

陈红. 2019. CMIP5 耦合模式对太平洋年代际振荡的模拟与预估 [J]. 大气科学, 43(4): 783-795. Chen Hong. 2019. Simulation and projection of the Pacific Decadal Oscillation based on CMIP5 coupled models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 783-795. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1809.18142

CMIP5 耦合模式对太平洋年代际振荡的模拟与预估

陈红

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 40 个模式的模拟资料 and 分类集合的方法, 评估了耦合模式对 20 世纪太平洋年代际振荡 (PDO) 特征的模拟能力。结果表明, CMIP5 多数模式对 PDO 周期有着较好的刻画能力, 能模拟出 PDO 的年代际变化周期。模式对 PDO 模态空间特征的模拟能力存在较大差异, 小部分模式模拟效果较差。进一步的分析表明, 对 PDO 模态模拟较好的第 1 类模式, 能较好地再现热带太平洋与北太平洋海表温度异常 (SSTA) 年代际变化间的关系, 而且热带太平洋 SSTA 通过大气遥相关影响北太平洋海表温度的过程也模拟的较成功。对 PDO 模态模拟差的模式, 不能合理模拟出热带太平洋 SSTA 对北太平洋海表温度影响的遥相关过程。以上研究也证实了热带太平洋地区海表温度的年代际变率对北太平洋海表温度年代际变率的重要影响, 热带太平洋 SSTA 对北太平洋 SSTA 的影响是通过大气遥相关实现的。利用 CMIP5 中等排放情景模拟结果, 分析了第 1 类模式预估的北太平洋年代际变率的特征, 发现 21 世纪北太平洋年代际变率的主要模态为一致的正异常分布且呈现明显的上升趋势, 第二模态则表现为类似于 20 世纪典型 PDO 的马蹄型 SSTA 分布。

关键词 太平洋年代际振荡(PDO) 热带太平洋 遥相关 预估

文章编号 1006-9895(2019)04-0783-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1809.18142

Simulation and Projection of the Pacific Decadal Oscillation Based on CMIP5 Coupled Models

CHEN Hong

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Historical simulation outputs from the Coupled Model Intercomparison Program Phase 5 (CMIP5) climate models with a categorization method were used in this study to evaluate the performance of coupled models in simulating the Pacific Decadal Oscillation (PDO). While several of the 40 models under examination failed to reproduce the characteristics of PDO pattern, the majority of the models can reproduce the interdecadal cycle of PDO well. The good performance of the category-1 models in simulating the PDO pattern can be attributed to the relationship of the SSTA (sea surface temperature anomaly) between tropical Pacific and North Pacific being captured by these models. Further, the impact of the decadal SST variation in the tropic Pacific on the SST variation in the North Pacific via atmospheric teleconnection was reproduced using these models. In contrast, the models with poor simulation for the PDO pattern failed to reproduce the tropics-extratropics linkage in the SST anomalies that was induced by atmospheric

收稿日期 2018-03-22; **网络预出版日期** 2018-09-05

作者简介 陈红, 女, 1972 年出生, 副研究员, 从事气候预测和可预报性研究。E-mail: chh@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA20060501, 国家自然科学基金面上项目 41575080

Found by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20060501), General Program of National Natural Science Foundation of China (Grant 41575080)

teleconnection. This result indicates the importance of the decadal SST variation in the Tropic Pacific for the formation of PDO. Under RCP4.5 (Representation Concentration Pathway Scenarios 4.5), it is suggested that the first EOF (empirical orthogonal function) of SST variability over the North Pacific for the 21st century is a uniform positive pattern with a corresponding time series indicating an upward trend. Meanwhile, the second leading pattern of the 21st-century EOF analyses shows the spatial variability of the PDO dipole pattern.

