

热带印度洋春季海表温度异常与 南海夏季风强度变化的关系

李东辉^{1,2} 朱益民³ 谭言科³ 张 瑰⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 南京军区气象水文中心, 南京 210016

3 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

4 解放军理工大学理学院, 南京 211101

摘要 利用 50 年的 Reynolds 月平均海表温度资料和 NCEP/NCAR 全球大气再分析资料, 分析了热带印度洋春季海温异常对南海夏季风强度变化的影响。结果表明: 1) 热带印度洋春季海表温度距平 (SSTA) 的模式主要是全区一致型 (USBM) 和热带南印度洋偶极型 (SIODM), USBM 模式既有年际时间尺度的变化特征, 又有年际以上时间尺度的变化特征, 既包含有对冬季 ENSO 信号响应的变化特征, 又有独立于 ENSO 的变化特征; SIODM 模式主要表现为独立于 ENSO 的年际时间尺度变化。2) USBM 模式与南海夏季风强度变化呈显著负相关关系, 且二者都是对冬季 ENSO 信号的响应, USBM 模式的年际变化不能独立于 ENSO 信号影响南海夏季风的强度变化。3) 经 (1~8 年) 带通滤波及去除 ENSO 信号的热带印度洋春季 SSTA 的 SIODM 型分布是影响南海夏季风强度变化的主要模式, 表现为热带东南印度洋为负 (正)、其他海区为正 (负) 时, 南海夏季风强度增强 (减弱), 大气环流对热带东南印度洋 SSTA 热力作用的响应是造成这一关系的直接原因, SIODM 型的 SSTA 分布与南海夏季风年际异常关系在热带印度洋长期变化趋势的暖位相期显著, 在长期变化趋势的冷位相期不显著。

关键词 热带印度洋 春季 海表温度 南海夏季风

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0514-11 **中图分类号** P425 **文献标识码** A

Relationships between Spring Ocean Sea Surface Temperature Anomalies in the Tropical Indian Ocean and the Strength of South China Sea Summer Monsoon

LI Dong-Hui^{1,2}, ZHU Yi-Min³, TAN Yan-Ke³, and ZHANG Gui⁴

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Meteorological and Hydrological Center of Military Area Command of Nanjing, Nanjing 210016*

3 *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

4 *Institute of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

Abstract The impacts of spring tropical Indian Ocean Sea Surface Temperature (SST) anomalies on the strength of South China Sea summer monsoon (SCSSM) are investigated by analyzing 50 a Reynolds monthly mean SST data

收稿日期 2005-01-25 收到, 2006-03-07 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405010、40233028 以及大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室开放课题

作者简介 李东辉, 男, 1973 年出生, 博士, 工程师, 主要从事热带海气相互作用和物理海洋数值计算研究。

E-mail: lidonghui73@yahoo.com.cn

and NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data. The main conclusions are as follows. 1) There are two dominant modes of spring SST anomalies in the tropical Indian Ocean, the Uniformly Signed Basin-wide Mode (USBM) and the tropical South Indian Ocean Dipole Mode (IODM), respectively. The SST anomalies associated with USBM vary at both interannual and interdecadal time scales, involving ENSO-dependent as well as ENSO-independent variability, while the SST anomalies associated with SIODM mainly vary on interannual time scale, characterizing by ENSO-independent variability. 2) The USBM exhibits significant negative correlation with the strength of SCSSM, both appears to be the response to winter ENSO events. 3) The SIODM with variations below 1—8 year band-filtered and ENSO signal removed is the dominant mode that exerts impact on the variation of intensity of SCSSM. Accompanied with the negative (positive) SST anomalies in tropical South-eastern Indian Ocean and positive (negative) elsewhere, the SCSSM is strengthened (weakened). The mechanism responsible for this could be attributed to the direct response of atmospheric circulation to thermal forcing of SST anomalies in the tropical South-eastern Indian Ocean. In addition, the relationship between the interannual variability of SIODM and that of SCSSM is significant during the warm phase of secular trend but insignificant during the cool phase.

Key words tropical Indian Ocean, spring, sea surface temperature, South China Sea summer monsoon

1 引言

南海夏季风是亚洲夏季风系统中爆发最早的系统, 研究表明^[1,2], 南海夏季风异常与我国的气候尤其是江淮流域汛期降水有显著关系。在影响南海夏季风异常的因子中, 热带地区海温异常是其中重要的因子之一。Saha^[3]在讨论了印度洋海表温度纬向异常的作用后指出, 东西向海温梯度的异常可以大大地修正季风环流, 并通过大气垂直环流对亚洲季风系统产生影响。Weare 等^[4]分析了印度洋海温和印度季风的关系, 指出南亚次大陆的降水和印度洋的海温为弱相关, 但是印度洋海温对东亚季风却有显著影响。陶诗言等^[5]的研究表明, 在 El Niño (La Niña) 年冬季华南和青藏高原降水或降雪量为正 (负) 距平, 这使得在晚春和初夏南亚的加热慢 (快), 导致夏季海陆的热力对比小 (大), 因而出现弱 (强) 夏季风。梁建茵等^[6]的分析指出, 南海西南季风的强弱变化与海表面温度之间存在显著的相互作用, 年际或以上时间尺度的变化主要表现为南海西南季风强弱与东太平洋海温、南海—阿拉伯海海温存在显著负相关。梁建茵等^[7]通过合成对比分析和相关分析发现, 前期热带太平洋地区海温异常分布是影响南海西南季风爆发早晚的重要因素。陈隆勋等^[8]认为 4 月南海海温异常是南海夏季风爆发早晚的主要影响因子。赵永平等^[9]对 5 月东亚至热带东印度洋表面温度距平主要特征向量场的分

