

CMIP5/6 模式对 PDO 调制 ENSO 爆发频率不对称的模拟评估

胡伟¹, 陈权亮^{1*}, 林壬萍², 陈幸荣³

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 利用第五次和第六次国际间耦合模式比较计划(CMIP)中piControl情景下的模拟结果, 结合观测资料, 对比评估了19个CMIP5模式和23个CMIP6模式对太平洋年代际振荡(PDO)调制厄尔尼诺-南方涛动事件爆发频率不对称的模拟能力, 并进一步揭示了PDO的调制过程。结果表明: 在观测中, PDO正(负)位相下厄尔尼诺(El Niño)的爆发频率比拉尼娜(La Niña)多300%(少73%), 53%(78%)的CMIP5(6)模式模拟出这一特征; 尽管两个模式整体都低(高)估了PDO正(负)位相的调制能力, 但CMIP6模式对PDO调制能力的模拟有所改进。进一步研究发现, 在PDO正(负)位相下, 赤道太平洋中西部会产生较强的西(东)风异常, 风场通过平流的作用使得暖水向东流动, 从而在太平洋中东部的海表面温度背景场中出现正(负)异常变化, 而这有利于PDO正(负)位相下El Niño(La Niña)事件的发生。

关键词: 太平洋年代际振荡; 第五次国际间耦合模式比较计划; 第六次国际间耦合模式比较计划; 模式评估

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)03-00104-10

0 引言

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋地区海气耦合系统中最强的年际变率信号, 尽管ENSO的主体形态呈现于热带太平洋, 然而其对全球范围内众多地区的气候都有着不容忽视的影响。因此, 自ENSO这一概念被提出, 国内外学者便投入了大量研究^[1-3]。近些年, 关于ENSO的年代际调制问题得到了诸多关注^[4]。TIMMERMAN^[5]提出了一种非线性机制, 该机制在不应用赤道外动力学的环境下就能产生对ENSO振幅的年代际调制。另外, YE^[6]指出, ENSO的年代际调制主要是由大气噪声过程组成。

太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)是一种年代际时间尺度上的气候模型, 它不仅影响太平洋地区的气候, 对全球范围内其他地区

也会产生一定的影响^[7-8]。由于ENSO和PDO在地理位置上相互联系、空间分布相近, 已有多项研究表明两者有密切关系。研究证实, PDO决定年代际ENSO的背景场, 在不同年代际背景下, 年际ENSO的空间结构和诸多特性均有显著性差异^[9]。FENG等^[10]通过研究指出PDO会影响ENSO的演变过程, 例如, 厄尔尼诺(El Niño)在PDO正(负)位相下衰减缓慢(迅速)。LIN等^[11]使用观测数据和第五次国际间耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Projects 5, CMIP5)模式数据进行分析, 结果发现PDO对ENSO的爆发频率具有调制作用, 即正位相有利于El Niño事件的发生, 负位相则有利于La Niña事件的发生, 正位相下的调制作用强于负位相。但是, 模式虽然能模拟出上述特征, 但模拟出的PDO的调制能力与观测相比还有一定差距。此外, 尽管我们已经知道PDO对ENSO爆发频率具有

收稿日期: 2022-06-27。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42175045)。

作者简介: 胡伟(1998-), 男, 硕士在读, 主要从事海气相互作用方面研究。E-mail: 17608026438@163.com

*通信作者: 陈权亮(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事对流层平流层相互作用和气候变化及其数值模拟研究。E-mail: chenql@cuit.edu.cn

调制作用,但是究竟如何实现调制的过程还不清楚,有待于我们进一步的研究。

近年来,代表当今国际气候系统模式先进水平的第六次国际间耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Projects 6, CMIP6)实验结果已经发布,它是20多年来耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Projects, CMIP)实验中参与模式数量最为庞大的一次^[12]。与CMIP5模式关于PDO的模拟结果进行比较后发现,CMIP6在空间特征模拟方面有一定的进步^[13]。这一提升是否能体现到模拟PDO调制ENSO的爆发频率呢?本文主要对以下两个问题进行探究:①与CMIP5模式相比,CMIP6模式在模拟PDO调制ENSO爆发频率的能力上是否有所提升;②PDO通过何种物理机制调制ENSO爆发频率。

1 资料和方法

本文使用的观测资料主要包括:①月平均海表

面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据集选用美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的扩展重建海面温度(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, ERSSTv5)^[14],空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,时间跨度为1854—2022年;②风场数据选取的是美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的再分析格点资料(Reanalysis Dataset),分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间跨度为1948—2022年。选取1900—2014年用于研究PDO对ENSO爆发频率的调制作用,由于风场数据时间的限制,在进行机制探讨时选取1948—2014年。

分别从CMIP5和CMIP6模式中随机选取了19个和23个piControl实验条件下运行的结果。模式资料插值为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的分辨率。相关模式基本信息见表1。

