

文章编号: 2096-1618(2019)03-0278-09

CMIP5 多模式下的 ENSO 模拟评估及非对称性特征分析

张凯锋^{1,2}, 曹 宁², 张 敏³

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088 3. 广东省气象探测数据中心, 广东 广州 510110)

摘要:为了评估参与世界气候研究计划组织的“第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)”的全球气候模式对 ENSO(厄尔尼诺和南方涛动)现象非对称性特征的模拟能力,采用泰勒图统计分析、合成分析等方法,对参与 CMIP5 计划的 18 个耦合模式模拟资料与观测资料进行对比分析。可得出 CMIP5 模式对热带太平洋的整体海温状况的模拟较好,对表征热带太平洋海温显著年际变异的 4 个指标海域的海温状况模拟较差。其中多模式集合平均的综合模拟能力最优,其次是 CCSM4。HadCM3 的综合模拟能力最差。ENSO 海温异常强度的非对称特征表现为 El Niño 强于 La Niña。模式对海温异常中心强度的模拟效果较理想,模拟的强度与观测的所相差在正负 0.3 °C 左右。ENSO 海温异常空间分布的非对称性特征表现在 La Niña 冷异常区域比 El Niño 暖异常区域大,模式对 ENSO 强事件的空间分布模拟较理想,与观测基本一致,但不能较好模拟弱事件海温异常区域关于赤道对称的特征。ENSO 海温异常持续性的非对称性特征主要表现在 La Niña 的持续时间较短,El Niño 的持续时间较长。模式都能较好模拟 ENSO 持续性特征,但对 ENSO 衰退事件的海温异常中心强度的模拟效果不理想。

关键词:大气物理学与大气环境;气候模拟;ENSO;CMIP5 模式

中图分类号:TP301.6

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.03.013

0 引言

随着全球气候异常的不断加剧,作为影响年际气候变化的主要因素,ENSO(厄尔尼诺和南方涛动)不仅对其活动中心所在热带太平洋气候起重要作用,而且在大气遥相关作用下对全球气候系统的大尺度海气相互作用也产生重要影响。通过耦合模式的模拟研究发现全球变暖更容易导致 ENSO 极端事件的发生^[1-3]。ENSO 对全球灾害性天气的产生也有重要的影响^[4],尤其是 1982/1983 年和 1997/1998 年的超强 El Niño 事件对世界各地造成的巨大损失。此外 ENSO 对西北太平洋台风的活动有明显的预报信号^[5]。极端降水事件更容易发生在 El Niño 年的冬春季和 La Niña 年的夏秋季^[6]。许多对 ENSO 事件机制的研究,表现出 ENSO 的复杂性和多样性。近十几年来,ENSO 事件的非对称性特征、形成机制及其影响也引起科学家的广泛关注^[7-8]。ENSO 事件的非对称特征,主要表现在 El Niño 事件强于 La Niña 事件^[8],另外表现在空间分布的非对称,持续性的非对称。对于 ENSO 的空间分布,中部型和东部型 ENSO 事件分别表现出显著的年际尺度(2~7 年)和年代际尺度(10~15 年)周期变化特征^[9]。基于模式的研究^[10]表明,ENSO 的过渡

有持续时间和振荡幅度的不对称,主要原因是非线性风应力的耦合作用,强大的暖事件后是紧跟的冷事件,反之亦然,而且冷事件比暖事件更长。有研究^[11]表明大气非对称响应都表现出与海温异常非对称较好的一致性。所以,通过研究海温异常的非对称性来研究 ENSO 的非对称性特征是可行且必要的。

气候系统模式是研究气候变化机理和预测未来气候变化最重要的工具。世界气候研究计划推动诸多模式的比较,其中影响力最大的 CMIP(国际耦合模式比较计划)自 1995 年实施以来,推动国际间气候模式数据共享,充分引导气候模式和诊断、气候变化归因和气候变化预估等各领域的国际合作。从参加 CMIP1 的国际模式有 10 个,参加 CMIP2 的国际模式有 18 个,到参加 CMIP3 的国际模式有 23 个^[12]。之后 CMIP4 成了 CMIP3 与 CMIP5 的过度计划^[13]。从 2008 年 9 月开始实施的第五阶段实验计划^[14],有来自全球 20 多个研究组、40 余个气候系统模式和地球系统模式参加,旨在解决 IPCC 第四次评估过程中出现的一些突出的科学问题,相比于 CMIP3,CMIP5 模式虽然没有质的飞跃^[15],但 CMIP5 模式在外强迫、模式分辨率、模式物理过程等方面都有所改进^[16],CMIP5 设置了历史模拟实验,比较计划委员会已收集并发布四十多个 CMIP5 模式的不足和优势有助于模式的改进,也是预估未来气候变化的前提。中国亦对 CMIP5 模式的发展作出自己的贡献^[17]。近 10 年来,参与历次 CMIP 的

收稿日期:2018-07-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC1401403);国家自然科学基金资助项目(41475120)

模式对 ENSO 事件模拟和预测取得了较大进步。模式的物理参数化方案更加完善,水平和垂直分辨率更加精细。CMIP5 实验在 2012 年陆续完成,并发布模拟资料,同时学者们开始了针对 ENSO 现象对 CMIP5 模式的模拟性能和动力过程进行评估和研究。有研究指出,参与 CMIP5 的部分模式能够模拟出 ENSO 事件振幅不对称特征^[17]。模式模拟的基本气候态及季节变化与观测大体一致,模拟的 El Niño 现象也与观测大体一致^[18]。

