

张雅乐, 俞永强. 2015. FGOALS 模式 4 个版本太平洋年代际气候变率模拟的比较 [J]. 大气科学, 40 (1): 176–190, Zhang Yale, Yu Yongqiang. 2015. Comparison of Pacific interdecadal variability simulated by four versions of the LASG/IAP Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 176–190, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14161.

FGOALS 模式 4 个版本太平洋年代际气候 变率模拟的比较

张雅乐^{1,2} 俞永强²

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 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 (LASG), 北京 100029

摘 要 本文选用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 (LASG/IAP) 发展的全球海洋—大气—陆面气候系统模式 (FGOALS) 的 4 个版本 g2.0、s2.0、g1.1 和 g1, 利用模式的长时间积分结果, 结合观测、再分析资料比较、评估模式对太平洋年代际变率的模拟能力, 并通过对海气相互作用及其海洋动力过程分析, 探讨了模式中太平洋年代际振荡形成机制。研究发现, FGOALS 模式 g2.0 和 s2.0 版本对太平洋年代际振荡 (PDO/IPO) 的模拟能力优于 g1.1 和 g1。模式中太平洋年代际变率的正反馈过程与 Bjerknes (1969) 提出的海气相互作用正反馈机制有关, 其负反馈则主要与海洋内部动力过程有关。太平洋异常经向热量输送将热带与中纬度海洋联系在一起, 可以抑制正反馈作用, 但无法使得年代际振荡变化位相发生反转; FGOALS 模式中, 热带海表温度 (SST) 暖距平信号通过大气桥影响热带外大气环流, 在海气作用下, 热带与热带外海洋次表层分别以 Kelvin 波和 Rossby 波的形式传播, 使得冷暖位相反转, 4 个版本均能再现这种负反馈机制。但不同版本 Rossby 波所处的纬度不同, 太平洋 SST 异常年代际变化信号最明显的范围越宽, 则由此激发的 Rossby 波便更为偏北, 纬度越高 Rossby 波西传的时间也越长, PDO/IPO 的周期与其 SST 异常的经向尺度密切相关。

关键词 气候系统模式 太平洋年代际振荡 (PDO/IPO) 海气相互作用 FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model)

文章编号 1006-9895(2016)01-0176-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14161

Comparison of Pacific Interdecadal Variability Simulated by Four Versions of the LASG/IAP Flexible Global Ocean– Atmosphere–Land System Model

ZHANG Yale^{1,2} and YU Yongqiang²

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

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

Abstract The long-term control simulation (20th century experiment) of four versions of the coupled atmosphere–ocean

收稿日期 2014-04-03; 网络预出版日期 2014-12-12

作者简介 张雅乐, 女, 博士, 主要从事年代际气候变化、短时临近预测研究。E-mail: zhangyale@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB956204, 中国科学院科技先导项目 XDA05110302, 国家自然科学基金项目 41530426

Founded by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (Grant 2013CB956204), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05110302), National Natural Science Foundation of China (Grant 41530426)

global climate model FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model), g2.0, s2.0, g1.1 and g1, developed at the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, combined with observational and reanalysis data, are analyzed and compared. In terms of evaluating how realistic the model is in simulating the climatology, the physical mechanisms of Pacific decadal variations are discussed. It is found that g2.0 and s2.0 simulate more reasonable interdecadal Pacific variations than g1.1 and g1. The results indicate that the positive air–sea interaction feedback should be related with the Bjerknes positive feedback mechanism. The negative feedback is mainly associated with the ocean dynamic process. The anomalous meridional heat transport in the Pacific links the tropical and extratropical regions, which inhibits the positive feedback effect. The tropical SST (Sea Surface Temperature) warm anomaly signal, via the atmospheric bridge, affects the extratropical atmospheric circulation. With the air–sea interaction, Kelvin waves and Rossby waves spread across the tropical and extratropical subsurface ocean, respectively. Such negative feedback behavior can be reproduced by the four versions of FGOALS. The study quantifies some of the factors responsible for the periods of Pacific interdecadal variations. The farther from the equator the maximum zonal SST is, the wider the decadal variations are. Subsequently, poleward heat transport requires a longer time, the surface wind stress curl anomalies will extend farther north, and ocean Rossby waves appear much more northward with longer transport periods.

Keywords Fully coupled global climate system model, Pacific Decadal Oscillation/Interdecadal Pacific Oscillation (PDO/IPO), Air–sea interaction, FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model)

1 引言

气候变率在全球范围内有很多具有年代际尺度特征的现象和模态。太平洋地区海表温度 (SST) 在年代至多年代际尺度的变化主要表现为太平洋年代际振荡 PDO/IPO (Power et al., 1999; Folland et al., 2002), 是太平洋的气候变率中具有类似 ENSO 空间结构但周期为 10~30 a 的振荡模态。目前, 涉及太平洋年代际振荡形成机制的研究非常之多, 侧重点也各有不同, 基于模式与观测相结合的诸多种物理机制研究主要可以概括为中纬度海气相互作用、大气随机强迫、非线性、遥相关和热带—热带外海气相互作用理论。

中纬度海气相互作用: 北太平洋海气耦合过程决定太平洋年代际变化 (Latif and Barnett, 1994, 1996; Jin et al., 1997; Barnett et al., 1999; Pierce et al., 2000)。Latif and Barnett (1994) 利用海气耦合模式发现北太平洋存在准 20 a 周期振荡, 提出了中纬度海气相互作用机制, 并认为北太平洋这种年代际振荡与热带无关。

大气随机强迫、非线性理论或遥相关: Hasselmann (1976) 和 Frankignoul and Hasselmann (1977) 从热力学角度解释海表温度 (SST) 低频变化时提出随机的大气强迫可以驱动并产生低频的海洋振荡。Jin et al. (1994) 等认为热带海—气相互作用可产生年代际尺度上的具有较大振幅的非规则 ENSO 振荡。再则有观点认为热带太平洋年代

际振荡通过大气遥相关, 使得中纬度太平洋产生年代际振荡 (Graham, 1994; Miller and Schneider, 2000; Newman et al., 2003)。

热带与中纬度相互作用产生太平洋年代际变化的一系列研究 (Barnett et al., 1999; Pierce et al., 2000; Capotondi and Alexander, 2001; Wang et al., 2003) 主要可分为三类具代表性的观点: 一类观点认为在太平洋东边界海区海洋波导以类 Kelvin 波的形式将赤道太平洋和中纬度太平洋相互联系, 太平洋年代际变化位相反转通过中纬度太平洋 Rossby 波动过程实现 (Meehl and Hu, 2006); 一类观点强调温度异常平流的作用, 认为赤道 SST 的年代际振荡主要源于中纬度冷 (暖) 海水潜沉 (subduction) 并沿温跃层输送至热带的过程; 第三类观点强调北太平洋副热带—热带经圈环流 (Subtropical–Tropical meridional Cells STC), 即经向速度异常平流起主要作用 (Kleeman et al., 1999; McPhaden and Zhang, 2002; Nonaka et al., 2002)。研究认为北太平洋浅层的经向翻转流在副热带下沉, 将次表层冷水输送至赤道, 随后在赤道地区上翻到达海表, 海气热通量交换使上翻的冷水变暖, 随后通过表层 Ekman 极向输送流至副热带, 闭合的 STC 通过影响赤道热平衡造成太平洋年代际变化。

基于观测的分析指出, 20 世纪 PDO/IPO 模态的变化可能来自于多种物理机制。Meehl and Hu (2009) 用海气耦合环流模式 (PCM) 对照试验 300 年时长的海表温度进行经验正交函数分解 (EOF)

分析认为, PDO/IPO 在 1970 年代中期气候迁移是气候内部多年代际变化的产物, 主要是受气候系统内部变率所控制。另外, 也有研究认为人类活动等外强迫也会影响北太平洋年代间变化, 但还不确定对其产生多大程度的影响。因此, 在 PDO/IPO 预测中既要考虑包括人类活动外强迫, 还要考虑年代际变化自然变率的共同作用 (Meehl et al., 2009)。

由于观测资料尤其是海洋数据的时间长度有限并存在不确定性, 对研究气候系统年代际气候变化一些特征难以充分解释, 对海洋内部年代际变化的过程等研究结论也存在相当大的局限性, 给海气系统相互作用以及机理研究造成了巨大的困难。考虑到耦合气候模式已经可以较好地重现 20 世纪增暖趋势及年代际气候变化的基本特征, 利用模式数值模拟长期积分结果对年代际气候变化机制进行研究具有可行性和重要意义。本文选取大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 发展的 FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System) 耦合模式的 4 个版本 g2.0、s2.0、g1.1 和 g1 长时间积分结果, 希望通过模式比较, 评估模式各版本对太平洋年代际变率的模拟能力, 借助对数值模拟结果的分析太平洋年代际振荡的机制, 以及与其周期有关的因素。

本文其余章节安排如下: 第 2 部分介绍资料及模式; 第 3 部分在评估模式模拟性能的基础上, 讨论太平洋年代际变率的反馈机制; 第 4 部分探讨影响太平洋年代际变率周期和振幅的影响因素; 第 5 部分对本文进行总结和讨论。