Keywords PDO (Pacific Decadal Oscillation), Tropic Pacific, Teleconnection, Projection

1 引言

年代际变化是短期气候变化的主要背景。20世纪70年代中后期北太平洋海气系统出现了一次显著的年代际突变现象,在海洋方面,热带中东太平洋海表温度(SST)出现年代际异常增暖,而在北太平洋中西部SST异常变冷,阿拉斯加湾及北美西岸SST却增加。对应着北太平洋SST的这种异常变化型,大气则表现为北太平洋地区海平面气压和500 hPa高度场明显降低,阿留申低压异常加深、东移并偏南。类似于20世纪70年代中后期的这种突变也同样发生在20世纪20和40年代,这表明北太平洋存在着年代际振荡现象, Mantua et al. (1997)把这种太平洋年代际振荡现象称为PDO (Pacific Decadal Oscillation)。

PDO作为年代际时间尺度上的气候变率强信号对东亚大气环流和中国气候年代际变化有直接影响。东亚夏季风具有显著的年代际变化,其中最为显著的是发生在1970年代末的年代际衰减,其主要特征表现为夏季西南季风环流的减弱和中国东部雨型的变化(Wang, 2001)。相关研究认为这次年代际变化与太平洋年代际振荡(PDO)的位相转换有关,PDO的位相转变是造成东亚夏季风年代际变化的主要原因(杨修群等, 2004; 张庆云等, 2007; 陈红和薛峰, 2013)。PDO还是年际变率的重要背景,会对与ENSO (El Niño-Southern Oscillation)有关的年际气候变率可能具有重要的调制作用,可导致年际ENSO和中国夏季年际气候异常关系的不稳定性(朱益民和杨修群, 2003)。由于PDO对东亚气候年代际变化的重要影响,其在模式中预测的准确性,将直接关系到东亚气候年代际变化的预测能力,因此对其在模式中的模拟能力如何有必要进行全面评估。关于PDO特征的模拟评估研究目前还较少。顾薇和李崇银(2010)分析了CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Program 3)耦合模式对PDO年代际变化的模拟

能力。

关于PDO的形成机制目前有很多研究,从其生成源地主要可分为三类:一是热带地区的年代际变化影响,热带年代际变率通过大气遥相关影响北太平洋SST,从而产生PDO (Graham, 1994; Graham et al., 1994; Miller et al., 1994; Lau and Nath, 1996)。二是源于中纬度海气耦合系统内部。中纬度地区局地的海气相互作用可以产生年代际变化,而不需要热带或其他地区的影响(Latif and Barnett, 1994, 1996; Zhong et al., 2008; Zhong and Liu, 2009; Zhang and Delworth, 2015)。第三类观点认为,热带与中纬度之间通过海洋和大气遥相关的相互作用可以产生PDO (Gu and Philander, 1997; Lysne et al., 1997; Jin et al., 2001)。目前关于PDO的形成机制还尚未定论,热带地区海表温度异常的年代际变化对PDO的影响也需要进一步的证实。

目前已对外发布的CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Program 5)耦合模式,较之前CMIP3模式有了较大的改进,情景试验设计也更加合理,代表了当前国际主要先进模式的最新版本。已有不少研究利用CMIP5多模式模拟结果进行了大气环流和涛动等气候特征的模拟检验与预估,包括对东亚夏季风、东亚冬季风、阿留申低压等的模拟检验与估计等(金晨曦和周天军, 2014; Feng et al., 2014; 李恺霖等, 2016)。本文拟将利用CMIP5多个耦合模式模拟结果,考察现有耦合模式对PDO特征的模拟能力;然后通过分类集合方法研究不同类的模式集合对PDO模态模拟的差异及这种差异产生的可能原因。这里主要从考察模式对热带-热带外联系的模拟能力出发,揭示热带SST对PDO的作用;本文最后对未来PDO的特征进行了简单的预估。本文的研究将有助于进一步深化了解气候模式对PDO的模拟能力及PDO的形成机制,并为模式的改进和完善及东亚气候的年代际变化预估提供依据。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料包括: 大气环流资料为 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast) 提供的 1958~1999 年月平均 EAR40 再分析资料, 资料的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Uppala et al., 2005); 观测海表温度资料为 NOAA 重建的长时间序列海表温度资料 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.html>[2015-07-01]), 分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$; 海平面气压场资料为 Hadley 中心提供的 20 世纪百年资料 (Allan and Ansell, 2006); 长波辐射资料 (OLR) 资料为 NOAA 提供的 1975 年开始的插值资料 (Liebmann and Smith, 1996)。