析表明, 以苏门答腊岛为中心的热带海洋温度异常与南海夏季风爆发有密切关系。闫晓勇等^[10]的资料分析和数值模拟结果表明, 印度洋正偶极子位相期间, 东亚地区的西南季风爆发偏晚, 强度增强, 我国大陆降水增多。徐建军等^[11]通过资料诊断和数值试验研究指出, 在 ENSO 的不同阶段和不同的海温的年代际背景场上 ENSO 异常对亚洲季风存在着不同的影响。

对东亚夏季风的研究^[12]指出, 在夏季低空流场, 南半球热带东风和北半球热带西风带之间的 3 条跨赤道气流对维持东亚季风起着重要的作用。值得注意的是, 这 3 条跨赤道气流都位于热带印度洋, 因此热带印度洋海温异常对夏季风环流的作用不容忽视。吴国雄等^[13]利用历史观测数据, 证实赤道印度洋和东太平洋海表温度 (SST) 年际变化有显著的正相关, 指出这种正相关是由于沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空 Walker 环流之间显著的耦合造成的。周天军等^[14]利用 GISST 资料分析了 20 世纪印度洋气候变率的基本特征, 指出赤道印度洋海表温度与 Niño3 区指数的相关系数在滞后 Niño3 区指数 4~5 个月左右达到最大, 并据此推测, 赤道印度洋 SST 的变暖, 可能是对赤道中东太平洋 SST 变化的响应。考虑到南海夏季风异常与 ENSO 存在显著的相关关系, 那么热带印度洋 SST 异常对南海夏季风的影响是否是二者对 ENSO 响应的一种表现形式? 在不考虑 ENSO 信号后, 热带印度洋 SST 异常与南海夏季风的强度变化的关系如何? 本文利

用 EOF 分析、相关分析及回归分析等诊断方法,试图通过对历史资料的分析,在保留和去除 ENSO 信号的两个前提条件下,探讨南海夏季风强度与前期春季热带印度洋 SST 异常的关系,找到上述问题的答案。

2 资料和方法

本文所用资料包括 1949 年 12 月~1999 年 11 月的 Reynolds 月平均海表温度资料^[15]和 1950 年 1 月~1999 年 12 月的 NCEP/NCAR 全球大气再分析资料^[16]。季节划分按照北半球的标准,前一年 12 月和当年的 1、2 月作为冬季,3~5 月作为春季,6~8 月作为夏季,9~11 月作为秋季。对所用资料进行季节平均处理,得到 1950~1999 年季节平均的海表温度场和夏季 850、200 hPa 风场。

在文中对春季海表温度场和夏季风场进行去除 ENSO 信号的处理。对原始变量场 X 和要去除经标准化后的信号 Y , 可以进行如下操作:

$$X^* = X - Y \times \beta(X, Y) \quad (1)$$

其中, X^* 为 X 去除信号 Y 后的新变量场, $\beta(X, Y)$ 为原始变量场 X 和信号 Y 的线性回归系数。经过上述处理, 新变量场 X^* 去除了原始变量场 X 中与信号 Y 相关的信息。

文中对热带印度洋春季 SSTA 进行了 3 次 EOF 分析, 为叙述方便, 对原始海表温度距平 (SSTA) 的 EOF 分析称为 EOF_A, 对 (1~8 年) 带通滤波后 SSTA 的 EOF 分析称为 EOF_B, 对经过带通滤波并进行去除 ENSO 信号处理的 SSTA 的 EOF 分析称为 EOF_C。其中, 带通滤波采用 Butterworth 带通滤波器。

3 热带印度洋春季 SST 的气候变率

图 1 给出了热带印度洋春季 SSTA EOF 分析得到的前 2 个特征向量的空间分布。图 1a、b 为原始的热带印度洋春季 SSTA EOF_A 分析得到的第 1 和第 2 个特征向量的空间分布, 前两个特征向量的方差贡献分别为 52.2% 和 10.4%。第 1 个特征向量在整个热带印度洋符号一致, 均为正, 为全区一致型 (USBM)。第 2 个特征向量在热带

东南印度洋存在一个负值中心, 而在其他海区符号为正, 表现为热带东印度洋经向符号相反和热带南印度洋纬向符号相反, 这一模态与 Saji 等^[17]提到的热带印度洋偶极子的分布特征不同, 热带印度洋 SSTA 的东西向偶极分布只是局限在热带南印度洋, 因此可以将图 1b 的空间分布称为热带南印度洋偶极子模态 (SIODM)。对 USBM 和 SIODM 模态的时间系数分别进行小波分析 (图略) 可知, USBM 的时间系数的小波全谱主要存在 3、10 年的峰值周期, 表明其既有年际时间尺度变化的特点又有年际以上时间尺度变化的特点; SIODM 型的时间系数主要以 3~8 年的年际周期变化为主。

以赤道东太平洋 Niño3 区 ($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{W}$) 区域平均的 SSTA 作为 ENSO 信号 (Niño3 指数), 分析 EOF_A 前两个特征向量的时间系数与 Niño3 指数的关系, 考察热带印度洋春季 SSTA 对 ENSO 的响应特征。图 2 给出了 EOF_A 得到的 USBM 和 SIODM 的时间系数以及冬季 Niño3 指数随时间的演变。图中可以明显地看出, 在 20 世纪 70 年代末海盆尺度 SSTA (USBM 的时间系数) 呈现整体变暖趋势, 长期变化趋势的特征非常明显, 可以认为在 20 世纪 70 年代末之前为长期趋势的冷位相期, 之后为长期趋势的暖位相期。相关分析表明, USBM 时间系数与冬季 Niño3 指数具有同位相变化的特点, 二者的相关系数可达到 0.715, USBM 时间系数与春季 Niño3 指数的相关系数为 0.567, 可见冬季 Niño3 指数与热带印度洋春季 USBM 时间系数的正相关性更好。因此, 本文采用冬季的 Niño3 指数对 SSTA 进行的去除 ENSO 信号的处理。SIODM 型的时间系数与冬季、春季 Niño3 指数的相关系数分别为 0.11 和 0.064, 都没有通过显著性检验, 这说明近 50 年来春季印度洋 SIODM 型的 SSTA 分布和 ENSO 的相关是不显著的。周天军等^[18]通过分析观测资料指出, 与 ENSO 相关的热带印度洋 SST 变化, 表现为全海盆一致的正距平, 并且这种变化要滞后赤道中东太平洋 SST 变化大约一个季度。本文对观测资料的分析可以得到同样的结果, 且可以认为春季热带印度洋 SIODM 型的 SSTA 分布是独立于 ENSO 的。