基于目前的研究,对 ENSO 非对称性特征现象的研究较少,特别是 CMIP5 模式对 ENSO 非对称性特征模拟能力的评估。由于全球气候极端异常的加剧,对 ENSO 非对称特征的研究及全面评估新一代 CMIP 模式的模拟能力尤为重要。因此利用 HadISST 观测资料分析研究 ENSO 的非对称性特征,并采用 18 个 CMIP5 耦合模式的模拟结果评估模式对 ENSO 的模拟能力,以期模式的未来发展和误差订正提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据

研究采用参加 CMIP5 计划的 18 个全球海-气耦合模式对 20 世纪历史气候模拟(20C3M 情景)的输出结果,各个模式的基本信息见表 1。模式数据为全球表面温度,包括海洋、陆地、和海冰表面,时间跨度为 1850 年至 2005 年。观测资料使用的是英国 Hadley 气候预测和研究中心的 HadISST 海表面温度资料,观测数据仅为海表面温度,时间跨度为 1870 年至 2015 年,是分辨率为全球范围 360×180 的网格数据。由于采用的各模式及观测数据的分辨率不同,故使用线性插值的方法统一插值到 180×90 的网格上。重点评估 20 世纪即 1900–1999 年这 100 年的热带海洋海表温度,并对观测资料和模式实验的输出结果进行对比分析。

表 1 选取的 CMIP5 中 18 个全球气候模式基本情况说明

序号	模式名称	所属国家和研究单位	分辨率
1	BCC-CSM1-1	国家气候中心(中国)	128×64
2	CanESM2	加拿大气候模式与分析中心(加拿大)	128×64
3	CCSM4	国家环境预测中心/大气研究中心(美国)	288×192
4	CESM1-CAM5	Community Earth System Model Contributors(美国)	288×192
5	CNRM-CM5	CNRM(法国)	256×128
6	FGOALS_g2	中国科学院大气物理研究所和清华大学(中国)	128×60
7	FGOALS_s2	中国科学院大气物理研究所(中国)	128×108
8	GISS-E2-H	国家航空航天局(美国)	144×90
9	GISS-E2-R	国家航空航天局(美国)	144×90
10	HadCM3	国家环境预测中心/大气研究中心(美国)	96×73
11	INMCM4	Institute for Numerical Mathematics(俄罗斯)	180×120
12	IPSL-CM5A-LR	皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所(法国)	96×96
13	MIROC-ESM-CHEM	AORI/NIES/JAMSTE(日本)	256×128
14	MIROC5	AORI/NIES/JAMSTE(日本)	256×128
15	MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut for Meteorologie(德国)	192×96
16	MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut for Meteorologie(德国)	192×96
17	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute(日本)	320×160
18	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre(挪威)	144×96

注:分辨率为全球范围,经向网格点数×纬向网格点数

1.2 方法

1.2.1 合成分析

首先利用 HadISST 观测数据及 18 套 CMIP5 模式数据,选取研究的时间范围是 1900–1999 年共 100 年的逐月数据。Niño3.4 指数是先计算 Niño3.4 区(5°N~5°S, 170°W~120°W)的海表面温度距平值,然后在该区域范围内求区域平均值,即为 Niño3.4 指数。并求取 12、1、2 月月平均(即 DJF-mean) Niño3.4 作为

代表该年份的 Niño3.4 指数。Trenberth^[20]曾提出将 Niño3.4 区的海表温度大于 0.4℃作为 El Niño 发生的指标,而现在国际上一般采用大于 0.5℃作为 El Niño 发生的指标。因此采用正负 0.5℃作为区分 ENSO 事件发生的指标,并采用正负 1℃对 ENSO 事件的强弱进一步划分,即根据 Niño3.4 指数的大小将 ENSO 事件分为 5 类,分别为 Niño3.4 指数≥1 的强 El Niño 年份,0.5≤Niño3.4 指数<1 的弱 El Niño 年份,-0.5<Niño3.4 指数<0.5 的正常年份,-1<Niño3.4 指数

≤ -0.5 的弱 La Niña 年份, Niño 3.4 指数 ≤ -1 的强 La Niña 年份。

将已归类的异常事件(强\弱)进行合成分析,即在 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{W}$ 的热带太平洋海域,求各类事件海温距平值的时间平均态,并绘成各类事件的空间型态图,以表示 ENSO 各类事件的海表面温度异常分布。然后对模式和观测的空间型态图进行比较分析。同时从 CMIP5 中 18 个海气耦合模式中,根据各模式综合评级的排名采用二项式加权平均的方法计算出该 18 个模式的集合平均 MME。

同样求出 1901 年至 1999 年的 6、7、8 月月平均(即 JJA-mean) Niño 3.4, 得出 99 个 Niño 3.4 指数夏季平均的序列,求出该序列的标准差。然后去判断各类 ENSO 事件所发生的次年夏季平均的 Niño 指数与标准差的大小关系;对于 El Niño 事件,如果是大于标准差的一半,则表示该 El Niño 事件持续时间较长,是一个慢衰退,反之是一个快衰退;对于 La Niña 事件,如果是小于负标准差的一半时,则表示该 La Niña 事件持续时间较长,是一个慢衰退,反之是一个快衰退。然后分别对 El Niño 事件和 La Niña 事件的快衰退事件和慢衰退事件进行合成分析,以分析 ENSO 事件持续性特征。

1.2.2 泰勒图分析

所用到的统计量有如下几种:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

S 为均方根误差,又称标准误差,表示模式值与观测值的平方和年数 n 比值的平方根,其中 X_i 为单个的模式值, \bar{X} 为观测值。用来表示各模式模拟型态与 HadISST 的相似性(模式的模拟能力与均方根误差值成反比),即用来衡量模式值与观测值之间的偏离程度。

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

S_x 为均方差,又称标准差,表示数据 X_i 与平均值 \bar{X} 的平均状况。它衡量资料围绕平均值的平均变化幅度,即物理量自身的离散程度(物理量的变率)。而对于 Niño3.4 指数序列的均方差则用来表征模式对中心振幅的模拟能力,即用来衡量序列本身的偏离程度。