2 模式和资料说明

本文研究的耦合模式 FGOALS 是 LASG/IAP 发展的灵活的全球“海洋—大气—陆面—海冰”完全耦合、“非通量订正”的气候系统模式。FGOALS 耦合模式在 LASG 灵活的全球耦合气候系统 (Flexible Global Circulation Models, 简称 FGCM) 的基础上发展起来 (Yu et al., 2002, 2004), 现已经发展比较成熟, 包括海洋、大气、陆面、海冰 4 个分量模式和通量耦合器。本文所用数据来自已经被广泛应用于多种气候变化研究的 g1 (Zhou et al., 2008) 和 g1.1 (Yu et al., 2011) 两个版本, 以及参加 CMIP5 计划两个最新版本 g2.0 (Li et al., 2013)、s2.0 (Bao et al., 2013)。以上版本都是基于 NCAR

(National Center for Atmospheric Research) 耦合器建立起来, 而所采用的分量模式和耦合器版本均随时间推移不断更新。

尽管如大部分耦合模式一样仍然存在较明显的热带模拟偏差, 但 FGOALS 模式以上 4 个版本可以较真实地重现当代气候的许多基本特征, 如 ENSO、亚澳季风环流、北大西洋涛动 (NAO) 等现象, 同时也可以较好地模拟过去 100 多年来的全球平均气温的变化趋势 (Yu et al., 2011, 2013; Bao et al., 2013; Wang et al., 2013)。表 1 给出了这 4 个版本各分量模式的介绍。

FGOALS 模式 g1 和 g1.1 的主要区别海洋模式版本不同 (Yu et al., 2011), 而 g2.0 和 s2.0 的主要区别在于大气分量选用格点和谱两种模式, 同时海冰模式也有区别 (Zhou et al., 2008; Yu et al., 2011; Lin et al., 2013b; Bao et al., 2013)。另外, g2.0、s2.0 与 g1.1 以及 g1 的海洋模式版本不同, 新版本 LICOM2.0 增加了上层海洋的垂直分辨率, 在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 之间, 经向分辨率向赤道逐步加密到 0.5 度, 垂直方向 30 层, 其中在海洋上层 150 米均匀分布着 15 层等 (Liu et al., 2012)。因此, 通过上述 4 个版本的比较有助于我们理解大气和海洋模式在年代际变化中的不同贡献。

本文选取上述各版本中工业革命前对照试验 200 年积分结果, 针对 SST、海表高度 (SSH)、海洋上层 400 米海温 (T) 和经向速度 (v)、海表纬向风应力 (TAUX)、经向风应力 (TAUY) 这些变量展开分析。

本文选用的观测和再分析资料如下:

美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA) 气候资料中心 (The National Climatic Data Center, 简称 NCDC) SST 扩展重建资料, 版本 3b (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, version 3b, ERSSTv3b), 时间范围从 1950 年至 2009 年, 水平分辨率 2° (纬向) $\times 2^{\circ}$ (经向) (Smith et al., 2008)。

海洋上层 400 米海温 (T)、纬向流速 (u) 和海平面高度 (SSH) 逐月数据选取美国马里兰大学 (UMD) 2.0.2-4 版本海洋再分析资料 (Simple Ocean Data Assimilation Reanalysis, version 2.0.2-4, SODA2.0.2-4), 时间范围从 1958 年至 2007 年, 水平分辨率 0.5° (纬向) $\times 0.5^{\circ}$ (经向), 垂直 18 层 (Brohan et al., 2006)。

表 1 LASG/IAP FGOALS 模式四个版本各分量简介

Table 1 Details of the four versions of LASG/IAP FGOALS

LASG/IAP FGOALS 模式四个版本各分量				
	g1	g1.1	g2.0	s2.0
大气	GMAIL low-resolution	GMAIL1.0	GMAIL2.0	SMAIL2.0
大气顶	top = 2.194 hPa	top = 2.194 hPa	top = 0.1 hPa	top = 0.1 hPa
水平分辨率, 垂直	4°×5°, L26	2.8125°×2.8°, R42L26	2°×2.5°, L20	2.8125°×1.66°, R42L26
分层 (参考文献)	(Wang et al. 2004)	(Wang et al. 2004)	(Wang et al. 2011)	(Bao et al. 2013)
海洋	LICOM 1.0	LICOM 1.1	LICOM 2.0	LICOM 2.0
水平分辨率, 垂直	1°×1°, L30	1°×1°, L30	1°×1°, L30	
分层 (参考文献)	(Liu et al., 2004)	(Liu et al., 2004)	(Liu et al., 2012; Lin et al. 2013)	(Liu et al., 2012; Lin et al. 2013)
海冰	CSIM 4	CSIM 4	CICE	CICE
(参考文献)	(Briegleb et al., 2004)	(Briegleb et al., 2004)	(http://climate.lanl.gov/Models/CICE)	(http://climate.lanl.gov/Models/CICE)
陆面模式	CLM 2.0	CLM 2.0	CLM 3.0	CLM 3.0
(参考文献)	(Bonan et al. 2002)	(Bonan et al. 2002)	(Oleson et al., 2004)	(Oleson et al., 2004)
耦合器	CPL5	CPL5	CPL6	CPL6
通量调整	串行处理各分量在界面上通量的交换	串行处理各分量在界面上通量的交换	并行处理各分量在界面上通量的交换	并行处理各分量在界面上通量的交换
(参考文献)	(Yu et al. 2008)	(Yu et al. 2008)	(Craig et al., 2005)	(Craig et al., 2005)

注: g1 与 g1.1 采用相同的陆面模式 CLM2.0、海冰模式 CSIM4 和通量耦合器 CPL5。g1 大气分量模式是 LASG 发展的一个全球大气格点模式 (Grid-point Atmospheric Model of IAP/LASG, GAMIL) 1.0 低分辨率版本, 而 g1.1 大气分量模式采用 GAMIL1.0 (Wang et al., 2004; Li et al., 2007; Li and Wang, 2010)。g1 和 g1.1 海洋分量模式分别为 (LASG/IAP Climate system Ocean Model, LICOM) 1.0 版本和 1.1 版本 (Yu et al., 2011)。g2.0 与 s2.0 采用同样的海洋模式 LICOM2.0、陆面模式 CLM3.0 模式和耦合器 CPL6。g2.0 大气分量模式选用 GAMIL2.0 (Li et al., 2013, s2.0 采用 LASG/IAP 研发的一代大气环流谱模式 (Spectral Version 2, SAMIL2.0) (Bao et al., 2013)。

TAUX、经向风应力 (TAUY) 采用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 44 年逐月再分析资料 (Re-Analysis, ERA-40), 时间范围从 1958 年至 2001 年, 水平分辨率 2.5° (纬向) × 2.5° (经向) (Simmons and Gibson, 2000)。

本文关注年代际时间尺度的气候变率, 除对全球表面海温气候平均态分析之外, 其他分析都是在对原始月平均数据进行去倾和低通滤波处理, 保留 7 年以上年代际变化分量基础上进行, 即主要关注年代际尺度上的大气和海洋环流变化特征及其机理。

3 太平洋年代际变率模拟

3.1 热带太平洋平均态

FGOALS 模式 4 个版本模拟的全球 SST 气候平均空间分布总体特征与观测基本一致 (图 1, 填色), 多数热带海区的 SST 与观测之差小于 1°C, 4 个版本均模拟出热带太平洋东西方向明显的温度梯度, 对太平洋暖池模拟较好, 再现北赤道地区海温大于 27°C 暖水带贯穿东、西太平洋的空间分布型。与目前世界上大多数耦合模式一样, 在热带地区还存在一定的模拟误差, 例如模式对热带西太平洋暖池高

于 30°C 海域模拟略偏弱, 赤道印度孟加拉湾和阿拉伯海模拟较观测整体略偏冷。g1 和 g1.1 模拟 SST 主要偏差在于 SST 沿赤道显现南北对称分布特征, 对西太平洋暖池模拟偏冷, 同时出现了赤道太平洋冷舌模拟过于西伸, 达日界线以西。相对于 FGOALS 的前两个版本 g1 和 g1.1 模拟的海表温度, 新版本 g2.0、s2.0 在热带东、西太平洋地区和印度洋的模拟能力明显提高, 很好的模拟出与观测相似的赤道和热带太平洋 SST 东冷西暖沿纬向不对称分布特征, 改善了冷舌过于西伸的问题, 另外在极地区域 SST 的模拟误差也明显小于以前的版本。已有研究将模式与观测对比, 对 FGOALS 不同版本关于太平洋平均态的模拟进行详细研究 (Lin et al., 2013a, 2013b)。另外, g1 和 g1.1 没有出现显著的气候漂移, g2.0 和 s2.0 较之前的版本也较好克服了气候漂移现象 (Zhou et al., 2008; Lin et al., 2013c)。

观测与模拟的海表风应力场在热带、中纬度和高纬度显示出与三圈环流对应的环流特征 (图 1, 矢量)。北半球低纬和极地附近大致为东北风, 中纬度为西风, 相应的南半球低纬盛行东南风, 在中纬度海域被东风覆盖。副热带地区风应力呈现反气旋分布, 在中高纬有气旋式风应力。模式模拟出全球海