常用的Niño3.4指数是Niño3.4区($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$,

表1 所选CMIP模式

Tab. 1 The selected CMIP models

CMIP5 模式名称	国家	CMIP6 模式名称	国家
ACCESS1-0	澳大利亚	ACCESS-CM2	澳大利亚
ACCESS1-3	澳大利亚	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚
bcc-csm1-1	中国	BCC-CSM2-MR	中国
bcc-csm1-1-m	中国	CAMS-CSM1-0	中国
CanESM2	加拿大	CanESM5	加拿大
CMCC-CESM	意大利	CAS-ESM2-0	中国
CMCC-CM	意大利	CMCC-CM2-SR5	意大利
CMCC-CMS	意大利	CMCC-ESM2	意大利
CNRM-CM5	法国	CNRM-CM6-1	法国
CNRM-CM5-2	法国	EC-Earth3	欧洲
FGOALS-s2	中国	EC-Earth3-CC	欧洲
GISS-E2-H	美国	FGOALS-f3-L	中国
GISS-E2-H-CC	美国	GFDL-CM4	美国
HadGEM2-CC	英国	GISS-E2-1-G	美国
HadGEM2-ES	英国	GISS-E2-1-H	美国
MPI-ESM-LR	德国	HadGEM3-GC31-LL	英国
MPI-ESM-P	德国	HadGEM3-GC31-MM	英国
MRI-CGCM3	日本	INM-CM4-8	俄罗斯

续表 1

CMIP5 模式名称	国家	CMIP6 模式名称	国家
NorESM1-M	挪威	MCM-UA-1-0	美国
		MPI-ESM-1-2-HAM	德国
		MPI-ESM1-2-LR	德国
		MRI-ESM2-0	日本
		NorCPM1	挪威

170°~120°W) SST 异常的区域平均值^[15],以 SST 数据集的整个时间段作为气候态,以冬季(12月—次年2月)平均值作为该年 Niño3.4 指数的年平均值。图 1a 即为计算所得的 1900—2014 年的年平均 Niño3.4 指数,从中可以看到年际变率上叠加了年代际变率。由于本文主要关注的是 Niño3.4 指数的年

际变率,因此,我们对原指数进行了 9 a 高通滤波,得到如图 1b 所示的新指数。

当该年的 Niño3.4 指数大于一个标准差时,则记为一次 EN 事件;反之,则记为一次 LN 事件。同时,采用 LIN 等使用的指数 R 来表示 EN 与 LN 爆发频率的差异。公式如下:

$$R = (N_{EN} - N_{LN}) \times \frac{100\%}{N_{LN}} \quad (1)$$

式中: N_{EN} (N_{LN})表示的是 EN(LN)事件爆发的个数。

月平均 PDO 指数定义为对太平洋 20°N 以北月平均 SST 异常进行经验正交分解(EOF)后得到的第一模态所对应的时间序列。在进行 EOF 之前,首先去除全球平均海温异常以减少长期趋势的影响。前人研究指出,太平洋年代际变率中前两个模态分别是 PDO 和维多利亚模态(Victoria Mode, VM)。在观测中,第一(二)模态对应的是 PDO(VM),由于模式模拟的差异,导致个别模式中第一模态并没有对应 PDO,因此我们分别计算模式中前两个模态与观测中前两个模态的相关系数,并以相关系数更高的模态作为模式中的 PDO。参照此标准得到的结果显示只有 FGOALS-s2 对应的第二模态为 PDO。图 2 为 CMIP5/6 模拟的 PDO 空间模态的泰勒图,其中 MME5 和 MME6 分别为 CMIP5 和 CMIP6 模拟的集合平均值。从图中可以看出所有模式模拟得到的 PDO 的空间模态与观测的相关系数都大于 0.7,这表明所有模式都能模拟出 PDO 空间模态的基本特征;并且 CMIP5 与 CMIP6 整体上对 PDO 空间模态的模拟能力相当。月平均 PDO 指数即为该模态对应的时间序列,以 11 月—次年 3 月(NDJFM)的平均值作为该年的 PDO 指数,并以 0.2 个标准差来区分 PDO 正负位相,之所以选取 0.2 个标准差,是为了去除 PDO 指数为中性的年份。图 1c 中的黑线即为 0.2 个标准差。

