

冬季北太平洋海表面热通量异常和海气相互作用的耦合模式模拟^{* 1}

李 博^{1,2} 周天军¹ 林鹏飞¹ 包 庆¹
LI Bo^{1,2} ZHOU Tianjun¹ LIN Pengfei¹ BAO Qing¹

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学与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

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

2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2010-01-08 收稿,2010-04-02 改回.

Li Bo, Zhou Tianjun, Lin Pengfei, Bao Qing. 2011. The wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air-sea interaction as simulated by the LASG/IAP ocean-atmosphere coupled model FGOALS_s1.0. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(1):52-63

Abstract The anomalous latent and sensible heat flux over the North Pacific in boreal winter and their impact on sea surface temperature (hereafter SST) anomalies are analyzed by using a long-term integration of the ocean-atmosphere coupled model FGOALS_s of LASG/IAP. The relative contributions of heat flux components and oceanic dynamical terms to the SST variance are compared. The results show that the FGOALS_s can reproduce the dominant characteristics of the mean state of surface heat fluxes and the interannual variance of turbulent heat flux. In the extra-tropical North Pacific Ocean, significant correlation exists between anomalous latent and sensible heat flux and SST tendency anomalies in boreal winter. The turbulent heat flux is the most important factor that determine the SST variance, whereas the downward short wave flux is dominant only to the southeast of Hawaii archipelago. The model has a reasonable performance in capturing the leading mode of winter time SST tendency in the extra-tropical North Pacific Ocean and the corresponding pattern of sea level pressure anomalies. Analysis shows that the anomalous large-scale atmospheric circulation affects the turbulent heat flux and thus plays a significant role in changing the SST anomalies. The diagnosis based on model results supports that in the boreal winter extra-tropical North Pacific Ocean, the atmospheric forcing is dominant in the local air-sea interaction processes, and the new edition of the coupled model FGOALS_s is applicable to investigate the air-sea interaction over the North Pacific in wintertime.

Key words turbulent heat flux, North Pacific Ocean, SST variance, air-sea interaction

摘 要 基于中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG/IAP)开发的耦合气候系统模式 FGOALS_s1.0 控制试验的积分结果,分析了冬季北太平洋海表面湍流热通量(潜热和感热通量之和)异常及其对海表面温度(SST)异常的影响,并通过分析海温倾向方程,比较了各因子对 SST 变率的相对贡献。结果表明,模式能基本再现冬季北太平洋海表面热通量的平均态和湍流热通量年际变率的主要特征。在冬季热带外北太平洋上,海洋向大气释放的湍流热通量同 SST 倾向存在显著的相关。在冬季热带外大部分北太平洋上,湍流热通量异常是决定 SST 变率的最主要因子,入射短波辐射通量异常只在夏威夷群岛东南侧的一个小区域起主要作用。模式能够较为准确模拟出 SST 倾向的主要模态和相应的海平面气压场特征。分析表明,模式模拟的北太平洋冬季大尺度的大气环流异常通过影响湍流热通量从而决定 SST 的变率。文中得出的结果进一步证明“在冬季的热带外北太平洋上,海-气相互作用过程中占主导地位的是大气对海洋的强迫”

* 资助课题:国家自然科学基金(40890054)、国家科技支撑计划项目(2007BAC29B03)、国家高技术研究发展计划(2010AA012303)。

作者简介:李博,主要从事亚洲季风的数值模拟研究。E-mail: libo@mail.iap.ac.cn

这个结论是有意义的,LASG 新版本耦合模式 FGOALS_s 亦适用于开展北太平洋海-气相互作用研究。

关键词 湍流热通量, 北太平洋, SST 变率, 海-气相互作用

中图法分类号 P434

1 引言

海-陆-气-冰气候系统的各个组成部分之间存在着相互作用和各种反馈。在不同的时间尺度和不同的地区,海-气相互作用的特征亦不尽相同。许多大气环流模式(AGCM)试验中一个通用的做法是用给定的表层海温(SST)进行强迫。在夏季的热带太平洋上(除季风区外),海温的变化主要受海洋内部的动力过程影响(Jin, et al, 1999; Lau, et al, 1996),海洋对大气的强迫是主要的,大气的负反馈过程相对较弱,故利用给定 SST 强迫大气模式的试验一般可以较好地模拟出大气和 SST 变化的关系。而在冬季热带外大洋上,大气对海洋的强迫在海-气相互作用中占主导地位,由于 SST 强迫下的 AGCM 的试验并未能包含这种反馈过程,因此这种试验在这些地区未必适用(Lau, et al, 2000; Wang, et al, 2003)。Wallace 等(1987)曾经指出,观测中热带外地区大气环流异常与 SST 异常之间的超前相关大于滞后相关,大气对热带外海洋的强迫可能占主导地位。

海表的湍流热通量的两个分量,即感热通量和潜热通量,包含了海-气相互作用的信息,这两个分量同 SST 以及 SST 倾向之间的相关是海-气相互作用的一个最直接的反映(张学洪等,1998; Wu, et al, 2007)。在热带海洋上,海洋动力过程对 SST 变化起主导作用,潜热通量异常同 SST 变化存在显著联系(Weare, et al, 1984; 周天军等,2002)。Cayan (1992a)基于 COADS 资料的分析表明,冬季热带外北太平洋向大气释放的湍流热通量与 SST 倾向的距平相关系数有很强的负相关,而与 SST 本身的距平则没有显著的正相关。因此湍流热通量异常可能是热带外北太平洋 SST 变化的重要强迫因子。张学洪等(1998)利用一个低分辨率的、采用通量订正技术的耦合模式 GOALS(Global Ocean-Atmosphere-Land System Model)的资料验证了这一结论(张学洪等,1998)。周天军等(2006a, 2006b)利用一个耦合模式详细讨论了北大西洋地区冬季的海-

气相互作用特征,证实了大气对海洋的强迫作用。

SST 变化不仅受湍流热通量影响,而且受辐射热通量、海洋的水平平流、上翻和混合等动力过程影响。为了准确认识不同空间和时间尺度上海-气相互作用的本质和主要作用项,有必要定量估计影响 SST 变化的各种因子的相对贡献。对于评估海表热通量各项的作用而言,现有的海洋资料基本可以满足这方面的需要,但要进一步分析海洋内部动力过程的作用,当前的观测资料就明显不足。在此情况下,海-气耦合模式可以作为一个有效的研究工具。张学洪等(1998)利用“月通量距平耦合”的海-气耦合模式 GOALS 分析了冬季北太平洋的海-气相互作用。由于 GOALS 模式分辨率较低($5^{\circ} \times 4^{\circ}$)且采用了通量订正技术,其结果在直接耦合的非通量订正模式中的适应性有待检验。

本文的目的,是希望通过对 LASG/IAP(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)非通量订正的新版本耦合模式 FGOALS_s1.0 控制积分的分析,回答以下问题:(1)SST 倾向方程中各个因子对冬季热带外北太平洋 SST 变率的贡献分别如何?(2)在冬季的热带外北太平洋上,大气对海洋的强迫是怎样实现的?关于上述问题的讨论,既能够为模式后续版本的改进工作提供依据,又能够丰富对海-气相互作用过程本质的理解。