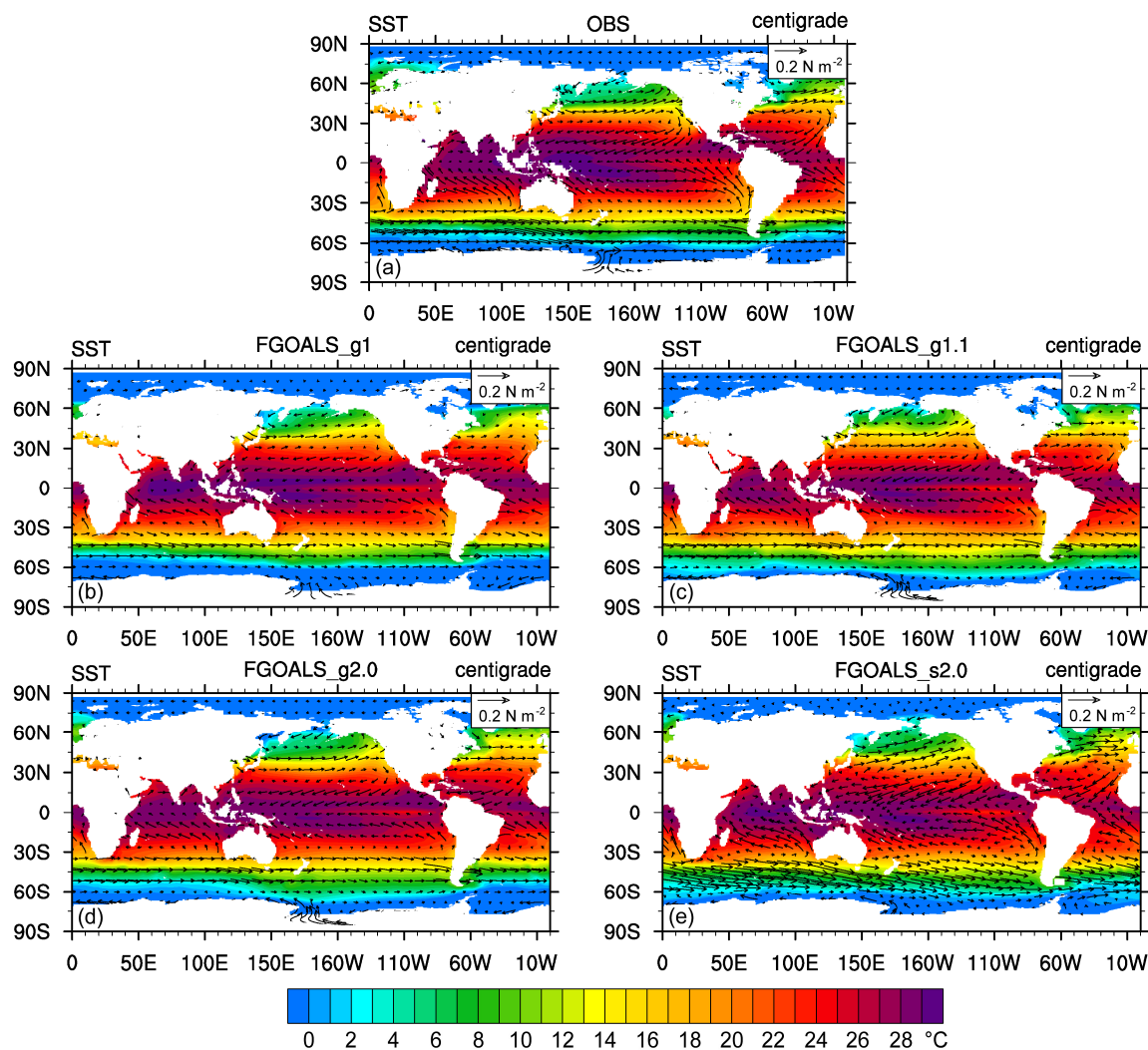


图1 全球海表温度(SST, 单位: $^{\circ}\text{C}$, 填色)和表面风应力(矢量, 单位: N m^{-2})的气候平均: (a-e)依次为观测、FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0、FGOALS_s2.0

Fig. 1 Climatological mean SST (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) and surface wind stress (arrows, units: N m^{-2}): (a) Observation; (b) FGOALS_g1; (c) FGOALS_g1.1; (d) FGOALS_g2.0; (e) FGOALS_s2.0

表风应力的气候平均, g1 版本对中纬度西风带和赤道西太平洋纬向风应力模拟偏弱, s2.0 版本对副热带及中高纬度太平洋经向风应力模拟偏差较大, g1.1 和 g2.0 版本对风应力强度的模拟更接近于观测。

总体而言, 模式 4 个版本模拟的全球 SST 无论从量值还是空间分布, 均可以再现与观测类似的特征。新版本 FGOALS 格点模式和谱模式均比 g1 和 g1.1 版本有明显改进, 克服了冷舌过度西伸的问题, 改善赤道西太平洋暖池偏冷范围偏小的状况, 特别是对于旧版本赤道南北两侧 SST 对称分布的误差有明显改进。

3.2 太平洋海表温度年代际变率模式

本文研究的区域为太平洋 ($30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$,

$110^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{W}$), 对 SST 异常去倾向滤波后进行经验正交函数分解 (EOF)。如图 2, 观测与模式 SST 异常 EOF 第一主分量 (EOF1) 均可再现 Zhang and Levitus (1997) 和 Mantua et al. (1997) 观测的 PDO/IPO 模态。观测 SST 异常 EOF1 占解释总方差的 35.4%, 经向分布为北太平洋中西部与热带太平洋相反, 当北太平洋中西部及 KOE 区马蹄形区域偏冷时, 热带太平洋表现为 ENSO 事件暖位相分布型, 沿秘鲁、墨西哥向北至北美西岸到阿拉斯加湾整个东太平洋 SST 变暖。模式各个版本对照试验太平洋 SST 异常 EOF1 空间分布与观测 EOF1 相似, 亦表现为在中纬度北太平洋中西海域与东部相

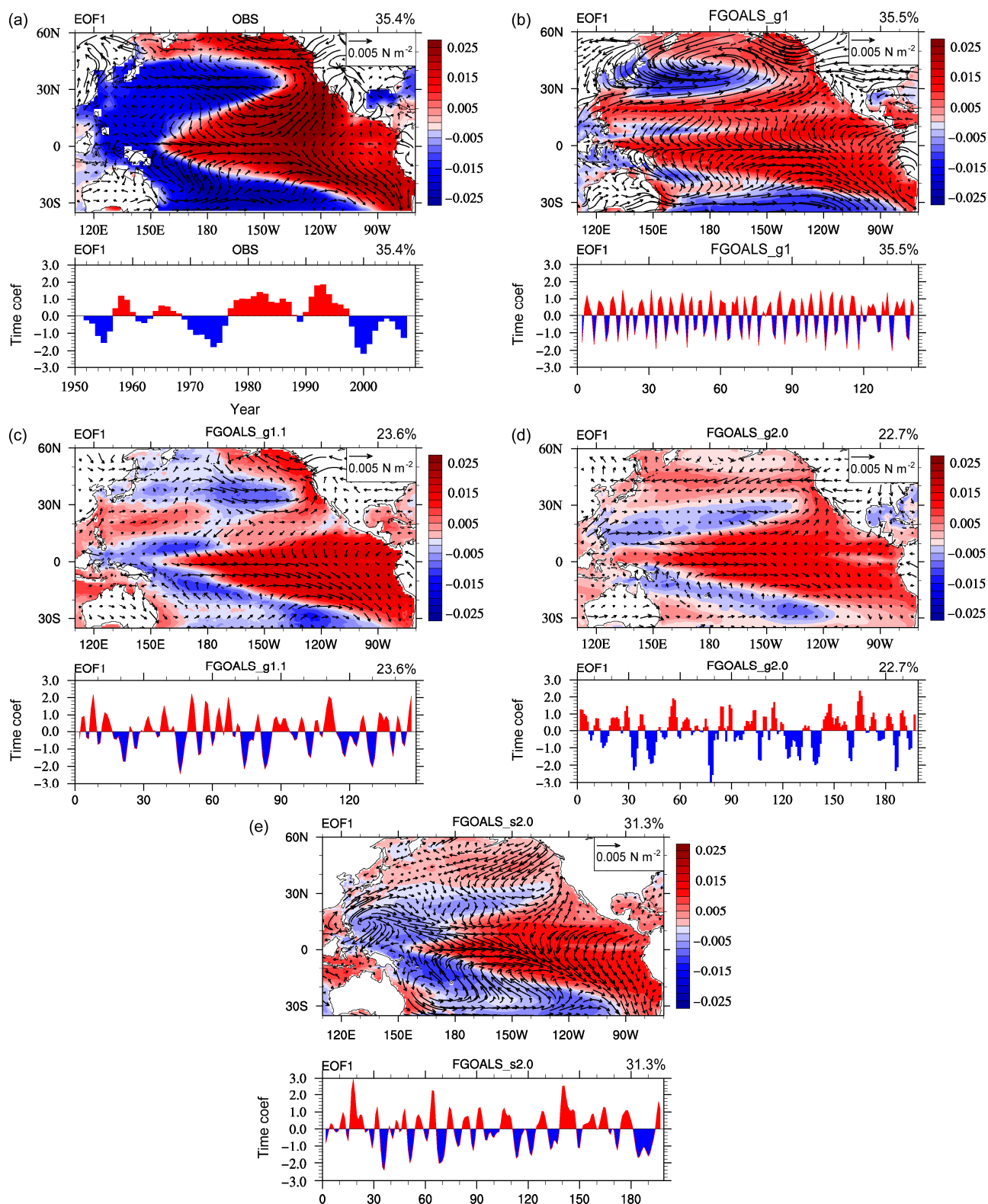


图2 太平洋 SST 异常经验正交函数分解 (EOF) 第一主分量 (EOF1) (填色, 上图) 及其时间系数序列 (下图) 和与之对应的表面风应力异常 (上图箭头, 单位: N m^{-2})。 (a-e) 依次为观测、FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0、FGOALS_s2.0