利用泰勒图评估模式对热带太平洋海温的模拟能力^[21-22],采用泰勒图中提供的观测场和模拟场之间的相关系数、两者的标准差之比及其去中心化的均方根误差(RMES)。相关系数可以表示 CMIP5 的模拟场与 HadISST 的观测场之间的空间分布相似程度,均方根误差可用来表示模式模拟结果的强度,而标准差之比可用来表示模式模拟的海温空间均匀分布程度与观测之间的差异。并引用一个综合模拟指数 M ^[24],进而判断泰勒的评估指标的整体上的一致性,从而对模式的

综合模拟能力进行排名。两个场之间的空间相关系数越高,均方根误差越小,且模式与观测标准差之比越接近于 1,说明模式的模拟能力越好。

$$M = 1 - \frac{1}{1 \times n \times m} \sum_{i=1}^n Ri$$

式中, m 为选取 CMIP5 模式个数, $m=19$ (18 个耦合模式+集合平均 MME); n 为选取上述泰勒图的评估指标个数, $n=3$; Ri 为各模式在 3 个评估模式与观测值的统计分析指标的排名,按模式的模拟能力从强到弱分别用 1~19 排名,模拟能力最强的为 1。所以, M 越接近 1,说明模式的综合模拟能力越强,并对综合模拟指数进行排名。

根据 NOAA/CPC(美国国家海洋和大气管理局/美国政府气象预测中心)将太平洋海温依其对于显著年际变异所区分的 4 个指标海域,如图 1^[24] 所示。分为 Niño1+2 ($90^{\circ}\text{W} \sim 80^{\circ}\text{W}$, $0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{S}$)、Niño3 ($150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$)、Niño4 ($160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$) 与 Niño3.4 ($170^{\circ}\text{W} \sim 120^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$),利用泰勒图分析分别对热带太平洋洋面以及这 4 个指标海域进行模式模拟能力分析,最后结合各模式对这五个海域的综合模拟指数 M 的排名情况分析模式的模拟能力。

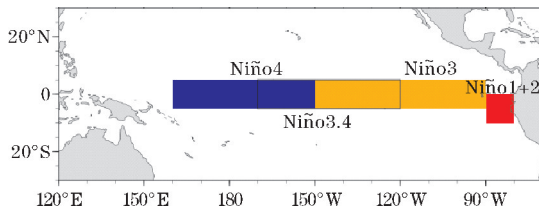


图1 太平洋海温显著年际变异的 4 个指标海域

2 结果分析

2.1 海温平均气候特征模拟

2.1.1 HadISST 与模式的集合平均 MME 的海温差值分布

选取 $120^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 的热带太平洋区域,研究观测场 HadISST(图 2a)、18 个模式平均场 MME(图 2b)和两者的偏差场(图 2c)在该区域的平均态分布(各个模式与观测场 HadISST 海温偏差分布图略)。

选取的 18 个全球气候模式大多数都可较好地模拟出热带海洋上的海表温度特征。比较图 2(a)和图 2(b),可看出多模式集合平均对赤道附近的海温模拟较差,对太平洋南北两侧的海温模拟较好。且由于多模式的集合平均,多模式集合平均的中心区温度仅达到 28°C 且大于 28°C 的面积缩小,而观测的热带平均海温的中心区温度可达 29°C 。图 2(c)为多模式集合平

均与观测场的偏差,是由 100 年月海温偏差的平均求来,从图中赤道太平洋大部分海域尤其是中东部海域都为冷偏差,表明多模式集合平均对海温的模拟比观测海温都较小,这与我们所熟知的耦合模式存在“过度冷舌误差”的系统性偏差是一致的。此外最大的误差中心不在赤道附近,而在太平洋北部,偏差达 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。赤道附近的海温模拟偏差达 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,太平洋南部的海温模拟偏差仅在 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。对于各个模式的模拟情况,各模式误差都主要集中在赤道附近和太平洋北部,偏差值相差不大,最大偏差都集中在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,个别模式的偏差相差较大,偏差值可达 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,如有 HadCM3、MIROC5、GISS-E2-H。选取的 18 个模式中 CCSM4、BCC-CSM1-1 模拟情况较好,大部分区域的偏差控制在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最大偏差也不低于 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

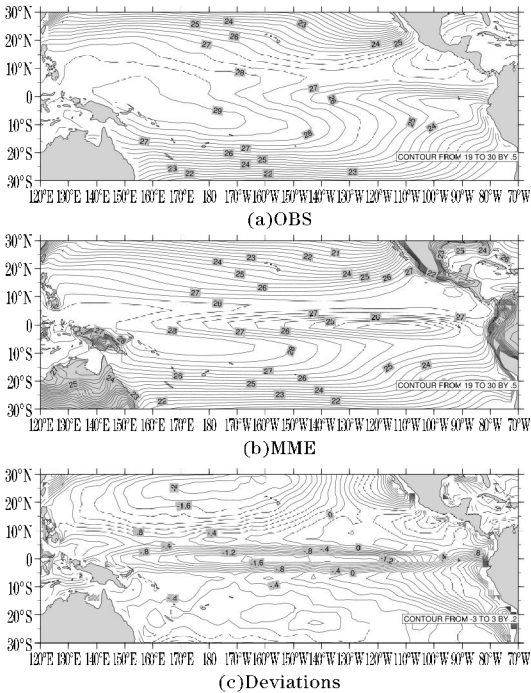


图 2 热带太平洋海温分布状况图

2.1.2 模式与观测值的统计分析

根据泰勒图的 3 个评估指标以及综合模拟指数,

分析评估各模式对热带太平洋洋面 ($30\text{ }^{\circ}\text{S} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{N}$, $120\text{ }^{\circ}\text{E} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{W}$) 海温模拟能力。从图 3 可以看出,各个模式都能较好地模拟出热带太平洋海温的平均分布状况,模式与观测场的空间相关系数都大于 0.9,各模式的相关系数相差不大,都在 $0.92 \sim 0.97$ 内,说明 CMIP5 模式能够很好地模拟热带太平洋海温的整体空间分布。其中集合平均 MME 的相关系数最高 (0.9707),MRI-CGCM3 的相关系数最低 (0.9206)。CMIP5 模式中只有 MIROC-ESM-CHEM 模式对热带海温空间标准差的模拟小于观测值 (0.9728),其标准差之比也是最接近 1 的模式,而对海温异常状况的模拟最差的是 IPSL-CM5A-LR,标准差之比是。

