

邹立维, 李东欢, 周天军, 等. 2018. FGOALS 海洋同化试验对西北太平洋夏季 SST—降水关系的模拟评估 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 139–149. Zou Liwei, Li Donghuan, Zhou Tianjun, et al. 2018. Summer rainfall–SST relationships in the western North Pacific simulated by the FGOALS model with ocean assimilation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 139–149, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17006.

FGOALS 海洋同化试验对西北太平洋夏季 SST—降水关系的模拟评估

邹立维^{1,2} 李东欢^{1,3} 周天军^{1,3} 吴波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 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 评估了耦合气候系统模式 FGOALS 海洋同化试验对西北太平洋夏季降水和 SST 相关关系的模拟技巧, 并对比了相应的观测海温强迫试验 (AMIP) 和历史气候模拟试验结果。结果显示, FGOALS 海洋同化试验对亚洲季风区大部分海域夏季 SST 年际变化有较高的模拟技巧, 但其对菲律宾以东海域模拟技巧较低。在西北太平洋夏季降水—SST 相关关系方面, 同化试验部分地再现了南海和菲律宾以东海域降水超前 SST 变化 1 个月和同时二者的负相关关系, 优于 AMIP 试验但逊于自由耦合模拟试验。同化试验对 SST 倾向—降水相关关系的模拟技巧亦介于 AMIP 试验和自由耦合试验之间。观测中, 西北太平洋夏季降水与环流异常受日界线附近和赤道东印度洋海洋大陆地区海温异常的遥强迫, 并通过改变到达海表的净短波辐射通量影响局地 SST 异常, 导致局地海温—降水和局地海温倾向—降水的负相关关系。在 AMIP 试验中, 遥强迫导致的西北太平洋地区环流异常较之观测偏弱, 由于缺少局地海气耦合过程, 在西北太平洋多数地区表现为海温对大气的强迫作用, 即 SST—降水正相关关系。FGOALS 同化试验和自由耦合试验考虑了局地海气耦合过程, 虽然低估了遥强迫对西北太平洋地区夏季环流异常的影响, 依然部分模拟出局地降水—SST 负相关关系但较之观测偏弱。同时, 自由耦合试验高估了西北太平洋 20°N 以南地区海温异常对大气环流异常的强迫, 使得其对中国南海和日本岛以南海域 SST—降水负相关关系的模拟稍优于同化试验。

关键词 海洋同化试验 降水—SST 关系 西北太平洋

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0139-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17006

Summer Rainfall–SST Relationships in the Western North Pacific Simulated by the FGOALS Model with Ocean Assimilation

ZOU Liwei^{1,2}, LI Donghuan^{1,3}, ZHOU Tianjun^{1,3}, and WU Bo¹

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2017-01-08; **网络预出版日期** 2017-07-26

作者简介 邹立维, 男, 1984 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气候数值模拟研究。E-mail: zoulw@mail.iap.ac.cn

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201506012, 国家自然科学基金项目 41575105, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题 2016LASW-B03

Funded by R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) (Grant GYHY201506012), National Natural Science Foundation of China (Grant 41575105), the Open Program of State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2016LASW-B03)

Abstract This study evaluates the performance of FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land surface–Sea ice coupled model) with ocean assimilation in the simulation of summer rainfall–SST relationship during 1979–2005 in the western North Pacific (WNP), and compares the results with corresponding simulations forced by observed sea surface temperature and FGOALS historical simulation. Results show that the FGOALS with ocean assimilation well captures the interannual variability of summer SST over the WNP except that over east of the Philippines. For the interannual variability of precipitation, it barely demonstrates any skill over Asian summer monsoon region, which is comparable to the AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) simulation. However, for the summer rainfall–SST relationship, the observed negative correlations over South China Sea and east of Philippines are partly reproduced in the FGOALS with ocean assimilation, in particular when the precipitation leads SST by one month and is concurrent with SST. The simulated skill is better than the AMIP simulation, but is inferior to the historical simulation. Based on observations, anomalous convection and circulation in the summer over the WNP are primarily driven by SST anomalies over the area near the dateline and the eastern Indian Ocean–Maritime Continent. The induced anomalous convections affect solar radiation reaching the sea surface, which contributes significantly to local SST anomalies and leads to negative SST–rainfall correlation and SST tendency–rainfall correlation. In the AMIP simulation, the anomalous circulation over the WNP driven by the remote forcing is underestimated. Since the AMIP simulation is forced by observed SST, the anomalous convection and circulation are forced by underlying SST over some places of the WNP, leading to positive rainfall–SST correlation. Although the anomalous circulations over the WNP driven by the remote forcing are also underestimated in both FGOALS with ocean assimilation and historical simulation, weaker than observed negative SST–rainfall correlations are produced since local air–sea coupling is included. In addition, the historical simulation tends to overestimate the forcing from SST anomalies over the WNP south of 20°N, which leads to better simulated SST–rainfall correlation than the FGOALS with ocean assimilation over South China Sea and south of Japan islands.

Keywords Coupled model simulation with assimilated ocean, Rainfall–SST relationship, Western North Pacific

1 引言

亚洲季风区夏季局地降水和 SST 变化在年际尺度上呈现显著的负相关关系,这是热带、副热带大洋上独特的现象 (Trenberth and Shea, 2005)。该负相关关系在降水超前 SST 变化的 1 个月最强,而当 SST 超前降水变化 1 个月时二者几乎不存在相关关系 (Wang et al., 2005)。这意味着亚洲夏季风对局地 SST 变化的影响要强于 SST 对其的强迫作用 (Wang et al., 2005)。Wu et al. (2009) 分析了 ENSO 不同阶段西北太平洋地区 (2.5°N~15°N, 120°E~140°E) 夏季局地海温和降水关系的差异,其结果指出该地区夏季 SST—降水的负相关关系主要是 ENSO 衰减年夏季的贡献。ENSO 衰减年夏季,西北太平洋地区大气环流异常主要受到其他海域 SST 变化的遥强迫影响,而大气环流的异常影响了局地的 SST 变化,最终导致降水—SST 变化的负相关关系 (Wu et al., 2009)。

亚洲季风区“季风驱动海洋”的夏季海气相互作用特征,意味着合理模拟季风变化需要考虑局地海气耦合过程。缺少大气对海洋的反馈过程,被认为是大气环流模式对亚洲季风区降水变率模拟

较差的主要原因之一 (Wang et al., 2004, 2005; Kumar et al., 2005; Zhou et al., 2008, 2009a, 2009b)。诸多研究表明,考虑海气耦合过程后,改进了亚洲夏季风的模拟。Duan et al. (2008) 的研究表明,在大暖池区考虑局地海气相互作用后,改进了模式模拟的夏季风降水气候态和季风爆发。Song and Zhou (2014) 对比了 CMIP5 模式国际耦合模式比较计划 (AMIP) 试验和历史气候模拟试验,发现耦合模拟改进了东亚夏季风气候态和年际变率的模拟。在区域气候模式中加入海气耦合过程后,亦改进了对印度夏季风的模拟 (Ratnam et al., 2009)、东亚夏季风的模拟 (姚素香和张耀存, 2008; 李涛和周广庆, 2010; Cha et al., 2016; Zou et al., 2016)、西北太平洋夏季风的模拟 (Zou and Zhou, 2013, 2014)。Huang et al. (2012) 的研究表明,考虑海气耦合过程的区域气候模式可以合理再现中国南海和西太平洋夏季 SST—降水的超前滞后关系,而观测海温驱动的试验模拟效果则较差。