Fig. 2 Spatial patterns of the first leading mode of SST (shaded, above) with the associated time series (below) and wind stress anomalies regressed on the first leading mode of SST time series (arrows, above; units: N m^{-2}) in the Pacific: (a) Observation; (b) FGOALS_g1; (c) FGOALS_g1.1; (d) FGOALS_g2.0; (e) FGOALS_s2.0

反,北太平洋中西部及 KOE 区为冷的马蹄形,东部为暖位相。g1 版本 EOF1 的方差贡献 39.4%,东太平洋暖海水不仅西伸严重,南北跨度也明显增大,马蹄形冷水区朝高纬偏移,强大的暖水区几乎将 PDO/IPO 空间型变为带状分布。FGOALS_g1.1 EOF1 的方差贡献 23.6%,总体上呈现出 PDO/IPO 暖位相时空间分布,对太平洋暖区的分布型模拟明显好于 FGOALS_g1,但是菲律宾沿岸东伸至日界线以西洋面与观测相反。FGOALS_g2.0 EOF1 的方差贡献 22.7%,对北太平洋西部的马蹄形区 30°N 以北冷区模拟不足,热带太平洋暖区较观测过于西伸,但较上 2 个版本,带状分布明显改善,空间分布上更接近于观测。s2.0 版本的 EOF1 方差贡献为 31.3%,也出现对 30°N 以北冷区模拟不足的现象,马蹄形冷水区范围较观测向东延伸,对北美西岸到阿拉斯加湾暖区模拟不足;但是对赤道太平洋西、东冷暖空间分布特征模拟的与观测较一致,同时对南太平洋的模拟也较格点模式更接近观测。考虑到 FGOALS 的 g2.0 和 s2.0 版本的海洋模式完全一致,西北太平洋冷中心模拟得偏弱,可能与海洋模式对黑潮西边界流及其延伸体的模拟误差有关。

将标准化 EOF1 时间序列做为 PDO/IPO 指数 (Mantua, 1997)。如图 2a,观测 PDO/IPO 指数随时间呈现出显著年代际变率的特征,EOF1 时间序列在 20 世纪 60 年代中、70 年代末和 90 年代初从负值变为正值,即从冷位相突变成暖位相。SST 异常 EOF 第一模态对应的标准化时间序列在 FGOALS 模式 4 个版本中的振幅强度与观测相当,年代际时间尺度冷暖交替振荡的特点在模式 EOF1 时间序列中也有较为一致的体现。将观测与模式 EOF1 对应的时间序列进行谱分析(图略),观测 EOF1 时间序列呈现 14 a 振荡周期,FGOALS 模式 4 个版本也都显示出时间不等的年代际振荡周期,FGOALS_g1 峰值出现在 16 a 附近,FGOALS_g1.1 峰值在 24 a,FGOALS_g2.0 谱分析峰值出现在 18 a,FGOALS_s2.0 峰值出现在 15 a。Zhou et al. (2014) 也得到类似的结论,指出 FGOALS_g2.0 周期在 14 和 20 a,FGOALS_s2.0 周期在 12~13 a 和 20 a,同版本 g2.0、s2.0 与本文的年代际周期的不同和所选样本长度、选取区域以及滤波不同有关。通过谱分析可以进一步看出,模式对太平洋年代际模拟显示出不同周期的年代际变化特征,其中 FGOALS_g1 的周期最长,FGOALS_s2.0 的周期最短。其中

FGOALS_s2.0 的年代际变率振荡周期与观测最为接近,因 g2.0 的周期相对偏长,而两个模式的主要区别在于大气模式的不同,因而,可能与模式所采用的大气模式或者耦合过程有关。

同时考虑与海洋 PDO/IPO 暖位相对应的大气异常风场分布形态,将对应的风应力场异常与 PDO/IPO 指数进行回归(图 2,矢量)。观测热带太平洋 150°W 以西表现为西风异常,风场呈现反气旋分布型,而热带东太平洋正好相反,但强度明显弱于中西太平洋,热带太平洋 125°W 海表面东、西风异常形成辐合。赤道以北至 45°N 的中东太平洋形成一个大的气旋式环流。海表温度场与大气风场年代际变率的空间配置说明,在热带中、东太平洋 SST 暖异常强迫下,信风减弱,产生西风距平,并且在赤道外异常风场有气旋式环流分布,这种大气对 SST 异常的响应,可以用大气风场对海表加热的 Gill 响应模态来解释 (Gill, 1982)。模式模拟的风应力场基本可以再现观测的特征,风应力强度在 $0.1 \sim 0.26 \text{ N m}^{-2}$ 之间。FGOALS_g1 版本中高纬度气旋式分布模拟较观测偏西偏北且偏强,北太平洋副热带洋面经向风应力过强;FGOALS_g1.1 版本模拟的风应力场可基本再现观测的特征,纬向风应力强度较观测偏弱,气旋式环流中心位置与观测较接近,但气旋式环流场的范围和强度相对较弱;FGOALS_g2.0 版本与观测最为接近,模拟的赤道纬向风应力场以及北太平洋的气旋式风场范围和环流中心与观测一致,只是强度弱于观测;FGOALS_s2.0 版本模拟的北太平洋洋面气旋式环流场范围不足,且环流中心偏东,日界线以东的经向风应力模拟过强,对黑潮及黑潮延伸体的模拟与观测有出入。

上述太平洋大气风场,海表温度以及赤道温跃层深度(图略)在年代际时间尺度上形成一个彼此密切关联的海气耦合系统。赤道中东太平洋 SST 暖异常造成赤道太平洋东西向大气压力梯度减弱(增强),导致赤道东(西)风减弱(增强),大气场进一步作用于海洋导致海水上翻减弱(增强),温跃层东西梯度变平缓(变陡峭),最终将加大赤道东太平洋原有的正(负) SST 异常,西太平洋次表层海水冷异常有利于进一步加强海温的垂直梯度,导致次表层垂直输送西太平洋强于东太平洋。上述海气之间的相互作用是可以由 Bjerknes (1969) 提出的海气相互作用正反馈机制来解释。模式在热带太平洋纬向风应力模拟偏弱,削弱了海水上翻减弱作

用, 从而模式中温跃层梯度较观测偏大。

3.3 经向热输送对年代际变化的贡献

太平洋年代际变率不仅体现为 SST 的异常, 更是海洋上层热量调整的过程。如上文提及, 热带—副热带经向环流 (STC) 在年代际变率过程中的重要地位 (Kleeman et al., 1999; McPhaden and Zhang, 2002; Nonaka et al., 2002), 特别是对热带太平洋上层海温年代际变率的贡献。海水经向环流的变化同时伴随着海洋上层海水质量、温度的输送, 本文通过分析经向热输送的年代际变率特征, 讨论经向热输送对热带太平洋上层海温年代际变率的影响, 进而分析海温年代际正、负位相转换的物理机制。

经向热输送 H_{LAT} 的定义为

$$H_{LAT} = \rho \cdot c_p \int_{-400 \text{ m}}^0 \int V \cdot T dx dz, \quad (1)$$

即对 $V \cdot T$ 进行纬向和垂直积分, 纬向区域贯穿整个太平洋海盆, 垂直方向选取海表至 400 m 深处, 其中 V 是海洋上层逐层经向速度, T 是海洋上层逐层海水温度, $dx dz$ 代表沿纬向和垂直方向积分增量, $\rho = 1026 \text{ kg m}^{-3}$ 为海水标准密度, $c_p = 3996 \text{ J m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 为海水标准热容量。

太平洋经向输送最显著的区域位于热带, 且与赤道太平洋 SST 年代际变率密切相关, 选取 6°S 和 8°N 两个纬度计算向两极的经向热输送:

$$H = H_{8^\circ\text{N}} - H_{6^\circ\text{S}}. \quad (2)$$

其中, H 表示经向热输送从赤道向两极辐散。

如图 3, FGOALS 模式极向热输送变率显示出明显的年代际振荡特征, 振幅在 -0.1 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) $\sim 0.2 \text{ PW}$ 之间。EOF1 时间序列随着海洋极向热输送的升高 (降低) 而上升 (下降), 峰值稍落后于海洋 SST 异常变化。这说明极向热输送与热带太平洋 SST 年代际变率有直接联系, 通过经向热量的极向输送, 使得热带太平洋 SST 温度逐渐降低。将 H 与 EOF1 时间序列进行超前滞后相关分析, 各版本最大相关系数出现在经向热输送超前 EOF1 时间序列约 $1 \sim 2 \text{ a}$, 二者之间的正相关意味着经向热输送起着负反馈的作用, 当热带中东太平洋处于暖位相时, 海洋上层出现热量从赤道向两极输送; 当热带中东太平洋处于冷位相, 热量向赤道辐合。

FGOALS 模式中海洋上层热量输送呈现出的年代际变率特征的物理过程说明经向热输送将热带与热带外联系在一起, 热带 SST 暖异常产生的 Bjerknes 正反馈有助于热带太平洋温度增加, SST