2 资料与分析方法

2.1 资料介绍

LASG/IAP 通过对谱大气模式进行完善,提高模式的分辨率,改进模式内部物理过程,并提高模式的标准化、模块化和并行化,从而形成了分辨率为 R42L26 的新版本大气环流谱模式 SAMIL(王在志等,2007)。本文所用的耦合模式 FGOALS_s1.0 (Flexible Global Atmosphere Land System Model)是利用 NCAR 的 CCSM 气候系统模式的第 5 代耦合器 CPL5(Kauffman, et al, 2002),实现了大气模式 SAMIL 与海洋、陆面和海冰模式的耦合,形成了

海-陆-气-冰直接耦合的、“非通量订正”的气候系统模式(周天军等, 2005a, 2005b; 包庆等, 2006; 王志等, 2007)。4个子系统模式通过耦合器进行数据交换。

FGOALS_s1.0 的海洋分量模式采用 LICOM (LASG/IAP Climate System Ocean Model)。它是对 LASG/IAP 第 3 代全球大洋环流模式 L30T63 (Jin, et al, 1999) 的水平分辨率进行提高而形成的新版本(Liu, et al, 2004), 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向是 30 层, 其中上部 300 m 分 13 层。FGOALS_s1.0 的陆面和海冰模式分别采用 NCAR 研制的通用陆面过程模式 CLM (Vertenstein, et al, 2002) 和海冰模式 CSIM4 (Briegleb, et al, 2002)。

FGOALS_s1.0 进行了 200 年的完全耦合积分。耦合积分的初始场、大气和陆面模式分别采取陆-气耦合积分的各自第 50 年 1 月 1 日的瞬时场, 海洋模式取 500 年起转积分的第 500 年 12 月 31 日的瞬时场, 海冰模式的初始场则任意给定。分析表明, FGOALS_s1.0 (以下简称为 FGOALS_s) 成功地控制了气候漂移趋势, 能够较为真实地模拟大气、海洋和陆面的气候平均态(周天军等, 2005a, 2005b); 围绕着该模式对东亚季风的模拟(陈昊明等, 2009)、对亚澳季风和 ENSO 关系的模拟(吴波等, 2009), 此前已进行了较为系统的分析。本文选取耦合模式第 151—199 模式年的月平均输出量进行分析。

为了与模式结果进行对照, 本文还应用了 GIS-ST 海表面温度资料(Rayner, et al, 2003) 和 OAF-lux (Objective Analyzed Air-Sea Fluxes) 的表面热通量资料(Yu, et al, 2004), 所用观测和再分析资料的时间长度为 1983—2003 年。

2.2 分析方法介绍

表层海温 (T_{SS}) 的预报方程可表示为

$$\frac{\partial T_{SS}}{\partial t} = \frac{F_A}{\Delta z \rho_0 c_p} - \mathbf{v} \cdot \nabla T_{SS} - \tau \frac{\partial T_{SS}}{\partial z} - \frac{\kappa}{\Delta z} T_{SSz} \Big|_{\Delta z} + A_H \Delta T + H_{convection} \quad (1)$$

式中, Δz 为温跃层厚度, ρ_0 为表层海水密度, c_p 为

海水的定容比热, v 和 w 分别为洋流的水平和垂直分量, κ 是垂直湍流扩散系数, A_H 是水平混合系数。式(1)右侧各项依次为: 净的海表热通量 (F_A , 以向下为正)、水平平流、垂直平流、垂直混合、水平混合及对流。其中净的海表热通量 (F_A) 可表示为

$$F_A = S + L + F_1 + F_s \quad (2)$$

式(2)中右端各项分别代表入射短波辐射通量、净长波辐射、潜热和感热通量(各项方向均以向下为正, 即海洋得到热通量为正)。在热带外海洋上, 水平混合和垂直对流对 SST 变化的贡献相对较小(张学洪等, 1998), 因此下面的分析只考虑感热、潜热、短波辐射、长波辐射、水平平流和垂直平流的作用, 前 4 项代表海-气的热量交换, 后 2 项代表海洋内部的动力过程产生的加热或冷却效应。

为了定量评估上述 6 项对 SST 异常的贡献, 采用 Ronca 等(1997)推荐的归一化协方差分析方法。单一因子与 SST 异常的协方差可表示为 $\langle Q'_i, T'_{SS} \rangle$, 将单一因子的异常 Q'_i 与表层海温异常的协方差做归一化处理:

$$H_i = \frac{\langle Q'_i, T'_{SS} \rangle}{\sqrt{\sum_{i=1}^6 \langle \langle Q'_i, T'_{SS} \rangle \rangle^2}} \quad (3)$$

通过比较 H_i 就可以得知哪个因子对 SST 的异常有贡献。需要注意的是, 本文考虑的是相同格点上的协方差。这种分析方法此前在海-气相互作用研究中已经得到较为广泛的应用(张学洪等, 1998; 周天军等, 2002)

3 模式资料诊断的冬季北太平洋表面热通量的平均态和湍流热通量标准差的分布

由 1983—2003 年 OAF-lux 资料计算的冬季平均的海表面热通量(图 1a)可见, 冬季, 除赤道太平洋很小的一个范围之外的整个北太平洋的海表面热通量都是负值, 即由海洋向大气输送热通量, 其绝对值大部分在 40—400 W/m^2 , 在 $50^\circ N$ 以南基本上呈西高东低型分布, 180° 以西、 $20^\circ N$ 以北一个很大范围内可以超过 200 W/m^2 , 中心绝对值超过 400 W/m^2 。而在北太平洋的海盆东部, 热通量的绝对值一般都在 120 W/m^2 以下。

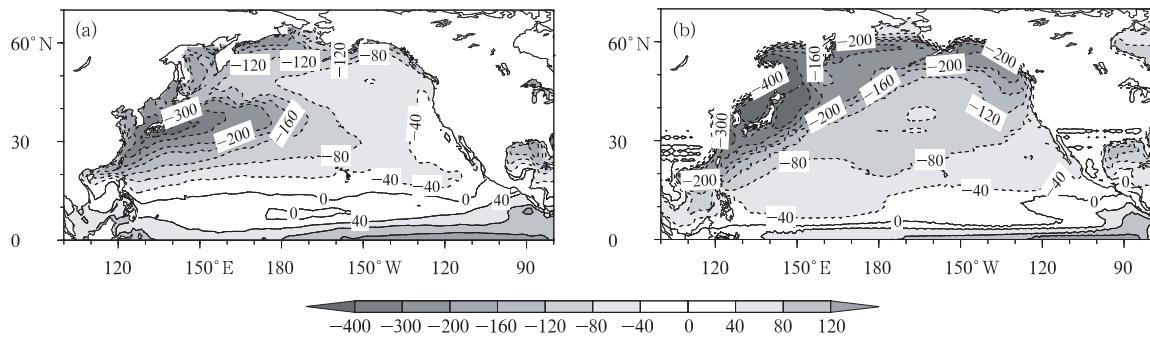


图1 冬季平均的净向下的海表面热通量(单位: W/m^2)
 (a. 1983—2003年 OAFflux 资料的结果, b. 第 151—199 模式年 FGOALS_s 的结果; 方向以进入海洋为正)
 Fig. 1 Winter mean net heat flux downward into the ocean derived respectively from (a) the 1983—2003 OAFflux dataset and (b) the outputs of the 151—199th model years of FGOALS_s
 (Unit: W/m^2 ; the flux entering into the ocean is set to be positive)