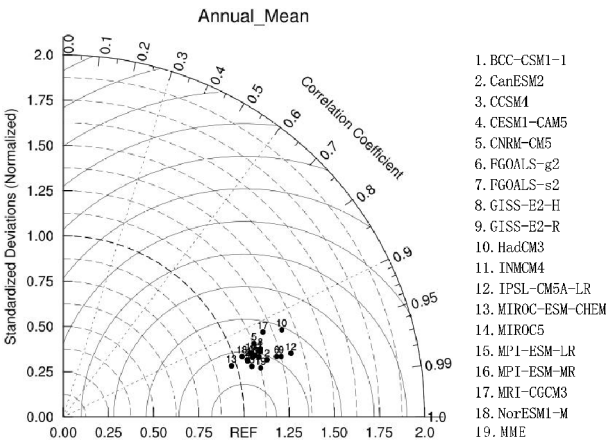


图 3 CMIP5 模式模拟热带太平洋海表温度气候平均场 (20 世纪百年平均,下同) 分布相对于观测场的泰勒图

均方根误差越小,综合模拟指数会越接近于 1,表明模式的模拟能力也越好。从表 2 可以看出均方根误差和综合模拟指数也有较好的一致性,CCSM4 模式的模拟能力最好,其 RMSE 数值为 0.682,对应的 M 数值为 0.860。集合平均 MME, CESM1-CAM5、FGOALS-s2 这 3 个模式都对应 RMSE 值较小, M 值较大。模拟能力最差的是 HadCM3 模式, RMSE 数值为 1.346, M 数值 0.053。

表 2 基于综合模拟指数及均方根误差的 CMIP5 模式对热带太平洋海表温度气候平均场模拟评估

模式	RMSE	M	模式	RMSE	M
BCC-CSM1-1	0.951	0.421	HadCM3	1.346	0.053
CanESM2	0.902	0.544	INMCM4	0.893	0.544
CCSM4	0.682	0.860	IPSL-CM5A-LR	1.418	0.263
CESM1-CAM5	0.877	0.737	MIROC-ESM-CHEM	1.243	0.579
CNRM-CM5	1.144	0.298	MIROC5	1.102	0.421
FGOALS_g2	1.260	0.316	MPI-ESM-LR	1.062	0.456
FGOALS_s2	0.848	0.719	MPI-ESM-MR	0.885	0.597
GISS-E2-H	0.951	0.316	MRI-CGCM3	1.177	0.140
GISS-E2-R	0.951	0.491	NorESM1-M	1.171	0.474
MME	0.871	0.772			

由于热带太平洋显著的海温异常中心主要集中在 Niño 3.4 区,所以同样使用泰勒图的 3 个评估指标以及综合模拟指数,来分析评估各模式对 Niño 3.4 区海温模拟能力。从图 4 可以看出各模式对 Niño 3.4 区海温的模拟情况并不理想,模式与观测场的空间相关系数只有集合平均 MME 大于 0.5,各模式的相关系数都主要集中在 0.2~0.5,其中 NorESM1-M 模式的相关系数最差(0.1643),而相关系数最好的模式是 MPI-ESM-LR(0.4835)。说明 CMIP5 模式模拟热带太平洋 Niño 3.4 区海温的整体空间分布能力较差,这与模式的系统性过度冷舌误差有关。CMIP5 模式中 GISS-E2-H 和 GISS-E2-R 模式对热带海温空间标准差的模拟小于观测值数值分别为 0.9036、0.8952,其中 GISS-E2-H 标准差之比也是最接近 1 的模式。其余模式的标准差之比主要在 1.3~1.8,表明模式对 Niño 3.4 海温异常程度的模拟能力较差,模拟最差的是 INMCM4 标准差之比是 1.8251。

从表 3 可以看出,均方根误差和综合模拟指数也

有较好的一致性,模式的集合平均 MME 模拟能力最好,其 RMSE 数值为 1.168,对应的 M 数值为 0.947。CCSM4、FGOALS-g2、GISS-E2-H 3 个模式都对应 RMSE 值较小, M 值较大。模拟能力最差的是 INMCM4 模式, RMSE 数值为 1.882, M 数值 0.193。