为了分析热带印度洋春季 SSTA 的年际变化

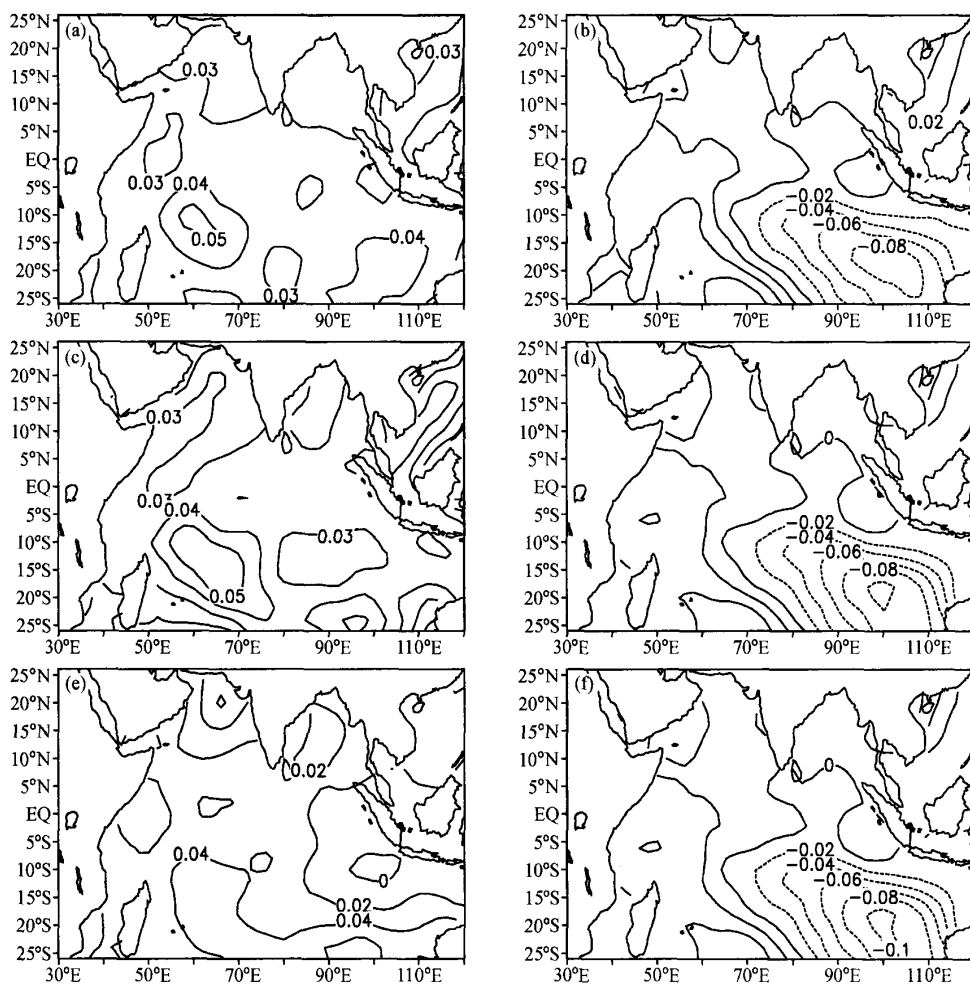


图1 热带印度洋春季 SSTA EOF 分析得到的前 2 个特征向量的空间分布: (a) EOF_A 的第 1 个特征向量的空间分布; (b) EOF_A 的第 2 个特征向量的空间分布; (c) EOF_B 的第 1 个特征向量的空间分布; (d) EOF_B 的第 2 个特征向量的空间分布; (e) EOF_C 的第 1 个特征向量的空间分布; (f) EOF_C 的第 2 个特征向量的空间分布

Fig. 1 First and second EOF of spring SST anomalies in the tropical Indian Ocean. (a) EOF1 of scheme EOF_A; (b) EOF2 of scheme EOF_A; (c) EOF1 of scheme EOF_B; (d) EOF2 of scheme EOF_B; (e) EOF1 of scheme EOF_C; (f) EOF2 of scheme EOF_C

特征,对原始资料进行了年际分量(1~8年)的带通滤波,对滤波后的 SSTA 进行 EOF 分析(图 1c、d)。结果表明,EOF_B 前两个特征向量的空间分布与 EOF_A 前两个特征向量的空间分布特征基本相同,仍为 USBM 和 SIODM 型,相应的方差贡献分别为 37.7%和 11.8%。EOF_B 得到的 USBM 和 SIODM 型的时间系数与冬季 Niño3 指数的相关系数分别为 0.81 和 -0.006 ,可见,滤波后的 USBM 模态与 ENSO 的正相关性更强,滤波后的 SIODM 型 SSTA 的变化仍然独立于 ENSO 存在。

为进一步分析热带印度洋春季 SSTA 的气候变率特征,对滤波后的 SSTA 进行去除冬季 ENSO 信号的处理,对处理后的 SSTA 进行 EOF 分析(图 1e、f)。分析结果显示,EOF_C 前两个特征向量的空间分布同样为 USBM 和 SIODM 型,相应的方差贡献分别为 20.4%和 15.8%。可见,热带印度洋春季 USBM 的 SSTA 变化还包含独立于 ENSO 的信号。

