有关。

(3)第四模态的空间分布包括北太平洋的马蹄型模态、热带太平洋和热带大西洋的经向模态、北大西洋三级模态,这说明各个不同海域特有的局地海洋-大气相互作用模态在此有一定的表现,该模态的时间序列有 1~4 a 周期年际变化和约 9 a 周期年代际变化的特征。

本文的结果提醒我们,全球海洋海表温度的变化不应是孤立的,某海域的海洋-大气相互作用异常海温信号可以通过大气环流向全球传送,并通过海洋-大气相互作用影响其他海域的 SST。如何区分各大洋的局地海洋-大气相互作用以及各大洋之间

的联系,是我们目前遇到的难题,本文仅是一种 尝试。

参考文献:

- [1] 吴爱明,胡敦欣,白学志. 太平洋表层海温的年代际变化[J]. 海洋科学集刊,第43集,2001:1—5.
- [2] 余贞寿,孙照渤. 热带太平洋 SST 的多尺度时空特征分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(2):193—199.
- [3] 周天军,宇如聪,李薇,等. 20 世纪印度洋气候变率特征[J]. 气象学报,2001,59(3):257—271.
- [4] 晏红明,肖子牛,谢应齐. 近 50 年热带印度洋海温距平场的时空特征分析[J]. 气候与环境研究,2000,5(2):180—188.
- [5] 谭言科,张人禾,何金海,等. 热带印度洋海温的年际变化与 ENSO[J]. 气象学报,2004,62(6):831—840.
- [6] XIE S P, CARTON J A. Tropical Atlantic variability: patterns, mechanisms, and impacts[C]// Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction, Geophysical Monograph, 2004, 147: 121—142.
- [7] RUIZ-BARRADAS Alfredo, CARTON J A., NIGAM Sumant. Structure of interannual-to-decadal climate variability in the Tropical Atlantic sector[J]. J Climate, 2000, 13(18): 3285—3297.
- [8] 赵珊珊,杨修群,朱益民. 热带大西洋年际和年代际变率的时空结构模拟[J]. 海洋学报,2003,25(3):9—19.
- [9] 徐建军,王东晓. 印度洋和太平洋海温的年际、年代际异常及其对亚洲季风的影响[J]. 海洋学报,2000,22(3):34—43.
- [10] 武术,刘秦玉,胡瑞金. 热带太平洋—南海—印度洋海面风与海面温度年际变化整体耦合的主模态[J]. 中国海洋大学学报,2005,35(4):521—526.
- [11] 王晓悦,钱永甫. 近 50a 全球和三大洋海温距平的时空变化特征[J]. 南京气象学院学报,2002,25(6):755—763.
- [12] 胡基福. 气象统计原理与方法[M]. 青岛:青岛海洋大学出版社,1996:141—160,235—245.
- [13] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61—78.
- [14] AN S L, WANG B. The forced and intrinsic low-frequency modes in the North Pacific[J]. J Climate, 2005, 18(6):876—885.
- [15] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDRAN P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean[J]. Nature, 1999, 401(6751): 360—363.
- [16] YANG J, LIU Q, XIE S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34, L02708, doi:10.1029/2006GL02857.
- [17] CHIANG J C, SOBEL Adam H. Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate[J]. J Climate, 2002, 15(18): 2616—631.
- [18] LIU Qin-yu, JIANG Xia, XIE Shang-ping, et al. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: Seasonal development and interannual variability[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, C07012, doi:10.1029/2003JC002179.
- [19] XIE Shang-ping, TANIMOTO Y. A pan-Atlantic decadal climate oscillation[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25(12): 2185—2188.
- [20] WU L, HE F, LIU Z, et al. Atmospheric teleconnections of tropical Atlantic variability: interhemispheric, tropical-extratropical, and cross-basin Interactions[J]. J Climate, 2007, 20(5): 856—870.
- [21] LIU Qin-yu, WEN Na, LIU Z. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33, L18611.
- [22] CHIANG J C, VIMONT D J. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere ocean variability[J]. J Climate, 2004, 17(21): 4143—4158.

The analysis of interannual and interdecadal characteristics of global sea surface temperature during 1902—2003

ZHANG Jin-ting¹, LIU Qin-yu¹, WU Shu¹

(1. *Physical Oceanography Laboratory & Ocean-Atmospheric Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*)

Abstract: Based on the monthly HadISST SSTA (sea surface temperature anomaly) in recent 100 years

(from 1903 to 2002), the spatial and temporal variation characteristics of global SSTA are analyzed by using the method of Empirical Orthogonal Function (EOF), the first main mode of global SSTA and other joint modes between different oceans are respectively obtained. It is shown that the maximum changes of SSTA appear in equatorial eastern Pacific, Gulf Stream zone in northwestern Atlantic and Kuroshio extension zone in north Pacific; ENSO in tropical Pacific is the first main mode with periods of 2~7 years; the second main mode and third main mode are joint modes between different oceans with an interdecadal period of about 70 years. The second mode is a Pacific-Atlantic double dipole mode with one out-of-phase dipole in north Pacific and north Atlantic, the other in tropical Pacific and tropical Atlantic. The third mode is a North Pacific-North Atlantic-Southern Ocean mode with out-of-phase between northern and southern hemispheres. The fourth mode reflects local ocean-atmosphere interaction patterns in different zones and the time series in this mode presents interannual periods of 1~4 years and an interdecadal period of about 9 years.

Key words: SST; Empirical Orthogonal Function analysis; main mode; interannual and interdecadal characteristics