本文采用的模式资料来自耦合模式比较计划 CMIP5 的 40 个耦合模式对 20 世纪历史气候模拟试验的模拟结果和中排放情景 (RCP45) 预估结果, 选取的气象要素包括大气环流场及海表温度场。历史模拟试验中在 1850~2005 年间随时间变化的外强迫场包括太阳活动、温室气体、气溶胶、火山活动和臭氧, 强迫数据均采用 CMIP5 建议的统一资料。RCP 试验以历史试验最后一年为初始场, 对应相应的排放情景 (吴其重等, 2013)。CMIP5 各模式使用的集合个例并不相同, 本文使用的是各模式的集合平均结果。本文选用的 CMIP5 历史模拟数据时段为 1900~1999 年, 预估时段为 2006~2099 年。

2.2 方法

为了研究方便, 所有模式环流场资料均被插值到与 ECMWF 资料相同的格点上 ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$)。在对历史模式结果进行分析之前, 对所有变量都做去倾处理, 以扣除长期线性趋势的影响。由于关注的是年代际变率, 故对观测资料和模拟结果均进行年代际滤波, 仅保留 8 年以上的年代际分量。北太平洋年代际模态在冬季表现最显著 (Nakamura et al., 1997), 所以本文主要分析冬季 (定义为当年 12 月到次年的 2 月) 的情况。

PDO 指数定义为北太平洋地区 20°N 以北 SSTA (sea surface temperature anomaly) 正交函数分解 (EOF 分解) 第一主模态的时间系列 (Mantua et al., 1997)。将标准化的 PDO 指数回归 SSTA 可得到北太平洋区 ($20^\circ \sim 60^\circ\text{N}$, $140^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{W}$) 海表温

度异常的主要年代际变率模态, 即 PDO 的空间分布。

利用功率谱分析观测和模拟的 PDO 的周期。对 PDO 模态空间模拟能力的评估则采用 Oshima and Tanimoto (2009) 使用的综合评估指数 S , 该指数能综合反应模式对 PDO 形态和空间振幅的模拟性能, 具体表示为

$$S = \frac{4(1 + R_s)^4}{\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_r} + \frac{\sigma_r}{\sigma_f}\right)^2 (1 + R_0)^4}, \quad (1)$$

其中, σ_f 、 σ_r 分别为模拟和观测场的标准偏差, R_s 为观测和模拟场间的空间相关, R_0 取为 1。

本文中对模式资料的分析还采用分类模式集合评估, 研究不同类的模式集合对 PDO 模态模拟的差异。基本的思路是: 进行模式对 PDO 模态空间特征模拟性能的检验, 从中挑选模拟较好和模拟较差的两类模式, 分别进行分类集合, 评估产生这种差异的原因。

3 结果分析

3.1 PDO 特征的模拟评估

模式对于年际、年代际周期的模拟是评估模式能否真实反映气候特征的一个重要指标。用观测和模式模拟的海表温度资料通过 EOF 展开计算得到冬季北太平洋年代际变率的时间变化系列, 即 PDO 指数。观测结果 (图 1a) 表明, 北太平洋年代际变率显著表现为年代际振荡特征, 分别于 1925、1945 年和 1976 年前后发生了显著的年代际突变, 即观测资料显示在 20 世纪 PDO 经历了 3 次位相转变。为揭示北太平洋年代际变率的主要特征时间尺度, 对 PDO 指数进行了功率谱分析。图 2 给出了利用观测资料和 CMIP 模式集合平均所计算的 PDO 指数功率谱分析。分析表明, PDO 观测指数的年代际周期特征比较明显, 15~30 年的年代际周期特征达到了 90% 信度水平的显著性检验。对于模式的集合平均, 模拟的 30 年左右的周期达到了 90% 信度水平的显著性检验。CMIP5 模式模拟的 PDO 指数显示时间不等的年代际振荡周期, 年代际周期峰值为 15~30 年之间 (图略), 其中 15 年峰值周期的有 9 个模式, 20 年左右峰值周期的有 11 个模式, 30 年左右峰值周期的有 20 个模式, 所以