由以上分析可知,热带印度洋春季 SSTA 的空间分布主要是 USBM 和 SIODM 型,USBM 的 SSTA 变化既有年际时间尺度的变化特征,又有

年际以上时间尺度的变化特征,既包含有对冬季 ENSO 信号响应的变化特征,又有独立于 ENSO 的变化特征;SIODM 型 SSTa 主要表现为独立于 ENSO 的年际时间尺度变化。

4 热带印度洋春季 SSTa 与南海夏季风强度变化的关系

4.1 南海夏季风强度指数

本文采用吴尚森等^[19]用南海地区 6~8 月 850 hPa 标准化的平均西南风分量定义的南海夏季风强度指数 (I_v) 表征南海夏季风的强度变化。对该指数的 Morlet 小波分析表明,南海夏季风强度主要有两个变化周期频段,9~12 年和 3~6 年。在年代际时间尺度上,20 世纪 70 年代中期以前为

12 年的周期,70 年代中期以后变化周期变短,主要为 9~10 年的周期^[19]。

ENSO 是全球气候年际变化的最强信号,其和南海夏季风之间有着密切的联系。图 3 给出标准化的冬季 Niño3 指数和 I_v 随时间的变化曲线。图中可以看出,两个指数存在着明显的反位相关系。相关分析表明, I_v 和冬季 Niño3 指数的相关系数为 -0.421,超过了 0.01 的信度检验, I_v 和春季、夏季 Niño3 指数的相关系数分别为 -0.213 和 0.182,都没有通过显著性检验。可见,冬季的 ENSO 信号通过海气相互作用对南海夏季风的影响超过了春季和夏季 ENSO 信号的影响,可以将冬季 Niño3 指数作为影响南海夏季风强度变化的 ENSO 信号。

为了文中记述方便,将原始的夏季 850 hPa

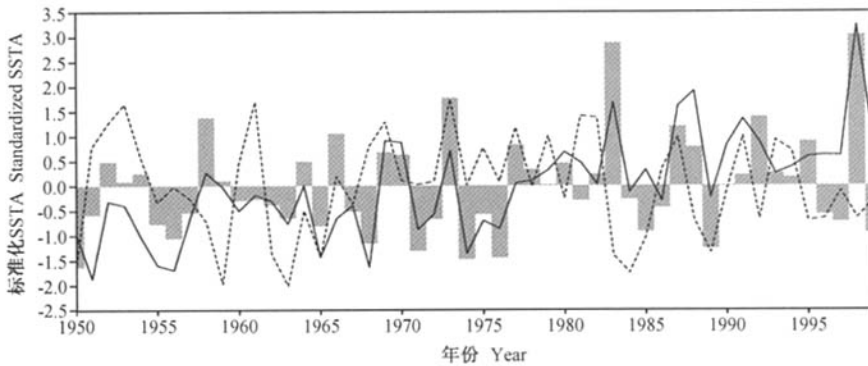


图 2 标准化的热带印度洋春季海表温度距平 EOF_A 得到的第 1 (实线) 和第 2 个 (虚线) 特征向量的时间系数、冬季 Niño3 指数 (柱状阴影) 逐年变化

Fig. 2 Standardized time series of first EOF (solid line) and second EOF (dashed line) of spring SST anomalies in the tropical Indian Ocean by scheme EOF_A, and winter Niño3 index (shaded histogram)

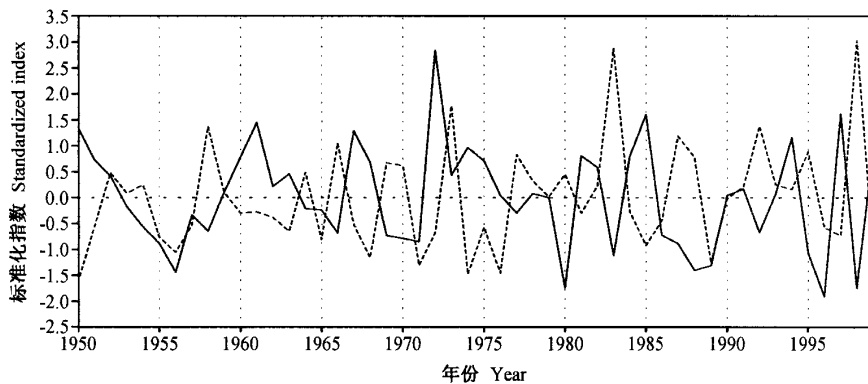


图 3 标准化的南海夏季风强度指数 (实线) 和冬季 Niño3 指数 (虚线) 逐年变化

Fig. 3 Standardized time series of the strength index of the South China Sea Summer Monsoon (solid line) and winter Niño3 index (dashed line)

风场计算得到的 I_V 记作 I_{V1} ; 将 (1~8 年) 带通滤波后的夏季 850 hPa 风场得到的 I_V 记作 I_{V2} ; 对滤波后去除冬季 ENSO 信号的夏季 850 hPa 风场得到的 I_V 记作 I_{V3} 。

4.2 原始的热带印度洋春季 SSTA 对南海夏季风强度变化的影响

表 1 给出了热带印度洋春季 SSTA 的 3 个 EOF 分析得到的前 2 个模态的时间系数与南海夏季风强度指数分别进行相关分析的结果。EOF_A 得到的 USBM 和 SIODM 型的时间系数与 I_{V1} 进行相关分析的结果表明, I_{V1} 与 USBM 时间系数为负相关, 相关系数为 -0.305, 通过了显著性检验; I_{V1} 与 SIODM 型的时间系数的相关系数为 0.152, 没有达到显著性检验标准。可见, 原始的热带印度洋春季 SSTA 主要是 USBM 分布对南海夏季风强度变化产生影响。