众所周知,现今耦合模式对西北太平洋 SST 的模拟较之观测仍存在一定的偏差或漂移 (Song and Zhou, 2014)。有时难以区分耦合模拟的改进究竟是由于有偏差的 SST 还是考虑了海气耦合过程。纠正耦合模式 SST 模拟偏差最直接的方法是同化观

测海温。那么,考虑海洋同化过程的耦合模式对西北太平洋夏季 SST—降水相关关系的模拟能力如何?其与自由耦合模拟、观测海温驱动的试验有哪些区别?此前未有相关研究,这也是本文试图回答的问题。

年代际气候预测是现今耦合模式模拟和预测的热点问题(Kirtman et al., 2013)。在进行年代际预测之前需要首先开展耦合模式的海洋分量初始化试验。初始化试验的目的是得到一组与真实世界尽可能一致的模式初始状态,使得在预测积分过程中真实地模拟内部变率模态的演变过程。这组试验可以认为是考虑了海洋同化的耦合模拟试验。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)长期致力于气候模式的发展,其全球气候系统模式参与了包括 CMIP5 在内的历次“国际耦合模式比较计划”(CMIP)(Zhou et al., 2014)。为了参加 CMIP6 框架下的年代际气候预测计划(DCPP),Wu et al. (2018)发展了新的初始化方法,并应用在 LASG/IAP 耦合气候系统模式里。

本文的目的是评估 IAP/LASG FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land surface–Sea ice coupled model) 海洋同化试验对西北太平洋海温—降水关系的模拟技巧,并与 FGOALS AMIP 试验和历史气候模拟试验对比,考察同化方案的优势与不足,为未来进一步改进 IAP/LASG 耦合模式同化系统提供参考。其余内容安排如下:第二节介绍模式和同化方案;第三节评估模式对西北太平洋夏季 SST—降水的相关关系;最后第四节总结全文。

2 模式和资料

2.1 模式

FGOALS-s2 是 IAP/LASG 发展的耦合气候系统模式(Bao et al., 2013),它包含大气、海洋、海冰和陆面 4 个分量模式。4 个分量模式通过 NCAR 开发的耦合器 CPL6 进行数据交换。FGOALS-s2 的大气分量是 IAP/LASG 发展改进的大气环流谱模式 SAMIL,其水平分辨率是菱形截断 42 波,约相当于 1.66° (纬度) $\times 2.81^{\circ}$ (经度),垂直方向采用 σ - p 混合坐标系,分为 26 层。

海洋分量是 IAP/LASG 开发的 LICOM2(Liu et al., 2012),其水平分辨率约为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经

度),其中赤道区域加密到 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度),垂直方向 30 层,其中 300 m 以上有 12 层。陆面和海冰分量分别是 NCAR 开发的 CLM3 (Oleson et al., 2004) 和 CSIM5 (Collins et al., 2006)。

2.2 同化方案

本文所用试验采用的同化方案为 EnOI-IAU 方案。同化的海洋观测资料来自 Hadley 中心提供的,经过质量控制的原始海洋上层 700 m 温度和盐度廓线资料 EN4_v1.1 和格点化 SST 资料 HadISST1.1 (Guinehut et al., 2009)。同化区域为 $70^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{S}$,其中 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 和 $60^{\circ}\text{S}\sim 70^{\circ}\text{S}$ 设为过渡区域。同化循环窗口宽度为 1 个月。这里我们只简单介绍 EnOI-IAU 方案的主要步骤,详细流程见 Wu et al. (2018)。在一个同化循环内,首先由模式自由积分得到预报场(背景场);然后使用集合最优差值(EnOI)方法,结合预报场和观测资料,计算得到分析增量;最后,将模式回到同化循环的起始点,重新积分,并在积分过程中逐步引入分析增量。其中,步骤 2 中的 EnOI 方法是基于集合卡门滤波(EnKF)理论发展而来,可以视为 EnKF 的次优解,其优点是不要进行集合模拟。本研究中,构造 EnOI 背景误差协方差矩阵所需集合成员来自历史气候模拟试验。

2.3 试验和观测数据介绍

本文用到了基于不同初值的 3 组海洋同化试验(以下称为“同化试验”)结果,取其集合平均作为评估对象。为了与同化试验结果相比较,本文还利用了 FGOALS-s2 观测海温强迫试验(AMIP)和 20 世纪历史模拟试验(historical)3 个成员的集合平均结果。各试验的区别与联系见表 1。AMIP 试验没有考虑海气耦合过程,historical 试验为自由耦合模拟试验,而同化试验则同化了观测海温与盐度,可认为是部分地考虑了海气耦合过程。分析时段为 1979~2005 年。

表 1 所用到的试验及其特点说明

Table 1 Description of numerical simulations and their characteristics

试验名称	SST	特点
FGOALS AMIP 试验	观测月平均海温	完全没有考虑海气耦合过程
FGOALS 同化试验	耦合模式模拟,但同化了观测海温	部分地考虑了海气耦合过程
FGOALS historical 试验	耦合模式模拟	完全考虑了海气耦合过程,但模拟 SST 较之观测有漂移

本文用到的观测和再分析数据如下：(1) 卫星融合逐月降水资料 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 逐月降水数据 (Adler et al., 2003), 分辨率 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度); (2) 美国环境预测中心 (NCEP) /能源部 (DOE) 全球再分析资料 (NCEP2) (Kanamitsu et al., 2002); (3) Hadley 中心全球海表温度资料 (HadISST) (Rayner et al., 2006); (4) OAFflux 月平均海表面热通量资料 (Yu and Weller, 2007), 分辨率 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度); (5) ISCCP 逐月海表净短波辐射资料 (Zhang et al., 2004), 分辨率 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)。海表净短波辐射资料的时间跨度为 1984~2005 年, 其他资料的时间跨度为 1979~2005 年。为讨论方便, 文中将上述资料统称为“观测资料”。

3 结果分析

3.1 西北太平洋夏季降水—SST 相关

在分析同化试验对西北太平洋夏季降水—SST 关系的模拟性能之前, 需首先评估其对夏季降水和 SST 年际变率的模拟能力。图 1a 给出同化试验模拟的 1979~2005 年夏季 SST 异常与观测的相关系数。由图可见, 同化试验对亚洲季风区大部分海域夏季 SST 年际变化有较高的模拟技巧, 略显不足的是其对菲律宾以东海域模拟技巧较低 (相关系数未通过 95% 信度检验)。图 1b 和 1c 分别给出同化试验和 FGOALS-s2 观测海温强迫试验 (AMIP) 模拟的夏季降水异常与观测的相关系数。两组试验对海洋大陆地区夏季降水异常年际变率模拟技巧较高, 对亚洲季风区模拟技巧较低, 在部分地区表现为模拟和观测显著的负相关关系。相较而言, FGOALS-s2 AMIP 试验对夏季降水年际变率的模拟技巧稍高于同化试验, 尤其是在赤道西太平洋地区, 同化试验中的降水变率与观测呈现显著负相关关系。

虽然同化试验模拟的夏季 SST 和降水年际变率均不如 AMIP 试验, 但其模拟的 SST—降水关系却更为合理。图 2 给出观测和模拟的夏季降水—SST 异常相关系数。观测显示 (图 2a), 在海洋大陆地区和赤道西太平洋地区, 夏季降水和 SST 异常表现为显著正相关关系。这表明大气的变化更多地受到下垫面海温变化的强迫。而在孟加拉湾、南海和西北太平洋地区, 夏季降水和 SST 异常呈现显著

