

吴春强, 周天军, 宇如聪, 等. 2009. 热通量和风应力影响北太平洋 SST 年际和年代际变率的数值模拟 [J]. 大气科学, 33 (2): 261–274.
Wu Chunqiang, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. The effect of heat flux and wind stress on the interannual and interdecadal variability of SST in the North Pacific simulated by an OGCM [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 261–274.

热通量和风应力影响北太平洋 SST 年际和年代际变率的数值模拟

吴春强^{1, 2} 周天军¹ 宇如聪^{1, 3} 刘海龙¹

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用一个大洋环流模式 LICOM, 通过 1958~2001 年风应力 (ERA40) 和热通量驱动下的两组模拟试验, 检验了二者在北太平洋年际和年代际变率形成中的作用。结果表明, 尽管在年际尺度上热带太平洋变率主要受风应力影响, 但合理考虑热通量异常的强迫作用能够显著改进模式对 El Niño 的模拟效果, 包括对 El Niño 周期非规则性的成功模拟; 北太平洋 SST 的年际和年代际异常主要受热通量异常的影响, 合理考虑热通量强迫的年代际变化能够改善模式对北太平洋年代际变率的模拟效果。在北太平洋海盆的不同区域, 导致 SST 变率异常的因子不同: 在加利福尼亚沿岸, 冬季平均海温的变率异常主要由热通量的异常决定; 在北太平洋中部, 温度趋势异常主要受热通量和水平平流的作用影响; 在黑潮及其延伸体区域, 对温度趋势异常起主导作用的是热通量和海洋非线性作用, 与此同时, 水平平流和扩散的作用亦不容忽视。

关键词 北太平洋 年际和年代际变率 海洋环流模式

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0261-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Effect of Heat Flux and Wind Stress on the Interannual and Interdecadal Variability of SST in the North Pacific Simulated by an OGCM

WU Chunqiang^{1, 2}, ZHOU Tianjun¹, YU Rucong^{1, 3}, and LIU Hailong¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

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

Abstract The roles of wind stress and surface heat flux in generating the Pacific interannual and interdecadal variability are examined by using two sets of simulations performed with LASG/IAP climate ocean model named LICOM. It is found that the interannual variability of SST in the tropical Pacific is mainly controlled by wind stress, however, the simulation of El Niño is improved significantly when surface heat flux is considered. The interannual variability of SST in the North Pacific is generated by the effect of surface heat flux, though it can be reproduced partly in a simulation without interannual variability of surface heat flux. Simulation without interdecadal variability of sur-

收稿日期 2007-08-10, 2008-02-27 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403603, 国家自然科学基金资助项目 40625014、40628006、40221503

作者简介 吴春强, 男, 1982 年出生, 博士生, 主要从事北太平洋年际与年代际变率的模拟分析。E-mail: wucq@mail.iap.ac.cn

face heat flux fails to reproduce the Pacific Decadal Oscillation (PDO) pattern, which confirms that the interdecadal variability of SST is governed by surface heat flux.

To reveal the contributions of surface flux, horizontal advection, vertical advection and diffusion (including horizontal and vertical diffusion) to the variability of winter averaged upper ocean temperature in different areas, the upper ocean heat budget is examined by using the output of LICOM_HW run. It shows that SST is controlled by different mechanisms in different regions. The anomaly of temperature trend is determined by both net surface heat flux and horizontal advection in the central North Pacific. But in the coast off California, only the anomaly of net surface heat flux is found to be dominant. In the Kuroshio and Kuroshio Extension (KKE) region, the contributions of net surface heat flux and the oceanic nonlinearity effect are significant, but the contributions of horizontal advection and diffusion should not be neglected.

Key words North Pacific, interannual and interdecadal variability, OGCM

1 引言

海洋是气候系统的重要组成部分,海气相互作用对全球气候及其异常具有重要影响。ENSO 是全球最为强劲的年际尺度变率,它是热带太平洋地区海气相互作用的结果 (Bjerknes, 1969),通过遥相关影响全球众多地区的气候,进而影响全球的生态、环境以及人类生活。国内学者的研究也表明,ENSO 对我国的气候有重要影响 (Huang et al., 1989; 龚道溢等, 1999; 陈文, 2002; 何溪澄等, 2008)。太平洋还存在显著的年代际变率 (Trenberth, 1990; Zhang et al., 1997),例如,北太平洋在 1976/1977 年前后经历了一次气候突变,在海温场上,它表现为北太平洋中部、黑潮及其延伸体附近变冷,而在加利福尼亚沿岸和热带中东太平洋则表现为变暖, Mantua et al. (1997) 把该现象称为太平洋年代际变率 (PDO)。这种变率并不局限于海表,在次表层也有体现 (钟姗姗等, 2002),与 PDO 的发生相对应,北太平洋周边地区的生态和气候也经历了显著变化 (Mantua et al., 1997)。PDO 对我国气候亦存在影响 (黄荣辉等, 1999; 朱益民等, 2003; 陈隆勋等, 2004)。

综上所述,太平洋年际和年代际变率对我国气候具有重要影响,开展太平洋年际和年代际变率机理的研究,对于理解全球和我国气候异常具有重要意义。但是关于该问题的讨论,却受到资料短缺的影响,目前的全球海洋观测资料在时空分布上都难以满足研究工作的需要。因此,包括大洋环流模式在内的气候系统模式是开展海气相互作用研究的重要工具 (周天军等, 2005; 李建等, 2007)。

在气候变率研究中,大洋环流模式发挥着非常

重要的作用 (Latif, 1987; Zebiak, 1987; Miller et al., 1994),此前的研究重点集中于热带,例如关于 ENSO 期间海温异常机制的讨论 (Harrison, 1990; Auad et al., 1998; Miller et al., 2000; 李崇银等, 2008)。围绕着北太平洋变率, Cayan (1990) 通过分析海洋观测资料,发现北太平洋 SST 和热通量之间存在很强的关系,提出了海气热通量异常驱动 SST 变率的观点。基于耦合模式长期积分结果的诊断分析表明,冬季热带外海洋上的湍流热通量是影响 SST 异常的主要因子,而太平洋中部水平平流的作用也不容忽视 (张学洪等, 1998)。利用大洋环流模式,可以较为合理地模拟发生在 1976/77 前后的北太平洋年代际跃变 (容新尧等, 2005)。基于观测资料和耦合模式的分析指出,虽然潜热通量对北太平洋中部年际尺度上的变率贡献显著,但主要还是海洋对大气强迫的动力响应的结果;关于北太平洋的年代际变率,海气热通量交换异常在其中发挥着重要作用,其中短波辐射和长波辐射占主导作用,而潜热通量的贡献则基本可以忽略 (Zhou et al., 2002)。总体而言,当前关于北太平洋气候变率机制的讨论,相对于热带要少得多。本文的目的是利用大洋环流模式,通过数值试验,理解风应力和热通量在北太平洋 SST 年际和年代际变率形成中的作用,比较北太平洋不同区域 SST 变率的形成机制。研究发现,尽管热带太平洋年际变率主要受风应力影响,但考虑热通量异常的强迫作用,能够显著改进模式对 El Niño 周期非规则性的合理再现;北太平洋的年际变率,主要受热通量异常的强迫,风应力强迫的作用次之;但北太平洋的年代际变率,则主要来自热通量的强迫作用。在北太平洋海盆东、

西两岸以及大洋中部, 导致 SST 变率异常的因子互有不同。

本文其他部分安排如下, 第 2 节简要介绍本文所利用的观测资料和模式结果。第 3 节是全文的重点, 分别从年际和年代际两个方面讨论了 LICOM 模式的模拟能力, 最后利用观测风应力和热通量共同强迫下的海洋模式积分结果, 讨论了不同区域海温变化的机制。第 4 节是全文的总结。