图 4 给出 EOF_A 得到的 USBM 时间系数与 850 hPa、200 hPa 风场的回归系数分布。在 850 hPa 等压面上, 与正的 USBM 模态相对应, 从菲律宾东南洋面经南海中部和中南半岛到印度半岛存在着显著的异常东风, 表明在 5~20°N 纬带上西风减弱; 从中国大陆经南海北部和孟加拉湾到苏门答腊岛以西洋面为显著的异常偏北风, 说明该区域的偏南风减弱。在对流层上层 (200 hPa 等压面), 与正的 USBM 模态相对应, 在 80~140°E 的热带区域包括南海在内存在显著的异常偏西风, 减弱了这一地区的热带东风; 青藏高原西侧存在一个异常的反气旋式环流, 在高原东侧西太平洋地区为气旋式环流, 表明北半球热带东风带和温带西风带之间的副热带高压带在高原西侧增强, 在高原的东侧减弱。以上分析表明, 当 USBM 模态为正 (负) 时, 南海的西南夏季风强度减弱 (增强)。从图 4a 还可以看到, 对应正 (负) 的 USBM 模态, 不仅南海夏季风减弱 (增强), 印度夏季风和东亚副热带夏季风也随之减弱 (增强)。这是由于春季热带印度洋整体增暖 (变冷), 使得热带印度洋与其北面亚洲大陆之间的温度对比小 (大), 造成南亚夏季风和东亚副热带夏季风的减弱 (增强)。

4.3 热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风强度的年际关系特征

在分析热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风

强度变化的年际关系之前, 对 EOF_A 的前 2 个时间系数和 I_{V1} 分别进行滤掉年际变化的处理, 以考察二者在年际以上时间尺度的关系。相关分析表明, 滤掉年际变化的 USBM 和 SIODM 型时间系数与 I_{V1} 的相关系数分别为 -0.183 和 0.022, 都没有通过显著性检验。可见, 对于年际以上时间尺度, 热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风强度变化的相关性不显著。

对滤掉年代际变化后热带印度洋春季 SSTA 进行的 EOF 分析 (EOF_B) 得到前 2 个模态与 I_{V2} 进行相关分析, 可以分析热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风强度变化的年际关系。由表 1 可知, EOF_B 的两个时间系数和 I_{V2} 的相关系数与 EOF_A 的两个时间系数和 I_{V1} 的相关系数相比, 都有不同程度的提高, USBM 时间系数与 I_{V2} 的相关系数为 -0.393, 超过 0.01 信度检验, SIODM 型时间系数与 I_{V2} 的相关系数为 0.222, 虽然没有通过显著性检验, 但已经接近 0.1 的信度检验标准。由此可见, 热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风强度变化的年际相关性更强。

为了分析热带印度洋春季 SSTA 与南海夏季风强度变化年际关系的长期趋势特征, 图 5 给出了 EOF_B 得到的 USBM 和 SIODM 型的时间系数与 I_{V2} 的滑动相关系数分布, 其中, 滑动窗区取为 29 年。图中可见, USBM 的 SSTA 分布与南海夏季风强度一直维持着显著的负相关, 相对而言, 二者的相关关系在长期趋势的暖位相期以及冷暖位相的转换期更为显著; SIODM 型的 SSTA 分布与南海夏季风强度之间具有正相关, 但这种正相关在长期趋势的冷、暖位相期都不具有统计显著性。

4.4 去除 ENSO 信号的热带印度洋春季 SST 与南海夏季风强度变化的年际异常关系

前面的分析可知, 热带印度洋春季 USBM 模态和冬季的 ENSO 事件都与南海夏季风强度存在着显著的负相关关系, 而热带印度洋春季 USBM 模态的时间系数与冬季 Niño3 指数的正相关性很强。这带来一个问题, USBM 的 SSTA 分布和南海夏季风强度是否都是对冬季 ENSO 信号的响应, 而不是热带印度洋自身的 USBM 分布独立地影响南海夏季风? 为此, 对滤波后的 SSTA 场和风场进行了去除冬季 ENSO 信号的处理, 通过分析

表 1 热带印度洋春季 SSTA 前 2 个模态的时间系数与南海夏季风强度指数的相关系数

Table 1 Correlations between the intensity index of the South China Sea Summer Monsoon and the two dominant principal components of EOFs for spring SST anomalies in tropical Indian Ocean

	USBM 模态时间系数与 I_V 的相关系数 Correlation coefficient between the time series of USBM and I_V	SIODM 模态时间系数与 I_V 的相关系数 Correlation coefficient between the time series of SIODM and I_V
由原始资料得到 From original data	-0.305 *	0.152
由 (1~8 年) 带通滤波资料得到 From 1-8 year bandpass-filtered data	-0.393 *	0.222
由滤波后去除冬季 ENSO 信号的资料得到 From 1-8 year bandpass-filtered as well as ENSO signal removed data	-0.057	0.247 *