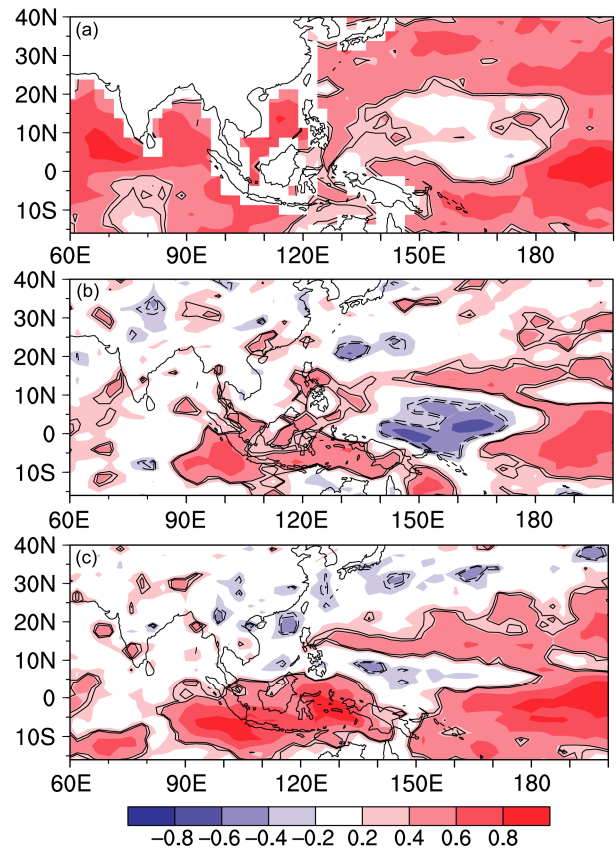


图 1 FGOALS 海洋同化试验模拟的 1979~2005 年夏季 (a) SST 异常和 (b) 降水异常与观测的相关系数分布, (c) 为 FGOALS AMIP 试验模拟的 1979~2005 年夏季降水异常与观测的相关系数分布 (等值线代表相关系数通过 0.05 和 0.1 显著性水平检验)

Fig. 1 Simulated skills of June–August (JJA) (a) SST anomalies and (b) rainfall anomalies for the period of 1979–2005 by the FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land surface–Sea ice coupled model) with ocean assimilation measured by correlation coefficients with observations. (c) is the corresponding skills of JJA rainfall anomalies simulated by the FGOALS AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) simulations. Counter lines represent the 0.05 and 0.1 significance levels

的负相关关系, 意味着这些海域夏季 SST 的年际变化更多地受到大气变化的驱动 (Wang et al., 2004, 2005)。同化试验较为合理地再现了观测中“SST—降水正相关”关系, 强度略微偏强 (图 2b)。但在观测中表现为“SST—降水负相关”的区域, 同化试验中二者的相关关系不显著 (图 2b)。

同化试验对夏季降水—SST 异常年际关系的模拟技巧, 介于 AMIP 试验和 historical 试验之间。在 FGOALS-s2 AMIP 试验中 (图 2c), 夏季 SST 和局地降水异常表现为空间上较为一致的显著正相关关系。该结果与其他全球大气模式的结果类似, 原因在于观测海温驱动的 AMIP 试验缺少了大气对

海洋的反馈过程 (Wang et al., 2004, 2005)。在自由的海气耦合试验中 (图 2d), 观测中南海和西太平洋 SST—降水负相关关系一定程度上得以合理再现, 但在菲律宾以东部分海域模拟的负相关关系较之观测仍偏弱。

降水—SST 超前滞后相关可以更好地刻画局地大气与海洋下垫面的关系。选择 1979~2005 年每年 5~10 月资料, 图 3 给出观测与模拟的降水超前 SST 1 个月、同时和滞后 1 个月二者的相关系数空间分布。在亚洲季风区, 观测降水超前 SST 1 个月和同时均表现为降水—SST 变化的显著负相关关系 (图 3a、3b), 而 SST 超前降水变化 1 个月二者的关系不明显 (图 3c)。这表明, 在西北太平洋地区夏季大气对 SST 变化的影响强于 SST 对大气的强迫作用 (Wang et al., 2005)。同化试验部分地再现了南海和菲律宾以东海域降水超前 SST 变化一个月和同时二者的负相关关系 (图 3d、3e), 但强度偏弱且无法再现日本岛以南海域降水和 SST 变化的负相关关系。在 SST 超前降水变化 1 个月, 同化试验表现为空间较为一致的 SST—降水变化正相关关系 (图 3f)。

由于 AMIP 试验缺少了大气对海洋的反馈过程, 即使降水超前 SST 变化 1 个月, SST 和降水仍表现为显著正相关关系 (图 3g)。由于大气对下垫面海温的快速响应, 在同时和降水滞后 SST 变化 1 个月时, AMIP 试验中 SST 和降水表现为更为显著的正相关关系 (图 3h、3i)。自由耦合的 historical 试验则较为合理地再现了降水和 SST 变化的超前滞后相关关系。降水超前 SST 变化 1 个月时, historical 试验模拟的 SST—降水负相关区较之观测范围更广 (图 3j)。但在即时的相关关系中, 降水—SST 变化的负相关区则较之观测范围偏小强度偏弱 (图 3k), 在降水滞后 SST 变化 1 个月时, 则与 AMIP 和同化试验类似二者的关系变为显著的正相关关系 (图 3l)。该结果表明, FGOALS-s2 的大气分量对西北太平洋夏季 SST 变化的响应是偏强的。

图 4 进一步给出观测与模拟的夏季平均 SST 倾向与降水的相关系数。SST 倾向是利用月平均 SST 的中央差分得到的。观测中, 西北太平洋地区夏季 SST 倾向与降水表现为显著的负相关关系 (图 4a), 其强度和范围较之局地 SST 与降水的负相关 (图 2a) 更强更广, 这表明大气异常对 SST 的变化有显著的贡献, 降水变化受到其他区域海温变化的

遥强迫影响 (Wu and Kirtman, 2007)。同化试验中, 在南海北部、东海及菲律宾岛以东部分海域, 模拟的 SST 倾向与降水呈现显著的负相关关系 (图 4b), 强度与范围较之观测偏弱偏小。但结合模拟 SST 与局地降水在该区域不显著的相关关系 (图 2b), 意味着在同化试验中大气异常对 SST 变化的贡献强于 SST 变化对大气的强迫作用。

AMIP 试验部分再现了菲律宾岛以东部分海域降水与 SST 倾向的负相关关系 (图 4c), 但模拟强度与范围均较之观测偏弱。由于 AMIP 试验的 SST 来源于观测资料, 该结果表明模式能够部分再现其他海域海温变化对该地区降水变化的遥强迫作用。在西北太平洋其他区域, 模拟降水与 SST 倾向的相关关系不明显。结合 SST 与模拟降水在该区域的显著正相关关系 (图 2c), AMIP 试验主要体现了下垫面 SST 变化对大气的强迫作用。自由耦合的 historical 试验较好地再现了西北太平洋地区夏季局地 SST 倾向与降水的负相关关系 (图 4d), 大气异常对 SST 变化的贡献在该试验中得以较好体现。结合 historical 试验中局地 SST 与降水在该地区的负相关关系 (图 2d), 表明耦合试验中大气异常对局地海温变化有重要贡献, 一定程度再现了观测中该地区海温—降水的关系。

综合比较同化试验、AMIP 试验和 historical 试验结果可知, 同化试验对西北太平洋地区夏季降水—海温关系、夏季降水—SST 倾向关系的模拟性能均介于 AMIP 试验和 historical 试验之间。