2 模式和资料简介

本文利用的模式是中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 新近发展的气候海洋模式 LICOM1.0 (刘海龙, 2002; 刘海龙等, 2003; Liu et al., 2004)。LICOM1.0 是在 LASG/IAP 第三代大洋环流模式 L30T63 (Jin et al., 1999) 的基础上发展的一个高分辨率版本。该模式为原始方程模式, 采用水平方向为球坐标, 垂直方向为 η 坐标的坐标系。模式引进了一些较为成熟的物理参数化方案, 如中尺度涡参数化方案 GM90 (Gent et al., 1990), 热带上层海洋垂直混合的 P-P 方案 (Pacanowski et al., 1981)。LICOM1.0 是一个准全球涡相容模式, 南北范围为 $75^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$, 包含了除北冰洋以外的其他海洋, 水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 垂直方向分为 30 层, 上层 300 m 每 25 m 为一层, 共 12 层, 300~5600 m 的后 18 层每层厚度随深度增加逐渐加大。

LICOM1.0 的海表热力强迫采用 Newton 冷却形式:

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{o}} - \frac{\partial Q_{\text{o}}}{\partial T_{\text{o}}}(T_{\text{o}} - T_{\text{m}}), \quad (1)$$

其中, 下标 o 代表观测, m 代表模式。 Q_{o} 为观测净海表热通量。 T_{o} 和 T_{m} 分别为观测和模拟的 SST, $\partial Q_{\text{o}}/\partial T_{\text{o}}$ 为观测的耦合系数, 耦合系数采用经验通量计算方法, 和 Haney 公式 (Haney, 1971) 一致。

为比较风应力和净热通量对北太平洋变率的影响, 本文采用两组试验的结果 (吴方华, 2006)。第一组实验, 风应力强迫采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析资料 (ERA40) (Uppala et al., 1999) 逐日风应力资料; 净海表热通量用逐月的 GISST 资料 (Rayner et al., 1996) 和 ERA40 的辐射资料分别为观测 SST 和辐射通量计算得到; 海

表盐度向 WOA01 (World Ocean Atlas 2001) 气候态恢复 (Stephens et al., 2002) (该组实验简称 LICOM_HW)。积分时段从 1958 年至 2001 年。第二组实验, 分别用 WOA01 气候态的 SST 和 ERA40 气候态的辐射通量代替逐月的 SST 和辐射通量资料, 对其他强迫场的处理则完全与 LICOM_HW 实验相同 (该组实验简称 LICOM_OW), 积分时段与 LICOM_HW 相同。

对于海洋模式而言, 温度边界条件的处理是一个很棘手的问题。过去的研究已经提出了很多处理方案 (Pacanowski et al., 1981; Schopf et al., 1983; Rahmstorf et al., 1995; Chu et al., 1998), 它们各有优缺点。在本文中, 采用相对简单的牛顿冷却形式的边界条件, 虽然在计算中用到了观测的 SST, 但需要指出的是, 我们不是对 SST 的简单修正, 而是对热通量的修正。在现阶段, 无论是观测还是再分析资料, 对热通量的评估都存在很大的偏差 (Yu et al., 2006), 所以需要热通量进行修正。利用牛顿冷却形式计算的热通量的气候态与 ERA40 资料基本一致 (图略), 均能够再现赤道冷舌和北太平洋黑潮区域的热通量极大值。在两组数值试验中, 热通量的年际和年代际变率是不同的, 以北太平洋 ($20^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{W}$) 冬季平均的热通量为例 (图略), LICOM_HW 有很强的年际和年代际变化, 其变化幅度约为 ERA40 的 1/2, 而 LICOM_OW 存在年际变率, 但是幅度明显小于 ERA40 和 LICOM_HW, 且年代际变化不显著。因此, LICOM_HW 试验的热通量变化较为合理, 不过, 从 LICOM_HW 与 ERA40 的比较可以看出, 即使采用 LICOM_HW 的热通量处理方式, 其结果与 ERA40 还有偏差, 说明所用热通量处理方案还有待改进。

为便于与模式结果比较, 本文还用到了 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 海洋同化资料 (Carton, et al. 2004)。SODA 资料同化系统采用的是 POP3 (Parallel Ocean Program, V1.3) 海洋模式, 范围覆盖全球, 水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 垂直方向从 5~5374 m 共 40 层。在同化过程中, 表层温盐资料的 2/3 来自 WOA01, 风应力资料来自 ERA40, 净海表热通量和淡水通量则采用整体参数化方法计算。

3 结果分析

3.1 与 ENSO 相联系的北太平洋海温的年际变率特征

许多研究已经证实,热带太平洋的 ENSO 事件能够通过大气的“桥梁”作用,影响到北太平洋、大西洋、热带印度洋海温的异常 (Latif et al., 1995; Zhang et al., 1998; Alexander et al., 2002; 周天军等, 2004)。那么, LICOM1.0 对北太平洋 ENSO 信号的模拟能力究竟如何? 为此,本文采用经验正交函数 (EOF) 来揭示北太平洋 SST 变率中与 ENSO 相关的模态。分析的区域为 ($30^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{W}$), 进行 EOF 分解前,从原始数据中去掉季节循环以得到 SST 距平场。本文利用主分量 (PC) 和 SST 距平的相关系数得到 EOF 的空间型。图 1 给出 SODA 和两组实验 SST EOF 第一模态 (EOF1) 的空间分布和主分量序列 (PC1)。为检验与该模态相对应的风应力异常,亦将纬向和经向风应力异常与 PC1 分别作回归,并将回归系数以矢量形式叠加在 SST EOF1 的空间分布型上。

SODA 资料中, EOF1 解释了总方差的 23.2%。空间分布上,主要表现为从赤道东太平洋一直延伸到西太平洋的正距平,大值区位于 Niño3 区;阿拉斯加湾、加利福尼亚沿岸也存在正距平,强度相对较弱;北太平洋中部则为负距平,中心位于 40°N 附近。LICOM_HW 的 EOF1 解释了总方差的 38.7%,这说明模式中该模态非常强劲。该模态的空间分布与 SODA 非常相像。两者的区别在于 LICOM_HW 中赤道地区的正距平比 SODA 强,并且西伸 10° 经度左右;另外,东南热带太平洋的正距平、北太平洋中部的负距平都偏强。LICOM_OW 的 EOF1 解释了总方差的 43.3%,几乎是 SODA 的两倍。LICOM_OW EOF1 的空间分布与 SODA 差别很大,正距平主要集中于 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 的狭长地带,而且过于西伸,几乎贯穿整个赤道太平洋。与此同时,在 LICOM_OW 中,北太平洋中部的 SST 变率信号很弱。

图 1d 给出了 SODA 和两组实验的第一主分量 (PC1)。可见, LICOM_HW 和 LICOM_OW 基本上都能模拟出几次比较强的 ENSO 事件,如 1982/1983 和 1997/1998 的 ENSO 事件。LICOM_HW 模拟的 ENSO 事件在位相、强度、持续时间上,与

SODA 资料都很接近;而 LICOM_OW 对于非 ENSO 年或者弱 ENSO 事件的模拟,无论在强度上,还是在起始时间上,都与 SODA 有所区别。

图 2 给出了 PC1 的功率谱分析。可见, SODA 资料在 2~5 年的周期上都存在谱峰,而且都通过了 95% 的显著性检验,其中 4 年左右周期的峰值最大,另外在年代际尺度上 (~ 14 年) 也存在谱峰,但没有通过 95% 的显著性检验。LICOM_HW 中,除了 5 年左右的谱峰只是接近 95% 显著性检验外,其他波段上的结果与 SODA 类似。LICOM_OW 较好地模拟出了 4 年以下的变率,但是 5 年左右的谱峰不够显著,而且基本模拟不出年代际尺度的谱峰。总体而言, LICOM_OW 中的 ENSO 事件过于规则。

以上讨论了表层海温的变率特征,下面检查北太平洋次表层海温变率的状况。为清楚起见,我们对 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 做经向平均,图 3 给出经向平均的海温异常和 PC1 相关系数的分布。LICOM_HW 的结果与 SODA 基本类似。如东西边界的暖距平、日界线以东表层和 250 m 以下的冷距平。两者不一致的是, LICOM_HW 正负距平均偏强。LICOM_OW 模拟的海温变率的垂直结构,与 SODA 存在明显区别,与表层 SST 对 ENSO 的响应一致,次表层海温的响应也偏弱。