模式集合平均的年代际周期为30年左右。总体而言，模式模拟的PDO的主要特征时间尺度与观测资料分析结果是相吻合的。

利用 S 评估指标评估了 CMIP5 耦合模式对 PDO 空间分布的模拟能力。北太平洋海表温度异常变化的第一模态呈现中太平洋和北美西岸反相变化的马蹄型分布特征（图 1b）。表 1 列出了每个模式的评分结果，就空间相关而言，多数模式的相关

值大于 0.6，其中有 24 个模式空间相关值大于 0.7，表明模式对 PDO 的形态模拟效果较好。模式模拟与观测间的标准偏差比（0.2~1.6）差异很大，表明不同模式的 PDO 空间振幅与观测资料有较大差异，这也导致了各模式间综合评分 S 值差异较大。 S 评分结果最好的达到 0.7 以上，最差的只有 0.03。在此我们以模式对 PDO 模态的综合模拟性能为标准进行分类：第 1 类为模拟相对较好，能基本再现

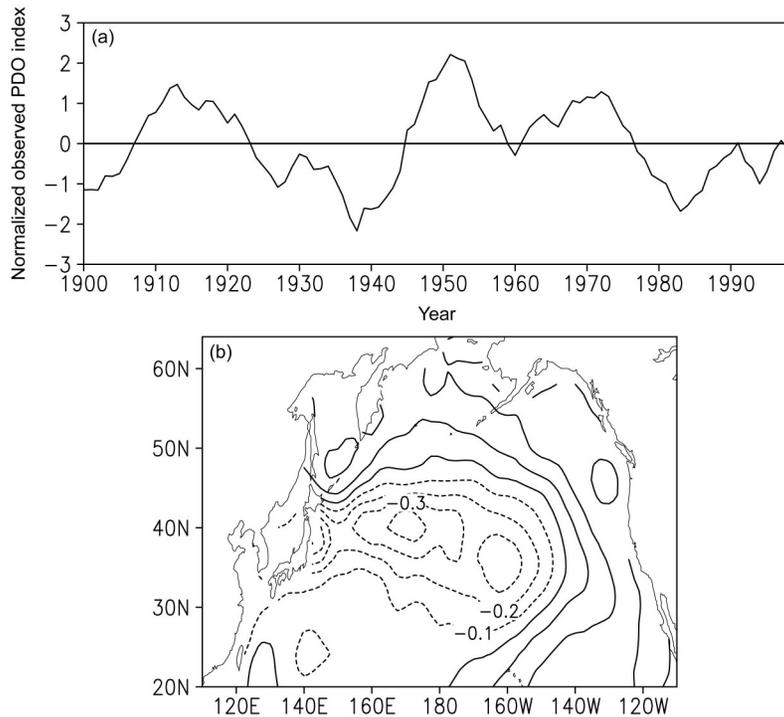


图1 (a) 标准化的观测 PDO 指数及 (b) 观测 PDO 指数回归的北太平洋海表温度异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 1 (a) Time series of the normalized observed PDO (Pacific Decadal Oscillation) index and (b) Regressed SST anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) over the North Pacific onto the observed PDO index