3.2 观测和模拟的西北太平洋夏季海气相互作用过程分析

基于 3.1 节的结果, 本节将讨论观测和 3 组试验模拟的西北太平洋地区夏季海气相互作用过程。采用 Wu and Kirtman (2007) 的方法, 当观测或模拟表现为大气驱动海洋占主导地位时, 利用区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均 1979~2005 年夏季 SST 倾向标准化时间序列向各气候变量场回归, 而当观测或模拟表现为海洋驱动大气占主导地位时, 则利用区域平均 SST 异常标准化时间序列向各气候变量场回归。回归分析时, 假定混合层深度为 50 m, 将海表热通量的单位转换为 $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ 。

降水—SST 相关分析显示, 观测西北太平洋夏季主要表现为大气异常对 SST 变化的强迫。图 5 给出观测区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均 1979~2005 年夏季 SST 倾向标准化时间序列对降

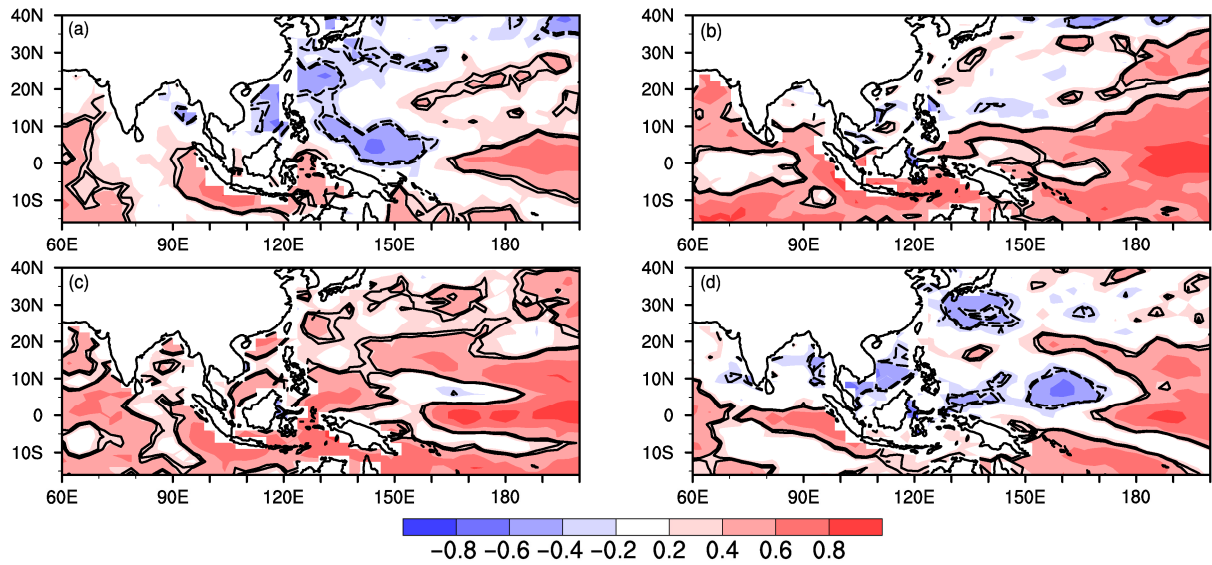


图2 (a) 观测、(b) 同化试验、(c) AMIP 试验和 (d) 自由耦合模拟试验模拟的 1979~2005 年夏季降水异常与局地 SST 的相关系数分布 (线条代表相关系数通过 0.05 和 0.1 显著性水平检验)

Fig. 2 Spatial patterns of correlation coefficients between the JJA SST and precipitation anomalies of 1979–2005 for (a) observations, (b) FGOALS with ocean assimilation, (c) AMIP simulation, and (d) historical simulation. Counter lines represent the 0.05 and 0.1 significance levels

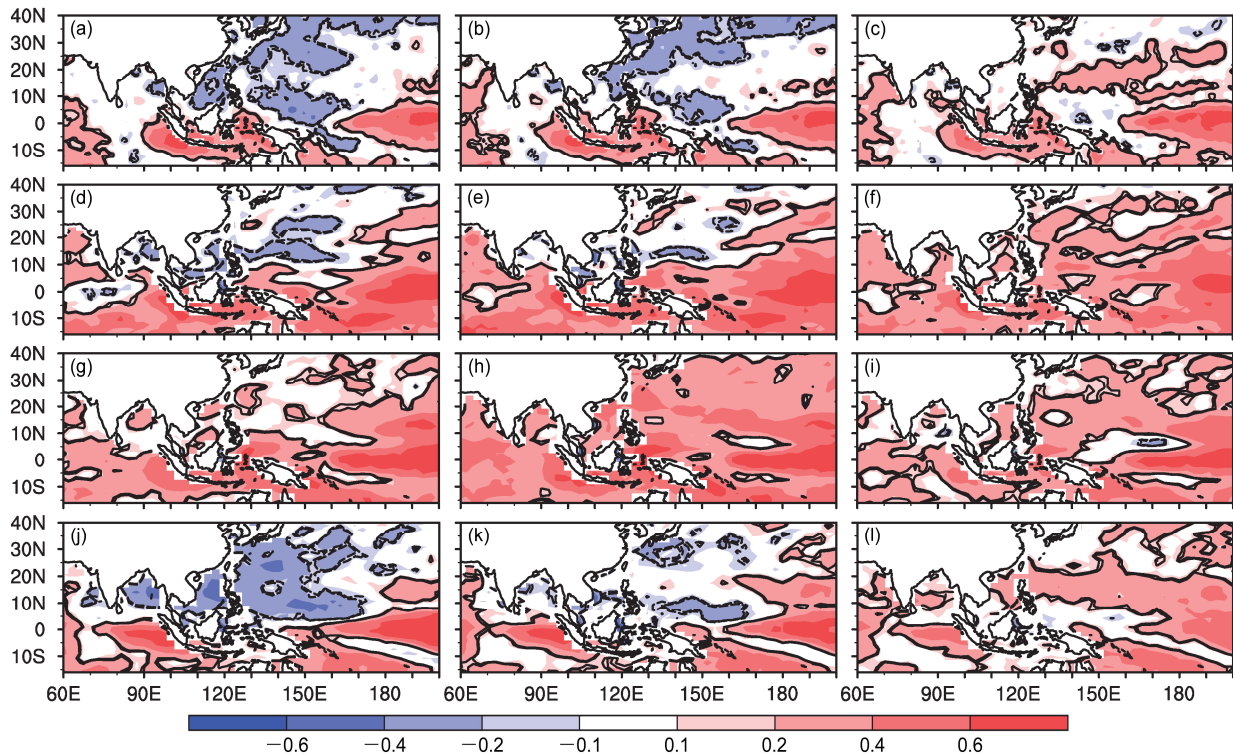


图3 基于 1979~2005 年每年 5~10 月资料, 计算的观测 (第一行)、同化试验 (第二行)、AMIP 试验 (第三行) 和自由耦合试验 (第四行) 模拟的降水超前 SST 1 个月 (左列)、同时 (中) 和滞后 1 个月 (右列) SST 与降水异常的相关系数空间分布 (每个时间序列的样本数为 108, 线条代表相关系数通过 0.05 和 0.1 显著性水平检验)