与北太平洋不同,两组实验均能够较为合理地再现热带太平洋年际变率的特点。因此,可以认为在年际尺度上,热带太平洋变率主要受风应力影响。这与以前的一些研究结果 (Wang et al., 2001; Huang et al., 2002) 是一致的,这些结果均指出在年际尺度上,赤道中东太平洋 SST 的异常受平流、卷挟等动力过程影响,而热通量则表现为对 SST 异常的反馈。

在年际尺度上,北太平洋 SST 变率的形成与风应力与热通量强迫的关系如何? 图 2a~c 显示,在 SODA 和 LICOM_HW 中,与北太平洋中部 SST 负异常相对应的,都是很强的西风应力异常。在理想条件下,根据 Ekman 输送原理,北半球海洋在西风应力的作用下,会产生向南的 Ekman 输送,这有利于冷海温距平的产生。与 SODA 和 LICOM_HW 不同,在 LICOM_OW 中,与 SST 负异常对应的是西北东南向的风应力异常,且其强度较弱。在北太平洋区域, SST 年际尺度异常的空间分布和振幅,

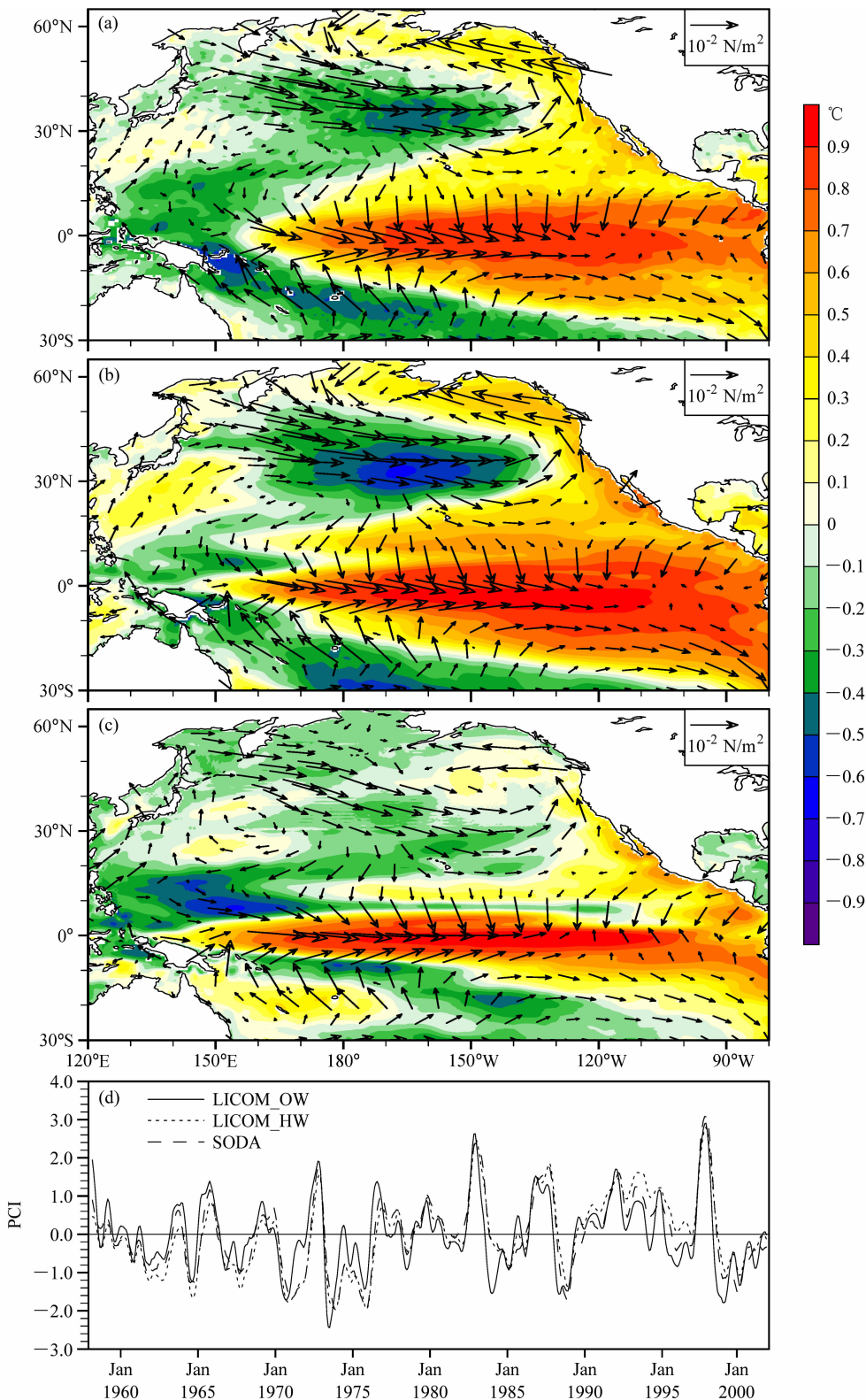


图 1 SST 年际变率 EOF1 的空间分布 (彩色) 及其 PC1 与风应力的回归系数 (矢量): (a) SODA; (b) LICOM_HW; (c) LICOM_OW; (d) 相应的 PC1

Fig. 1 Spatial patterns of the first EOF mode of interannual variability of SST (color) and regression coefficients of the wind stress against the principal component (PC1) (vector) for (a) SODA, (b) LICOM_HW, (c) LICOM_OW and (d) the corresponding PC1

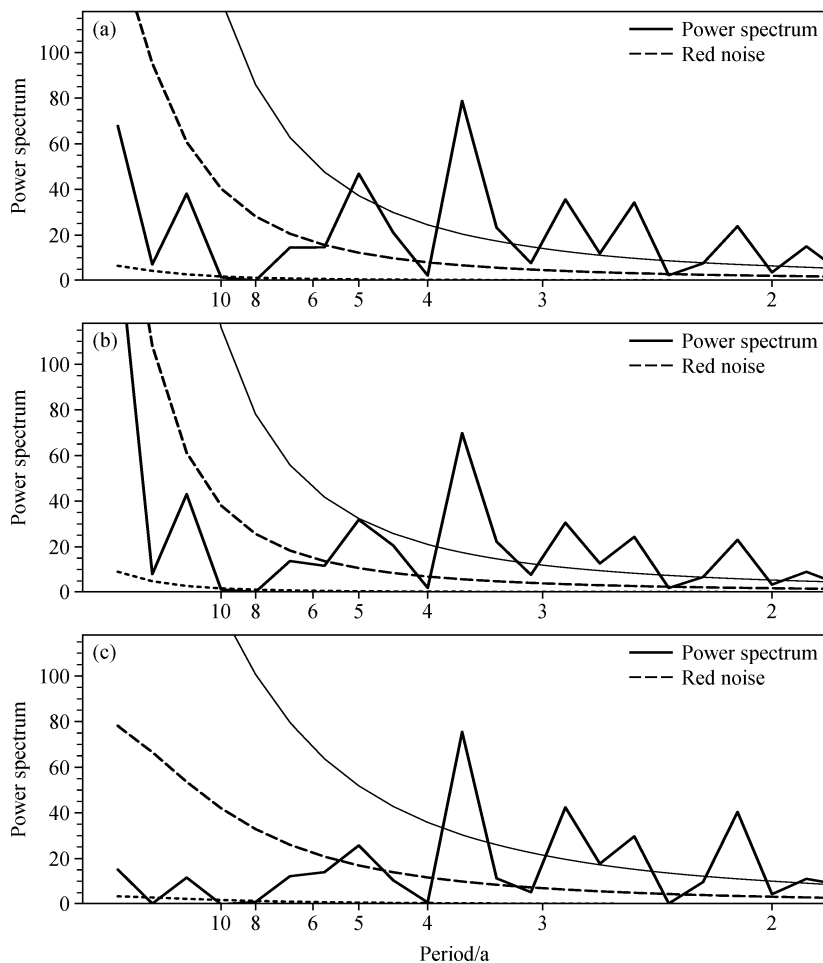


图2 SST EOF1 主分量 (PC1) 的功率谱分析: (a) SODA; (b) LICOM_HW; (c) LICOM_OW。细实线和短虚线: 95% 的显著性水平