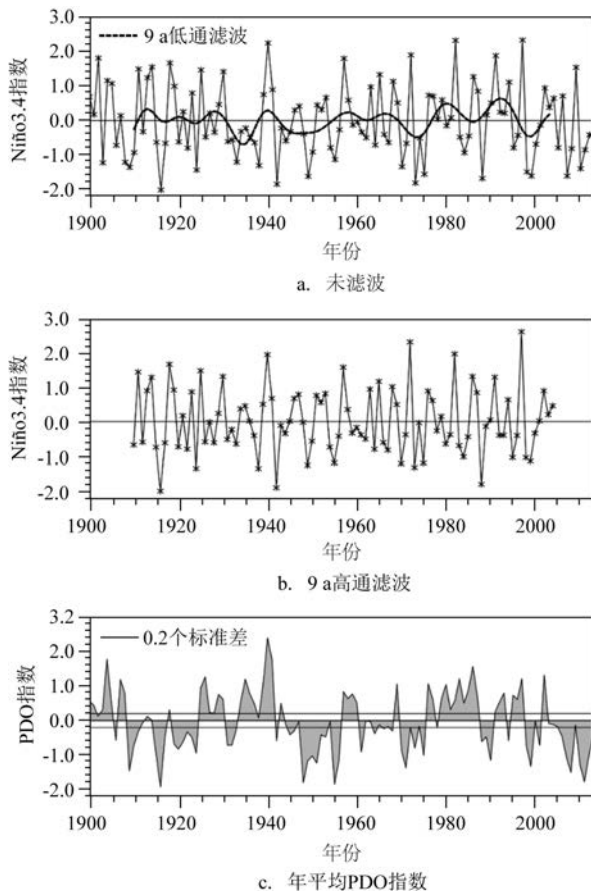


图1 1900—2014年未滤波和9 a高通滤波后的Niño3.4指数和年平均PDO指数

Fig.1 Time series of unfiltered and nine-year high-pass filtered Niño3.4 index, and annual mean PDO index during 1900 to 2014

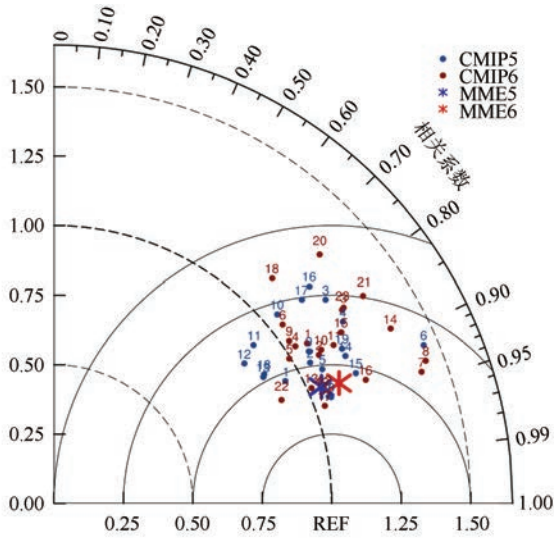


图2 CMIP5/CMIP6模拟的PDO空间模态的泰勒图

Fig.2 The Taylor diagrams of PDO patterns from CMIP5 and CMIP6

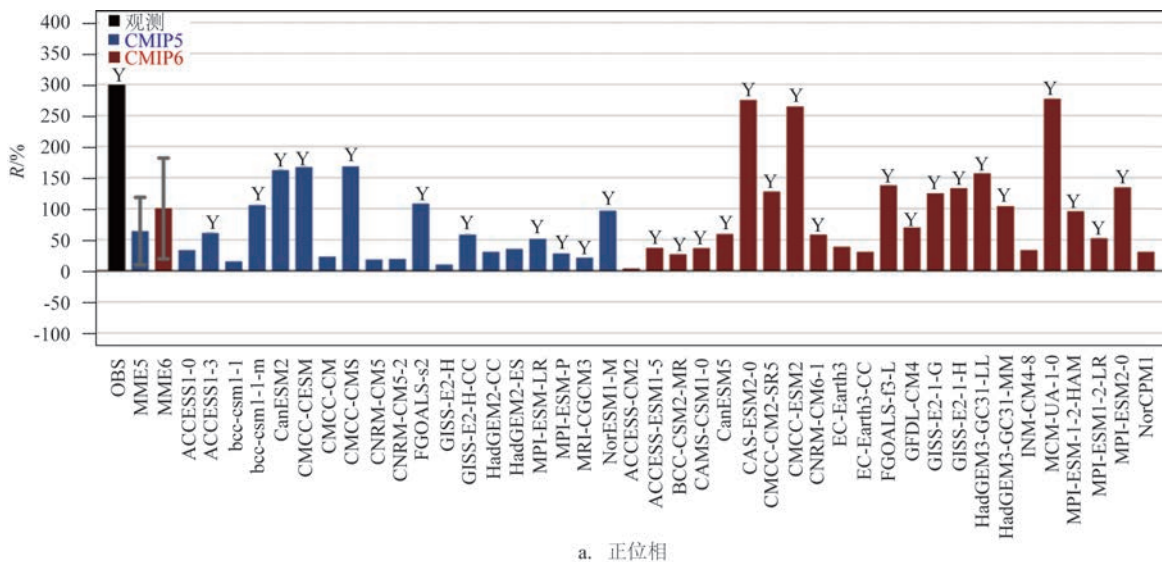
由此,分别计算正负位相下发生的EN与LN个数。为了验证PDO调制ENSO爆发频率的真实性,使用蒙特卡罗方法对计算得到的 R 值进行检验^[6]。以观测结果为例,在1900—2014年间,有45 a为PDO正位相。因此,随机从整段时间序列中抽取45 a,重新计算此次正位相下的 R 值,如此持续1 000 000次,便能得到1 000 000个样本。当观测