总体来说, FGOALS_s 第 151—200 模式年资料诊断的冬季平均海表面热通量的分布(图 1b)与 1983—2003 年 OAFflux 资料计算的结果(图 1a)和 Esbensen 等(1981)基于观测资料的分析结果一致。中纬度北太平洋净热通量西高东低的分布型式得到了一定的再现。与早期的耦合模式 GOALS 的结果类似(张学洪等, 1998), FGOALS_s 模拟的日本海附近海洋向大气输送的潜热通量的绝对值在 $400 W/m^2$ 以上, 远大于 Esbensen 等(1981)的结果。但张学洪等(1998)曾经指出, 基于 COADS 资料发表的其他观测分析中也可以出现同样大的数值。OAFflux 资料在该地区的热通量强度也可以达到 $400 W/m^2$ 。不过, 模式模拟的海洋向大气释放的热通量在阿拉斯加湾附近出现了 $400 W/m^2$ 以上的极大值, 大于 OAFflux 结果。这可能与模式对极地冷空气路径的模拟偏差有关。此外, OAFflux 资料在 $30^{\circ}N, 150^{\circ}E-170^{\circ}E$ 区域海洋向大气输送的热量在 $250 W/m^2$ 左右, 而 FGOALS_s 在该区域为 100

W/m^2 左右; 在加拿大西岸海 OAFflux 中海洋向大气释放的热通量在 $100 W/m^2$ 左右, 而 FGOALS_s 的结果在 $250 W/m^2$ 左右。上述模拟偏差都是模式需要进一步改进之处。

此外, 模拟结果中, 在大部分近赤道地区, 模式正负净热通量的分界线位于 $5^{\circ}N$ 附近, 比 OAFflux 的结果($15^{\circ}N$)要偏南。这可能与 FGOALS_s 模拟的云量分布偏差影响海表的热通量收支, 从而导致热带海温偏冷有关(周天军等, 2005a)。另外, GOALS 模式模拟的潜热通量在 $40^{\circ}N$ 附近、 $160^{\circ}E-160^{\circ}W$ 低于 $60 W/m^2$ (张学洪等, 1998), 与观测之间存在较大的误差。在 FGOALS_s 的模拟结果中(图 2b), 该区域海洋向大气输送的潜热通量在 $100 W/m^2$ 以上, 与 OAFflux 的结果(图 2a)接近, 这种改善可能部分来自大气和海洋模式分辨率的提高(大气模式分辨率由 R15 提高到 R42, 海洋模式分辨率由 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 提高到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)。

但是在图2中, 我们也注意到, OAFflux资料在

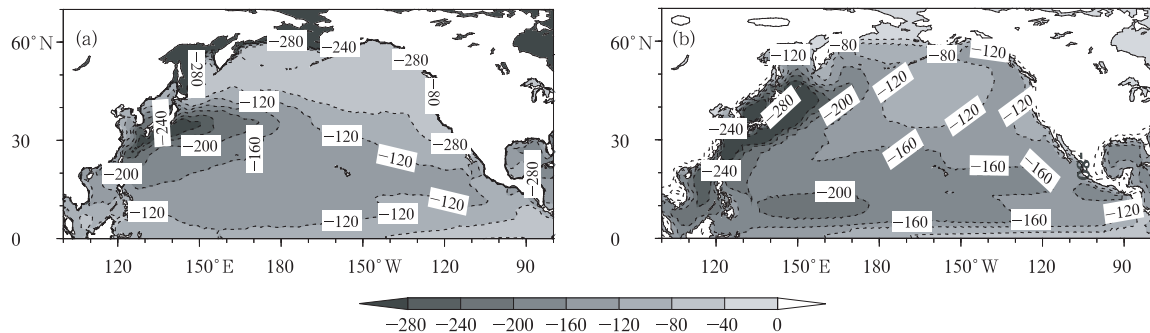


图2 冬季平均的潜热通量(单位: W/m^2)
 (a. 1983—2003年 OAFflux 资料的结果, b. 第 151—199 模式年 FGOALS_s 的结果; 方向以进入海洋为正)
 Fig. 2 As in Fig. 1 but for the latent heat flux

10°N 附近、日界线以西的地区海洋向大气释放的潜热通量在 140 W/m² 左右,而 FGOALS_s 在该地区为 220 W/m² 左右;OAFflux 在库页岛以东海洋向大气释放的潜热通量在 60 W/m² 左右,而 FGOALS_s 在该地区为 180 W/m² 左右;OAFflux 在中国南海地区海洋向大气释放的潜热通量在 140 W/m² 左右,而 FGOALS_s 在该地区其值却为 260 W/m² 左右。上述模拟偏差的来源,可能与模式模拟的大尺度大气环流偏差导致海气湿度差别及表面风速与观测不符有关。

在冬季的北太平洋区域,海表的湍流热通量(潜热和感热通量)异常对海表面的热量收支起着重要作用。感热和潜热通量是海-气之间最为直接的热交换形态,而这两种热通量的异常也是考察海-气相互作用过程的指标之一(张学洪等,1998;Zhou, et al, 2002)。本文将根据 Cayan(1992b)利用 1950—1979 年的 COADS 资料所做的分析和基于 1983—2003 年 OAFflux 资料的分析对 FGOALS_s 的模拟结果进行评估。

从 OAFflux 冬季潜热通量标准差(图 3a)和感

热通量标准差(图 3b)的水平分布可以看出,潜热通量标准差的分布基本呈西高东低的型式,大值区位于 10°—60°N、110°E—180°的亚洲沿岸地区,中心最大值在 50 W/m² 以上。FGOALS_s 模拟的潜热通量标准差的分布(图 3c)与 OAFflux 结果相近,大值区也位于亚洲沿岸,中心最大值在 40 W/m² 以上,略小于 OAFflux 的 50 W/m² 以上的极大值,但较之 GOALS 模拟的 20 W/m² 更接近观测。与 OAFflux 类似,模式模拟的潜热通量标准差的小值区位于北美洲西岸和赤道中东太平洋。模拟的极小值在 10 W/m² 以下,比 Cayan(1992b)给出的 20 W/m² 的极小值要小,但与 OAFflux 的结果相近。在模式的结果中,沿着 20°—30°N 有一条东西向的相对大值带,强度在 15—20 W/m²,与 GOALS 的结果相似。在 OAFflux 的结果中,对应的大值区只局限在日界线附近。而在 Cayan(1992b)的分析中,这个相对高值区局限在 180°以西。观测资料上的不确定性,为进一步讨论模式在该地区的模拟偏差带来了困难。此外,模式模拟的潜热通量标准差在阿拉斯加湾存在一个大值中心,这也与 OAFflux 结果不一致。