变暖的同时会通过风应力旋度异常引起异常的经向热输送。经向热输送会减弱 SST 进一步增长, 从而抑制 Bjerknes 正反馈, 起到负反馈作用。但是经向热输送超前 SST 异常变化 $1 \sim 2 \text{ a}$, 远小于十几年的 PDO/IPO 周期, 因此二者在年代际变化尺度上几乎处于同位相, 仅靠热输送不足以使得 PDO/IPO 变化位相反转, 这一点与 ENSO 循环中海洋经向环流的贡献截然不同。

3.4 太平洋年代际变率波动特征

年代际变率不仅仅体现为 SST 的异常, 更是整个海洋上层热量的调整。海水经向环流的变化实际上同时伴随着海洋上层海水质量、温度的输送, 通过分析经向热输送的特征, 发现经向热输送在太平洋年代际变率中抑制热带太平洋上层海温进一步增长, 但不引起 PDO/IPO 位相反转, PDO/IPO 从暖位相向冷位相转换需要一种负反馈机制起作用。

FGOALS 热量经向输送在到达 $15^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{N}$ 之后发生明显衰减 (Zhang and Yu, 2011), 用海表高度异常代表温跃层变化, 以 FGOALS_g2.0 为例, 对海表高度异常在 16°N 随时间的经向变率 (SSH 异常在 16°N 变化最为明显) 和 16°N 纬向风应力经向变率进行分析 (图 4)。 16°N 东太平洋纬向风应力正异常对应 SSH 正异常, 这种空间配置将加深此纬度温跃层深度; 纬向风应力为负异常对应 SSH 亦为负异常, 此纬度温跃层深度将抬升变浅。图中 SSH 异常还呈现出明显西传的特征, PDO/IPO 暖位相时热带外 16°N 东太平洋 SSH 为正异常, 西太平洋为负异常, 16°N 东太平洋的负异常明显西传, 如 28、58、73、85、90、105、150、165、190 a。PDO/IPO 冷位相, 热带外 SSH 在东太平洋为负异常, 西太平洋为正异常。东太平洋正异常有明显西传的特征, 如 32、78、88、138、160、184 a。SSH 异常从太平洋东岸向西传播至西岸大约需要 $9 \sim 13 \text{ a}$, 这正好与此纬度 Rossby 的速度 $3 \sim 5 \text{ cm s}^{-1}$ (Gill, 1982) 一致。对海洋以及大气各物理量场的研究, 热带 SST 暖距平信号通过大气桥影响热带外大气环流, 在 $16^\circ\text{N} \sim 25^\circ\text{N}$ 左右产生西风异常, 在北半球中纬度激发出 Rossby 波向西传播, 经过约十多年的时间到达热带外西太平洋沿岸, 在西边界赤道被捕获反射成东传的 Klevin 波, 最后温跃层异常信号传播赤道西太平洋, 引起太平洋上层海洋年代际时间尺度的冷暖位相反转。

FGOALS 模式 4 个版本赤道与赤道外 SSH 异

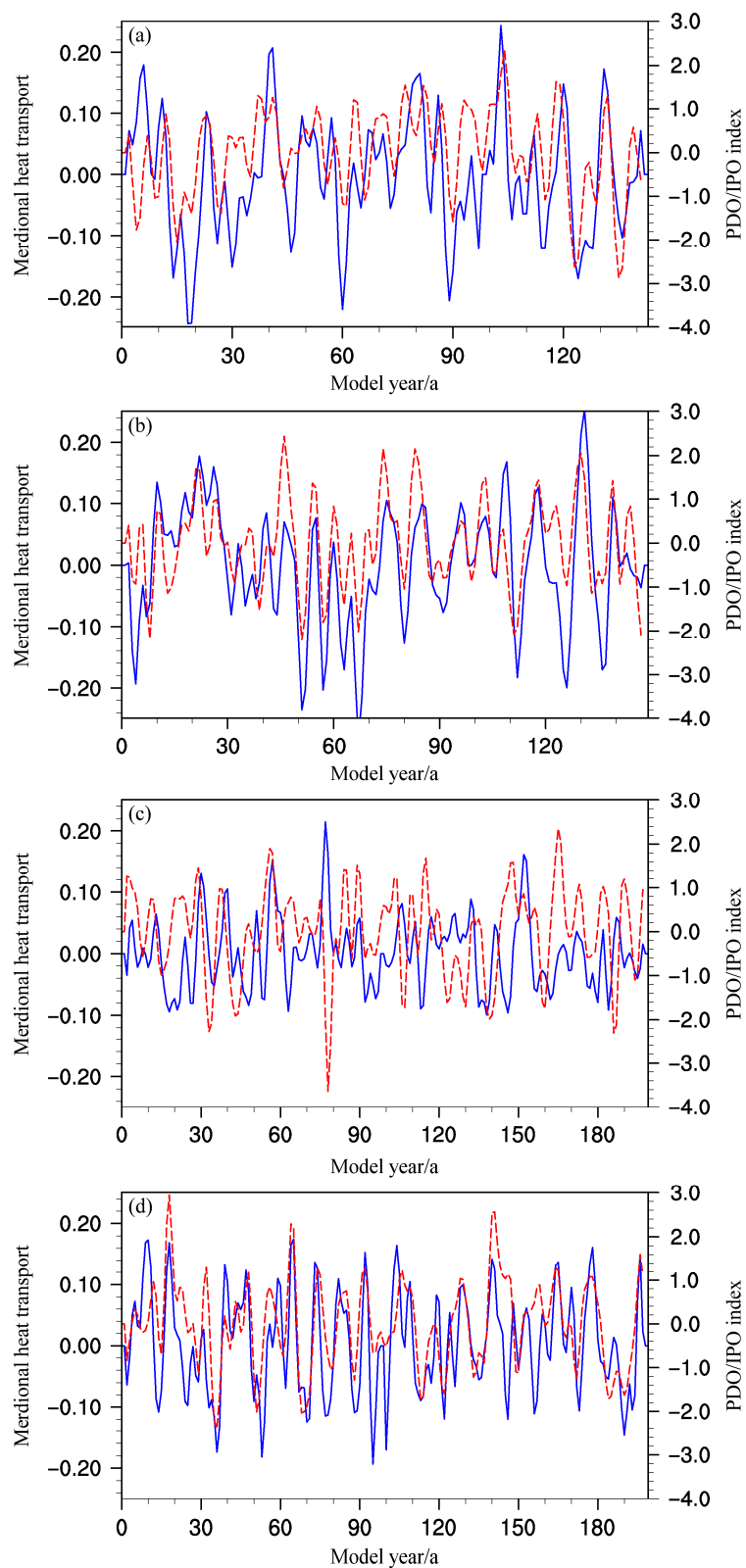


图3 FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0、FGOALS_s2.0 对照试验太平洋 ($H_{8^{\circ}\text{N}}-H_{6^{\circ}\text{S}}$) 极向热输送 (蓝色实线, 单位: PW, $1\text{ PW}=10^{15}\text{ W}$) 和 PDO/IPO 指数 (红色虚线) 随时间演变。(a-d) 依次为 FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0、FGOALS_s2.0

Fig. 3 Time series of the equatorial upper-ocean ($H_{8^{\circ}\text{N}}-H_{6^{\circ}\text{S}}$, above 400 m) meridional heat transport (solid blue line; units: PW, $1\text{ PW}=10^{15}\text{ W}$; positive: northward) and the time series of the first EOF mode of Pacific SST (anomalies, dashed red line): (a) FGOALS_g1; (b) FGOALS_g1.1; (c) FGOALS_g2.0; (d) FGOALS_s2.0