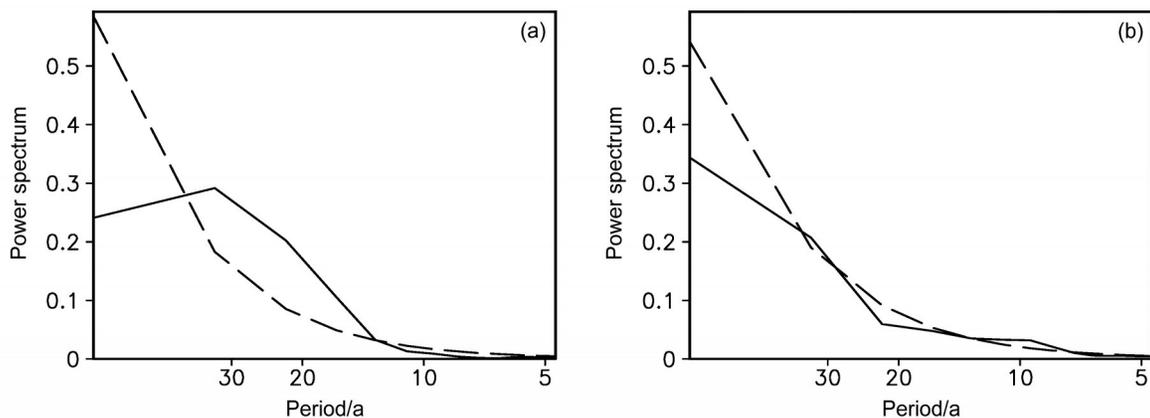


图2 (a) 观测的、(b) CMIP5 模式集合平均计算的 PDO 指数功率谱。虚线为 90% 信度水平线

Fig. 2 Power spectra of the PDO indices from (a) the observations and (b) CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Program 5) models ensemble mean. The dashed lines represent the 90% confidence level

表 1 CMIP5 模式关于 PDO 模态空间分布的模拟技巧
Table 1 Predictive skills for PDO patterns provided by the CMIP5 models

序号	模式名称	空间相关	方差比 (σ_f/σ_r)	S 评分
1	NorESM1-ME	0.88	1.09	0.78
2	GISS-E2-H-CC	0.86	0.82	0.72
3	CMCC-CMS	0.85	1.02	0.72
4	IPSL-CM5A-MR	0.88	1.40	0.70
5	HADGEM2-AO	0.78	1.09	0.63
6	HADGEM2-CC	0.79	1.17	0.63
7	MPI-ESM-MR	0.79	0.76	0.60
8	FGOALS-g2	0.75	0.96	0.59
9	CESM1-CAM5-1-FV2	0.86	0.60	0.58
10	BNU-ESM	0.74	1.09	0.57
11	CMCC-CESM	0.82	1.56	0.56
12	NorESM1-M	0.86	0.57	0.56
13	CMCC-CM	0.74	1.10	0.56
14	INMCM4	0.73	1.20	0.54
15	CESM1-WACCM	0.74	1.35	0.52
16	GFDL-ESM2G	0.78	1.53	0.52
17	GISS-E2-R-CC	0.68	0.94	0.51
18	FGOALS-s2	0.70	0.85	0.51
19	GFDL-ESM2M	0.72	1.40	0.49
20	BCC-CSM1-1-m	0.66	0.96	0.48
21	FIO-ESM	0.79	0.56	0.48
22	Cam5	0.65	1.03	0.46
23	CESM1-BGC	0.63	0.91	0.44
24	BCC-CSM1-1	0.65	0.79	0.44
25	MIROC5	0.71	0.64	0.43
26	CESM1-FASTCHEM	0.71	0.62	0.43
27	MPI-ESM-P	0.70	0.67	0.43
28	MPI-ESM-LR	0.68	0.61	0.40
29	ACCESS1-3	0.61	1.30	0.39
30	ACCESS1-0	0.59	0.84	0.38
31	CCSM4	0.75	0.49	0.36
32	MRI-CGCM3	0.68	0.50	0.33
33	GISS-E2-R	0.86	0.38	0.33
34	IPSL-CM5B-LR	0.51	0.86	0.32
35	GISS-E2-H	0.64	0.33	0.16
36	GFDL-CM3	0.46	0.23	0.08
37	CNRM-CM5	0.67	0.20	0.07
38	HadCM3	0.53	0.24	0.07
39	CanESM2	0.29	0.23	0.03
40	IPSL-CM5A-LR	0.27	0.25	0.04