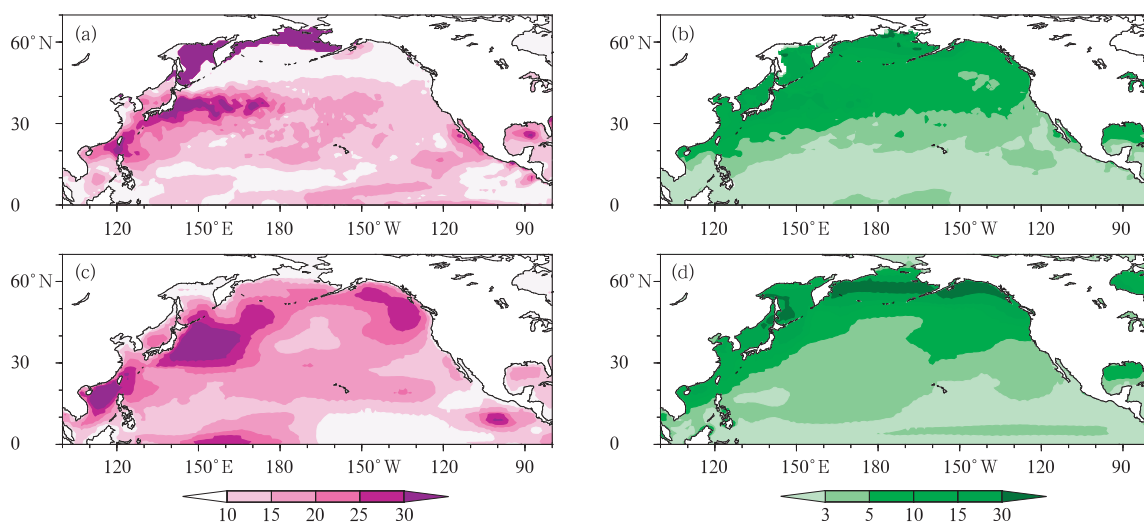


图 3 OAFflux 资料 1983—2003 年冬季平均的海表面潜热通量(a)和感热通量(b)标准差的水平分布(单位:W/m²);(c)和(d)分别同(a)和(b)但为 FGOALS_s 第 151—199 模式年的结果

Fig. 3 Distribution of winter mean standard deviation of latent heat flux (a,c) and sensible heat flux (b,d) at sea surface. Figures a—b are derived from the 1983—2003 OAFflux dataset; figures c—d are derived from the 151—199th model years outputs from the FGOALS_s (Unit: W/m²)

OAFflux 感热通量标准差的水平分布(图 3b)大致呈西南—东北走向,大值区位于西北太平洋沿岸

和鄂霍次克海以及白令海。FGOALS_s 模拟的感热通量标准差的水平分布(图 3d)亦呈现西南—东

北走向,其最大值从西北太平洋沿岸沿大陆边界一直向东延伸到阿拉斯加湾,最大值在 30 W/m^2 以上。模拟结果与 Cayan(1992b)的观测分析及 OAFflux 的结果比较一致。不过在白令海和阿拉斯加湾,模式模拟的感热通量标准差极大值在 30 W/m^2 以上,较之 Cayan 的观测结果和 OAFflux 的结果高出 10 W/m^2 以上,这种误差亦存在于 GOALS 的模拟结果中,这可能和模式模拟的极地冷空气路径的误差有关(张学洪等,1998)。除了提高模式分辨率之外,如何进一步改善极地冷空气路径的模拟效果,是 FGOALS_s 模式未来发展中应该考虑的问题。

4 潜热和感热通量异常对 SST 变化的作用

海表面湍流热通量(潜热通量和感热通量)异常与 SST 的变化是紧密相连的,这种联系随季节和地区变化而不同(Cayan,1992a)。当 SST 本身的异常同海洋向大气释放的潜热通量和感热通量异常呈显著正相关时,表明潜热和感热通量异常受 SST 异常的显著作用(Cayan,1992a;张学洪等,1998),海洋对大气的强迫是主要的(Wu, et al, 2007)。在冬季的热带外海洋上,SST 倾向的异常同海洋向大气释放的潜热通量和感热通量异常之间存在显著的负相关,说明 SST 的变化在很大程度上是由大气的变化决定的(Cayan,1992a)。在冬季的热带外海洋上,基于观测资料的分析显示,湍流热通量对于 SST 的变化占支配地位(Cayan,1992a)。在 10°N 以南的洋面上,入射短波辐射通量和潜热通量的作用同等重要。 $15^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$,潜热通量的作用最为重要。而在 30°N 以北,潜热通量和感热通量的作用同等重要。

从 OAFflux 冬季北太平洋海表面潜热通量和感热通量之和(方向以向下为正)与 SST(GISST)倾向的距平相关系数的分布(图 4a)可见,在 15°N 以外的北太平洋上,湍流热通量之和同 SST 倾向之间是显著的正相关, $20^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ 最大相关系数超过 0.8。这种正相关意味着当海洋向大气释放的湍流热通量减少时,SST 有变暖趋势。与前人的观测(Cayan,1992a)、OAFflux 以及 GOALS 的模拟结果(张学洪等,1998)相比,FGOALS_s 的模拟结果(图 4c)在两个方面是合理的:(1)热带外海洋上的相关性要高于热带海洋,这说明在热带外北太平洋上湍流热通量

对于 SST 的变化更为重要;(2)在东太平洋的北美沿岸,存在一个相关系数的大值区,最大值在 0.8 以上。这是因为,虽然海盆东部的湍流热通量异常要弱于海盆西部(图 2),但由于此处海洋环流的动力作用亦较弱(张学洪等,1998),因此 SST 的异常仍然主要由湍流热通量的变化决定。与 OAFflux 相比,模式结果的不合理之处主要表现在大部分的热带外北太平洋上,模式模拟的湍流热通量与 SST 倾向的相关系数要强于观测,即模式高估了湍流热通量对 SST 变化的作用。

由 OAFflux 冬季北太平洋海表面潜热通量和感热通量之和与 SST 本身的距平相关系数的分布(图 4b)可见,在 15°N 以南的热带太平洋上,湍流热通量和 SST 本身的距平呈显著负相关,最强的负相关在 -0.8 以上,表明在热带太平洋,湍流热通量异常主要是由 SST 异常决定。当 SST 升高时,海洋向大气释放的潜热通量和感热通量相应增加。在热带外北太平洋上,SST 异常和湍流热通量异常的相关性不高,通过显著性检验的区域不多。FGOALS_s 模拟的湍流热通量之和与 SST 距平(图 4d)在热带北太平洋亦呈显著负相关,与 OAFflux 的结果较为一致。图 4d 与图 4b 的主要差别位于中纬度北太平洋。OAFflux 在该地区相关较弱, $40^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ 有一条负相关区。结合图 4a 和图 4b 可知,该地区 SST 异常决定湍流热通量的异常,局地海-气相互作用中海洋的强迫占主导地位。而图 4d 中该地区的相关很弱,图 4c 中该地区的潜热通量异常和 SST 倾向异常之间存在很强的正相关。结合图 4c 和图 4d 可知,模式模拟的该地区 SST 异常由湍流热通量的异常决定,局地海-气相互作用中大气的强迫是主要的,与 OAFflux 的结果不符,这可能和海洋模式模拟的西边界流的拐弯区位置偏北有关。

结合图 4a 和图 4b 可知,在冬季,除 $40^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ 之外的北太平洋大部分地区的 SST 异常主要由湍流热通量决定,局地海-气相互作用中大气对海洋的强迫占主导地位;而赤道北太平洋则以海洋的强迫作用为主,湍流热通量的异常主要由 SST 的变化决定。FGOALS_s 基本上可以模拟出上述特征,但在 $40^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ 的北太平洋,模式未能再现海洋对大气强迫为主的特征。