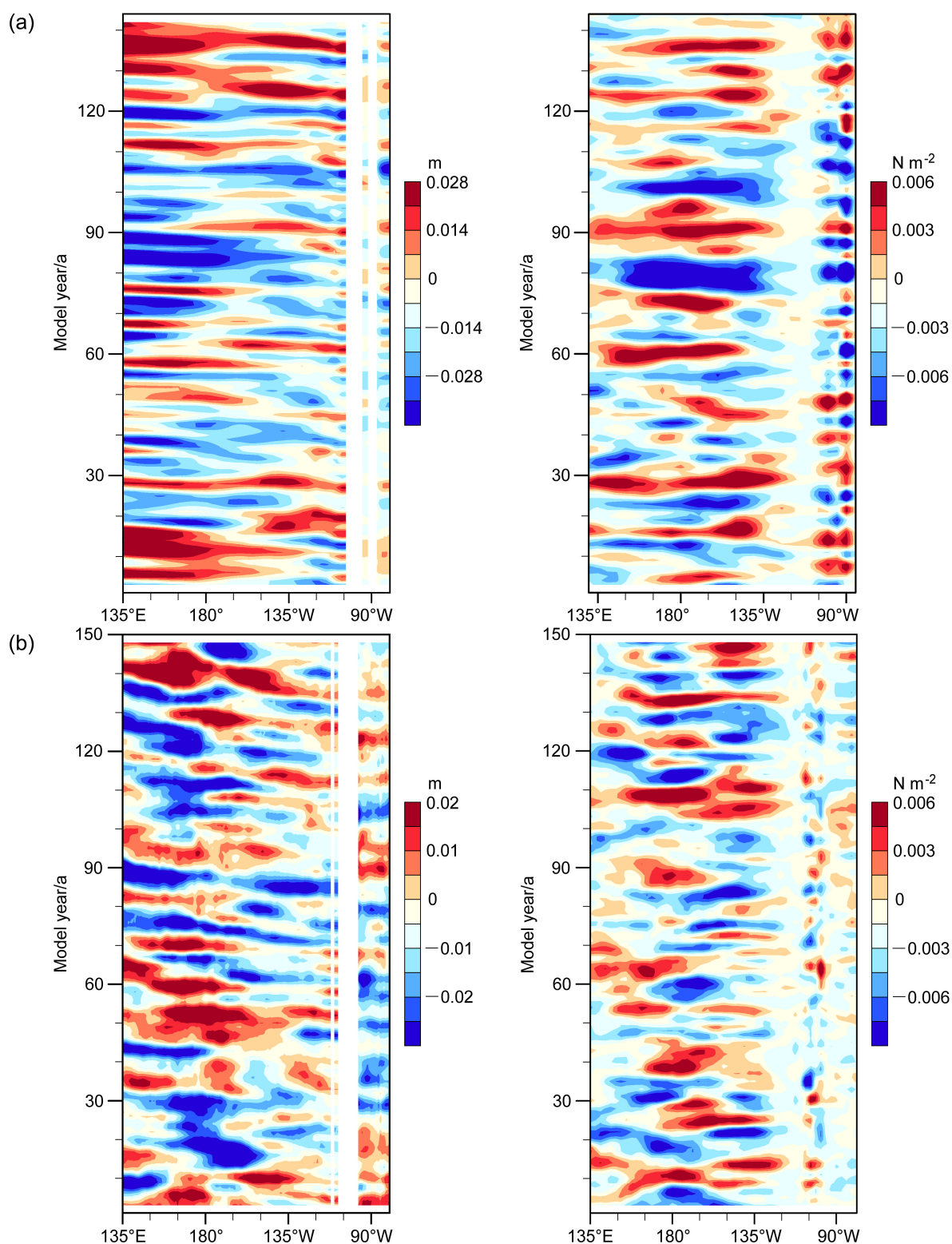


图 4 (a) FGOALS_g1、(b) FGOALS_g1.1、(c) FGOALS_g2.0、(d) FGOALS_s2.0 对照试验太平洋 18°N、24°N、16°N 和 15°N 海表高度异常 (左)、对应纬度纬向风应力 (TAUX, 右) 的纬向 (横轴)—时间 (纵轴; 单位: a) 传播特征

Fig. 4 Latitude (abscissa axis)—time (ordinate axis; units: a) sections of zonal sea surface height anomalies (left) and the wind stress (right): (a) FGOALS_g1; (b) FGOALS_g1.1; (c) FGOALS_g2.0; (d) FGOALS_s2.0

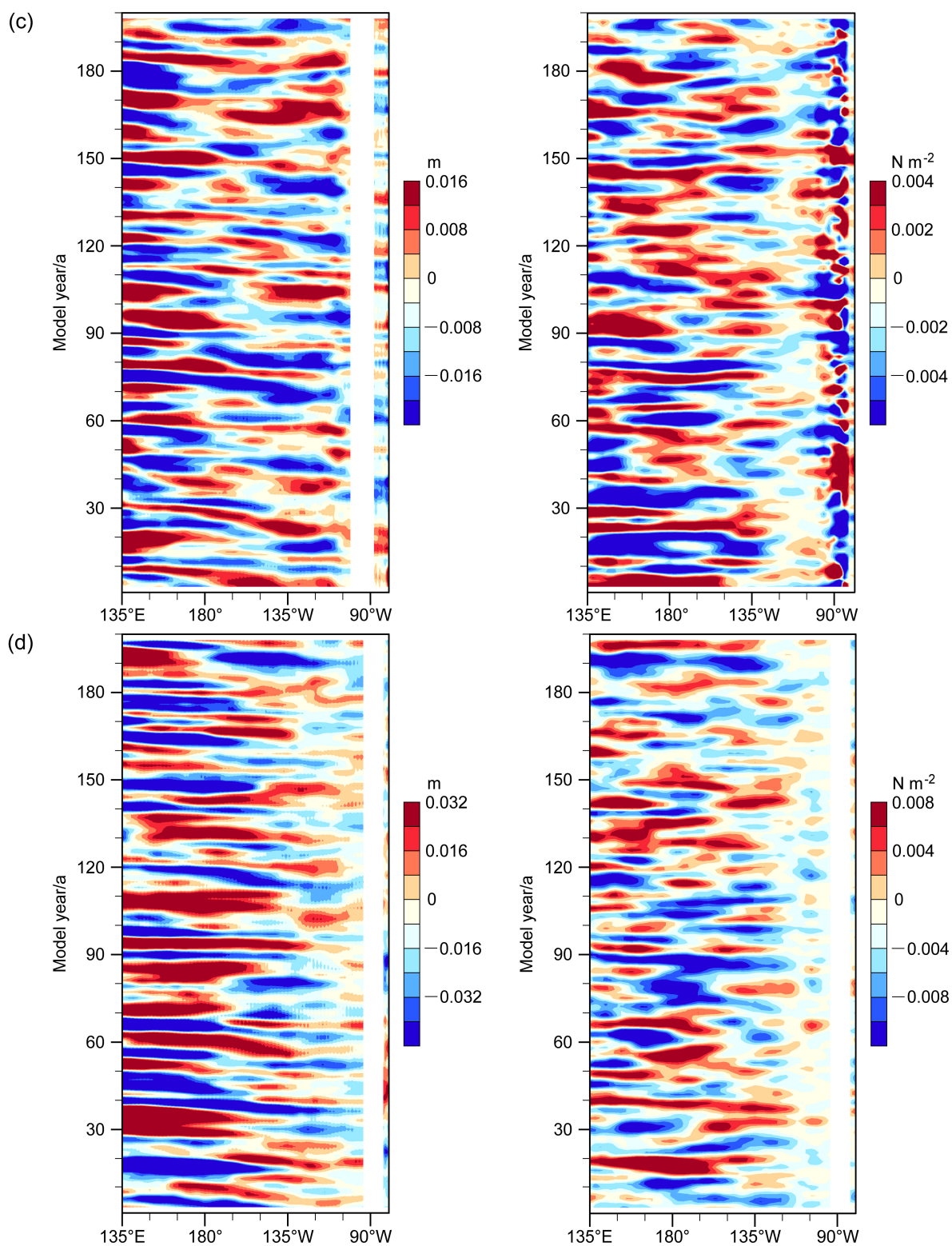


图4 (续)

Fig. 4 (Continued)

常沿经度随时间变化显现出一致的特征：赤道中东太平洋 SSH 正（负）异常有明显东传的特征，对应赤道纬向风应力西风（东风）异常；热带外东太平

洋纬向风应力正（负）异常，其对应 SSH 正（负）异常且明显西传。但不同的是，FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0 和 FGOALS_s2.0 模

拟的 SSH 西传特征最为明显的纬度分别位于 18°N 、 24°N 、 16°N 和 15°N 。模式 Rossby 波从东向西传播的时间因其所在纬度不同而不同, 分别需要 8.5 a、10 a、7 a 和 6 a。

4 影响 PDO/IPO 周期的可能因素

因为模式中 PDO/IPO 模态海水冷暖分布各具特点, 风应力辐合辐散、气旋反气旋式风场等特征具体出现的经纬度各不相同。在 4 个版本中, s2.0 马蹄型冷舌区所在的位置最靠近赤道, 大约在 $15^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 附近; g1.1 冷舌最为偏北, 在 $28^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 。与中高纬度马蹄形冷水区东部对应的逆时针风场, 冷舌的位置越远离赤道, 其气旋式风场出现的位置也偏北。模式表面风应力旋度对 PDO/IPO 的

响应(图 5)说明, 在暖中心北侧赤道外 8°N 以北, 有异常的气旋性大气环流。FGOALS_g1.1 模式气旋式风应力旋度位置最北 (20°N 以北), 由北向南依次为 FGOALS_g1.1、FGOALS_g1、FGOALS_g2.0 和 FGOALS_s2.0。比较 g2.0 和 s2.0 版本发现, 风应力旋度对 PDO/IPO 的响应在整个太平洋海盆的分布型差别明显, 而版本 g2.0 和 s2.0 的主要区别在于所选择的大气模式不同; 而版本 g1 和 g1.1 风应力旋度对 PDO/IPO 的响应在整个太平洋海盆的分布较为一致, 如前所述, 版本 g1 和 g1.1 的主要区别在于海洋模式 LICOM 版本不同, 大气模式都选用 GMAIL1.0。因而, 风应力旋度在各版本之间呈现出的差别很可能来自所采用的大气模式不同。