Fig. 2 Power spectra of the principal component of EOF1 (PC1) from (a) SODA, (b) LICOM_HW, (c) LICOM_OW. The thin-solid and short-dashed lines denote the 95% confidence level

与风应力异常的空间分布和振幅有直接的关系。

标准化的 PC1 与热通量异常的回归系数如图 4 所示。由于 SODA 资料中没有热通量输出, 所以下文重点比较 LICOM_HW 和 LICOM_OW 的结果。

从图 4 可以看出, 在 LICOM_HW 中, 对应于北太平洋中部 SST 的负异常, 表面净热通量在绝大多数区域为负异常; 而在黑潮及其延伸体区域, 与变暖相对应的是正的热通量异常。在 LICOM_OW 中, 净热通量在北太平洋中部为正异常, 在黑潮及其延伸体区域为负异常, 正好与 LICOM_HW 中相关区域的热通量距平反号。考虑到 LICOM_OW 对上述区域 SST 年际变率的模拟结果较差, 对比 LICOM_HW 的结果不难发现, 热通量异常在很大程度上决定模式对北太平洋年际变率的模拟效果。因此, 热通量异常是导致北太平洋年际变率的

重要机制, 而且结合前面的分析, 可以认为这个热通量异常主要是由于风 (风应力) 异常引起的湍流热通量异常, 这进一步证实了基于海气耦合模式的分析结果 (Zhou et al., 2002)。

3.2 北太平洋海温场的年代际异常特征

为揭示冬季平均 SST 在 1976/1977 跃变前后空间分布的差异, 参照 Graham (1994) 的做法, 计算 1976/1977 后 6 年 (1976/1977 年至 1981/1982 年) 与前 6 年 (1970/1971 年至 1975/1976 年) 冬季 (DJF) 平均之差 (图略)。LICOM_HW 能够合理再现 SODA 资料中跃变前后 SST 异常的主要特征: 即整个北美沿岸、北太平洋的东南部以及黑潮及其延伸体 (简称 KKE) 附近表现为增暖, 而北太平洋中部为变冷。在上述区域内, LICOM_HW 模拟的 SST 异常幅度小于 SODA。较之 LICOM_HW,

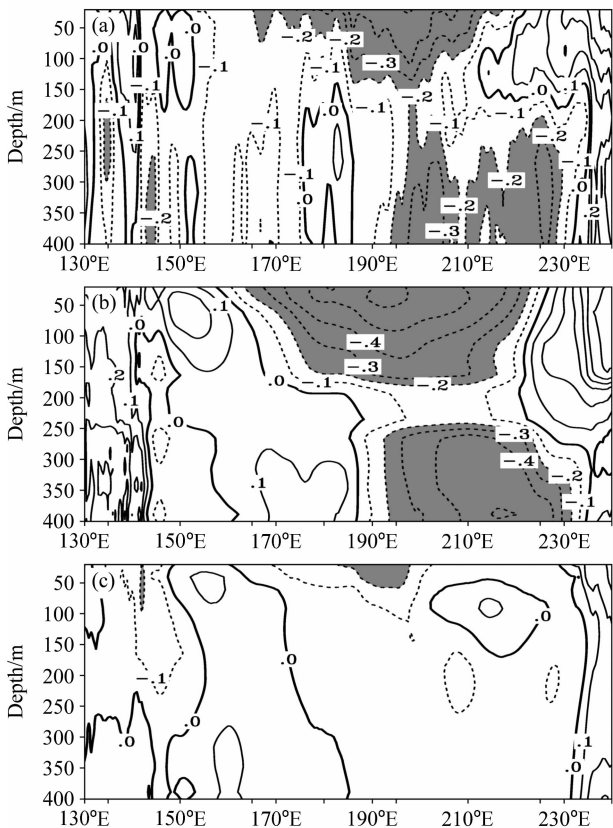


图 3 PC1 与 30°N~40°N 平均的海温异常的回归系数图 (单位: °C): (a) SODA; (b) LICOM_HW; (c) LICOM_OW

Fig. 3 Regression coefficients of the temperature anomalies averaged over 30°N–40°N against PC1 for (a) SODA, (b) LICOM_HW, (c) LICOM_OW. Units: °C

LICOM_OW 的结果不理想, 虽然 SST 异常的空间分布与 SODA 相似, 但其变化幅度小于 0.4°C, 可以认为 LICOM_OW 不能很好再现 1976/1977 的气候突变。

图 5 给出了 SST 年代际异常 EOF 分解第一模态的空间分布。在做 EOF 分解前, 对 SST 异常进行了低通滤波, 滤去 7 年以内的信号, 以突出年代际变率信号。类似于图 2a~c 的做法, 将风应力异常与 PC1 的回归系数叠加在 SST EOF1 的空间分布型上。三者 EOF1 的方差贡献分别为 47.3%、60.1% 和 40.1%。LICOM_HW 较为准确地再现了 SODA 主模态空间分布的特征, 即北太平洋中部为强的负距平, 在北美洲沿岸、热带中东太平洋为正距平, 但 LICOM_HW 中正、负异常的振幅均要大于 SODA。LICOM_OW 模拟的 EOF1 空间分布与 SODA 相差很大, KKE 区的正距平很强并一直向东北延伸, 把中太平洋的负距平一分为二, 而中

太平洋的负距平较之 SODA 要弱很多。同时, 在北美沿岸和热带中东太平洋, SST 正距平较之 SODA 也偏弱。从时间序列上可以看到, SODA 资料的一个突出特点, 是在 1976 年前后由冷位相到暖位相的过渡。LICOM_HW 合理再现了这个特征, 只是突变的时间比 SODA 晚一年左右, 两者的相关系数高达 0.96。虽然 LICOM_OW 的时间序列与 SODA 的相关系数也达到了 0.76, 但是在突变的年份 (晚 3 年以上)、峰值出现的时间和强度上, LICOM_OW 与 SODA 的差别都较大。因此, 合理的风应力强迫和热通量异常, 对于整个北太平洋年代际异常的发生都具有重要作用。

3.3 不同区域表层海温异常的形成机制

上述分析表明, 北太平洋不同区域海温异常的特征不同, 影响海温异常的因子也可能彼此有别。鉴于 LICOM_HW 所模拟的海温异常与观测基本一致, 下面基于 LICOM_HW 的结果, 讨论不同区域的混合层海温收支。为此, 选取三个典型区域, 即北太平洋中部 (25°N~45°N, 180°E~145°W)、加利福尼亚沿岸 (15°N~35°N, 135°W~110°W) 和黑潮及延伸体区域 (30°N~40°N, 140°E~160°E), 这些区域基于海温年际、年代际变率的大值中心选取, 所以与容新尧等 (2005) 的选取范围有所不同。另外, 由于北太平洋海气相互作用在冬季最强, 主要表现为大气对海洋的强迫作用 (Cayan, 1990; 张学洪等, 1998), 所以下面的分析针对 1960~1999 年冬季平均的结果。另外, 本文根据 Foltz et al. (2003) 的方法, 选取海温低于海表温度 0.5°C 处为混合层深度。

在海洋模式中, 温度预报方程可以写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{T}^Z}{\partial t} &= \frac{Q_{\text{net}} - Q_{\text{open}}}{\rho_0 c_p H} - \mathbf{v} \cdot \nabla \overline{T}^Z - \\ &\overline{\omega \frac{\partial T}{\partial z}} + A_{\text{hh}} \nabla^2 \overline{T} + A_{\text{hv}} \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \quad (2)$$

其中, $\overline{(\quad)}^Z$ 代表垂直平均 ($1/H \int_{-H}^0 (\quad) dz$), H 代表混合层深度, 是经纬度的函数。在式 (2) 中从左到右依次为: 温度倾向项、净热通量项、水平平流项、垂直平流项以及扩散项 (水平扩散和垂直扩散之和)。 Q_{net} 为根据牛顿冷却公式计算的海表净热