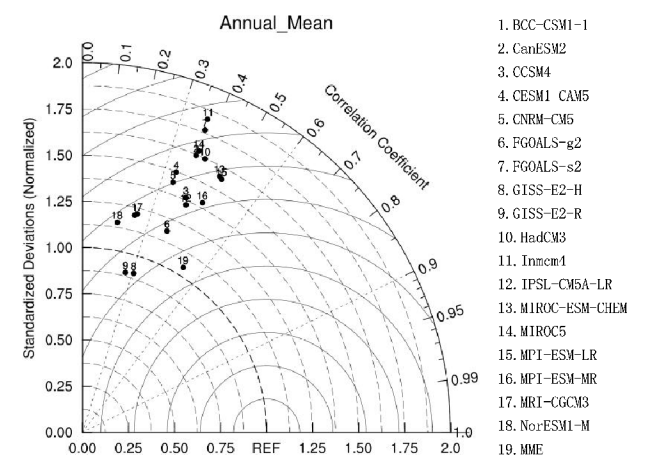


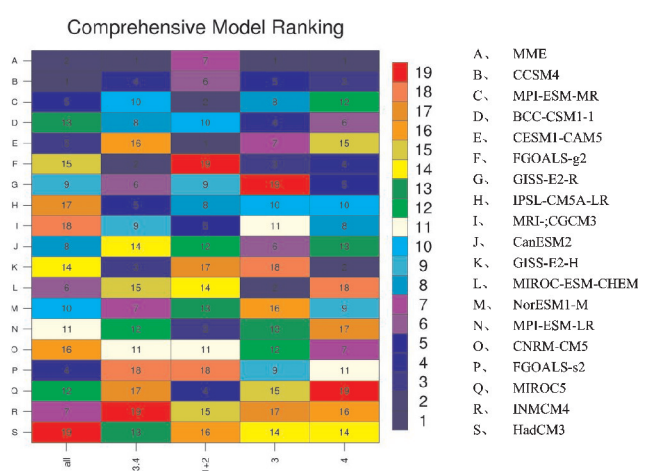
图 4 CMIP5 模式模拟 Niño3.4 区海表温度气候平均场分布相对于观测场的泰勒图

表 3 基于综合模拟指数及均方根误差的 CMIP5 模式对 Niño3.4 海表温度气候平均场模拟评估

模式	RMSE	M	模式	RMSE	M
BCC-CSM1-1	1.414	0.491	HadCM3	1.619	0.421
CanESM2	1.610	0.386	INMCM4	1.882	0.193
CCSM4	1.278	0.649	IPSL-CM5A-LR	1.770	0.509
CESM1-CAM5	1.693	0.333	MIROC-ESM-CHEM	2.237	0.368
CNRM-CM5	1.491	0.439	MIROC5	1.730	0.298
FGOALS_g2	1.245	0.719	MPI-ESM-LR	2.142	0.421
FGOALS_s2	1.704	0.246	MPI-ESM-MR	1.935	0.456
GISS-E2-H	1.241	0.667	MRI-CGCM3	1.438	0.456
GISS-E2-R	1.499	0.509	NorESM1-M	1.436	0.491
MME	1.168	0.947			

同样根据泰勒图的 3 个评估指标以及综合模拟指数,对 Niño1+2 区、Niño3 区和 Niño4 区进行评估。在此仅对这 3 个区域的综合模拟指数 M 排名结果进行分析,另外结合热带太平洋和 Niño 3.4 区的综合模拟指数的排名结果。图 5 给出了 18 个模式+集合模式 MME 对热带太平洋及评估太平洋海温显著异常的 4 个指标海域的海温气候平均场模拟能力的综合排名,总体来评估模式模拟性能,其对每个评估指标都有较好的再现能力,从图 5 也可看出,综合模拟能力最强的模式的集合平均 MME,多模式集合平均的误差均小于单个模式的误差,主要是因为各模式的误差有正负之分,各模式取平均后可以抵消一部分误差。由此可得出,多模式的集合预报可以有效改善模式的模拟及预测的结果。而对于单个模式来看,模拟能力最强的前 5 个模式分别为:CCSM4、MPI-ESM-MR、BCC-CSM1-1、CESM1-CAM5、FGOALS-g2。模拟能力最差的模式为

HadCM3。



注: all、3.4、1+2、3、4 分别表示对热带太平洋、Niño3.4 区、Niño1+2 区、Niño3 区、Niño4 区

图 5 基于综合模拟指标的模式模拟能力综合排名的色块图

2.2 ENSO 的非对称性特征分析

2.2.1 ENSO 的强度及空间分布特征

根据 ENSO 事件的归类标准,表 4 给出 HadISST 观测资料的 ENSO 异常事件的归类。其中强 El Niño 事件发生的年份有 14 个,弱 El Niño 事件发生的年份有 14 个,而 La Niña 强弱事件的年份分别是 11 个和 18 个。

表 4 观测资料 HadISST 的 ENSO 事件年份归类	
事件	年份
强 El Niño 年 (Niño3.4 指数 ≥ 1)	1902、1911、1918、1925、1930、1940、1957、1965、1972、1982、1986、1991、1994、1997
弱 El Niño 年 ($0.5 \leq$ Niño3.4 指数 <1)	1900、1904、1905、1913、1914、1919、1923、1939、1941、1963、1968、1976、1977、1987 1901、1907、1912、1915、1920、1921、1926、1927、1928、1929、1931、1932、1934、1935、1936、1937、1943、1944、1945、1946、1947、1948、1951、1952、1953、1956、1958、1959、1960、1961、1962、1966、1969、1978、1979、1980、1981、1989、1990、1992、1993、1996
正常年 ($-0.5 <$ Niño3.4 指数 <0.5)	1903、1906、1908、1909、1910、1917、1922、1924、1938、1950、1954、1964、1967、1971、1974、1983、1985、1995
弱 La Niña 年 ($-1 <$ Niño3.4 指数 ≤ -0.5)	1916、1933、1942、1949、1955、1970、1973、1975、1984、1988、1998
强 La Niña 年 (Niño3.4 指数 ≤ -1)	