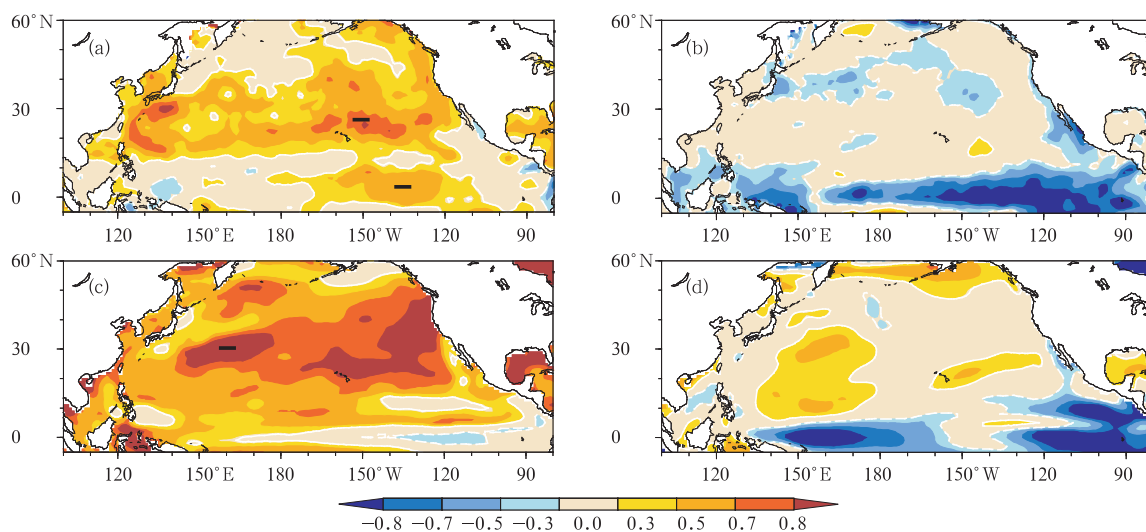


图 4 OAF flux 资料 1983—2003 年冬季平均的海表面潜热通量和感热通量之和同 SST 倾向(a)及 SST 本身(b)的距平相关系数;(c)和(d)分别同(a)和(b)但为 FGOALS_s 第 151—199 模式年的结果(方向以向下为正)
 Fig. 4 Distribution of the correlation coefficients between the sum of latent and sensible heat flux and the SST tendency (a, c) and the SST itself (b, d). Figures a—b are derived from the 1983—2003 OAF flux dataset; figures c—d from the 151—199th model year outputs of the FGOALS_s
 (Unit: W/m^2 ; the flux entering into the ocean is set to be positive)

在观测中,在海盆西部受强西边界流的作用,湍流热通量对 SST 倾向的作用不如海盆东部那么大,因此二者的距平相关系数要小于海盆东部(张学洪等,1998),在 GOALS 模式中,由于海洋模式的分辨率很低(水平分辨率为 $5^\circ \times 4^\circ$)、同时采用了很强的水平混合系数,故无法模拟出实际的西边界流,其模拟的上述距平相关型式表现不出这种东西向的差别。而 FGOALS_s 的海洋分量 LICOM 由于分辨率提高到 $1^\circ \times 1^\circ$ (Liu, et al, 2004),能够相对合理地模拟出冬季的西边界流(图略),因此能够模拟出上述相关型式的东西向差别(图 4c)。

在 GOALS 的模拟中,张学洪等(1998)发现模式模拟的副热带海洋上湍流热通量和 SST 倾向的相关系数偏高,这个问题在 FGOALS_s 的结果中仍然存在。 10° — $20^\circ N$ 模拟的相关系数在 0.5—0.7,而观测(Cayan, 1992a)和 OAF flux 的结果均只有 0.3 左右。这可能是由于虽然由于模式分辨率的提高,FGOALS_s 能模拟出一定的西边界流,但是在 10° — $20^\circ N$ 其强度比观测偏弱,因此会高估湍流热通量在 SST 变化中的作用。这也是目前大多数海-气耦合模式的通病,解决该问题的有效途径是提高海洋模式的分辨率,从而改进模式对西边界流的模拟。

5 SST 变化中各种因子所起的作用

影响 SST 变化的因子,既包括海洋动力过程,也包括大气环流因子。在赤道外北太平洋,即使在同一纬度带,由于起作用的海洋环流和大气环流分布型也存在区别,因此,对 SST 变率起主要作用的因子是不同的。

为进一步分析引起 SST 变化的原因,本文计算了第 151—199 模式年冬季感热、潜热、短波辐射、长波辐射、水平平流和垂直平流对 SST 倾向的归一化协方差(图 5)。在 $30^\circ N$ 以北的东亚大陆沿岸和白令海峡,感热通量对 SST 倾向异常的贡献是最主要的(图 5a)。 10° — $50^\circ N$ 的大部分热带外北太平洋,潜热通量异常对 SST 倾向异常的贡献是主要的,但在夏威夷群岛东南的 10° — $20^\circ N$ 、 140° — $110^\circ W$ 潜热通量异常的贡献相对较小(图 5b),起主要作用的是入射短波辐射通量异常(图 5c)。水平平流异常主要在北太平洋的东南沿岸及菲律宾海附近对 SST 倾向异常起作用(图 5e)。长波辐射通量异常(图 5d)和垂直平流异常(图 5f)对 SST 倾向异常的贡献都较小。FGOALS_s 模拟的感热、潜热、短波辐射和长波辐射对 SST 倾向的影响与 Cayan (1992a)的观测结果基本一致。