中的 R 值在这1 000 000个 R 值的概率分布函数(Probability Distribution Function, PDF)的90%以外,便认为它达到了90%的显著性水平。负位相下的检验方法也类似。

2 PDO调制ENSO爆发频率的不对称性

本节使用第1节中定义的方法来研究在PDO不同位相下,ENSO爆发频率的不对称性,即为PDO调制ENSO爆发频率的不对称性。由CMIP5/6模式计算得到的不同位相下的 R 值见图3。在观测中,PDO正(负)位相下EN的爆发频率比LN多(少)300%(73%),并且正位相下 R 的振幅强于负位相。这也说明PDO对ENSO爆发频率具有调制作用,并且正位相的调制作用强于负位相。为了检验结果的显著性,我们使用蒙特卡罗方法进行检验。正负位相下 R 的PDF如图4所示,观测中的 R 值(黄线)在正负位相下都超过了各自的阈值(蓝线),证明了上述结论,即PDO对ENSO爆发频率具有调制作用且在90%置信水平上显著。这个结论与LIN等的结论相似,但由于使用的数据不同,PDO负位相下的结果有所差异。

由CMIP5/6模式计算得到的不同位相下的 R 值

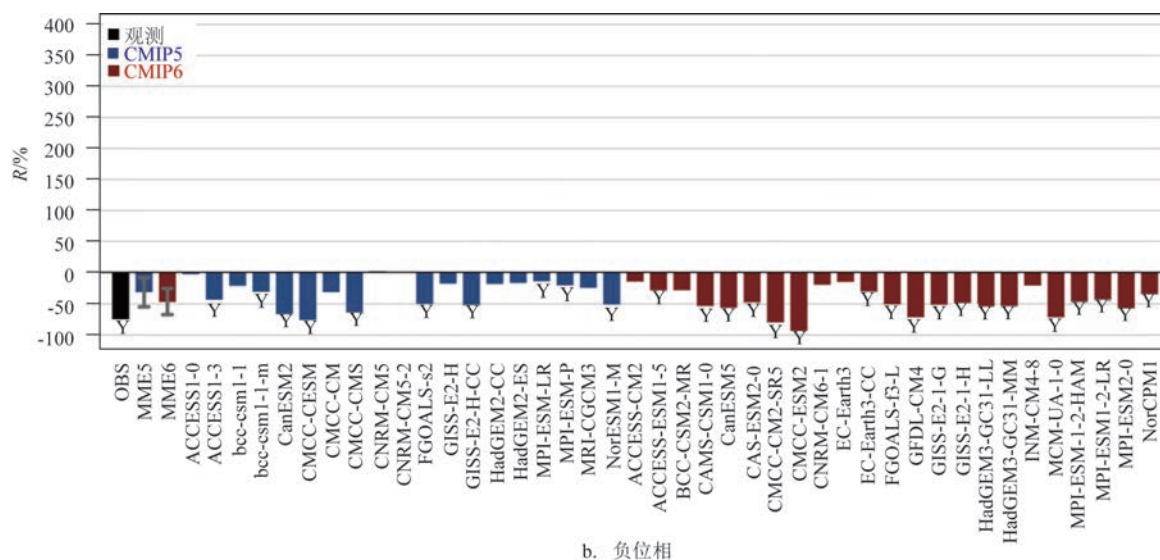


a. 正位相

注:字母“Y”表示该模式通过蒙特卡罗检验;灰色竖线表示一个标准差

图3 PDO正、负位相下观测值与CMIP5和CMIP6计算的 R 值

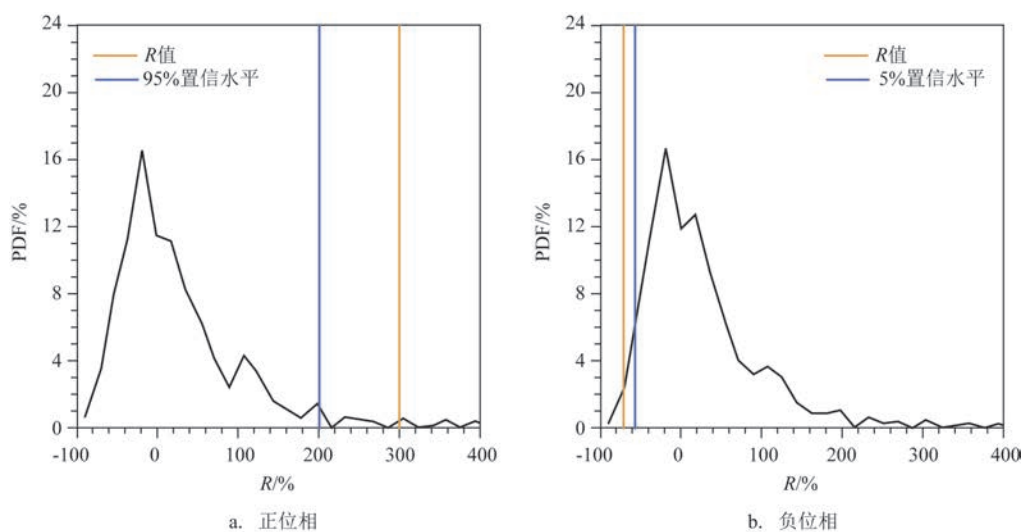
Fig.3 R value of observation, CMIP5 and CMIP6 under positive and negative phases of PDO



b. 负位相

图3 (续)