如前所述, FGOALS 四个版本 SSH 在热带外

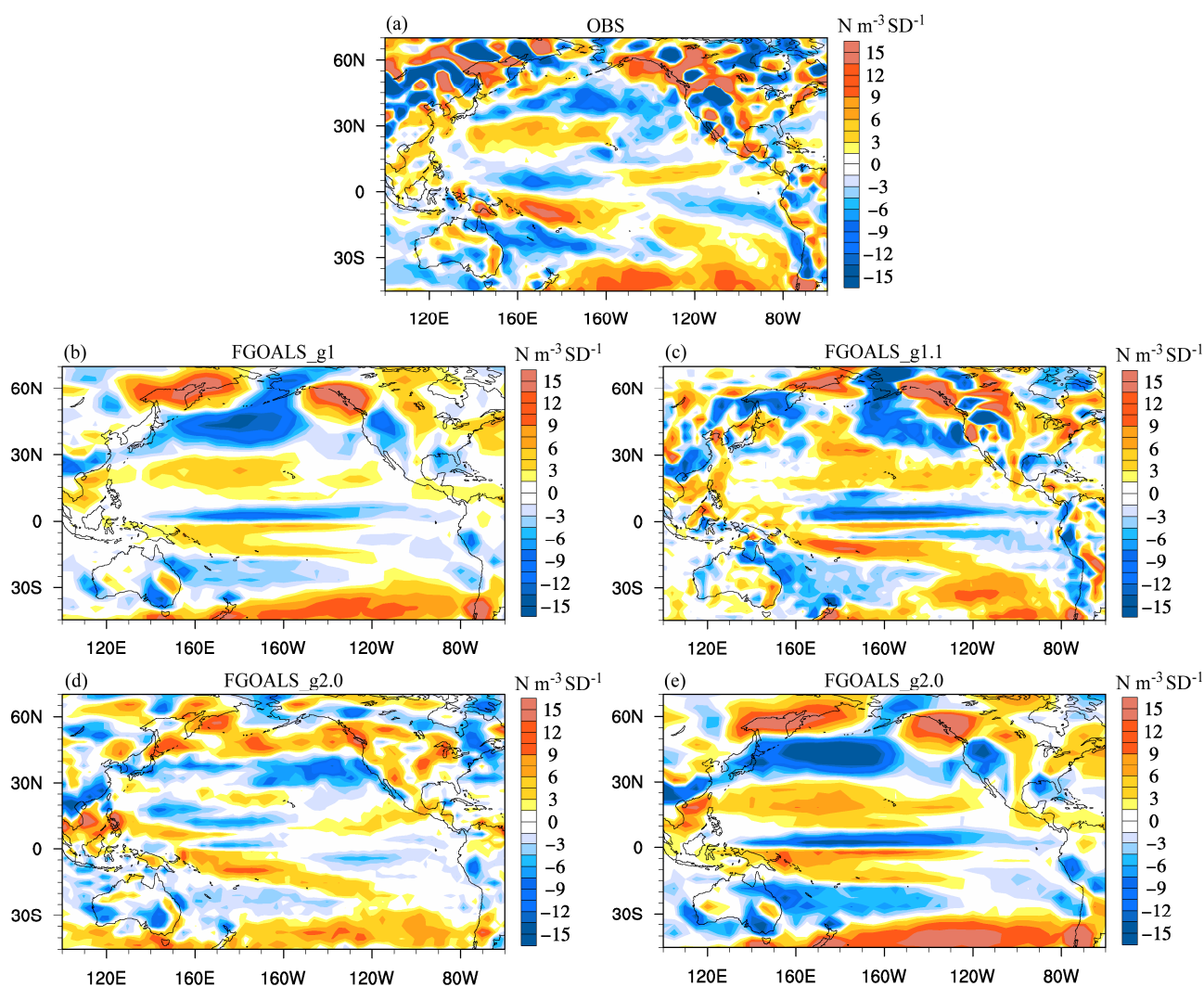


图5 太平洋风应力旋度异常对 PDO/IPO 指数的响应, 单位: N m^{-3} 。(a-e) 依次为观测、FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0、FGOALS_s2.0。
Fig. 5 Linear regression coefficients between the time series of the first EOF mode of Pacific SST anomalies and the wind stress curl anomalies (units: N m^{-3}): (a) Observation; (b) FGOALS_g1; (c) FGOALS_g1.1; (d) FGOALS_g2.0; (e) FGOALS_s2.0

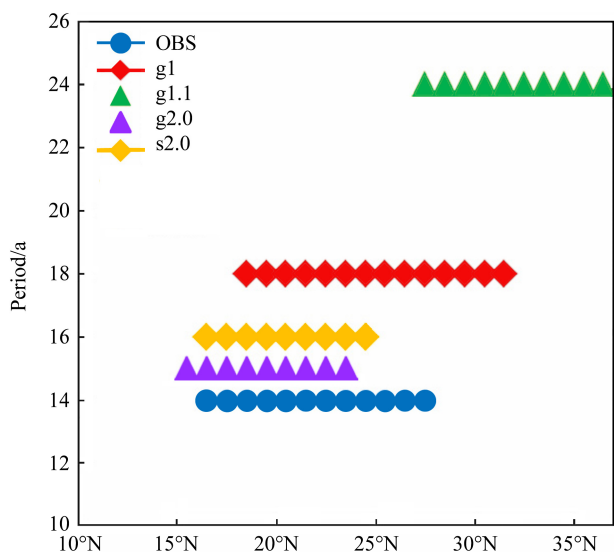


图6 PDO/IPO 年代际振荡周期与 SST 异常经向宽度值随纬度变化(横轴为纬度;纵轴为 PDO/IPO 年代际振荡周期,单位: a)

Fig. 6 The PDO/IPO inter-decadal oscillation period and the variation of SST anomaly meridional widths with latitudes (abscissa axis denotes the latitude; ordinate axis denotes the time, units: a)

西传特征最为明显的纬度分别位于 18°N、24°N、16°N 和 15°N, 均呈现 Rossby 波西传的特征。模式 Rossby 波从东向西传播的时间因其所在纬度不同而分别需要 8.5、10、7 和 6 a, 发现 SSH 西传的纬度越靠北, SSH 正负异常西传所需的时间越长。s2.0 模式 SSH 西传的纬度最南, SSH 正负异常传播所需时间也最短, 约需要 6~7 a; g1.1 模式 SSH 西传最靠北, 西传时间需要近 10 a, 在模式中所需时间最长。

比较各个模式发现, 赤道东太平洋 SST 正异常和西风异常, 使得赤道外暖中心西侧有异常的气旋性大气环流, 年代际时间尺度上的气旋性环流约出现在 10°N~25°N。模式中 SST 对 PDO/IPO 响应变化最强的信号出现的纬度各不相同, 赤道外中太平洋 SST 最大梯度越靠北, 宽度越宽, 对应模式模拟的周期越长。

为了更清楚揭示周期与经向宽度的关系, PDO/IPO 的周期与温度梯度变化最明显的区域所在纬度的散点分布如图 6。各个模式以及观测的温度梯度的绝对值不同, 将观测和每个模式的温度梯度除以各自梯度的最大值进行归一化。温度梯度的最大值出现在热带外, 观测距离赤道最近, FGOALS_s2.0、FGOALS_g2.0、FGOALS_g1 和

FGOALS_g1.1 温度梯度最大出现的纬度依次北移, 其经向宽度依次变宽, 观测与模式太平洋年代际振荡的周期也依次变长, FGOALS_g2.0 和 FGOALS_s2.0 与观测更为接近。

5 结论与讨论

本文结合观测资料, 通过对北太平洋年代际变率海气相互作用的分析, 比较 FGOALS 模式 g1、g1.1、g2.0 和 s2.0 的 4 个版本对年代际变率的模拟能力, 分析模式内在的太平洋年代际变率发展和演变的物理机制, 主要结论如下:

g1、g1.1、g2.0 和 s2.0 四个版本均模拟出典型的 PDO/IPO 暖位相时海洋和大气风场的年代际时空变化特征, 与观测结果基本符合。较 g1 和 g1.1 版本, g2.0 和 s2.0 版本能更好的模拟出西太平洋马蹄形冷区与东太平洋类似于 ENSO 分布暖水区的太平洋年代际变率模态。大气风场 g2.0 版本与观测最为接近, s2.0 版本的经向风应力场过强, g2.0 和 s2.0 版本对气旋式环流所在位置和范围的模拟较 g1 和 g1.1 版本误差明显减小。

FGOALS_g1、FGOALS_g1.1、FGOALS_g2.0 和 FGOALS_s2.0 模拟的海温异常的年代际振荡无论是在热带至热带外都非常显著。太平洋年代际变化的正反馈过程可以用 Bjerknes (1969) 提出的海气相互作用正反馈机制来解释。模式对风应力异常的模拟能力会影响到热带海洋温跃层深度的变化, 从而进一步影响太平洋年代际变率正反馈过程的强度。

FGOALS 模式极向热输送变率显示出明显的年代际振荡特征, 海洋经向热输会抑制赤道 SST 的变暖(变冷), 但模式中经向热输送与 SST 异常变化在年代际尺度可视为同位相, 不足以使得 PDO/IPO 位相反转。

FGOALS 模式中, 热带 SST 暖距平信号通过大气桥影响热带外大气环流, 在海气作用下, 热带与热带外海洋次表层分别以 Kelvin 波和 Rossby 波的类型传播, 且热带 Rossby 波动传播的位置, 与 ENSO 有显著不同, 使得冷暖位相反转, 产生负反馈作用, 实现热带中东太平洋 SST 冷暖交替的年代际时间尺度循环。

进一步分析还发现, FGOALS 模式模拟的年代际变率周期主要是由海洋动力过程决定。模式对太平洋 SST 异常年代际变率信号最明显的范围越宽,

由此产生经向热输送的位置也越靠北,使得热输送经向尺度越大,对应的风应力旋度出现在更加远离赤道的位置,使得更多热量从热带向两极输送。由此激发的 Rossby 波更加偏北,纬度越高, Rossby 波西传的时间越长,模式中 PDO/IPO 周期越长。热带外风应力旋度对 PDO/IPO 的响应的差别很可能来自大气模式的不同。