Fig. 3 (First row) Observed lead-lag correlation between monthly mean SST and precipitation anomalies for May through October of 1979–2005: (a) The correlation coefficients when precipitation leads SST by one month, (b) is concurrent with SST, and (c) lags SST by one month. The sample size is 108 for the time series at each grid. The second row is the same as the first row, except that the correlations are calculated from the FGOALS with ocean assimilation. The third (fourth) row is the same as the first row except for AMIP (historical) simulation. Counter lines represent the 0.05 and 0.1 significance levels

水、海表热通量等的回归空间分布。由图可知,到达海表净短波辐射增加(图 5f)是导致西北太平洋地区正 SST 倾向(图 5b)的重要原因。西北太平洋地区降水减少(图 5c),减少了总云量,使得到达海表的净短波辐射通量增加,导致了西北太平洋地区 SST 暖异常(图 5a)。局地降水的减少与西北

太平洋对流层低层反气旋环流异常有关,该反气旋受日界线附近冷海温异常和东印度洋海洋大陆地区暖海温异常的共同影响(Wu et al., 2009, 2010; Xie et al., 2009)。反气旋环流异常减弱了西北太平洋夏季风和海表面风速(图 5e),并减弱了低纬度和 30°N 以北地向上的潜热通量(图 5d),这对局地

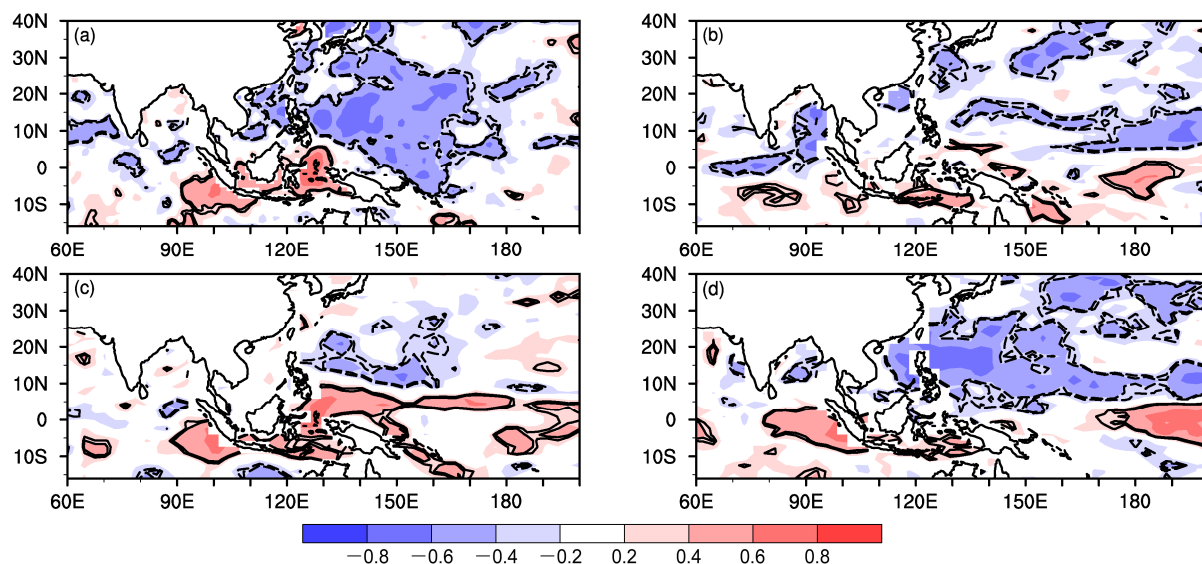


图 4 同图 2, 但为夏季 SST 倾向与降水的相关系数空间分布

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for rainfall-SST tendency correlation

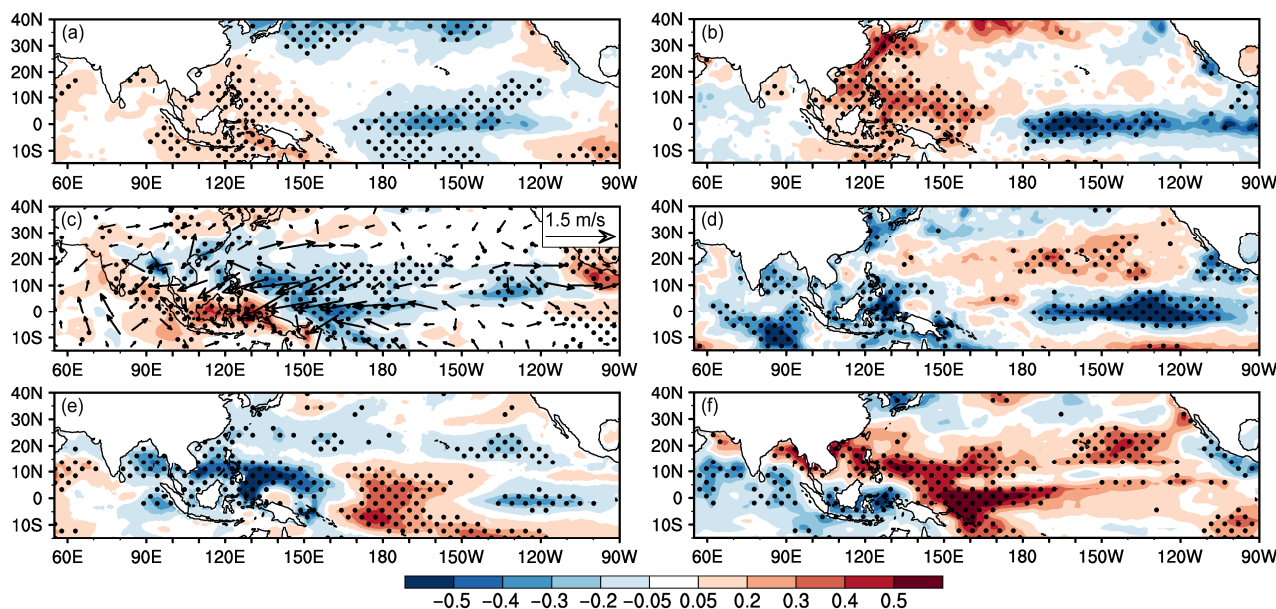


图 5 观测的 1979~2005 年 (5°N~35°N, 110°E~140°E) 区域平均夏季 SST 倾向标准化时间序列与 (a) SST (单位: °C)、(b) SST 倾向 (单位: $\times 5$ °C/month)、(c) 降水 (单位: mm/d, 填色) 和 1000 hPa 风场 (单位: m/s, 矢量)、(d) 潜热通量 (单位: $\times 5$ °C/month, 向上为正)、(e) 10 m 风速 (单位: m/s)、(f) 海表净短波辐射 (单位: $\times 5$ °C/month, 向下为正) 的回归系数。黑点区域代表回归系数通过 0.1 显著性水平检验

Fig. 5 Simultaneous regression with respect to normalized JJA SST tendency in the region of (5°N–35°N, 110°E–140°E) for the period of 1979–2005 in the observations: (a) SST (°C); (b) SST tendency ($\times 5$ °C/month); (c) rainfall (units: mm/d, shading) and wind at 1000 hPa (units: m/s, vector); (d) latent heat flux (units: $\times 5$ °C/month, upward is positive); (e) wind speed at 10 m (m/s); (f) surface shortwave radiation (units: $\times 5$ °C/month, downward is positive). The black dotted areas indicate that the regression coefficients are statistically significant at the 0.1 level by a two-tailed student's *t* test

正 SST 倾向亦有贡献。但在 $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间潜热通量无显著变化并略有增加, 这意味着受局地暖海温异常影响, 该地区海表海气湿度差将增加。因此, 观测中西北太平洋地区夏季降水—海温的负相关关系, 实则反映了降水和环流异常受到其他海域海温变化的遥强迫, 而环流异常导致的海表短波辐射异常对 SST 倾向和 SST 异常有重要贡献。