Fig.3 (Continued)



a. 正位相

b. 负位相

图4 观测中正、负位相下样本量为1 000 000的蒙特卡罗检验的PDF

Fig.4 PDF in positive and negative phases of PDO in the Monte Carlo test with a sample size of 1 000 000 for observation

见图3,模式在PDO正负位相下蒙特卡罗检验的结果分别见图5和图6。尽管大部分模式都能模拟出PDO调制ENSO爆发频率的不对称性这一特征,但是模拟结果与观测相比还是有所差距,主要表现为在CMIP5/6正(负)位相下模拟得到的 R 值小(大)于观测,说明低(高)估了PDO正(负)位相下的调制能力。但是,从整体上看,MME6比MME5在正负位相下的模拟有所改进。具体到个别模式,CMIP5中有9个模式(ACCESS1-0、bcc-csm1-1、CMCC-CM、

CNRM-CM5、CNRM-CM5-2、GISS-E2-H、HadGEM2-CC、HadGEM2-ES、MRI-CGCM3)未过检验,检验通过率只有53%,而CMIP6模式只有5个模式(ACCESS-CM2、EC-Earth3、EC-Earth3-CC、INM-CM4-8、NorCPM1)未通过,检验通过率达到78%。在PDO负位相下,CMIP5与CMIP6模式都有数个模式的模拟结果与观测相当;但在PDO正位相下,仅有CMIP6模式中的CAS-ESM2-0、CMCC-ESM2和MCM-UA-1-0达到观测水平,并且仅后两者模拟