本文的研究主要基于 FGOALS 模式 g1、g1.1、g2.0 和 s2.0 的 4 个版本气候模式模拟结果分析太平洋年代际气候变率的物理机制,比较各个版本的差异,气候模式本身存在不确定性,为了减小模拟结果的不确定性,在下一步研究工作中,必须利用耦合模式比较计划 CMIP5 的模拟结果,进行多模式对比较评估工作。同时,影响太平洋年代际变率周期和振幅的原因还需进一步探讨。

致谢 感谢 LASG 气候模式团队提供本文所需要的数据。

参考文献 (References)

- Barnett T P, Pierce D W, Latif M, et al. 1999. Interdecadal interactions between the tropics and midlatitudes in the Pacific basin [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 615–618, doi: 10.1029/1999GL900042.
- Bao Q, Lin P F, Zhou T J, et al. 2013. The Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System model, spectral version 2: FGOALS-s2 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30: 561–576, doi:10.1007/s00376-012-2113-9.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97: 163–172.
- Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. 2004. Scientific Description of the Sea Ice Component in the Community Climate System Model: Version Three [M]. Colorado: National Center for Atmospheric Research, Boulder, 70pp.
- Brohan P, Kennedy J J, Haris I, et al. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Capotondi A, Alexander M A. 2001. Rossby waves in the tropical North Pacific and their role in decadal thermocline variability [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 31: 3496–3515, doi: 10.1175/1520-0485(2002)0312.0.CO2.
- Craig A P, Jacob R L, Kauffman B, et al. 2005. CPL6: The new extensible, high performance parallel coupler for the community climate system model [J]. *Int. J. High Perform. Comput. Appl.*, 19: 309–327, doi:10.1177/1094342005056117.
- Folland C K, Renwick J A, Salinger M J, et al. 2002. Relative influences of the interdecadal Pacific oscillation and ENSO on the South Pacific convergence zone [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (13), 1643, doi: 10.1029/2001GL014201.
- Frankignoul C, Hasselmann K. 1977. Stochastic climate models. Part II. Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability [J]. *Tellus*, 29: 289–305, doi: 10.1111/j.2153-3490.1977.tb00740.x.
- Gill A E. 1982. *Atmosphere–Ocean Dynamics* [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Academic Press, 662pp.
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results [J]. *Clim. Dyn.*, 10: 135–162.
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models. Part I: Theory [J]. *Tellus*, 28: 473–485.
- Jin F, Neelin J D, Ghil M. 1994. El Niño on the Devil's staircase: Annual subharmonic steps to chaos [J]. *Science*, 264, 70–72.
- Jin F F. 1997. A theory of interdecadal climate variability of the North Pacific ocean–atmosphere system [J]. *J. Climate*, 10: 1821–1835.
- Kleeman R, McCreary J P, Klinger B A. 1999. A mechanism for generating ENSO decadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 1743–1746, doi:10.1029/1999GL900352.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. *Science*, 266: 634–637, doi:10.1126/science.266.5185.634.
- Latif M, Barnett T P. 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability [J]. *J. Climate*, 9: 2407–2423, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2407:DCVOTN>2.0.CO;2.
- Li L J, Wang B. 2010. Influences of two convective schemes on the radiative energy budget in GAMIL1.0 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 24 (3): 318–327.
- Li L J, Wang B, Wang Y Q, et al. 2007. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24: 323–335, doi:10.1007/s00376-007-0323-3.
- Li L J, Lin P F, Yu Y Q, et al. 2013. The Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 543–560, doi:10.1007/s00376-012-2140-6.
- Lin P F, Yu Y Q, Liu H L. 2013a. Long-term stability and oceanic mean state simulated by the coupled model FGOALS-s2 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (1): 175–192, doi:10.1007/s00376-012-2042-7.
- Lin P F, Yu Y Q, Liu H L. 2013b. Oceanic climatology in the coupled model FGOALS-g2: Improvements and biases [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 819–840, doi:10.1007/s00376-012-2137-1.
- Lin P F, Liu H L, Yu Y Q, et al. 2013c. Long-term behaviors of two versions of FGOALS2 in preindustrial control simulations with implications for 20th century simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 577–592, doi:10.1007/s00376-013-2186-0.
- Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21: 675–690.
- 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. 2004. LASG / IAP 气候海洋模式 LICOM 用户手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1–128. Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. 2004. Manual for LASG/IAP Climate System Ocean Model (LICOM1.0) (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–128.
- Liu H L, Lin P F, Yu Y Q, et al. 2012. The baseline evaluation of LASG/IAP climate system ocean model (LICOM) version 2 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 26: 318–329.
- 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: 1069–1079, doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069: APICOW>2.0.CO;2.
- McPhaden M J, Zhang D X. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean [J]. *Nature*, 415 (6872): 603–608, doi: doi:10.1038/415603a.
- Meehl G A, Hu A. 2006. Megadroughts in the Indian monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies [J]. *J. Clim.*, 19: 1605–1623, doi:10.1175/JCLI3675.1.
- Meehl G A, Hu A, Santer B D. 2009. The mid-1970s climate shift in the Pacific and the relative roles of forced versus inherent decadal variability [J]. *J. Climate*, 22: 780–792, doi:10.1175/2008JCLI2552.1.
- Miller A J, Schneider N. 2000. Interdecadal climate regime dynamics in the North Pacific Ocean: Theories, observations and ecosystem impacts [J]. *Progress Oceanogr.*, 47: 355–379, doi: 10.1016/S0079-6611(00)00044-6.
- Newman M, Compo G P, Alexander M A. 2003. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation [J]. *J. Climate*, 16: 3853–3857, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<3853:EVOTPD>2.0.CO;2.
- Nonaka M, Xie S -P, McCreary J P. 2002. Decadal variations in the subtropical cells and equatorial Pacific SST [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 1116, doi:10.1029/2001GL013717.
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the community land model (CLM) [R]. NCAR/TN-461+STR, 173pp.
- Pierce D W, Barnett T P, Latif M. 2000. Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal timescales [J]. *J. Climate*, 13: 1173–1194, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1173: CBT POT> 2.0. CO; 2.
- Power S, Colman R. 2006. Multi-year predictability in a coupled general circulation model [J]. *Climate Dyn.*, 26: 247–272, doi: 10.1007/s00382-005-0055-y.
- Power S, Casey T, Folland C, et al. 1999. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia [J]. *Climate. Dyn.*, 15: 319–324, doi: 10.1007/s003820050284.
- Simmons A J, Gibson J K. 2000. The ERA-40 Project Plan[R]. ERA-40 Project Report Series, 63.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements NOAA's historical merged land-ocean temperature analysis (1880–2006) [J]. *Journal of Climate*, 21, 2283–2296, doi: 10.1175/2007JCLI2100.1.
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods [J]. *Sci. China (Mathemat.)*, 47: 4–21, doi:10.1360/04za0001.
- Wang B, Liu M M, Yu Y Q, et al. 2013. Preliminary evaluations of FGOALS-g2 for decadal predictions [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 674–683, 10.1007/s00376-012-2084-x.
- Wang X C, Jin F F, Wang Y Q. 2003. A tropical ocean recharge mechanism for climate variability. Part II: A unified theory for decadal and ENSO modes [J]. *J. Climate*, 16: 3599–3616, doi: 10.1175/1520-0442(2003) 016<3599:ATORMF>2.0.CO;2.
- Yu Y Q, Zhang X H, Guo Y F. 2004. Global couple ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (3): 444–445, doi: 10.1007/BF02915571.
- Yu Y Q, Yu R C, Zhang X H, et al. 2002. A flexible global coupled ocean-atmosphere general circulation model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19: 169–190.
- Yu Y Q, Hai Z, Wang B, et al. 2008. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (4): 641–654, doi:10.1007/s00376-008-0641-0.
- Yu Y Q, Zheng W P, Wang B, et al. 2011. Versions g1.0 and g1.1 of the LASG/IAP Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (1): 99–117, doi:10.1007/s00376-010-9112-5.
- Yu Y Q, He J, Zheng W P, et al. 2013. Annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific as simulated by three versions of FGOALS [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3), 621–637, doi:10.1007/s00376-013-2184-2.
- Zhang R H, Levitus S. 1997. Structure and cycle of decadal variability of upper-ocean temperature in the North Pacific [J]. *J. Climate*, 10: 710–727, 10.1175/1520-0442(1997)010<0710:SACODV>2.0.CO;2.
- 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 2003. 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式 [J]. *大气科学*, 27 (4): 607–617. Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Liu Hailong. 2003. The development and application of the oceanic general circulation models. Part I. The global oceanic general circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 607–617, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.12.
- Zhang Y L, Yu Y Q. 2011. Analysis of decadal climate variability in the tropical Pacific by coupled GCM [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4 (4): 204–208.
- Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al. 2008. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (4): 655–672.
- Zhou T J, Chen X L, Dong L, et al. 2014. Chinese contribution to CMIP5: An overview of five Chinese models' performances [J]. *J. Meteor. Res.*, 28 (4): 481–509, doi:10.1007/s13351-014-4001-y.