AMIP 试验主要体现了局地 SST 异常对大气的强迫作用, 因此图 6 给出区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均夏季 SST 异常标准化序列对模拟降水和海表面通量等的回归空间分布。由图可见, AMIP 模式部分再现了遥强迫导致的西北太平洋地区反气旋反气旋环流异常 (图 6b), 但较之观测偏弱偏东。与反气旋异常相关的负降水异常亦偏弱, 在中国南海、东海及日本岛以南海域大气表现为对下垫面暖海温异常的响应, 出现了正降水异常 (图 6b)。由于反气旋环流异常偏弱偏东, 对海表面风速和海表净短波辐射通量的影响均较之观测的响应偏弱 (图 6d 和 6e), 但海表潜热显著增加 (图 6c), 这意味着在暖海温强迫下海表海气间湿度差明显增加。因此, AMIP 试验虽然部分地再现了其他海域对西北太平洋夏季气候异常的遥强迫特征, 但其强

度较之观测偏弱, 在西北太平洋部分地区表现为局地海温对大气的强迫作用, 即呈现海温—降水正相关关系。

同化试验中西北太平洋地区大气异常对海洋变化的贡献大于海洋对大气的强迫。因此, 图 7 给出区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均夏季 SST 倾向标准化时间序列对降水、海表热通量等的回归空间分布。与观测不同, 在同化试验中西北太平洋地区潜热通量的减少 (图 7d) 对正 SST 倾向的贡献远大于海表净短波辐射通量的贡献。潜热通量的减少与局地风速减弱 (图 7e) 有关。同时, 同化试验模拟的西北太平洋反气旋环流异常及与之相关的负降水异常较之观测明显偏弱 (图 7c), 由此导致的海表短波辐射通量的变化 (图 7f) 及局地 SST 异常 (图 7a) 亦偏弱, 未能通过显著性检验。这与同化试验模拟的西北太平洋地区降水—SST 相关较弱 (图 2b) 是一致的。西北太平洋反气旋异常模拟偏弱与同化试验模拟的日界线附近冷海温异常与东印度洋海洋大陆地区暖海温异常偏弱有关 (图 7a)。需要指出的是, 同化试验在北太平洋 150°E 以东地区模拟的 SST 暖异常及与之相关的气旋性环流异常、正降水异常均较之观测偏强, 这与模拟

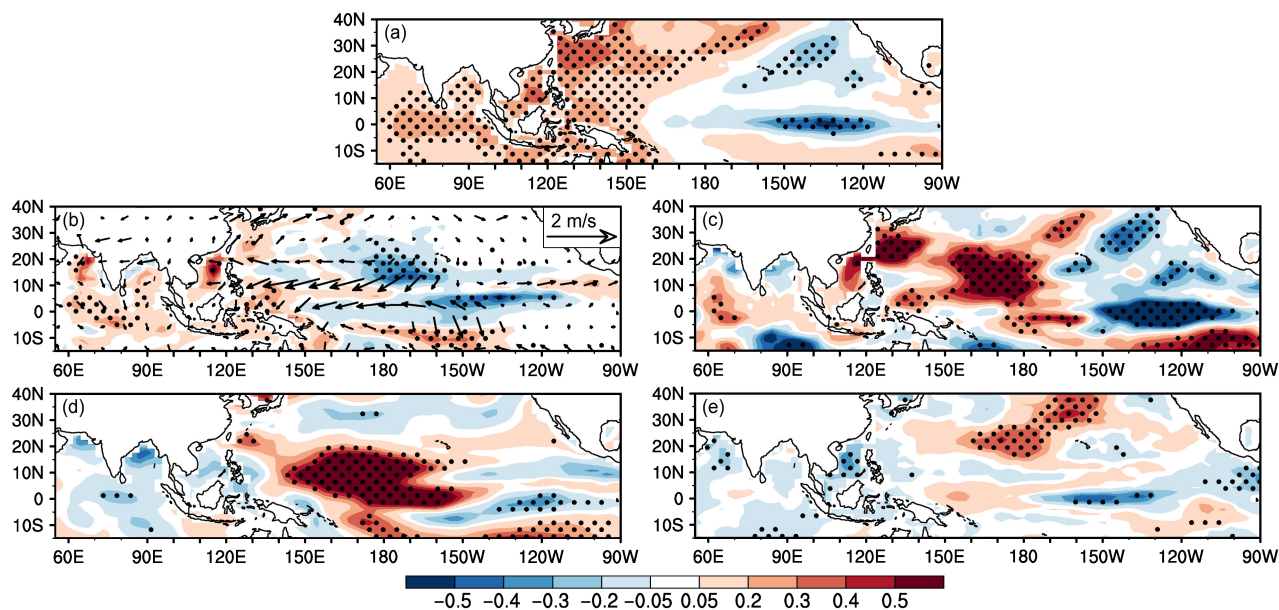


图 6 AMIP 模拟的 1979~2005 年 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 区域平均夏季 SST 标准化时间序列与 (a) SST (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(b) 降水 (单位: mm/d , 填色) 和 1000 hPa 风场 (单位: m/s , 矢量)、(c) 潜热通量 (单位: $\times 5^{\circ}\text{C/month}$, 向上为正)、(d) 10 m 风速 (单位: m/s)、(e) 海表净短波辐射 (单位: $\times 5^{\circ}\text{C/month}$, 向下为正) 的回归系数。黑点区域代表回归系数通过 0.1 显著性水平检验

Fig. 6 Simultaneous regression with respect to normalized JJA SST in the region of ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) for the period of 1979–2005 derived from AMIP simulation: (a) SST ($^{\circ}\text{C}$); (b) rainfall (units: mm/day , shading) and wind at 1000 hPa (units: m/s , vectors); (c) latent heat flux (units: $\times 5^{\circ}\text{C/month}$, upward is positive); (d) wind speed at 10m (m/s); (e) surface shortwave radiation (units: $\times 5^{\circ}\text{C/month}$, downward is positive). The black dotted areas indicate that the regression coefficients are statistically significant at the 0.1 level by a two-tailed student's t test

的局地 SST—降水正相关偏强亦是一致的。

图 8 给出自由耦合的 historical 试验模拟的区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均夏季 SST 倾向标准化时间序列与降水、海表热通量等的回归空间分布。由图可见, 西北太平洋地区海表潜热减少(图 8d)与海表净短波辐射增加(图 8f)对正 SST 倾向均有贡献, 并且海表潜热减少的贡献更大一些。historical 试验模拟的西北太平洋反气旋环流异常及负降水异常强度较之观测偏弱、范围偏小, 中心位

置略偏北(图 8c), 但强于同化试验。该反气旋异常减弱了西北太平洋夏季西南风, 减弱了海表风速(图 8e)及海表潜热(图 8d)。西北太平洋地区负降水异常受局地及遥强迫共同影响, 一方面与 20°N 以南地区局地 SST 冷异常有关, 另一方面则与东印度洋海洋大陆地区正降水异常激发的西北太平洋反气旋异常有关。偏弱的反气旋环流异常使得海表增加的短波辐射偏少, SST 暖异常偏弱且范围偏小(图 8a)。因此, 在耦合模拟中, 降水—SST 负相