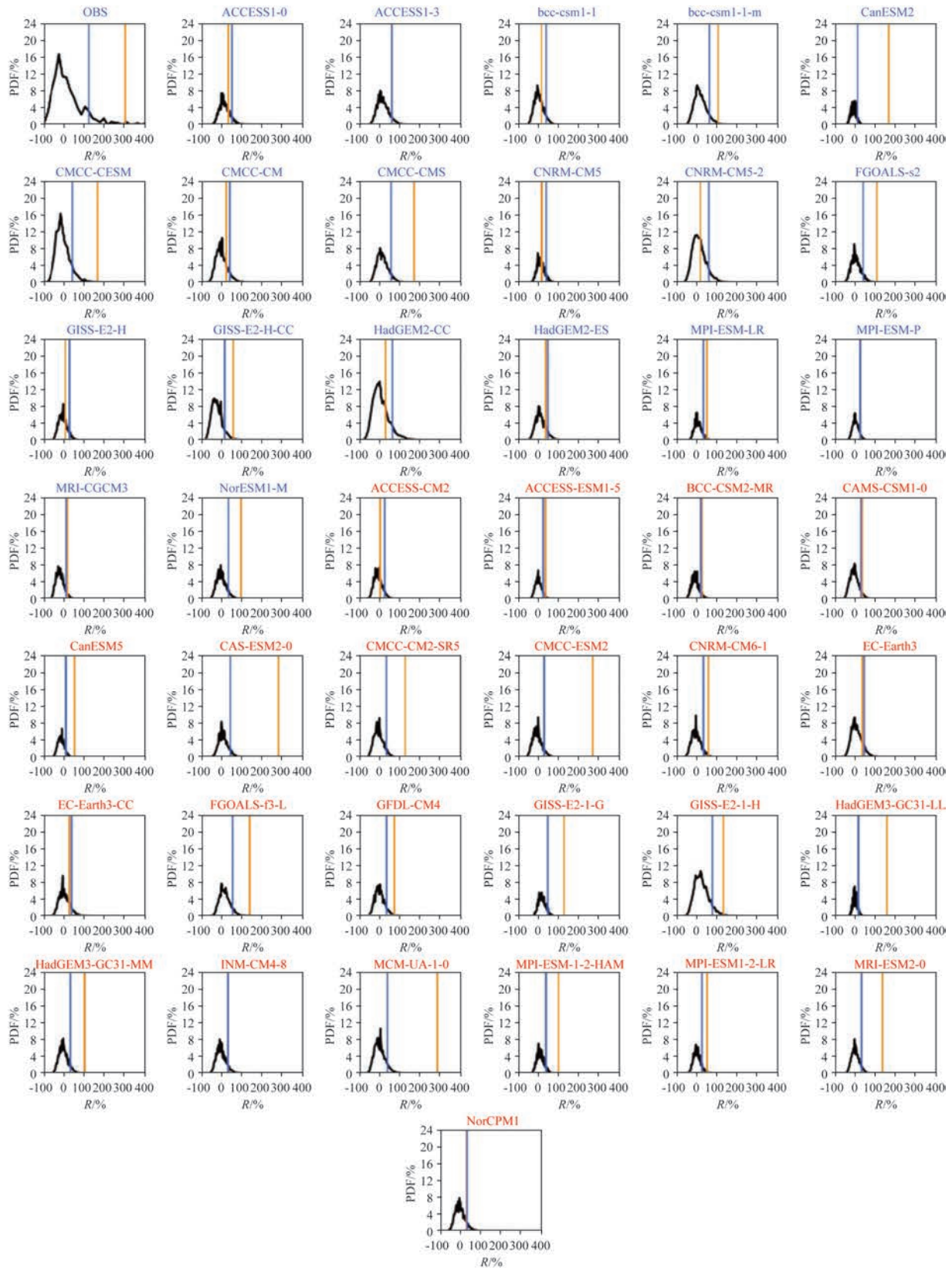


图5 模式在PDO正位相下样本量为1 000 000的蒙特卡罗检验的PDF

Fig.5 PDF in positive phase of PDO in the Monte Carlo test with a sample size of 1 000 000 for models

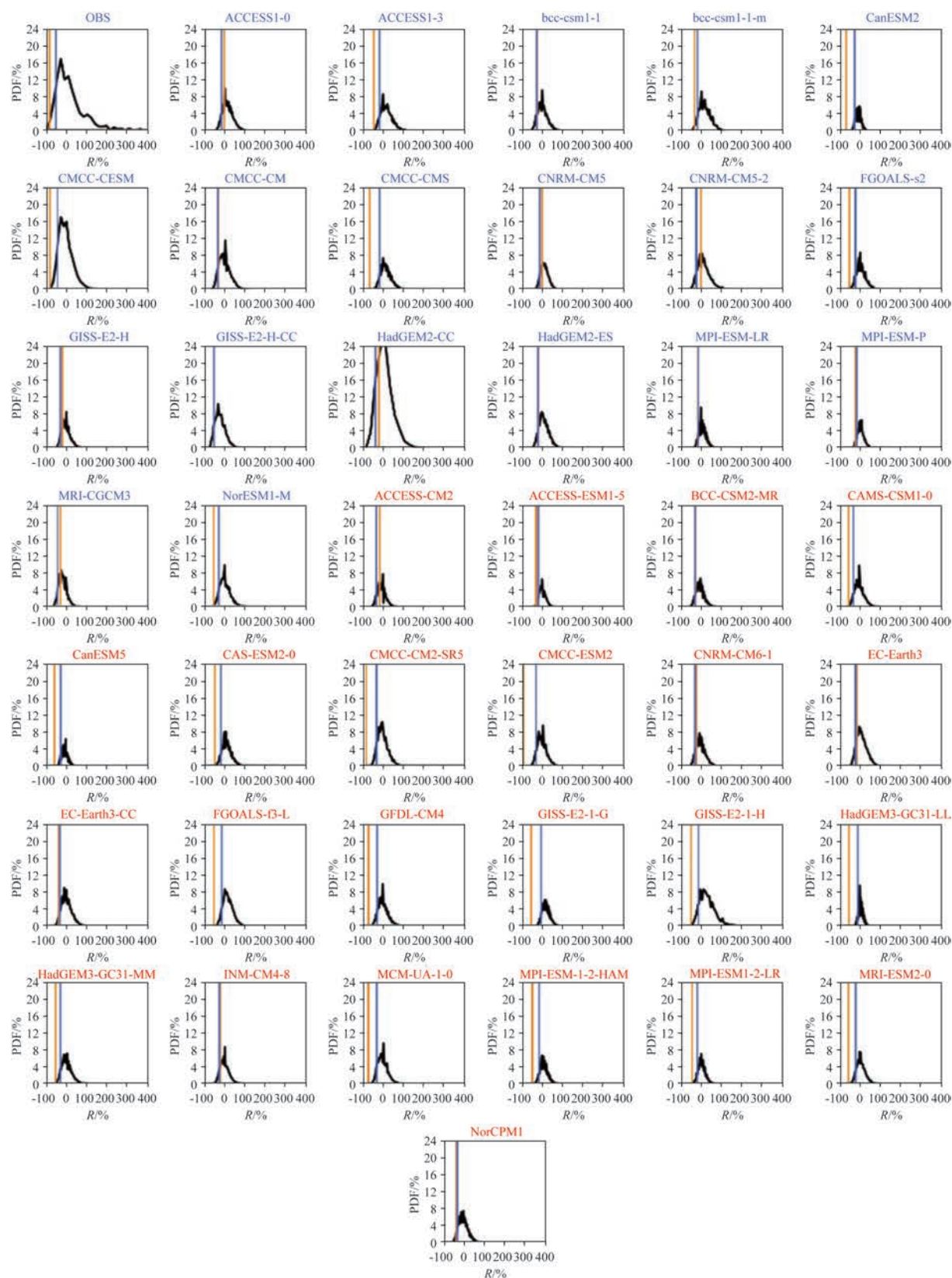


图6 模式在PDO负位相下样本量为1 000 000的蒙特卡罗检验的PDF

Fig.6 PDF in negative phase of PDO in the Monte Carlo test with a sample size of 1 000 000 for models