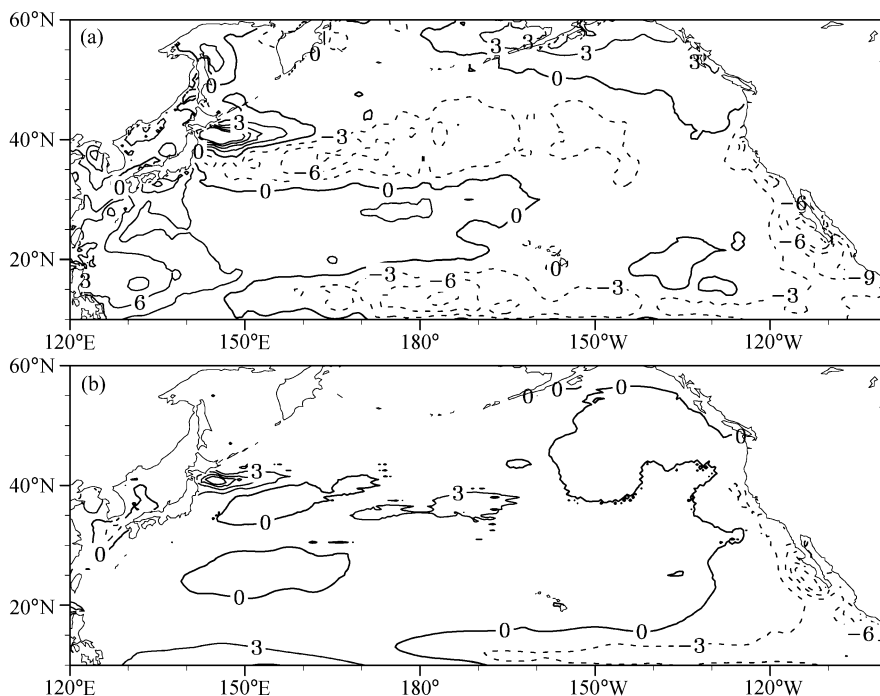


图4 PC1 与表面净热量异常的回归系数图(单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$): (a) LICOM_HW; (b) LICOM_OW. 正值表示海洋得到热量

Fig. 4 Regression coefficients of surface net heat fluxes against PC1 for (a) LICOM_HW, (b) LICOM_OW. Units are $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$, positive means the ocean gains heat flux from the atmosphere

通量, Q_{open} 为穿透混合层短波通量, V 、 ω 为水平、垂直速度, $\rho_0 = 1.028 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 表示海水密度, $c_p = 3996 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为比容, A_{hh} 、 A_{hv} 分别为水平和垂直湍流扩散系数, 在南北纬 30° 范围内通过 P-P 方案 (Pacanowski et al., 1981) 计算扩散项。

在北太平洋中部, 冬季平均的温度异常表现为降温, 1960~1999 年多年冬季平均的降温幅度大约为 $-0.85^\circ\text{C}/\text{月}$, 导致负温度距平的因子主要是热通量 ($-0.71^\circ\text{C}/\text{月}$), 其次是水平平流 ($-0.21^\circ\text{C}/\text{月}$), 约为热通量的 $1/4$, 其余项的作用很小。

图 6 给出北太平洋中部冬季平均的海温收支各项距平随时间的变化曲线, 从图中可以看出, 导致温度趋势异常最主要的项是热通量和水平平流, 两者量级相当, 其他几项的变率强度, 约为前两项的 $1/5 \sim 1/3$ 。热通量项的变化基本与温度趋势一致。各贡献项中, 水平平流的跃变与温度趋时的跃变一致, 1975 年以前表现为很强的正异常, 而之后则为负异常。热通量也存在年代际变率, 但没有水平平流明显。从上面的分析可以看出, 北太平洋海温的年代际异常主要是水平平流年代际异常的结果。这一结果, 部分解释了为何 LICOM_OW 给定的热通

量异常很弱, 但也能够部分再现北太平洋中部的年代际变率。Dawe et al. (2007) 曾指出, 在 PDO 正位相建立以后, 热通量对海温变化起增暖作用。我们的结果与之不同, 正位相建立以后热通量仍然起冷却作用, 这一结果与 Yasuda et al. (1997) 的观测结果一致。

在加利福尼亚沿岸, 冬季多年平均的降温幅度大约为 $-0.69^\circ\text{C}/\text{月}$, 导致这一异常的原因来自热通量异常 ($-0.70^\circ\text{C}/\text{月}$), 其他项的作用很小, 不足热通量的 $1/7$ 。

图 7 给出的是加利福尼亚沿岸海温异常各贡献项距平随时间的变化曲线, 从中可以看出, 加利福尼亚沿岸冬季平均的海温趋势的年际变率基本上是由热通量的异常引起的, 热通量贡献项和海温趋势项基本一致; 除此之外, 水平平流也起一定作用, 其强度约为热通量的 $1/3 \sim 1/2$ 。在 1970、1980 年代, 加利福尼亚沿岸海温存在明显的增温趋势, 而在 1980 年代后期和 1990 年代初期则为变冷, 热通量的异常与之很好的对应。水平平流项在 1970、1980 年代也经历了从负异常向正异常的转变, 这与热通量的变化基本一致, 但是它对 1980 年代后