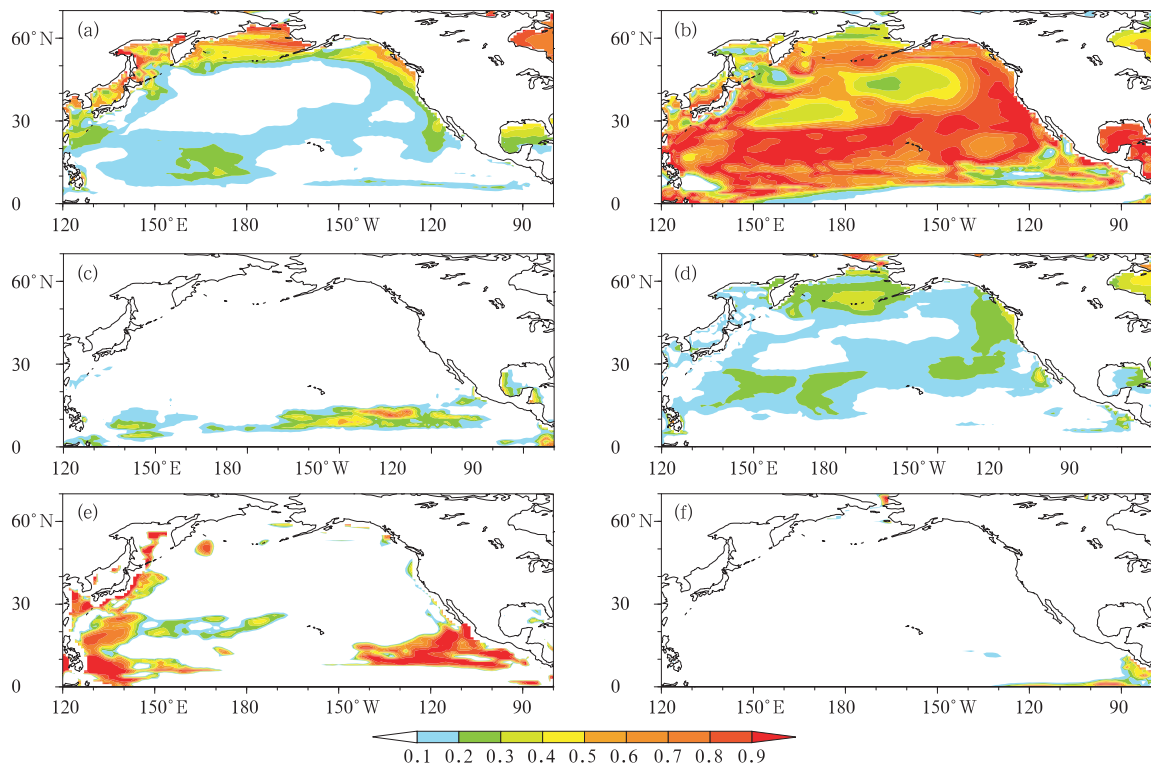


图5 第151—199模式年冬季平均的6个主要因子对SST倾向的归一化协方差
(a. 感热通量, b. 潜热通量, c. 短波辐射通量, d. 长波辐射通量, e. 水平平流($\times 5$), f. 垂直平流($\times 20$))
Fig. 5 Distribution of the standard covariance to the SST tendency for the six factors: (a) sensible heat flux, (b) latent heat flux, (c) short wave radiation flux, (d) long wave radiation flux, (e) horizontal advection ($\times 5$) and (f) vertical advection ($\times 20$) derived from the 151—199 model years outputs

需要指出的是,归一化协方差分析给出的只是结果,背后蕴藏着环流等因素变化的作用。例如,由于大尺度环流异常会影响表面风速和海-气之间的湿度和温度差,从而引起海表向大气释放的感热和潜热通量的异常,因此,在不同环流系统控制的地区,潜热和感热通量的作用也是不同的(Zhou, et al, 2002)。此外,在赤道外北太平洋上,不同地区主要的云种类、云量及其相应的云辐射强迫是不同的,因此,长短波辐射强迫也因地区而异(Hartmann, et al, 1992; Oeckert-Bell, et al, 1992)。

6 大尺度大气环流对SST的强迫作用

海表面的湍流热通量中,感热和潜热的异常取决于风速、海气温度差、海面饱和比湿与空气湿度差的异常以及它们之间的非线性作用(张学洪等, 1998)。在冬季的北太平洋上,上述变量的异常与大尺度大气环流的异常紧密相关。大尺度大气环流的异常会导致感热和潜热通量发生相应的变化。前文的分析表明,在冬季的热带外海洋上,感热和潜热通

量异常在很大程度上决定着SST倾向的异常,由此可以推测,大气环流的异常将会对SST倾向异常产生影响。下文将基于FGOALS_s结果对上述假设进行检验。

对第151—199模式年冬季的SST倾向进行EOF分析,计算范围为 14° — 62° N的热带外北太平洋,得到的第1个EOF分量的方差贡献为20.2%,略低于观测结果(24%,Wallace, et al, 1990)。模式模拟的SST倾向EOF分析的第1个主分量与同期SST倾向的相关系数分布(图6a)表明,SST倾向的分布型式与观测很接近,包括由西太平洋延伸至日界线以东的正值区,尤其是位于日界线附近的正值中心区。从鄂霍次克海向东至阿拉斯加湾及中低纬度东太平洋的SST倾向的负值区也较好地得到模拟再现。与Wallace等(1990)的观测结果相比,模式模拟的主要负值中心区位于白令海东部至阿拉斯加湾,比观测的位置要偏东。但与基于1983—2003年GISST资料的分析结果(图7)相比,模拟和观测的海温倾向的第1个EOF模态非常接近。

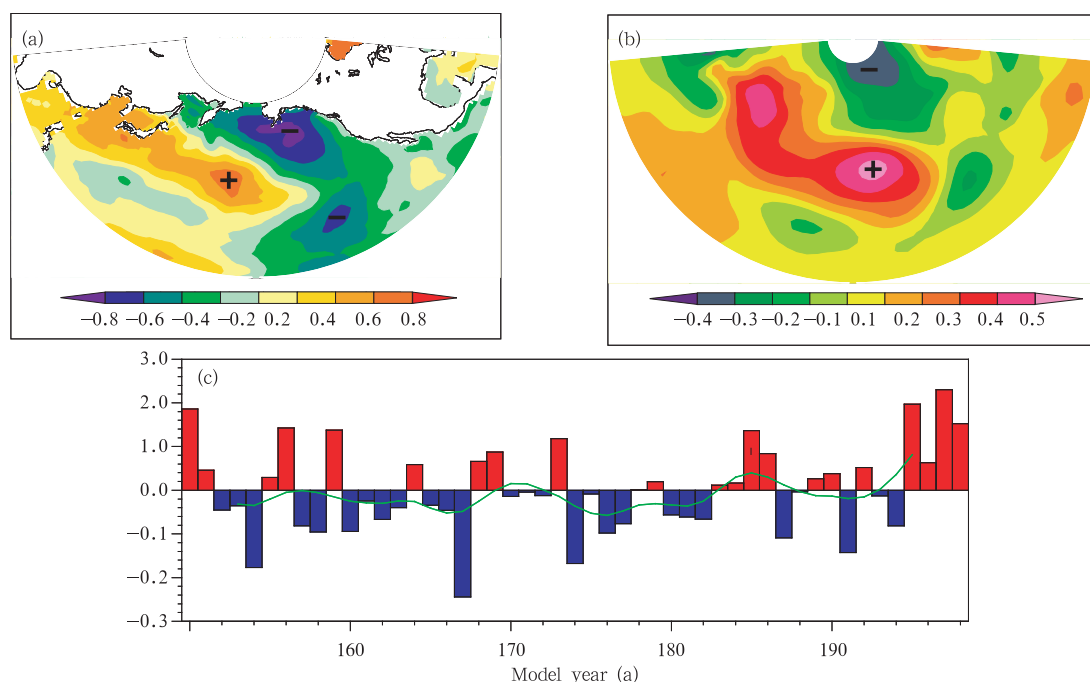


图6 第151—199模式年冬季SST倾向EOF分析的第1个主分量与同期SST倾向异常(a)和海平面气压场异常(b)的相关系数;(c)为EOF分析的第1个主分量

Fig. 6 Distribution of the correlation coefficients between the first principal component of the SST tendency EOF analysis and the simultaneous anomalous SST tendency (a) and the anomalous sea level pressure (b); (c) is the corresponding principal component time series. The results are derived from the 151 – 199 model years outputs