出了与观测结果相当的PDO调制能力的不对称强度。以上都说明了CMIP6模式在模拟PDO调制ENSO爆发频率的不对称性上比CMIP5模式有所改进。

3 PDO调制ENSO爆发频率的物理过程

本节主要通过对比观测和模式中PDO正负位相在SST和850 hPa风场的差异来说明PDO调制ENSO爆发频率的过程。尽管PDO被定义为北太平洋海温异常的第一模态,但它对热带太平洋地区也有相当大的影响。以往研究发现,PDO对热带地区的影响是通过改变与年代际背景场密切联系的大气遥相关来实现的^[17-18]。LIN等推测在年代际时间尺度上与PDO位相密切相关的背景西风异常是导致PDO正位相出现更多EN事件的原因。从图7中可以看出,在PDO正位相下,太平洋中西部(10°S~0°,160°E~120°W)可以观测到较强的西风

异常,风场异常可通过平流的作用使太平洋中东部(5°S~5°N,180°~100°W)SST背景场出现正异常变化。PDO负位相的过程类似。CMIP5和CMIP6模式整体也能模拟出以上过程,但模拟出的风场异常的强度弱于观测,同时,由此引发的SST背景场异常也较弱。但是,相较于MME5,MME6对上述过程的模拟有所改进,这也是CMIP6模式整体模拟出的PDO的调制能力有所改进的原因。

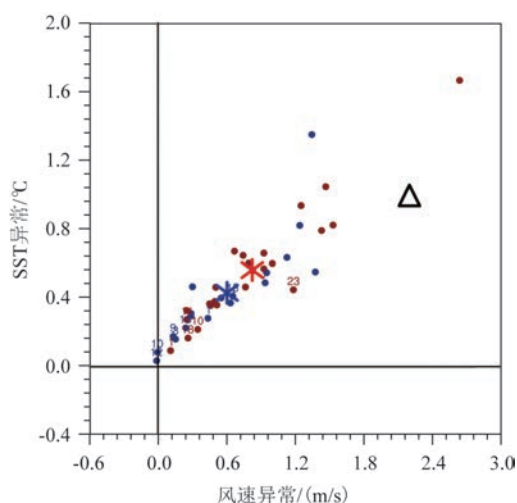
当具体到个别模式的模拟能力时,可以明显看出未通过蒙特卡罗检验的模式模拟出的西风异常较弱,引发的赤道中东太平洋SST背景场的变化强度也较弱,从而使得模拟的调制能力表现也比较弱。这也证明上述调制过程的存在。

4 结论与讨论

本文利用第五次和第六次国际间耦合模式比较计划中piControl情景下的模拟结果,结合观测资料,对比评估了19个CMIP5模式和23个CMIP6模式对PDO调制ENSO爆发频率不对称的模拟能力,并进一步探究了PDO的调制过程。结论如下:

①观测中的El Niño的爆发频率在PDO正(负)位相下比La Niña多300%(少73%),这与LIN等得到的结论基本一致。53%(78%)的CMIP5(6)模式能够模拟出这一特征,尽管两个模式整体都低(高)估了PDO正(负)位相的调制能力,但MME6的模拟结果比MME5有所改进。尽管在PDO负位相下,CMIP5与CMIP6模式有数个模式的模拟结果与观测相当,但在PDO正位相下,仅有CMIP6模式中的个别模式能达到观测强度,并模拟出与观测结果相当的PDO调制能力的不对称强度。这说明CMIP6模式比CMIP5模式对PDO调制ENSO爆发频率不对称的模拟能力有一定的改进。

②通过研究观测和模式中PDO正负位相在SST和850 hPa风场的差异,发现了PDO调制ENSO爆发频率的过程。在PDO正位相下,赤道太平洋地区会出现较强的西风异常,并通过平流的作用使得西太平洋的暖水向东流,进而引发赤道太平洋中东部SST背景场出现正异常变化。PDO负位相的过程也类似。CMIP6模式对PDO调制过程的模拟比CMIP5模式有所改进,这也是CMIP6模式模拟出



注:△为观测,*/*分别为MME5和MME6,数字对应未过检验模式的编号

图7 观测、CMIP5模式和CMIP6模式在10°S~0°、160°E~120°W范围内850 hPa纬向风异常的区域平均值与5°S~5°N、180°~100°W范围内SST异常的区域平均值的散点图

Fig.7 Scatter diagram between the regional-averaged value of zonal wind anomaly at 850 hPa over the region of 10°S~0°、160°E~120°W and the regional-averaged value of SST anomaly over the region of 5°S~5°N、180°~100°W for observation, CMIP5 and CMIP6 models