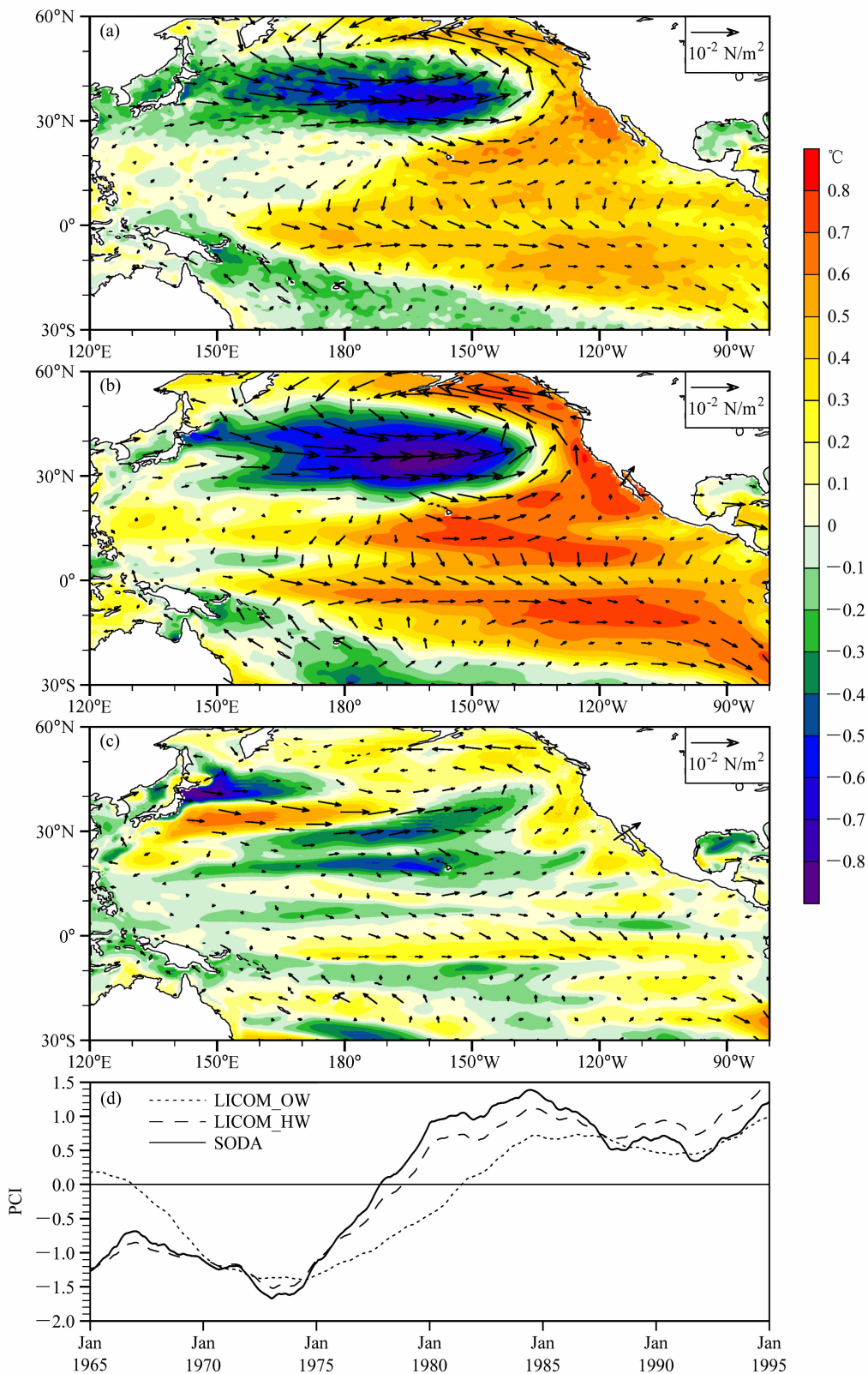


图 5 同图 1, 但为 SST 年代际变率的结果

Fig. 5 Same as Fig. 1, except for the decadal variability of SST

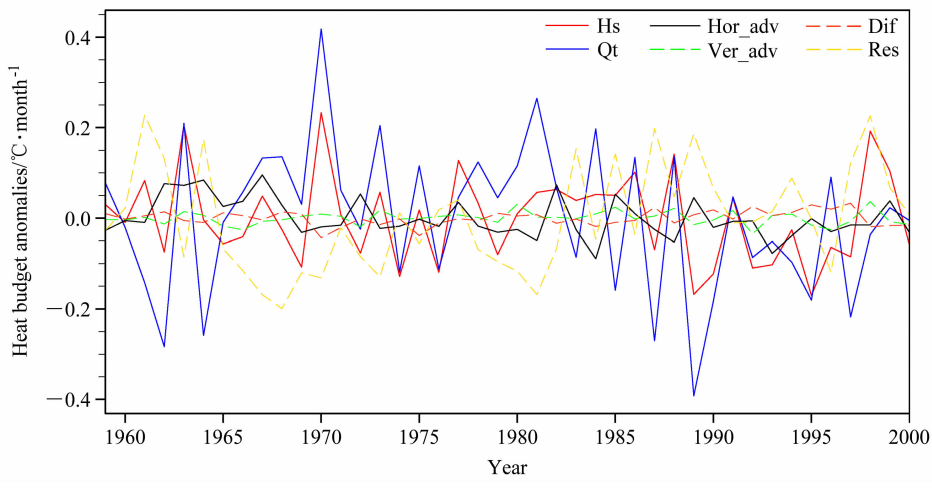


图 6 北太平洋中部冬季平均的混合层海温收支异常。Hs: 温度变化趋势; Qt: 净热通量项; Hor_adv: 水平平流项; Ver_adv: 垂直平流项; Dif: 扩散项; Res: 残差项

Fig. 6 The winter-averaged mixed-layer heat budget anomalies in the central North Pacific. Hs denotes temperature tendency; Qt, Hor_adv, Ver_adv, Dif and Res denote net heat flux, horizontal advection, vertical advection, diffusion and residual term, respectively

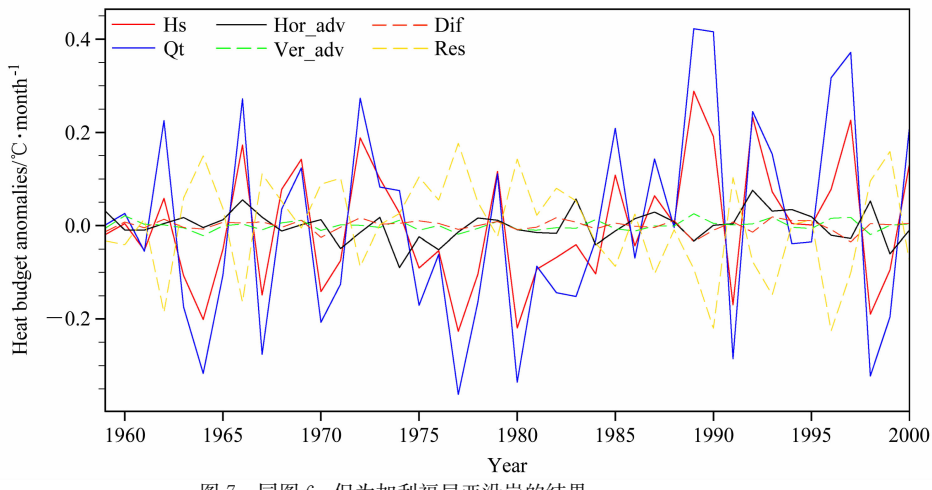


图 7 同图 6, 但为加利福尼亚沿岸的结果
Fig. 7 Same as Fig. 6, except for the coast off California

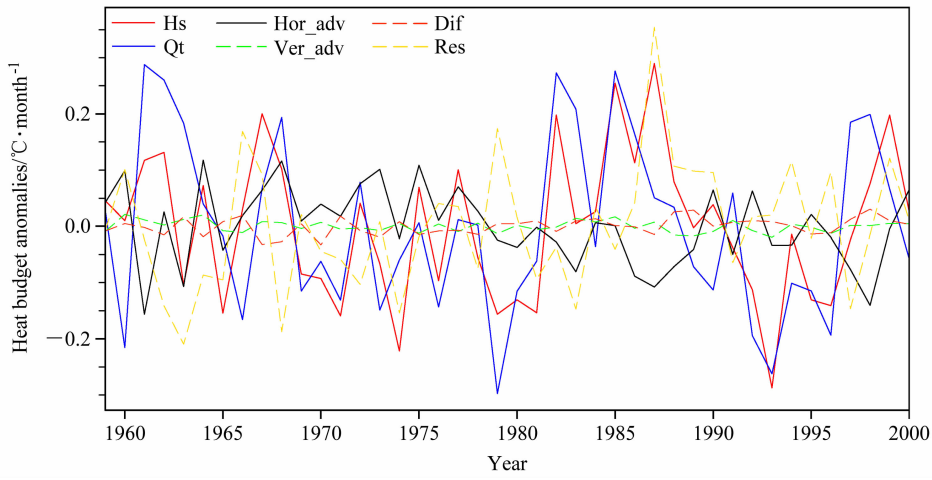


图 8 同图 6, 但为黑潮及其延伸体区域的结果
Fig. 8 Same as Fig. 6, except for the Kuroshio and Kuroshio Extension (KKE) region

期和 1990 年代初期的变冷影响不明显。

在黑潮及其延伸体区域，冬季多年平均的降温幅度大约为 $-1.19^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ，它的降温幅度比其他两个区域都要强，导致这一冷距平的原因是热通量异常 ($-1.58^{\circ}\text{C}/\text{月}$)。

图 8 给出的是黑潮及其延伸体区域各贡献项距平随时间的变化曲线，从图中可以看出，除垂直平流外，热通量项、水平平流和扩散项的变化趋势无论在年际变率还是年代际变率上，都与温度趋势项基本一致。在这三者中，热通量在温度趋势的年际与年代际变率中起主导作用，其余两项的作用相当，约为热通量项的 $1/3\sim 1/2$ 。

另外，需要指出的是，在上述计算过程中，温度趋势项和净热通量项、水平平流项、垂直平流和扩散之和并不是相等的，它们之间存在一个残差 (Res)。在北太平洋中部和加利福尼亚沿岸，残差项无论是多年平均还是异常值都不大；但是在黑潮及其延伸体区域，残差的多年平均和异常值则都很明显，多年平均的残差为 $-0.4^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ，而异常的大小和热通量相当且反向 (图 7 给出残差异常的大小)。关于残差项的产生，一方面可能与诊断中没

有考虑 GM90 方案计算的沿等密度面的扩散有关，虽然利用混合层平均的分析能够减小它的误差，但是它带来的偏差还是不容忽视。另一方面，在诊断中我们用逐月的资料，没有考虑瞬变扰动的作用。线性项中不需要考虑瞬变扰动的作用，但是在非线性项中，其作用不能忽略。在冬季黑潮及其延伸体区域，由于瞬变扰动活动频繁，非线性作用可能很大。对此，我们利用北太平洋中部和黑潮延伸体区域平均的逐日纬向风应力，来分析大气强迫的非线性作用。对于纬向风应力 U ，可以表示为：

$$U = [U] + U', \tag{3}$$

$$[UU] = [U][U] + [U'U'], \tag{4}$$

其中， $[U]$ 表示月平均， U' 表示叠加于月平均之上的扰动。为考察非线性作用的大小，分别计算公式 (4) 右端两项的相对大小，结果如图 9 所示。可见，虽然两个区域风应力的强弱不一样，但是从平均项和扰动项的比例上可以看出，在北太平洋中部，扰动部分的作用相对较弱，而在黑潮及其延伸体区域，扰动项的作用甚至超过了月平均部分。这从一个侧面解释了为什么在黑潮及其延伸体区域残