将所归类的事件(强\弱)进行合成分析,绘成各类别的空间形态图,如图 6 给出了观测资料 HadISST 的海表温度距平值在 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{W}$ 空间分布状况来呈现 ENSO 各类事件的海温异常状况。可以看出,El Niño 达到成熟阶段时,即强 El Niño 年份(图 6a),赤道东太平洋海表温度暖异常中心主要出现在 Niño 3.4 区,强度可达 $+1.8^{\circ}\text{C}$,分别向南北递减,到纬度 20° 附近转为冷异常。太平洋南北两侧海温为冷异常且关于赤道对称,而在太平洋西北部,即日本海附近为暖异常,异常值都较小。而弱的 El Niño 事件(图 6b)与强 El Niño 事件相比,异常中心的强度下降到 $+0.8^{\circ}\text{C}$,暖异常区域分布除了在西北太平洋上有所收缩,其他区域大致相同。而 La Nina 的强盛时期(图 6c),冷异常中心同样出现在 Niño 3.4 区,强度可达 -1.6°C 。相比与强 El Niño,强 La Niña 冷异常中心强度的绝对值比强 El Niño 事件强度小 0.2°C ,但分布区域较大,冷异常中心向南北两侧扩展,到纬度 30° 附近转为暖异常。弱 La Niña 事件冷异常中心强度为 -0.6°C (图 6d),其冷异常中心强度的绝对值比弱 El Niño 事件强度同样小 0.2°C ,但冷异常区域明显比弱 El Niño 的暖异常区域大。故海温空间分布异常的非对称特征主要体现在 La Niña 冷异常区域比 El Niño 暖异常区域大,而海温强度异常的非对称特征主要体现在 El Niño 的暖异常强度强与 La Niña 冷异常的强度。

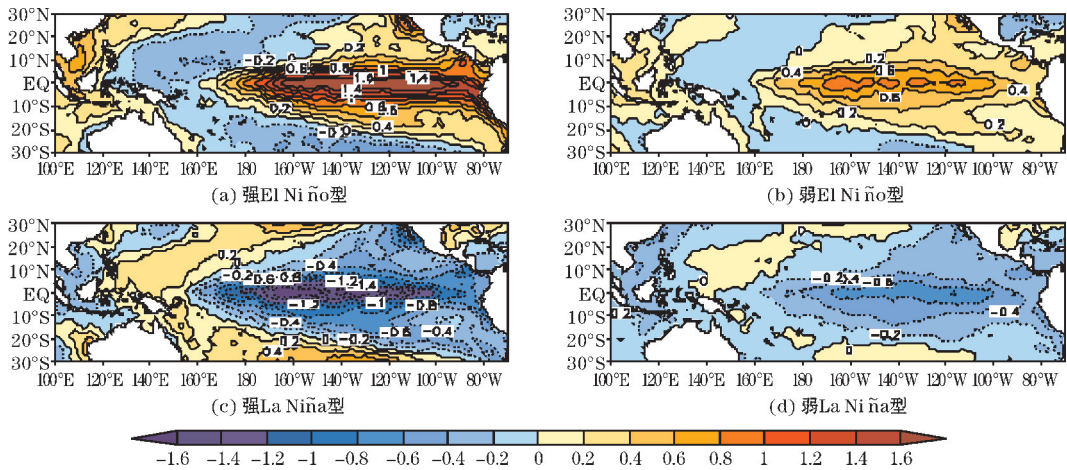


图 6 HadISST 的 ENSO 各类事件的海表面温度距平值分布图

对于各个模式对 ENSO 各类事件海温空间分布图的模拟,由于模式模拟出的各类事件所发生年份与实际发生的年份并不一致,多模式集合平均出现正异常和负异常相抵消情况,这样得出来的多模式集合平均模拟不出 ENSO 的强事件,仅有 ENSO 两类弱事件(如图 7),而且事件发生的年份明显偏少。弱 El Niño 事

件暖异常强度在 $+0.8^{\circ}\text{C}$ (图 7b),同样弱 La Niña 事件冷异常中心强度在 -0.8°C (图 7a),海温异常的空间分布与 HadISST 的海温异常的空间分布大致相同。故多模式集合平均 MME 对太平洋海温异常分布模拟,特别是对中心强度模拟的效果很差,而海温异常的空间分布状况模拟较好。

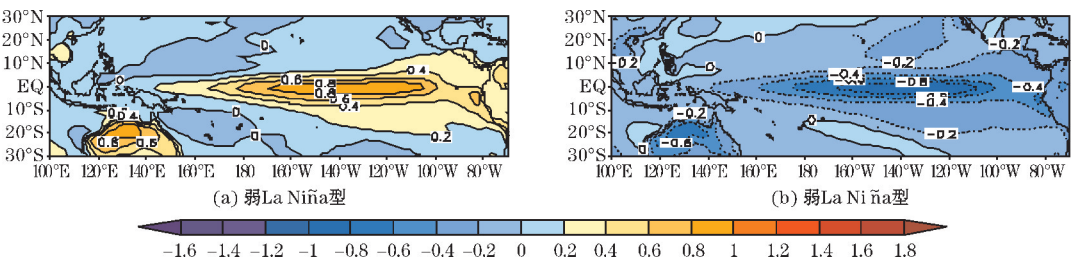


图 7 多模式集合平均 MME 的 ENSO 各类事件的海表面温度异常分布图

CMIP5 模式对 ENSO 各类事件海表温度强度异常状况的模拟效果较好(图略)。大部分模式模拟的强度与 HadISST 的强度相差 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而 CNRM-CM5、GISS-E2-H、MIROC5 这 3 个模式模拟的强 El Niño 强度偏强,强度在 $+2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。各模式对 La Niña 异常强度的模拟效果较好。总体上,模式对强事件海温异常空间分布的模拟效果较好,异常中心稍微有向西扩展。而对弱事件海温异常的空间分布的模拟效果较差,对冷暖异常的中心区域能够模拟出来,但海温异常分布关于赤道对称的特征模拟效果不理想。