* 通过 0.1 显著性水平检验
* At the 0.1 confidence level

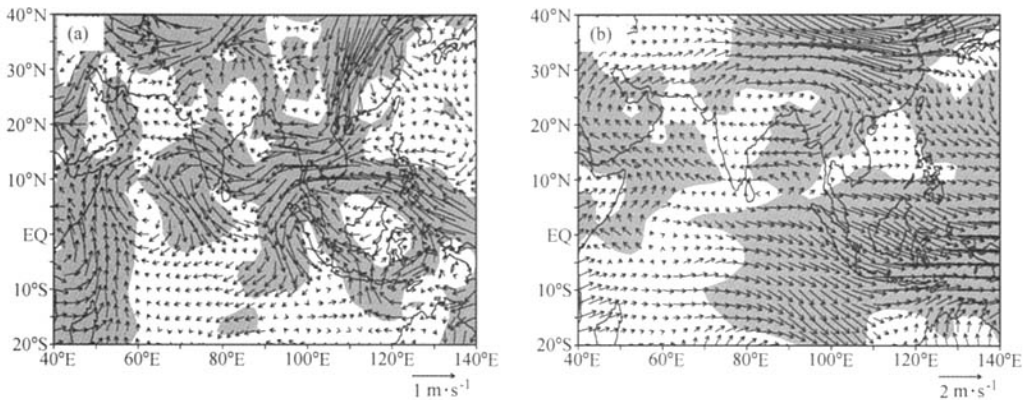


图 4 夏季 850 hPa (a)、200 hPa (b) 风场距平在 EOF_A 的 USBM 时间系数的回归系数分布 (阴影为 USBM 时间系数与风速距平相关系数超过 0.05 显著性水平的区域)
Fig. 4 Regression coefficients of summer (a) 850 hPa and (b) 200 hPa wind field anomalies upon the time series of USBM revealed by scheme EOF_A. Shaded areas are significant at the 0.05 confidence level

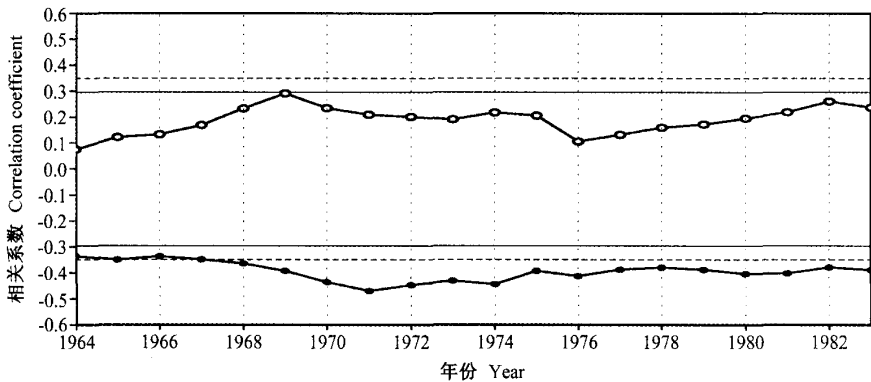


图 5 EOF_B 得到的 USBM (实心圆实线)、SIODM 型 (空心圆实线) 的时间系数与 I_{V2} 的滑动相关系数分布 (滑动窗区为 29 年, 细实线和虚线分别为 0.1 和 0.05 显著性水平线)
Fig. 5 Sliding correlation coefficients between I_{V2} index and time series of USBM (solid circle) as well as SIODM (hollow circle). Sliding window length is 29 a. Solid lines without any sign and dashed line represent the 0.1 and 0.05 significant confidence levels respectively

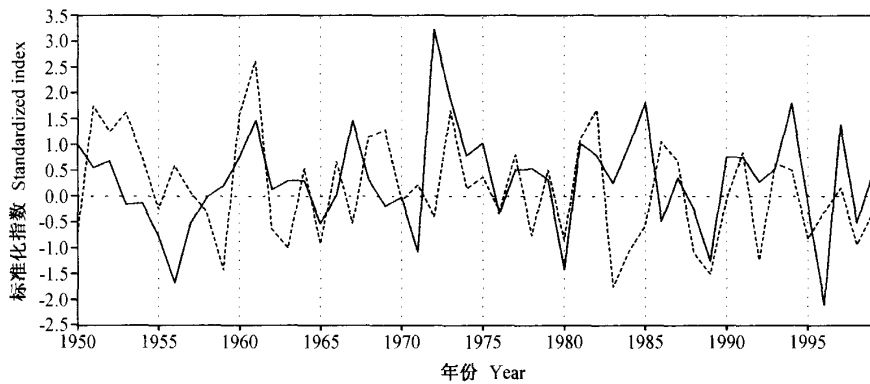


图 6 标准化的 I_{V3} (实线) 和 EOF_C 得到的 SIODM 型时间系数 (虚线) 的逐年变化
Fig. 6 Standardized time series of I_{V3} (solid line) and that of SIODM revealed by scheme EOF_C