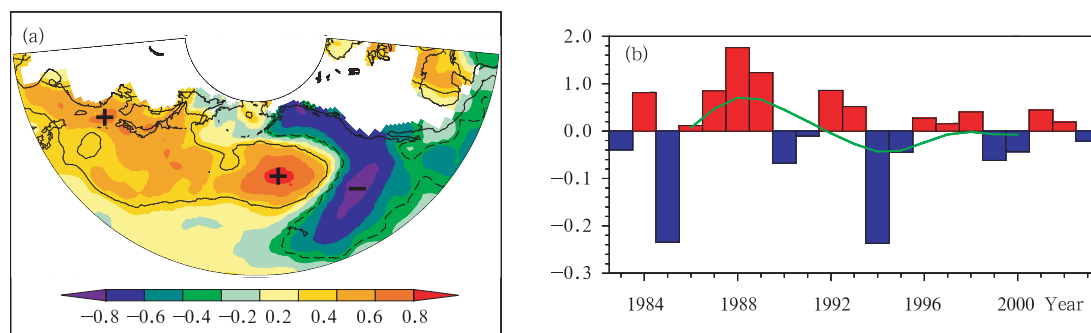


图7 GISST资料1983—2003年冬季SST倾向EOF分析的第1个主分量与同期SST倾向异常的相关系数分布(a)及相应的主分量(b)

Fig. 7 Distribution of the correlation coefficients between the first principal component of the SST tendency EOF analysis and the simultaneous anomalous SST tendency (a) and the corresponding principal component time series (b) for the period of 1983 – 2003. The results are based on the GISST dataset

模式模拟的SST倾向EOF分析的第1个主分量与同期海平面气压场的相关系数分布(图6b)表明,与观测相比(Wallace, et al, 1990),模式较好地再现了海平面气压场的分布型式。由于海平面气压场是同大尺度环流型相联系的,因此图6b表明冬季

热带外北太平洋SST倾向异常与大尺度环流异常联系紧密。例如在日本海附近的正相关区,当海平面气压为负异常时,对应的海温是冷异常,地转风异常为偏北风。

模式模拟的海平面气压场异常的分布型式与观

测相比亦存在一定的差别。观测中(Wallace, et al, 1990)的正相关区主要位于 50°N 以北,而模式模拟的正相关区明显偏北,最北可达 65°N 左右。同时,模式模拟的负相关区也要明显比观测偏北。观测的负相关中心区位于白令海峡附近,而模式模拟的最强负相

关北移到加拿大海盆。这种气压场异常模拟上的偏差,将直接影响到极地冷空气的传播路径。图3显示模式在白令海峡和阿拉斯加湾附近高估了海表面感热通量的标准差,因此上述气压场模拟偏差将通过影响极地冷空气路径而影响海表感热通量模拟效果。

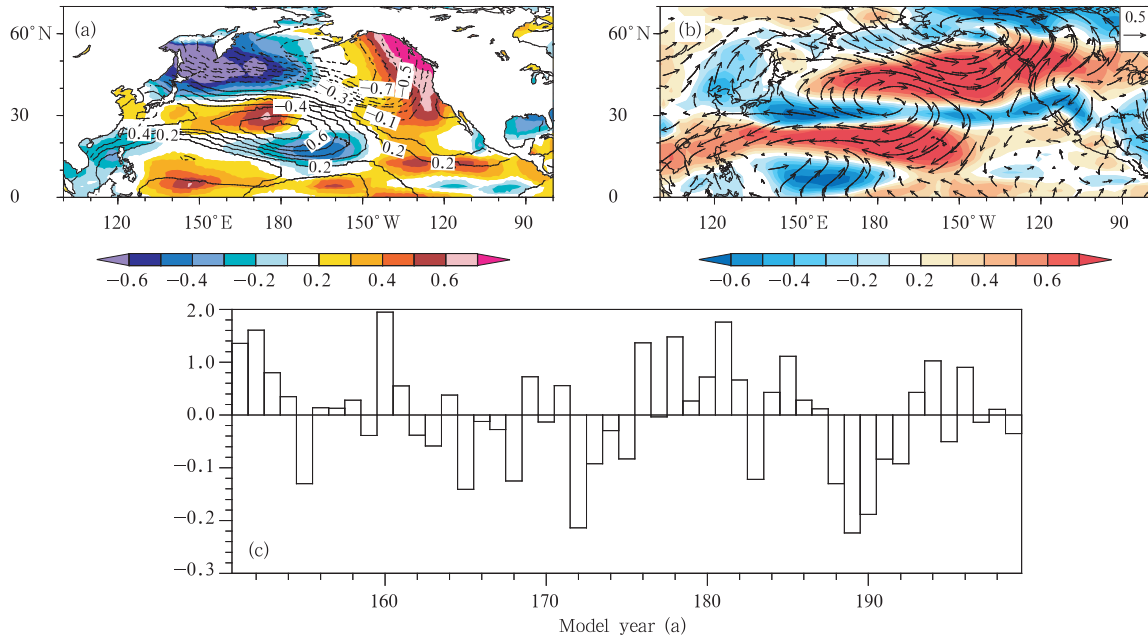


图8 (a)第151—199模式年冬季海平面气压场 EOF 分析的第1个主分量与同期海平面气压场异常(等值线)和潜热通量异常与感热通量异常之和(彩色阴影)的相关系数分布;(b)第1个主分量与同期表面风速(彩色阴影)和表面风场(矢量)的相关系数分布;(c)为 EOF 分析的第1个主分量

Fig. 8 (a) Distribution of the correlation coefficients between the first principal component of the anomalous sea level pressure EOF analysis and the simultaneous sea level pressure (contours) and the sum of the anomalous latent and sensible heat flux (shaded); (b) the same as (a) but for the surface wind speed (shaded) and the wind field (vectors); (c) the principal component time series.

The results are based on the 151 – 199th model years outputs

为了说明大气环流异常是如何作用于冬季热带外北太平洋上的湍流异常,即局地海-气相互作用中大气是如何强迫海洋的,图8a给出模拟的冬季北太平洋海平面气压场 EOF 分析的第一个主分量(方差贡献为35.1%)与同期海平面气压场异常(用等值线表示)和潜热通量异常与感热通量异常之和(方向以海洋得到热量为正,用彩色阴影表示)的相关系数分布,图8b给出第1个主分量与同期表面风速异常(用彩色阴影表示)及表面风场异常(用矢量表示)的相关系数分布。由图8a可见,在热带外北太平洋上,主要的正相关区位于 20° — 40°N 的中纬度太平洋和东北太平洋海盆,最强的正相关系数在0.6以上。前一个正相关区是由于其处在异常反气旋西部

的西南风中,将西南部海洋上暖湿的空气带到此处,减小海气温度和湿度差,同时异常的西南风与气候态的西北风叠加导致局地风速减小,从而海洋向大气释放的感热通量和潜热通量都减少,有利于 SST 升高。后一个正相关区位于异常气旋的东侧,地转风异常为南风,偏南风将南方海洋的暖湿空气带到此处,海气之间温度和湿度的差别减小,虽然此时表面风速是增加的(图8b),但是前者的强度更强,因此海洋向大气释放的感热和潜热通量之和是减少的。图8最主要的负相关区由鄂霍次克海向东延伸至日界线附近,最强负相关的绝对值在0.7以上。该负相关区位于异常气旋的南部。西北地转风异常将冬季亚洲大陆上的干冷空气带到海洋上,增大了