PDO 主要空间形态和振幅的模式 (S 评分大于 0.6); 第 2 类为模拟较差的模式, 模拟 S 评分小于 0.3。根据这一标准, 第 1 类模式有 7 个 (1~7 号), 第 2 类模式有 6 个 (35~40 号)。对这两类模式分别进行集合平均, 评估产生这种模拟性能差异的原因, 以进一步揭示 PDO 模态形成的机理。图 3a、b 给出了两类模式集合平均的 PDO 模态分布。第一类模式能基本再现 PDO 的马蹄型分布特征, 且空间振幅与观测值也比较接近; 第二类模式模拟的北太平洋 SSTA 为一致的正值分布, 异常值与观测相比也明显偏弱。

3.2 热带太平洋 SSTA 影响北太平洋 SSTA 过程的模拟

前人研究结果指出, 热带太平洋 ENSO 可以通过大气“遥相关”路径 (PNA) 向赤道外传播, 影响中纬度大气—海洋系统的变化 (Horel and Wallace, 1981; Alexander et al., 2002)。以下从两类模式对热带—热带外遥相关的模拟出发, 揭示不同类的模式集合对 PDO 模态模拟性能差异的可能原因, 以进一步加深对 PDO 形成机理的理解。

以年代际 ENSO 指数代表热带太平洋海表温度的年代际变化, 该指数取为热带中东太平洋 Niño3.4 区 (5°S~5°N, 170°~120°W) 区域平均的 SSTA 异常值 (Park et al., 2013)。北太平洋中部 (30°~45°N, 150°E~150°W) 是北太平洋年代际变率的大值区, 以此区域的区域平均海表温度代表北太平洋区海表温度的年代际变化 (Oshima and Tanimoto, 2009)。北太平洋区域海表温度平均指数与年代际 ENSO 指数有比较显著的反相关关系 (图略), 两者相关为 -0.494, 通过 95% 信度水平的显著性检验。

表 2 给出两类模式模拟的北太平洋区域平均海表温度指数 (NPI) 和年代际 ENSO 指数间的相关。就模式而言, 第一类模式模拟的两指数相关虽然比观测的低, 但均为负相关关系。第二类模式中除 GISS-E2-H 模式外, 另 5 个模式模拟两指数间相关均为正值。也就是说, 对 PDO 模态模拟较好的第一类模式对热带太平洋和热带外北太平洋海表温度关系的模拟相对第二类模式比较真实。

利用年代际 ENSO 指数分别对 SSTA、OLRA (向外长波辐射异常)、SLPA (海平面气压场异常) 进行回归 (图 4)。就观测而言, 在 SSTA 回归场上, 热带中、东太平洋为 SSTA 正异常分布, 热带

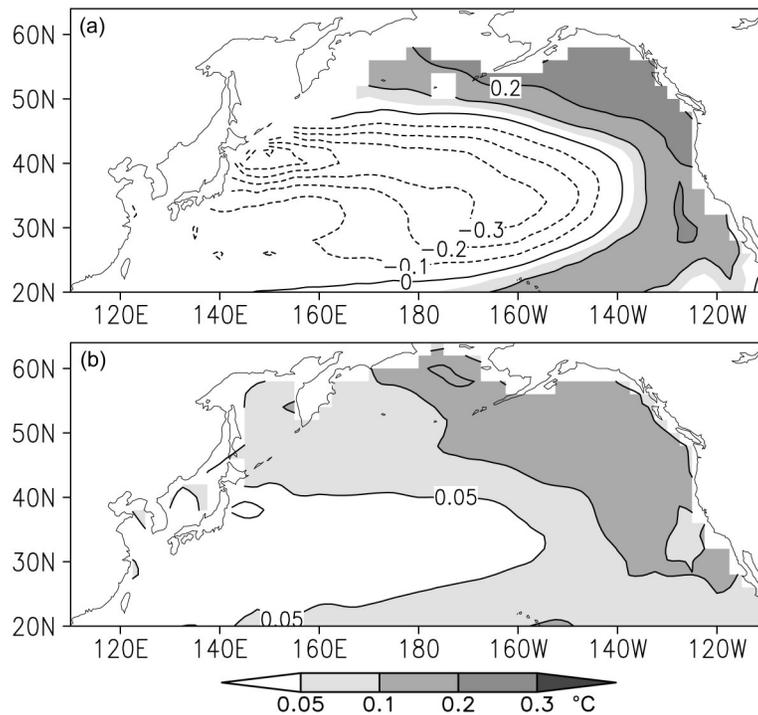


图3 PDO指数回归的北太平洋海表温度异常(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 第一类模式集合平均; (b) 第二类模式集合平均