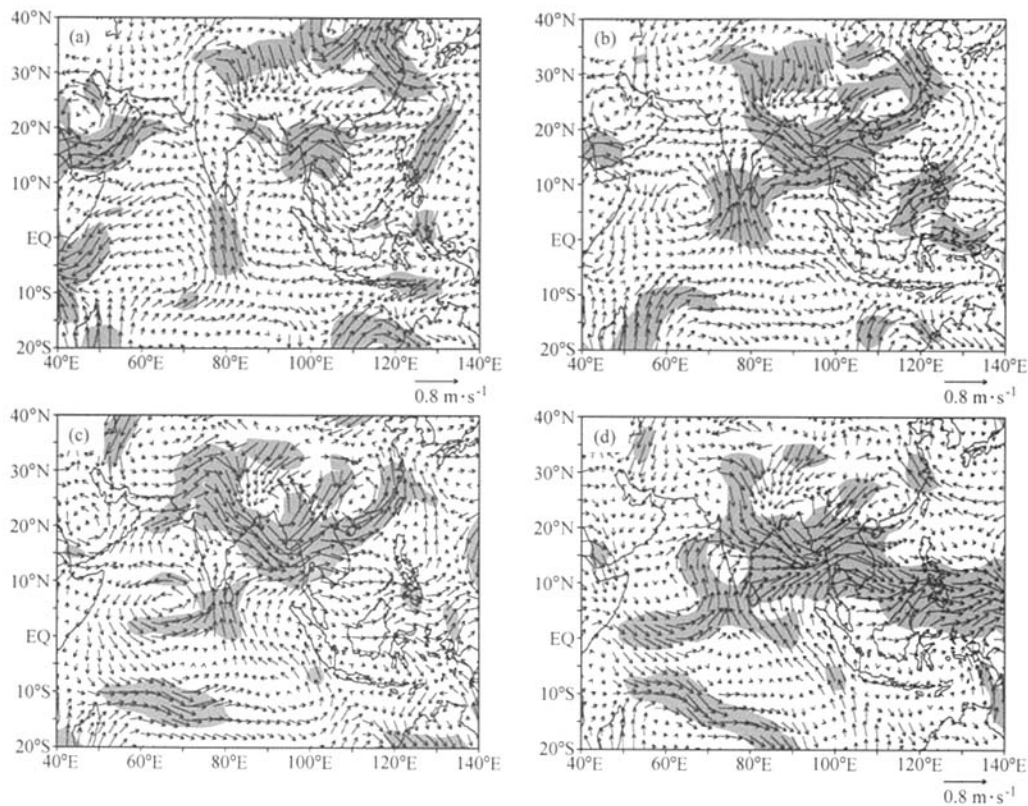


图 7 滤去年代际以上时间尺度和去除冬季 ENSO 信号的夏季 850 hPa 距平风场与 EOF_C 得到的 SIODM 型时间系数的滑动相关系数在不同位相的矢量分布 (滑动窗区为 29 年, 阴影为 SIODM 型时间系数与距平风速相关系数超过 0.1 显著性水平的区域, 每个位相之间的滑动步长约相距 5 年); (a) 第 1 位相; (b) 第 2 位相; (c) 第 3 位相; (d) 第 4 位相
Fig. 7 Sliding correlation coefficients between the time series of SIODM revealed by scheme EOF_C and summer 850 hPa wind field anomalies after interdecadal variation filtered and winter ENSO signal removed. Sliding window length is 29a. Shaded areas are significant at the 0.1 confidence level. The interval of two successive sliding phases is about 5 years; (a) phase 1; (b) phase 2; (c) phase 3; (d) phase 4

EOF_C 得到的 SSTA 前 2 个模态与南海夏季风强度变化的关系来找到这一问题的答案。

由表 1 中 EOF_C 得到的 USBM 和 SIODM 型的时间系数与 I_{V3} 的相关系数可知, USBM 时间系数与 I_{V3} 之间的相关系数很小, 为 -0.057 , 二者基本上没有关系; SIODM 型的时间系数与 I_{V3} 的相关系数为 0.247 , 通过了 0.1 的显著性检验。由此可见, 去除冬季 ENSO 信号后, 热带印度洋春季 USBM 模态不能独立地对南海夏季风强度变化产生影响, 而 SIODM 模态对南海夏季风强度变化的影响由去除 ENSO 信号和滤波前的不显著转变为显著, 并成为热带印度洋春季 SSTA 影响南海夏季风强度变化的主要模态。

图 6 给出 EOF_C 得到的 SIODM 型时间系数与 I_{V3} 随时间的变化曲线。图中可以看出, 在 20 世纪 70 年代末之前, 两个指数的正相关性不明显, 但 70 年代末之后 (长期趋势的暖位相期), 二者的正相关比较明显。为了更清楚地考察 SSTA 的 SIODM 型分布对南海夏季风强度变化的影响, 图 7 给出了夏季 850 hPa 风场与 SIODM 型时间系数之间的滑动相关系数在不同时段的空间分布, 由图可以看出 SSTA 的 SIODM 型分布与南海夏季风年际异常相关关系随年代的演变情况。图中显示, 在位相 1 (长期趋势的冷位相期) 中, 南海地区存在着大范围的异常西南风, 但没有达到统计显著性检验; 在位相 2、3 (长期趋势的冷、暖位相过渡期) 中, 南海北部的西南风分量通过了 0.1 的显著性检验, 但其范围较小, 不足以代表整个南海地区; 在位相 4 (长期趋势的暖位相期), 整个南海地区由异常西风控制, 其中南海大部分地区的异常西风通过了 0.1 的显著性检验。因此, 去除 ENSO 信号的热带印度洋春季 SSTA 的 SIODM 型分布与南海夏季风年际异常的正相关关系在长期趋势的暖位相期显著, 在冷位相期不显著。根据 EOF_C 的 SIODM 型空间分布 (图 1f) 可知, SSTA 在热带东南印度洋为负 (正)、其他海区为正 (负) 时, 在长期趋势的暖位相期, 南海夏季风强度增强 (减弱)。

当热带东南印度洋为负 SSTA 而孟加拉湾以及南海为正 SSTA 时, 大气在热带东南印度洋异常下沉, 在孟加拉湾和南海异常上升, 形成一个异常的经向环流, 该异常经向环流可以起到增强

季风环流的作用, 导致南海夏季风增强。图 7d 可以明显地看出, 来自热带东南印度洋的异常南风跨赤道进入孟加拉湾后折向南海, 增强了南海地区夏季的低空西风。因此, 造成 SIODM 模态和南海夏季风年际异常关系的直接原因是大气环流对热带东南印度洋 SST 异常热力作用的响应。

5 结论

本文根据 50 年的 Reynolds 月平均海表温度资料和 NCEP/NCAR 全球大气再分析资料, 分析了热带印度洋春季海温异常对南海夏季风强度变化的影响。结果表明:

(1) 热带印度洋春季 SSTA 的模态主要是 USBM 和 SIODM 型, USBM 的 SSTA 变化既有年际时间尺度的变化特征, 又有年际以上时间尺度的变化特征, 既包含有对冬季 ENSO 信号响应的变化特征, 又有独立于 ENSO 的变化特征; SIODM 型主要表现为独立于 ENSO 的年际时间尺度变化。