海-气之间的湿度和温度差别,并且异常西北风与气候态的西北风叠加使得局地风速增大,这些都会增加海洋向大气输送的感热和潜热通量,从而令 SST 降低。

结合图 6 和图 8,在冬季的热带外北太平洋,大气环流的异常导致了湍流热通量的异常,从而在相当大的程度上影响着 SST 的异常,因此大气对海洋的强迫在海气相互作用过程中占主导地位,这与前人结果是一致的(张学洪等,1998; Wu, et al, 2007)。通过上述分析可知,较之 LASG/IAP 耦合模式的此前版本,FGOALS_s 由于在大气模式和海洋模式的分辨率上都显著提高,故能够相对合理地模拟出影响 SST 变率的各种因子,并且能够再现大气环流异常是如何通过影响湍流热通量异常进而作用于 SST 变化的机制。这为利用该模式来进行有关海气相互作用的研究提供了很好的基础。

7 结 论

本文利用一个海-陆-气-冰完全耦合的气候系统模式 FGOALS_s1.0 的控制积分试验结果,分析了冬季北太平洋海表热通量异常及海温倾向方程中各因子对 SST 变率的相对贡献,讨论了该地区海-气相互作用的特点。主要结果如下:

(1) 模式能较好模拟冬季北太平洋净的海表热通量,特别是在 40°N 、 160°E — 160°W 附近,FGOALS_s1.0 模拟的潜热通量与 GOALS 相比有了很大改进,模拟结果与观测接近。

(2) 模式模拟的冬季北太平洋潜热和感热通量的标准差的分布型式与观测接近。其中潜热通量的年际变率小于 Cayan 的观测结果(1992a),但与 OAFflux 的结果接近。在白令海峡和阿拉斯加湾附近,模式模拟的感热通量标准差偏大,原因来自大气环流的模拟偏差所引起的极地冷空气路径偏差。

(3) 模式能够再现冬季热带外北太平洋上湍流热通量与 SST 倾向的强相关。由于分辨率的提高,FGOALS_s1.0 能够相对合理地模拟出西边界流,从而较好再现了海盆东西部上述相关性强度的差别。不过由于在 10° — 20°N 模式模拟的西边界流偏弱,在西边界流附近,模式高估了湍流热通量的作用而低估了海洋动力过程对 SST 变率的作用。

(4) 模式模拟的海表温度倾向方程中各因子的相对贡献中,潜热和感热通量异常在热带外北太平

洋上大部分地区对 SST 变率起决定作用,短波辐射通量异常在夏威夷群岛东南侧的一个小区域起主要作用。水平平流在热带太平洋对 SST 变率起主要作用。长波辐射和垂直平流的作用很小。

(5) 模式模拟的北太平洋冬季大尺度大气环流通过影响湍流热通量从而决定 SST 的变率,体现了在该地区的局地海-气相互作用中,占主导地位的是大气对海洋的强迫。

参考文献

- 包庆,刘屹岷,周天军等. 2006. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验. 大气科学,30(6):1077-1090
- 陈昊明,周天军,宇如聪等. 2009. LASG/IAP 耦合模式 FGOALS_s 模拟的东亚夏季风. 大气科学,33(1):155-167
- 王在志,宇如聪,包庆等. 2007. 大气环流模式(SAMIL)海气耦合前后性能的比较. 大气科学,31(2):202-213
- 吴波,周天军, Tim Li 等. 2009. 耦合模式 FGOALS_s 模拟的亚澳季风年际变率及 ENSO. 大气科学,33(2):285-299
- 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. 大气科学,22(4):511-521
- 周天军,张学洪. 2002. 印度洋海气热通量交换研究. 大气科学,22(2):161-170
- 周天军,王在志,宇如聪等. 2005a. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. 气象学报,63(5):702-715
- 周天军,宇如聪,王在志等. 2005b. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS. 北京:气象出版社,288pp
- 周天军,宇如聪,郜永琪等. 2006a. 北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟 I:局地海气相互作用. 气象学报,64(1):1-17
- 周天军,宇如聪,郜永琪等. 2006b. 北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟 II:热带太平洋强迫. 气象学报,64(1):18-29
- Briegleb B P, Hunke E C, Bitz C M, et al. 2002. The sea ice simulation of the Community Climate Model, Version two. NCAR Tech. Note NCAR/TN-455+STR:34
- Cayan D R. 1992a. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature. J Phys Oceanogr, 22: 859-881
- Cayan D R. 1992b. Variability of latent and sensible heat fluxes estimated using bulk formulae. Atmosphere-Ocean, 30: 1-42
- Esbensen S K, Kushnir Y. 1981. The heat budget of the global ocean: An atlas based on estimates from surface marine observations. Rep. No. 29, Climate Research Institute and Dep. Of Atmos. Sciences, Oregon State University. Corvallis, 230pp
- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. 1992. The effect of cloud type on earth-energy balance: Global analysis. J Climate, 5(11):1281-1304
- Jin F-F, An S-I. 1999. Thermocline and zonal advective feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO.

- Geophys Res Lett, 26: 2989-2992
- Jin Xiangze, Zhang Xuehong, Zhou Tianjun. 1999. Fundamental framework and experiments of the Third Generation of IAP/LASG World Ocean General Circulation Model. *Adv Atmos Sci*, 16: 197-215
- Kauffman B G, Large W G. 2002. The CCSM Coupler Version 5.01; Combined User's Guide, Source Code Reference and Scientific Description. National Center for Atmospheric Research. Boulder, CO 80307 U. S. A. 1-46
- Lau N C, Nath M J. 1996. The role of the "Atmospheric Bridge" in linking tropical Pacific ENSO events to extra-tropical SST anomalies. *J Climate*, 9: 2036-2057
- Lau N C, Nath M J. 2000. Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments. *J Climate*, 13: 4287-4309
- Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluations. *Adv Atmos Sci*, 21(5): 675-690
- Ockert-Bell M E, Hartmann D L. 1992. The effect of cloud type on earth's energy balance: Results for selected regions. *J Climate*, 5(10): 1157-1171
- Rayner N A, Parker D E, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108(D14):4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- Ronca P E, Battisti D S. 1997. Anomalous sea surface temperature and local air-sea energy exchange on intraannual timescales in the northeastern subtropical Pacific. *J Climate*, 10: 102-117
- Vertenstein M, Oleson K, Levis S. 2002. CLM2.0 User's Guide. National Center for Atmospheric Research. P. O. Box 3000, Boulder, CO80307 U. S. A. , 1-36
- Wallace J M, Smith C, Jiang Q. 1990. Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter. *J Climate*, 3(9): 990-998
- Wallace J M, Jiang Q. 1987. On the observed structure of the interannual variability of the atmosphere/ocean climate system // Cattle H. Atmospheric and Oceanic Variability. *J Roy Meteor Soc*, 17-43
- Wang B, Wu R, Li T. 2003. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on the Asian-Australian monsoon variation. *J Climate*, 16: 1195-1211
- Weare B C. 1984. Interannual moisture variations near the surface of the tropical Pacific Ocean. *Quart J Roy Meteor Soc*, 110: 489-504
- Wu R, Kirtman B P, Pegion K. 2007. Surface latent heat flux and its relationship with sea surface temperature in the National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System simulations and retrospective forecasts. *Geophys Res Lett*, 34: L17712, doi:10.1029/2007GL030751
- Yu L, Weller R A, Sun B. 2004. Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988 - 1999) by a synthesis approach. *J Climate*, 17: 373-393
- Zhou T, Yu R, Li Z. 2002. ENSO-dependent and ENSO-independent variability over the mid-latitude North Pacific: Observation and air-sea coupled model simulation. *Adv Atmos Sci*, 19: 1127-1147