Fig. 3 Regressed SSTA (sea surface temperature anomaly) over the North Pacific based on the PDO index (units: $^{\circ}\text{C}$): (a) Category-1 models (models with values of skill score S greater than 0.6) ensemble mean; (b) category-2 models (models with values of skill score S less than 0.3) ensemble mean

表2 模式模拟的NPI与年代际ENSO指数间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between the NPI (Index of the averaged SSTA over the North Pacific) and decadal ENSO (El Niño-Southern Oscillation) index for simulations

第一类模式	相关系数	第二类模式	相关系数
GISS-E2-H-CC	-0.19	GFDL-CM3	0.33
IPSL-CM5A-MR	-0.10	CNRM-CM5	0.29
MPI-ESM-MR	-0.41	GISS-E2-H	-0.01
CMCC-CMS	-0.36	IPSL-CM5B-LR	0.11
HADGEM2-CC	-0.28	HadCM3	0.26
HADGEM2-AO	-0.26	CanESM2	0.20
NorESM1-ME	-0.40		

太平洋海表温度增暖; 对应SLPA场上, 热带中、东太平洋为负异常, 热带西太平洋和印度洋为正SLPA值, SLPA的此种分布表明在年代际ENSO暖阶段Walker环流减弱。观测OLRA回归场上, ENSO暖阶段, 赤道中太平洋为OLRA负值, 赤道西太平洋OLRA为正值, 表明热带太平洋的增暖导致热带对流区的东移, 热带太平洋SLP纬向梯度减

弱, 最终通过遥相关导致北太平洋SLP的负异常, 从而使北太平洋中部海表温度冷却(Nitta and Yamada, 1989; Zhang et al., 1997)。从SLPA场上也可发现, 北太平洋地区为负气压异常中心, 阿留申低压(AL)加强, 对应此负异常, SSTA回归场上北太平洋中部为负海表温度异常。

对第一类模式(图5), 年代际ENSO指数回归的SSTA场, 热带中东太平洋为正异常分布, 北太平洋中部为负异常分布, 量值上也与观测比较接近。SLPA场上, 热带中、东太平洋为负异常, 热带西太平洋和印度洋为正异常, 阿留申低压附近为显著的负异常中心。OLRA回归场上, 赤道中太平洋为负值, 赤道西太平洋为正值。OLRA和SLPA这种分布与观测比较一致, 有利于引起大气遥相关, 从而影响北太平洋区域的海表温度异常分布。第二类模式的回归场(图6)则不能很好地模拟出观测的特征, 热带SSTA暖异常模拟偏弱、北太平洋海表温度负中心不能模拟出来, 热带中、东太平洋负SLP异常和热带西太平洋正SLP异常不能模拟出来, 赤道中太平洋负OLRA值模拟偏弱, 且赤道西太平洋正OLRA值模拟偏弱、偏西。两类模式对