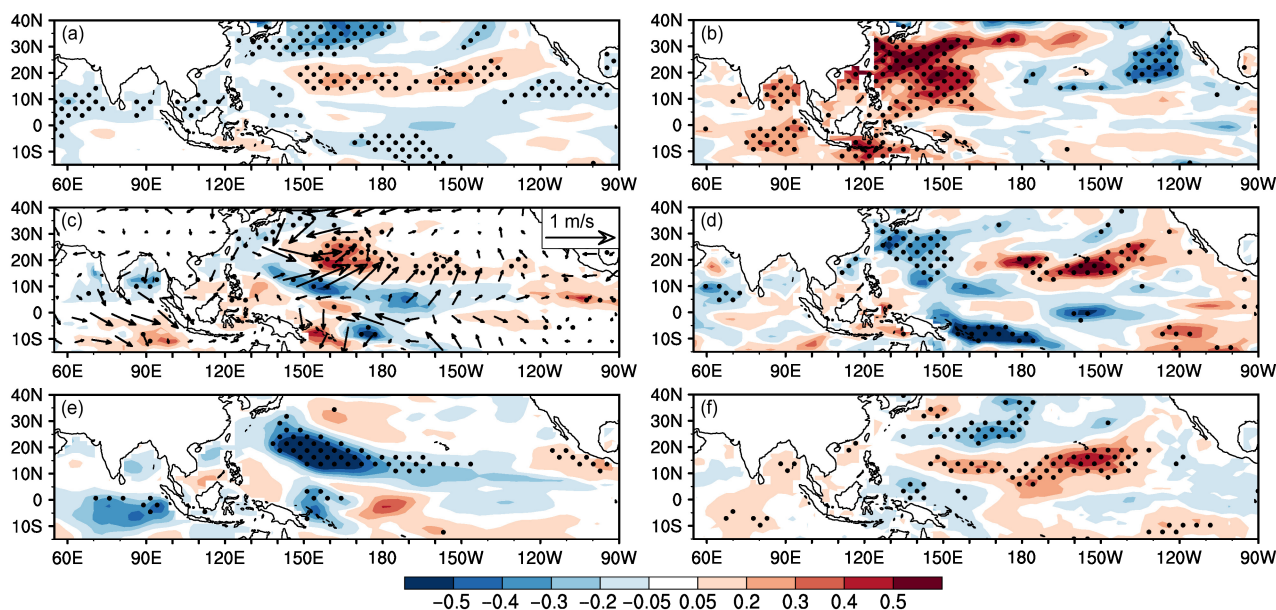


图 7 同图 5, 但为 FGOALS 同化试验的模拟结果

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the results derived from FGOALS with ocean assimilation

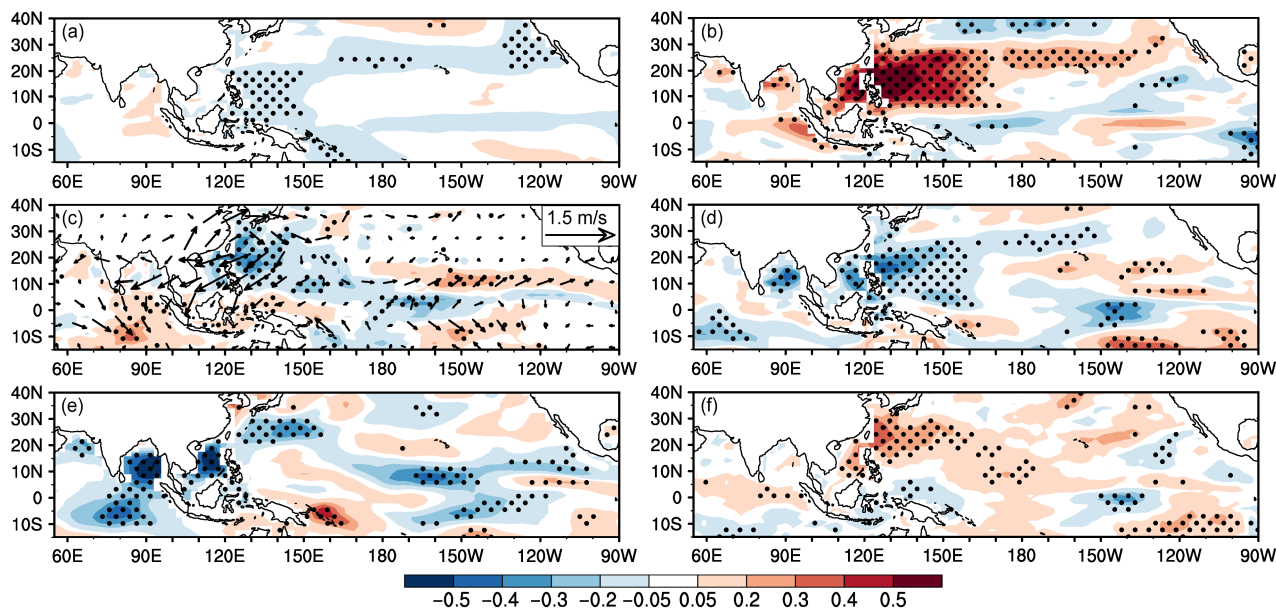


图 8 同图 5, 但为 FGOALS 自由耦合模拟结果

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the results derived from FGOALS historical simulation

关仅位于中国南海和日本岛南部部分海域(图 2d)。

综上所述, AMIP 试验由于没有考虑局地海气耦合过程, 同时遥强迫导致的西北太平洋地区环流异常较之观测偏弱, 在西北太平洋多数地区表现为海温对大气的强迫作用, 即 SST—降水正相关关系。在同化试验与自由耦合试验中, 由于均考虑了海气耦合过程, 是否能够合理再现观测中西北太平洋地区 SST—降水负相关关系, 取决于试验是否合理再现关键海域的海温异常及其对西北太平洋环流异常的影响。FGOALS 同化试验和自由耦合试验均低估了遥强迫对西北太平洋地区夏季环流异常的影响, 因此二者模拟的局地降水—SST 负相关关系均较之观测偏弱。同时, 自由耦合试验高估了西北太平洋 20°N 以南地区海温异常对大气环流异常的强迫, 使得自由耦合试验对中国南海和日本岛以南海域 SST—降水负相关关系的模拟稍优于同化试验。

因此, 同化试验相对 historical 试验的改进之处, 在于其减弱了耦合试验在西北太平洋 20°N 以南地区的虚假海温异常, 但对影响西北太平洋夏季环流异常的关键海区 SST 异常的模拟技巧仍较低, 未来应当考虑发展耦合同化方案, 改进大气异常对 SST 倾向的反馈, 进一步提高耦合模式系统的模拟技巧。

4 总结与讨论

亚洲季风区夏季局地降水和 SST 异常在年际尺度上呈现显著的负相关关系, 这是热带、副热带大洋上独特的现象。本文评估了 LASG/IAP 新发展的耦合气候系统模式 FGOALS 海洋同化试验对西北太平洋夏季降水和 SST 相关关系的模拟, 并与对应的 AMIP 试验和历史气候模拟试验比较, 重点对比分析了 3 组试验对西北太平洋夏季海气相互作用过程的模拟。主要结论如下:

(1) FGOALS 海洋同化试验对亚洲季风区大部分海域夏季 SST 年际变化有较高的模拟技巧, 但其对菲律宾以东海域模拟技巧较低。同化试验对海洋大陆和赤道西太平洋夏季降水异常年际变率模拟技巧较高, 对亚洲季风区模拟技巧较低, 在部分地区表现为模拟和观测降水异常显著的负相关关系。该技巧空间分布与 FGOALS-s2 AMIP 试验相似但技巧偏低, 尤其是赤道西太平洋地区。