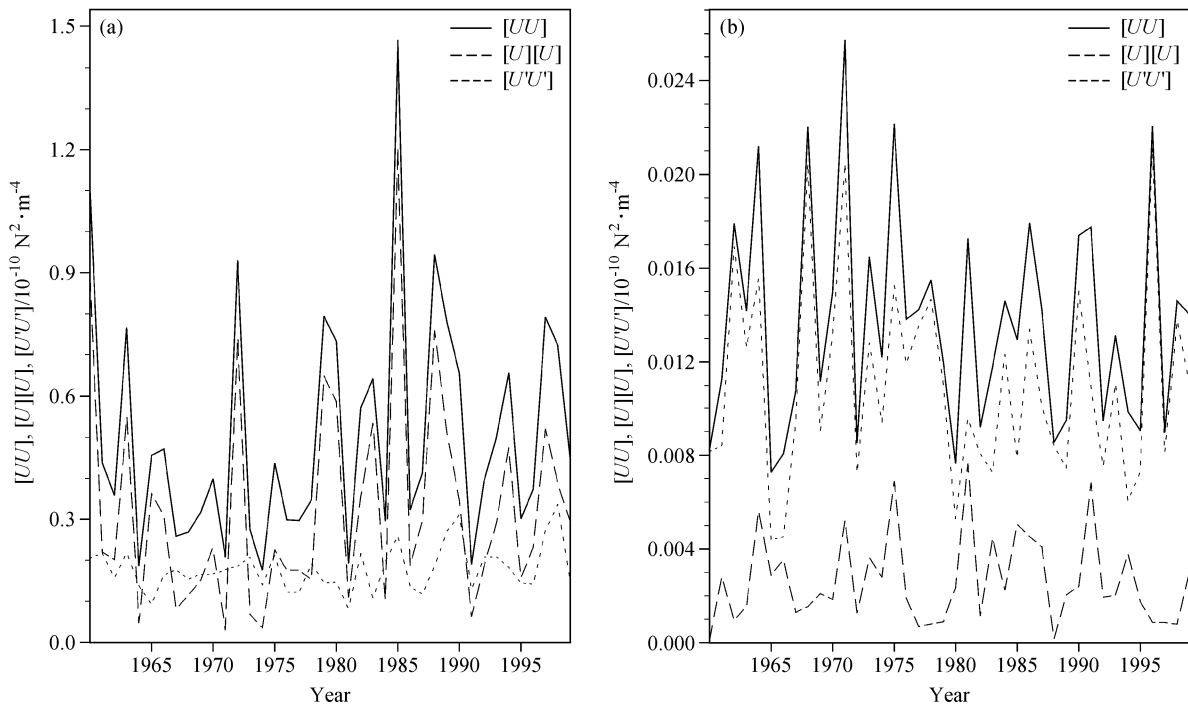


图 9 利用逐日纬向风应力计算的公式 (4) 中各项 $[UU]$ 、 $[U][U]$ 、 $[U'U']$ 的比较：(a) 北太平洋中部；(b) 黑潮及其延伸体区域
Fig. 9 Comparison of $[UU]$, $[U][U]$, $[U'U']$ in Eq. (4) for (a) the central North Pacific and (b) the KKE region based on the daily zonal wind stress

差项会如此之大。Dawe et al. (2003) 对观测资料的研究研究也发现, 黑潮及其延伸体区域的涡旋活动能引起很强的平流输送, 对海温异常影响明显。

4 结论与讨论

本文利用一个准全球的海洋模式, 设计了两组对比实验, 即 LICOM_HW 和 LICOM_OW, 检验了风应力和净海表热通量异常在太平洋年际和年代际变率形成中的作用。这两组实验都用 ERA40 逐日的风应力驱动, 但 LICOM_HW 中 SST 向逐月的观测资料恢复, 而 LICOM_OW 中 SST 向 WOA01 气候态的 SST 恢复。两种试验方案的差别, 在于前者既考虑了风应力又合理考虑了热通量年际异常对海洋的强迫, 而后者则主要考虑了风应力的作用, 而对热通量的变化反映较弱。通过与 SODA 同化资料的对比, 本文得到如下主要结论:

(1) 在年际尺度上, LICOM_HW 能够模拟出太平洋 SST 的 El Niño 空间型, 在赤道地区为正海温异常, 北太平洋中部为负海温异常; 模拟的 El Niño 的发生频率、强度, 以及北太平洋不同深度海温对 ENSO 信号的响应, 都与 SODA 基本一致。在 LICOM_OW 的模拟结果中, 与 El Niño 对应的正海温异常主要集中在赤道区域, 北太平洋的负异常不明显。另外, LICOM_OW 模拟的 El Niño 周期比较规则, 主要表现为 4 年以下的周期, 与 LICOM_HW 相比较, 二者在模拟 El Niño 周期上的差异, 意味着热通量异常可能是影响 El Niño 周期非规则性的重要因子。Wang et al. (2000) 曾撰文指出, 太阳短波辐射在 ENSO 非规则性的模拟中起非常重要的作用, 相比于由年平均短辐射驱动的结果, 利用年循环的太阳辐射的结果中 ENSO 的非周期性, 季节锁都有很大的改善。

(2) 热带外 SST 年代际异常主要受热通量异常的影响。在年代际尺度上, LICOM_HW 能够模拟出 1975/1976 年气候跃变前后 SST 异常的空间分布。LICOM_HW 模拟的太平洋年代际异常 PDO 的跃变时间比 SODA 稍晚。就整个太平洋区域而言, LICOM_OW 没有模拟出与 SODA 一致的年代际信号, 但在部分区域, 如北太平洋中部, 亦能部分再现年代际变冷现象。因此, 热通量异常可能在很大程度上影响整个太平洋 SST 年代际尺度变率的形成。

(3) 在北太平洋中部、加利福尼亚沿岸和黑潮延伸体区域, 多年冬季平均海温异常主要由热通量异常决定; 在北太平洋中部, 水平平流也有一定的影响, 约为热通量强度的 1/3, 而其他两个区域水平平流的作用则微乎其微。在北太平洋中部, 导致温度趋势异常最主要的项是热通量和水平平流, 而且水平平流的年代际异常对于温度趋势的年代际异常具有重要贡献。在加利福尼亚沿岸, 温度的异常主要来自热通量异常。在黑潮及其延伸体区域, 对温度趋势异常起主导作用的是热通量, 与此同时, 水平平流和扩散的作用亦不容忽视, 另外, 在这个区域, 非线性作用(残差项)很强, 甚至与热通量的作用相当, 所以这个区域的海温变化可能是热力条件和海洋动力过程共同作用的结果。与容新尧(2005)比较发现, 在加利福尼亚沿岸和北太平洋中部, 两个模式 SST 的控制机制基本一致。但是在黑潮及其延伸体区域, 我们的研究发现除了需要考虑热通量、水平平流和扩散的作用外, 非线性作用是不可忽视的影响因子。

参考文献 (References)

- Alexander M A, Blad I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J. Climate*, 15 (16): 2205-2231.
- Auad G, Miller A J, White W B. 1998. Simulation of heat storages and associated heat budgets in the Pacific Ocean I: El Niño-Southern Oscillation timescale [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (C12): 27621-27636.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97 (3): 163-172.
- Carton A, Giese B. 2004. Simple ocean data assimilation (SODA) reanalysis effort [C]. CLIVER Workshop on Ocean Reanalysis, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Cayan. 1990. Variability of the latent and sensible heat flux over the oceans [D]. Ph. D. dissertation, University of California, San Diego, 199pp.
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62 (5): 634-646. Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 62 (5): 634-646.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26 (5): 21-36. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East-Asian winter and