PDO的调制能力有所提升的原因。

LIN等通过对观测和CMIP5模式的研究,推测在年代际时间尺度上与PDO位相密切相关的背景西风异常是导致在PDO正位相下出现更多EN事件的原因。本文加入了CMIP6模式,并将CMIP5与CMIP6进行比较从而进一步证明了西风异常在PDO调制ENSO爆发频率中的重要作用,同时也说明了西风通过平流引发中东太平洋海温异常的过程。但是,LENGAIGNE等^[19]通过研究发现,西风在海气耦合相互作用下可以产生下行的开尔文波,从而也会使得中东太平洋地区产生海温异常,而本文对西风的这一作用还未涉及。此外,关于PDO的调制能力为何在正负位相下呈现出不对称的原因还有待我们进一步研究。

参考文献:

- [1] BJERKNES J. Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1969, 97(3): 163-172.
- [2] WANG C Z, PICAUT J. Understanding ENSO physics - A review [M]// WANG C, XIE S P, CARTON J A. Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction. Washington: American Geophysical Union, 2004.
- [3] 任宏利, 郑飞, 罗京佳, 等. 中国热带海-气相互作用与ENSO动力学及预测研究进展[J]. 气象学报, 78(3): 351-369.
REN H L, ZHENG F, LUO J J, et al. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 351-369.
- [4] AN S I, WANG B. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency[J]. Journal of Climate, 2000, 13(12): 2044-2055.
- [5] TIMMERMAN A. Decadal ENSO amplitude modulations: a nonlinear paradigm[J]. Global and Planetary Change, 2003, 37(1-2): 135-156.
- [6] YEH S W, JHUN J G, KANG I S, et al. The decadal ENSO variability in a hybrid coupled model[J]. Journal of Climate, 2004, 17(6): 1225-1238.
- [7] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1080.
- [8] NEWMAN M, ALEXANDER M A, AULT T R, et al. The Pacific decadal oscillation, revisited[J]. Journal of Climate, 2016, 29(12): 4399-4427.
- [9] WANG L, CHEN W, HUANG R H. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): L20702.
- [10] FENG J, WANG L, CHEN W. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Nino during different PDO phases[J]. Journal of Climate, 2014, 27(7): 2682-2698.
- [11] LIN R P, ZHENG F, DONG X. ENSO frequency asymmetry and the Pacific Decadal Oscillation in observations and 19 CMIP5 models[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(5): 495-506.
- [12] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
ZHOU T J, ZOU L W, CHEN X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456.
- [13] 夏松, 刘鹏, 江志红, 等. CMIP5和CMIP6模式在历史试验下对AMO和PDO的模拟评估[J]. 地球科学进展, 2021, 36(1): 58-68.
XIA S, LIU P, JIANG Z H, et al. Simulation evaluation of AMO and PDO with CMIP5 and CMIP6 models in historical experiment [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(1): 58-68.
- [14] HUANG B Y, THORNE P W, BANZON V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. Journal of Climate, 2017, 30(20): 8179-8205.
- [15] TRENBERTH K E, CARON J M, STEPANIAK P D, et al. Evolution of El Nino-Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D8): 4065.
- [16] CHU P S, WANG J X. Tropical cyclone occurrences in the vicinity of Hawaii: Are the differences between El Nino and non-El Nino years significant[J]. Journal of Climate, 1997, 10(10): 2683-2689.
- [17] BARNETT T P, PIERCE D W, LATIF M, et al. Interdecadal interactions between the tropics and midlatitudes in the Pacific basin[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(5): 615-618.
- [18] WANG B, AN S I. A mechanism for decadal changes of ENSO behavior: Roles of background wind changes[J]. Climate Dynamics, 2002, 18(6): 475-486.

Assessment of ENSO frequency asymmetry modulated by Pacific Decadal Oscillation in CMIP5 and CMIP6 models

HU Wei¹, CHEN Quanliang^{1*}, LIN Renping², CHEN Xingrong³

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing 100081, China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the observations and the simulation outputs under piControl scenario from the phase 5 and phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP), this study compares and evaluates the simulation ability of 19 CMIP5 models and 23 CMIP6 models on the El Niño-Southern Oscillation frequency asymmetry modulated by Pacific Decadal Oscillation (PDO), and further reveals the modulation process of PDO. The results show that the frequency of El Niño is 300% higher by 300% (lower by 73%) than that of La Niña in the positive (negative) phase of PDO. 53% (78%) of CMIP5 (6) models can simulate this feature. Although CMIP5/6 models underestimate (overestimate) the modulation ability of PDO in the positive (negative) phase, the simulation performance of CMIP6 on the modulation ability of PDO is improved compared with CMIP5 models. Further work shows that in the positive (negative) phase of PDO, a strong west (east) wind anomaly will occur in the central and western equatorial Pacific. Wind drives the warm water flow eastward through horizontal advection, thus a positive (negative) anomaly of sea surface temperature will occur in the central and eastern equatorial Pacific, which promotes the occurrence of El Niño (La Niña) event under the positive (negative) phase of PDO.

Key words: Pacific Decadal Oscillation; Coupled Model Intercomparison Projects 5; Coupled Model Intercomparison Projects 6; model evaluation