2.2.2 ENSO 的持续性特征

根据其他学者关于 ENSO 事件峰值特征的研究结果,以及观测资料 HadISST 分析得知,El Niño 和 La Niña 的峰值一般出现在冬季^[25]。对 ENSO 各类事件的持续性特征分析,根据 ENSO 衰退快慢的判断依据,对其各类事件衰退快慢进行划分,El Niño 快衰退事件次数为 16 次,慢衰退事件次数为 12。La Niña 快衰退事件次数为 23 次,慢衰退事件次数为 6 次。可看出 La Niña 的快衰退事件明显多于慢衰退事件,而 El Niño 的衰退快慢事件的次数相差并不大。说明 ENSO

持续性的非对称特征:La Niña 的持续时间性较短,El Niño 的持续时间性较长。为了清晰直观地的比较 ENSO 消退快慢与海温异常变化强弱之间的关系,对划分后各类事件衰退事件进行合成分析,见图 8。观测数据下的 ENSO 事件,可以看到衰退快的 El Niño 事件(图 8a)和衰退慢的 El Niño 事件(图 8b)海温暖异常中心的强度都达 $+1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;衰退慢的 La Niña 事件(图 8d)海温冷异常中心强度($-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)大于衰退快的 La Niña 事件(图 8c)海温冷异常中心强度($-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)。综上所述,ENSO 衰退的快慢与海温异常变化的强弱无明显的线性关系。

CMIP5 的大部分模式都能较好模拟出 ENSO 事件的持续性特征(图略)。个别模式模拟的结果不理想,其中 INMCM4、MIROC-ESM-CHEM、MIROC5、MPI-ESM-LR 模式模拟出的 ENSO 慢衰退事件次数多于快衰退次数。但 CMIP5 对 ENSO 衰退快慢事件的异常强度模拟较差,模式模拟的强度偏强,而且各模式对 ENSO 衰退的快慢与海温异常中心强度的对应关系的模拟与观测的相差较大,表明模式的模拟能力还有待提高。

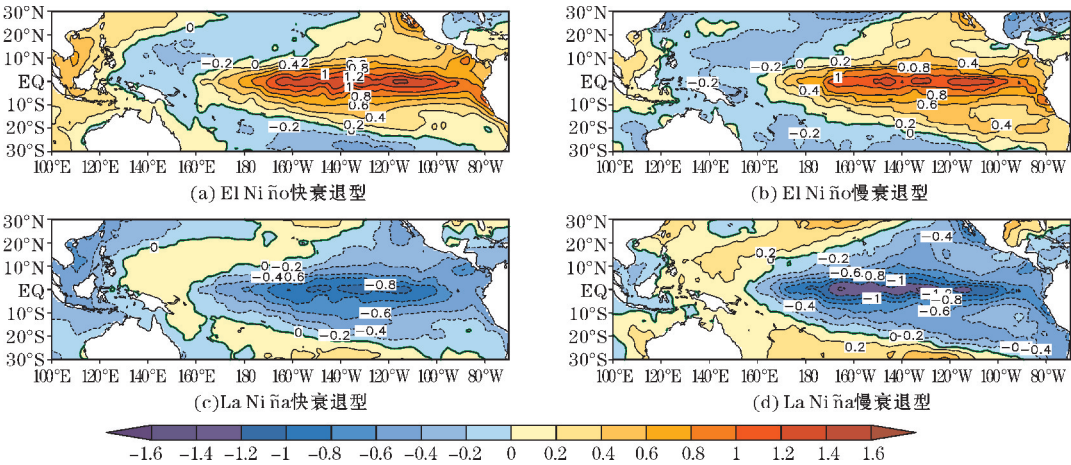


图 8 HadISST 的 ENSO 各类衰退事件的海表面温度距平值分布图

3 结论与讨论

通过 CMIP5 耦合模式对 1900–1999 年热带太平

洋的海表温度特征模拟结果的分析,可以看出 18 个模式基本上能够模拟出 ENSO 的非对称特征。但各个模式对这些特征模拟效果存在差异,在某些特征上,不同模式的模拟效果不一样。同时对于某些特征的模拟,

MME 的模拟效果会更好。但总体上 CMIP 模式是在不断地完善,CMIP5 对 ENSO 非对称性特征的模拟还是有很大的改进。

(1)从泰勒图对 CMIP5 多模式的统计分析中得出,模式对热带太平洋整体海温状况的模拟较好,各模式与观测场的相关系数都大于 0.92,而对 ENSO 的 4 个指标海域海温状况的模拟效果不理想。对各模式的综合模拟能力的分析中,MME 综合模拟能力为最优。CMIP5 模式模拟能力最强的前 5 个分别为:CCSM4、MPI-ESM-MR、BCC-CSM1-1、CESM1-CAM5、FGOALS-g2。

(2)ENSO 海温异常的强度非对称性特征主要表现在 El Niño 强于 La Niña。异常中心区域主要出现在 Niño 3.4 区。在模式中 MME 只能模拟出 ENSO 的两类弱事件,对海温异常中心强度的模拟能力差。各个模式对 ENSO 海温异常强度的模拟较好,大部分模式模拟的强度与观测的所相差在正负 0.3℃ 左右。

(3)ENSO 海温空间分布异常的非对称性特征主要表现在 La Niña 冷异常区域比 El Niño 暖异常区域大,其中 La Niña 的冷异常在南北纬 30°,而 El Niño 的暖异常在南北纬 20°之间。各个模式对 ENSO 强事件对空间分布的模拟较理想,与观测基本一致,但对弱事件的异常中心区域关于赤道对称特征的模拟效果较差。

(4)对 ENSO 各类事件的持续性的非对称性特征分析,La Niña 的快衰退事件明显多于慢衰退事件,而 El Niño 的衰退快慢事件的次数相差较小。说明 La Niña 的持续性较短,El Niño 的持续性较长。CMIP5 的大部分模式都能较好模拟出 ENSO 事件的持续性特征。但对 ENSO 衰退快慢事件的异常中心强度的模拟效果较差模式的模拟能力还有待提高。