- summer monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (5): 21–36.
- Chu P C, Chen Y C, Lu S H. 1998. On Haney-type surface thermal boundary conditions for ocean circulation models [J]. J. Phys. Oceanogr., 28 (5): 890–901.
- Dawe J T, Thompson L A. 2007. PDO-related heat and temperature budget changes in a model of the North Pacific [J]. J. Climate, 20 (10): 2092–2108.
- Foltz G R, Grodsky S A, Carton J A, et al. 2003. Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean [J]. J. Geophys. Res., 108 (C5), doi: 10.1029/2002JC001584.
- Gent P R, McWilliams J C. 1990. Isopycnal mixing in ocean circulation models [J]. J. Phys. Oceanogr., 20 (1): 150–155.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响 [J]. 科学通报, 44 (3): 399–407. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. The Influence of ENSO on global and Chinese precipitations during the last 100 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 44 (3): 399–407.
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results [J]. Climate Dyn., 10 (3): 135–162.
- Haney R L. 1971. Surface thermal boundary condition for ocean circulation models [J]. J. Phys. Oceanogr., 1 (4): 241–248.
- Harrison D E, Giese B S, Sarachik E S. 1990. Mechanisms of SST change in the equatorial waveguide during the 1982–83 ENSO [J]. J. Climate, 3 (2): 173–188.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J], 大气科学, 32 (2): 335–344. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 335–344.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 4–15. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variations of summer precipitations in China and the drought in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 4–15.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Adv. Atmos. Sci., 6 (1): 26–37.
- Huang B Y, Liu Z Y. 2002. An OGCM simulation of seasonal and interannual variabilities in the surface-layer Pacific of the equatorial band [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (2): 219–235.
- Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. 1999. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model [J]. Adv. Atmos. Sci., 16 (2): 197–215.
- Latif M. 1987. Tropical ocean circulation experiments [J]. J. Phys. Oceanogr., 17 (2): 246–263.
- Latif M, Barnett T P. 1995. Interactions of the tropical oceans [J]. J. Climate, 8 (4): 952–964.
- 李崇银, 穆穆, 周广庆, 等. 2008. ENSO 机理及其预测研究 [J]. 大气科学, 32 (4): 761–781. Li Chongyin, Mu Mu, Zhou Guangqing, et al. 2008. Mechanism and prediction studies of the ENSO [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 761–781.
- 李建, 周天军, 宇如聪. 2007. 利用大气环流模式模拟北大西洋海温异常强迫响应 [J]. 大气科学, 31 (4): 561–579. Li Jian, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2007. Atmospheric response to the North Atlantic SST anomalies in CAM2 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 561–579.
- 刘海龙. 2002. 高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 178. Liu Hailong. High resolution oceanic general model and the simulation of the upper ocean circulation in the tropical Pacific [D]. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 178pp.
- 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. 2003. LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册 [R]. 大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 技术报告特刊. 北京: 科学出版社, 107pp. Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. 2003. Reference manual of LASG/IAP climate system ocean model (LICOM1.0) [R]. The Special Issue of LASG Technical Report (in Chinese). Beijing: Science Press, 107pp.
- Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (5): 2–17.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (6): 1069–1079.
- Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. 1994. Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies [J]. Climate Dyn., 9 (6): 287–302.
- Miller A J, Schneider N. 2000. Interdecadal climate regime dynamics in the northern Pacific Ocean: Theories, observations and ecosystem impacts [J]. Prog. Oceanogr., 47 (2–4): 355–379.
- Pacanowski R C, Philander S G. 1981. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans [J]. J. Phys. Oceanogr., 11 (11): 1443–1451.
- Qu T D, Meyers G, Godfrey J S, et al. 1997. Upper ocean dynamics and its role in maintaining the annual mean western Pacific warm pool in a global GCM [J]. Int. J. Climatol., 17 (7): 711–724.
- Rahmstorf S, Willebrand J R. 1995. The role of temperature feedback in stabilizing the thermohaline circulation [J]. J. Phys. Oceanogr., 25 (5): 787–805.
- Rayner N A, Horton E B, Parker D E, et al. 1996. Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set, 1903–1994 [R], Climate Res. Tech. Note 74. Unpublished document available from the Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Meteorological Office, London Road, Bracknell, RS12 2SY, U.K.

- 容新尧, 杨修群. 2005. 全球海洋环流模式中上层海洋对表面强迫的响应和调整 II. 年代际变率 [J]. 海洋学报, 27 (3): 20–31.
- Rong Xinyao, Yang Xiuqun. 2005. The upper-ocean response and adjustment to surface forcing in an ocean general circulation model. II. Decadal-to-interdecadal variability [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 27 (3): 20–31.
- Schopf P S. 1983. On equatorial waves and El Niño. II: Effects of air–sea thermal coupling [J]. J. Phys. Oceanogr., 13 (10): 1878–1893.
- Stephens C, Antonov J I, Boyer T P, et al. 2002. World ocean atlas 2001 volume 1: Temperature [CD]. NOAA Atlas NESDIS 49 [EB/OL], Washington, D. C. U. S. Govt. Printing Office.
- Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1 (7): 988–993.
- Uppala S, Gibson J K, Fiorino M, et al. 1999. ECMWF second generation re-analysis ERA40 [CD]. Proceedings of the Second WCRP International Conference on Re-analyses, Wokefield Park, Reading.
- Wang B, Fang Z. 2000. Impacts of shortwave radiation forcing on ENSO: A study with a coupled tropical ocean–atmosphere model [J]. Climate Dyn., 16 (9): 677–691.
- Wang W, McPhaden M J. 2001. The surface-layer heat balance in the equatorial Pacific Ocean. Part II: Interannual variability [J]. J. Phys. Oceanogr., 30 (11): 2989–3008.
- 吴方华. 2006. 季节到年际尺度北印度洋经向热输送的模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 108pp.
- Wu Fanghua. 2006. Simulation study on meridional heat transport in the northern Indian Ocean at the seasonal-to-interannual timescales [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 108pp.
- Yasuda T, Hanawa K. 1997. Decadal changes in the mode waters in the midlatitude North Pacific [J]. J. Phys. Oceanogr., 27 (6): 858–870.
- Yu L S, Jin X Z, Weller R A. 2006. Role of net surface heat flux in seasonal variations of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean [J]. J Climate, 19 (23): 6153–6169.
- Zebiak S E, Cane M A. 1987. A model El Niño–Southern Oscillation [J]. Mon. Wea. Rev., 115 (10): 2262–2278.
- 张学洪, 俞永强, 刘辉. 1998. 冬季北太平洋海表热通量异常和海气相互作用——基于一个全球海气耦合模式长期积分的诊断分析 [J]. 大气科学, 22 (4): 511–521.
- Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Liu Hui. 1998. Wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air–sea interaction in a coupled ocean–atmosphere model [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 22 (4): 511–521.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–1993 [J]. J Climate, 10 (5): 1004–1020.
- Zhang X B, Sheng J, Shabbar A. 1998. Modes of interannual and interdecadal variability of Pacific SST [J]. J. Climate, 11 (10): 2556–2569.
- 钟姗姗, 何金海, 刘宣飞. 2002. 太平洋次表层海温年代际变率及其突变特征 [J]. 南京气象学院学报, 25 (5): 22–29.
- Zhong Shanshan, He Jinhai, Liu Xuan-Fei. 2002. Decadal variability and abrupt change of upper-ocean temperature in the Pacific [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (5): 22–29.
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟 [J]. 大气科学, 28 (3): 358–373.
- Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. 2004. Indian Ocean response to ENSO: Observation and air–sea coupled model simulation [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 28 (3): 358–373.
- 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 2005. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS_s [M]. 北京: 气象出版社, 288pp.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. 2005. Atmosphere circulation model SAMIL and the full coupled model FGOALS_s (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 288pp.
- Zhou T J, Yu R C, Li Z X. 2002. ENSO-dependent and ENSO-independent variability over the mid-latitude North Pacific: Observation and air–sea coupled model simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (6): 1128–1147.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641–654.
- Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationship between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654.