(2) 同化过程中, 耦合模式模拟的海温向观测海温异常逼近, 可以认为同化试验包含了海气耦合

过程但又不是完全的海气耦合试验。因此, 同化试验对西北太平洋夏季降水和 SST 异常相关关系的模拟技巧优于 AMIP 试验, 但逊于自由耦合模拟试验, 这在降水—SST 超前滞后相关中表现得尤为明显。由于 AMIP 试验缺少了大气对海洋的反馈过程, 即使降水超前 SST 变化 1 个月, SST 和降水仍表现为显著正相关关系。同化试验部分地再现了南海和菲律宾以东海域降水超前 SST 变化 1 个月和同时二者的负相关关系, 但强度(范围)较之自由耦合试验偏弱(偏小)。同化试验对 SST 倾向—降水的相关关系的模拟性能亦介于 AMIP 试验与自由耦合试验之间。

(3) 观测中, 西北太平洋夏季降水和环流异常受日界线附近和东印度洋海洋大陆地区海温异常的遥强迫, 而环流异常通过改变到达海表的净短波辐射通量影响局地 SST 异常, 因此造成局地海温—降水和局地海温倾向—降水的负相关关系。AMIP 试验对遥强迫导致的西北太平洋地区环流异常的模拟较之观测偏弱, 在西北太平洋多数地区表现为海温对大气的强迫作用, 即 SST—降水正相关关系。在 FGOALS 同化试验和自由耦合试验中, 遥强迫造成的西北太平洋地区环流异常均较之观测偏弱, 但由于考虑了海气耦合过程, 因此二者均能够部分模拟出局地降水—SST 负相关关系但较之观测偏弱。另外, 自由耦合试验高估了西北太平洋 20°N 以南地区海温异常对大气环流异常的强迫, 使得自由耦合试验对中国南海和日本岛以南海域 SST—降水负相关关系的模拟稍优于同化试验。

参考文献 (References)

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 4 (6): 1147–1167, doi: 10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.
- 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]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 (3): 561–576, doi: 10.1007/s00376-012-2113-9.
- Cha D H, Jin C S, Moon J H, et al. 2016. Improvement of regional climate simulation of East Asian summer monsoon by coupled air-sea interaction and large-scale nudging[J]. *International Journal of Climatology*, 36 (1): 334–345, doi: 10.1002/joc.4349.
- Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. 2006. The community climate system model version 3 (CCSM3) [J]. *J. Climate*, 19(11): 2122–2143, doi:

- 10.1175/JCLI3761.1.
- Duan A M, Sui C H, Wu G X. 2008. Simulation of local air–sea interaction in the great warm pool and its influence on Asian monsoon [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 113(D22): D22105, doi: 10.1029/2008JD010520.
- Guinehut S, Coatanoan C, Dhomp A L, et al. 2009. On the use of satellite altimeter data in Argo quality control [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26 (2): 395–402, doi: 10.1175/2008JTECHO648.1.
- Huang Q, Yao S X, Zhang Y C. 2012. Analysis of local air–sea interaction in East Asia using a regional air–sea coupled model [J]. *J. Climate*, 25 (2): 767–776, doi: 10.1175/2011JCLI3783.1.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (r-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11): 1631–1643, doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kirtman S B, Power S B, Adedoyin J A, et al. 2013. Near-term climate change: Projections and predictability[M]// *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 953–1028.
- Kumar K K, Hoerling M, Rajagopalan B. 2005. Advancing dynamical prediction of Indian monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L08704, doi: 10.1029/2004GL021979.
- 李涛, 周广庆. 2010. 一个东亚区域海气耦合模式初步结果[J]. *科学通报*, 55 (9): 808–819. Li Tao, Zhou Guangqing. 2010. Preliminary results of a regional air–sea coupled model over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55 (21): 2295–2305.
- 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 Meteorologica Sinica*, 26 (3): 318–329, doi: 10.1007/s13351-012-0305-y.
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the community land model (CLM) [R]. Tech. Note NCAR/TN-461+ STR.
- Ratnam J V, Giorgi F, Kaginalkar A, et al. 2009. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model [J]. *Climate Dyn.*, 33 (1): 119–139, doi: 10.1007/s00382-008-0433-3.
- Rayner N A, Brohan P, Parker D E, et al. 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset [J]. *J. Climate*, 19 (3): 446–469, doi: 10.1175/JCLI3637.1.
- Song F F, Zhou T J. 2014. The climatology and interannual variability of East Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air–sea coupling improve the simulations? [J]. *J. Climate*, 27 (23): 8761–8777, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00396.1.
- Trenberth K E, Shea D J. 2005. Relationships between precipitation and surface temperature [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (14): L14703, doi: 10.1029/2005GL022760.
- Wang B, Kang I S, Lee J Y. 2004. Ensemble simulations of Asian–Australian monsoon variability by 11 AGCMs [J]. *J. Climate*, 17: 803–818, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0803:ESOAMV>2.0.CO;2.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(15): L15711, doi: 10.1029/2005GL022734.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Contrast of rainfall–SST relationships in the western North Pacific between the ENSO-developing and ENSO- decaying summers[J]. *J. Climate*, 22: 4398–4405, doi: 10.1175/2009JCLI2648.1.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña[J]. *J. Climate*, 23: 4807–4822, doi: 10.1175/2010JCLI3222.1.
- Wu B, Zheng F, Zhou T J. 2018. EnOI–IAU initialization scheme designed for decadal climate prediction system IAP-DecPreS [J]. *J. Adv. Modell. Earth Syst.*, doi: 10.1002/2017MS001132
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Regimes of seasonal air–sea interaction and implications for performance of forced simulations[J]. *Climate Dyn.*, 29: 393–410, doi: 10.1007/s00382-007-0246-9.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22(3): 730–747, doi: 10.1175/2008JCLI2544.1.
- 姚素香, 张耀存. 2008. 区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟 [J]. *气象学报*, 66 (2): 131–142. Yao Suxiang, Zhang Yaocun. 2008. Simulation of China summer precipitation with a regional air–sea coupled model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (2): 131–142, doi: 10.11676/qxxb2008.014.
- Yu L S, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air–sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 527–539, doi: 10.1175/BAMS-88-4-527.
- Zhang Y C, Rossow W B, Lacis A A, et al. 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D19105, doi: 10.1029/2003JD004457.
- Zhou T J, Yu R C, Li H M, et al. 2008. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half-century [J]. *J. Climate*, 21 (15): 3833–3852, doi: 10.1175/2008JCLI2067.1.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009a. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian–Australian monsoon? [J]. *J. Climate*, 22 (5): 1159–1173, doi: 10.1175/2008JCLI2245.1.
- Zhou T J, Wu B, Scaife A A, et al. 2009b. The CLIVAR C20C project: Which components of the Asian–Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible? [J]. *Climate Dyn.*, 33: 1051–1068, doi: 10.1007/s00382-008-0501-8.
- 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.
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Can a regional ocean–atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the Western North Pacific Summer monsoon? [J]. *J. Climate*, 26: 2353–2367, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00722.1.
- Zou L W, Zhou T J. 2014. Simulation of the western North Pacific summer monsoon by regional ocean–atmosphere coupled model: Impacts of oceanic components[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59 (7): 662–673, doi: 10.1007/s11434-013-0104-6.
- Zou L W, Zhou T J, Peng D D. 2016. Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX East Asia domain: A comparison of regional ocean–atmosphere coupled model to stand-alone RCM simulations [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 121(4): 1442–1458, doi: 10.1002/2015JD023912.