(2) 当热带印度洋春季 SSTA 为正 (负) 的 USBM 型分布时, 南海的西南夏季风强度减弱 (增强), 二者之间的负相关关系是对冬季 ENSO 信号的响应, USBM 模态不能独立于 ENSO 信号影响南海夏季风的强度变化。

(3) 滤掉年代际变化及去除 ENSO 信号的热带印度洋春季 SSTA 的 SIODM 型分布是影响南海夏季风强度变化的主要模态, 其与南海夏季风年际异常的正相关关系在长期趋势的暖位相期显著, 在冷位相期不显著。

(4) 在长期趋势的暖位相期, 经滤波并去除 ENSO 信号的 SSTA 在热带东南印度洋为负 (正)、其他海区为正 (负) 时, 南海夏季风强度增强 (减弱)。造成这一关系的直接原因是大气环流对热带东南印度洋 SSTA 热力作用的响应。

本文分析了春季热带印度洋 SSTA 和南海夏季风强度变化的关系。由分析可知, 热带印度洋春季 USBM 模态对南海夏季风强度变化的影响较 SIODM 模态更为显著, 但 SIODM 模态是独立于 ENSO 影响南海夏季风强度变化的, 因此, 二者都对于预测南海夏季风强弱具有一定的指示意义。通过对其他季节海温变化与南海夏季风异常关系

的分析还可以发现, 南海夏季风强度变化与前期秋季和冬季热带印度洋 SSTA 也存在着较为显著的相关关系, 特别是前期秋季热带印度洋 SSTA 的偶极子模态与南海夏季风强度变化之间具有显著的负相关关系。限于篇幅, 对于其他季节热带印度洋 SSTA 与南海夏季风强度变化的相互关系将另文论述。

参考文献 (References)

- [1] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, **23**: 257~266
Li Chongyin, Zhang Lipin. Actives of South China Sea summer monsoon and its impact. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23**: 257~266
- [2] 吴尚森, 梁建茵. 南海夏季风强度指数及其变化特征. 热带气象学报, 2001, **17** (4): 337~344
Wu Sangshen, Liang Jianyin. An index of South China Sea summer monsoon intensity and its variation characters. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (4): 337~344
- [3] Saha K. Zonal anomaly of sea surface temperature in equatorial Indian Ocean and its possible effect upon monsoon circulation. *Tellus*, 1970, **22** (4): 403~409
- [4] Weare B C. A statistical study of the relationships between ocean surface temperatures and the Indian monsoon. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36** (12): 2279~2291
- [5] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气科学, 1998, **22** (4): 399~407
Tao Shiyun, Zhang Qingyun. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (4): 399~407
- [6] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风多时间尺度变化及其与海温的相互作用. 应用气象学报, 2000, **11** (1): 95~104
Liang Jianyin, Wu Sangshen. The multi-time scale variations of summer monsoon over South China Sea and its interaction with SST anomaly. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11** (1): 95~104
- [7] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风爆发日期及其影响因子. 大气科学, 2002, **26** (6): 829~844
Liang Jianyin, Wu Sangshen. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (6): 829~844
- [8] 陈隆勋, 刘洪庆, 王文, 等. 南海及其临近地区夏季风爆发的特征及其机制的初步研究. 气象学报, 1999, **57** (1): 16~29
- [9] 赵永平, 陈永利, 白学志, 等. 南海—热带东印度洋海温年际变化与南海季风爆发关系的初步分析. 热带气象学报, 2000, **16** (2): 115~122
Zhao Yongping, Chen Yongli, Bai Xuezh, et al. The relations between the SST anomalies in south China sea—tropical eastern Indian Ocean and the South China Sea monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, **16** (2): 115~122
- [10] 闫晓勇, 张铭. 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响. 气候与环境研究, 2004, **9** (3): 435~444
Yan Xiaoyong, Zhang Ming. A study of the Indian Ocean dipole influence on climate variations over East Asian monsoon region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 435~444
- [11] 徐建军, 王东晓. 印度洋—太平洋海温的年际、年代际异常及其对亚洲季风的影响. 海洋学报, 2000, **22** (3): 34~43
Xu Jianjun, Wang Dongxiao. Diagnosis of interannual and interdecadal variation in SST over Indian—Pacific Ocean and numerical simulation of their effect on Asian summer monsoon. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2000, **22** (3): 34~43
- [12] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 6~8
Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang, et al. *Asian Summer Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 6~8
- [13] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析. 大气科学, 1998, **22** (4): 470~480
Wu Guoxiong, Meng Wen. Gearing between the Indo—monsoon circulation and the Pacific—Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (4): 470~480
- [14] 周天军, 宇如聪, 李薇, 等. 20 世纪印度洋气候变率特征. 气象学报, 2001, **59** (3): 257~270
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Wei, et al. On the variability of the Indian Ocean during the 20th century. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (3): 257~270
- [15] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum Interpolation. *J. Climate*, 1994, **7**: 929~948
- [16] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~472
- [17] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A di-

- pole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, **401**: 360~363
- [18] 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟. *大气科学*, 2004, **28** (3): 357~373
Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. Indian Ocean response to ENSO: observation and air-sea coupled model simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 357~373
- [19] 吴尚森, 梁建茵. 南海夏季风强度指数及其变化特征. 见: 黄荣辉, 李崇银, 王绍武, 等. 主编, 我国旱涝重大气候灾害及其形成机理研究. 北京: 气象出版社, 2003. 72~82
Wu Sangshen, Liang Jianyin. Variation of the intensity index of south China sea summer monsoon. In: *Severe Drought and Flood Climate Damage in China and Its Mechanism* (in Chinese), Huang Ronghui, Li Chongyin, Wang Shaowu, et al. Ed. Beijing: China Meteorology Press, 2003. 72~82