系统评估了 CMIP5 耦合模式对 ENSO 非对称性特征的模拟能力。但对其非对称性特征的成因尚未研究。对 ENSO 的其他变化特征也尚未涉及,例如 ENSO 的周期性、峰值特征等。此外,基于各个模式对 ENSO 的综合模拟排名采用二项式权重赋予每个模式不同的权重而得来的集合平均 MME。其中 MME 对 ENSO 特征的模拟效果并不理想,在权重方案的选取仍需要进一步的改进,以优化模式集合平均的模拟结果。

致谢:感谢广东海洋大学科研启动经费项目(R17056)对本文的资助

参考文献:

- [1] Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(2):111–116.
- [2] Cai W, Santoso A, Wang G, et al. ENSO and greenhouse warming[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(9).
- [3] Cai W, Wang G, Santoso A, et al. Increased frequency of extreme La Nina events under greenhouse warming[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(2):132–137.
- [4] 胡增臻,王绍武. 与 ENSO 现象有关的全球灾害性天气气候现象[J]. *灾害学*, 1990(1):76–79.
- [5] 王小玲,宋文玲. ENSO 与登陆我国热带气旋的关系研究 *热带气象学报*[J]. 2009, 25(5):576–580.
- [6] 李威,翟盘茂. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(6):336–342.
- [7] 宋迅殊. ENSO 事件非对称性成因研究[J]. *海洋学研究*, 2013(1):35–44.
- [8] An S I, Jin F F. Nonlinearity and Asymmetry of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(11):2033–2038.
- [9] 徐康. 东部和中部型 ENSO 模态及其对中国降水影响的差异[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [10] Choi K Y, Vecchi G A, Wittenberg A T. ENSO Transition, Duration, and Amplitude Asymmetries: Role of the Nonlinear Wind Stress Coupling in a Conceptual Model[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(23):9462–9476.
- [11] Kim S T, Yu J Y. The two types of ENSO in CMIP5 models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(11):221–228.
- [12] 王澄海,吴永萍,崔洋. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(5):461–468.
- [13] 周天军,邹立维,吴波,等. 中国地球气候系统模式研究进展:CMIP 计划实施近 20 年回顾[J]. *气象学报*, 2014, 72(5):892–907.
- [14] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4):485–498.
- [15] Bellenger H, Guilyardi E, Leloup J, et al. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to

- CMIP5[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7-8): 1999-2018.
- [16] 郭彦,董文杰,任福民,等. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 181-186.
- [17] 周天军,陈晓龙,董璐,等. Chinese Contribution to CMIP5: An Overview of Five Chinese Models' Performances[J]. *气象学报*(英文版), 2014, 28(4): 481-509.
- [18] Rao J, Ren R C. Statistical Characteristics of ENSO Events in CMIP5 Models[J]. *大气和海洋科学快报*(Atmospheric and Oceanic Science Letters), 2014, 7(6): 546-552.
- [19] 张芳,董敏,吴统文. CMIP5 模式对 ENSO 现象的模拟能力评估[J]. *气象学报*, 2014(1): 30-48.
- [20] Trenberth K E. The definition of El Niño[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(12): 2771-2777.
- [21] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [22] Gleckler P J, Taylor K E, Doutriaux C. Performance metrics for climate models[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D6): 102-124.
- [23] 蒋帅,江志红,李伟,等. CMIP5 模式对中国极端气温及其变化趋势的模拟评估[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(1): 11-24.
- [24] 池建军,骆永军. Ni(n)o 综合区对研究 ENSO 的效果评估[J]. *气象研究与应用*, 2009, 30(1): 8-11.
- [25] 曹璐. 两类 ENSO 事件的监测及大气的响应[D]. 南京: 南京大学, 2011.

Evaluation and Asymmetry Feature Analysis of ENSO Events in CMIP5 Multi-models

ZHANG KaiFeng^{1,2}, CAO Ning², ZHANG Min³

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Guangdong Ocean University, Guangdong 524088, China; 3. Guangdong Meteorological Exploration Data Center, Guangdong 510110, China)

Abstract: In order to evaluate the CMIP5 (WCRP Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) global climate model for ENSO asymmetry feature simulation capabilities. The model and observation data were compared and analyzed by using Taylor's diagram and synthetic analysis. It can be concluded that the CMIP5 model has a good simulation effect on the overall sea surface temperature of the tropical Pacific Ocean, and has a poor simulation effect on the sea temperature conditions of the four sea areas with significant interannual variability of the Pacific SST. Among them, the multi-mode ensemble average has the best comprehensive simulation capability, followed by CCSM4, and HadCM3 has the worst comprehensive simulation capability. The asymmetrical characteristics of ENSO temperature anomalous intensity is characterized by El Niño being stronger than La Niña. The simulation effect of the model on the anomaly center intensity of the SST is ideal, and the simulated intensity differs from the observed intensity by about 0.3 °C. ENSO's asymmetry characteristics of spatial distribution of SST anomaly is characterized by the fact that the La Niña cold anomaly region is larger than the El Niño warm anomaly region. The spatial distribution simulation of the ENSO strong event is ideal, which is consistent with the observation. However, the symmetry of the equator in the SST anomaly region cannot be simulated well for the weak event. The asymmetry of the ENSO SST anomaly is mainly characterized by the short duration of La Niña and the longer duration of El Niño. The model can simulate better about the persistence characteristics of ENSO, but the simulation effect on the center intensity of the sea temperature anomaly in the ENSO decay event is not ideal.

Keywords: atmospheric physics and atmospheric environment; climate simulation; ENSO; CMIP5 model