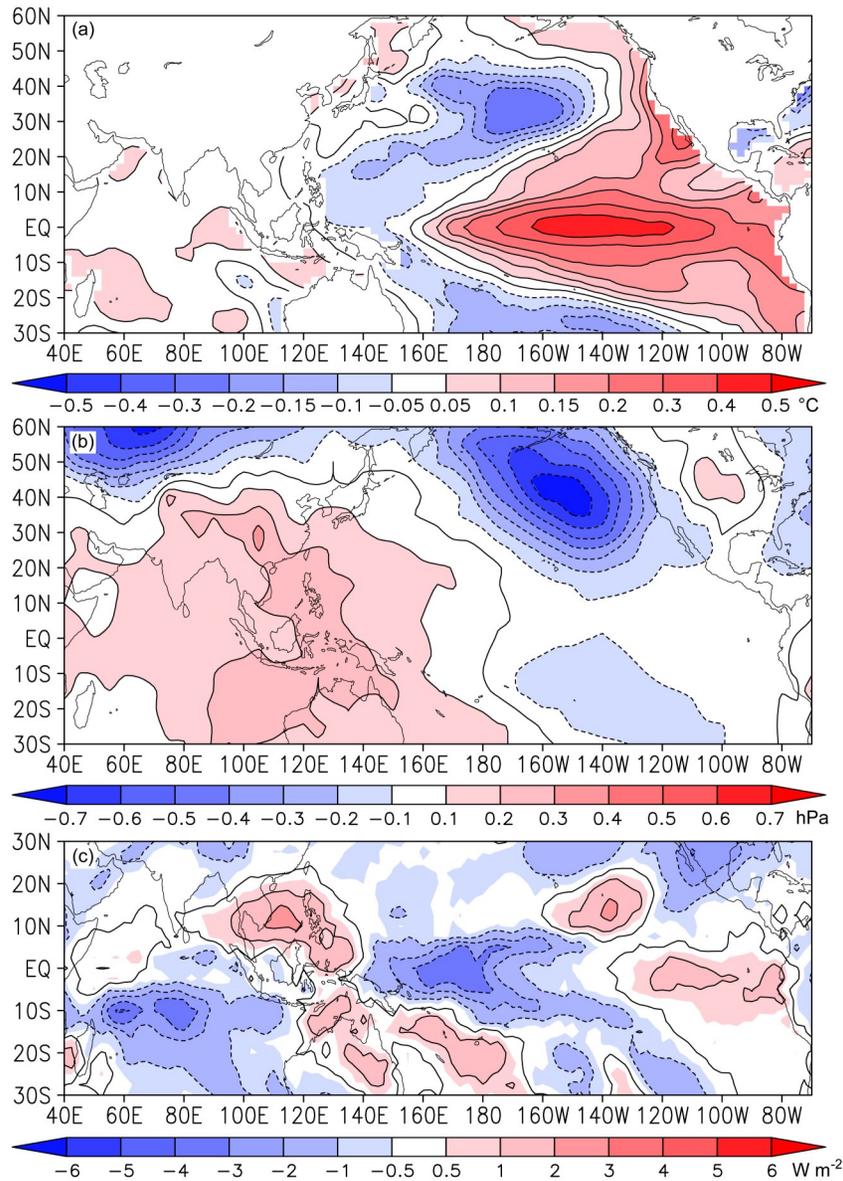


图4 观测的年代际ENSO指数回归的 (a) SSTA (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(b) SLPA (单位: hPa)、(c) OLRA (单位: W/m^2)

Fig. 4 Regressed (a) SSTA (units: $^{\circ}\text{C}$), (b) SLPA (sea level pressure anomaly, units: hPa), (c) OLRA (outgoing longwave radiation anomaly, units: W/m^2) onto the observed decadal ENSO index

与年代际ENSO相联系的SSTA、SLPA、OLRA模拟差异较大,也最终导致了PDO空间分布模拟性能的差异。

利用年代际ENSO指数分别对500 hPa位势高度距平进行回归。在500 hPa位势高度距平场上(图7),观测回归场呈现出典型的太平洋—北美遥相关型(PNA):当热带太平洋海表温度年代际偏高时,北太平洋地区高度场为异常负距平,中心在阿留申群岛南侧;热带东太平洋和北美地区为正距平。也就是说热带—热带外联系是通过大气遥相关PNA实现的,热带太平洋SSTA年代际异常通过

PNA遥相关向赤道外传播,影响中纬度大气—海洋系统的变化(Horel and Wallace, 1981),导致北太平洋区域气压的异常,从而影响了北太平洋中纬度区域的海表温度异常。对第一类模式,热带太平洋SSTA年代际变化导致的PNA遥相关型基本能被模拟出来(图7b),而第二类模式回归的PNA集合平均分布与实况相比偏弱(图7c)。

上述分析表明,热带太平洋SSTA年代际变率对北太平洋SSTA的影响是通过大气遥相关实现的。对PDO模态模拟较好的第一类模式,热带太平洋海表温度影响北太平洋海表温度的过程模拟的

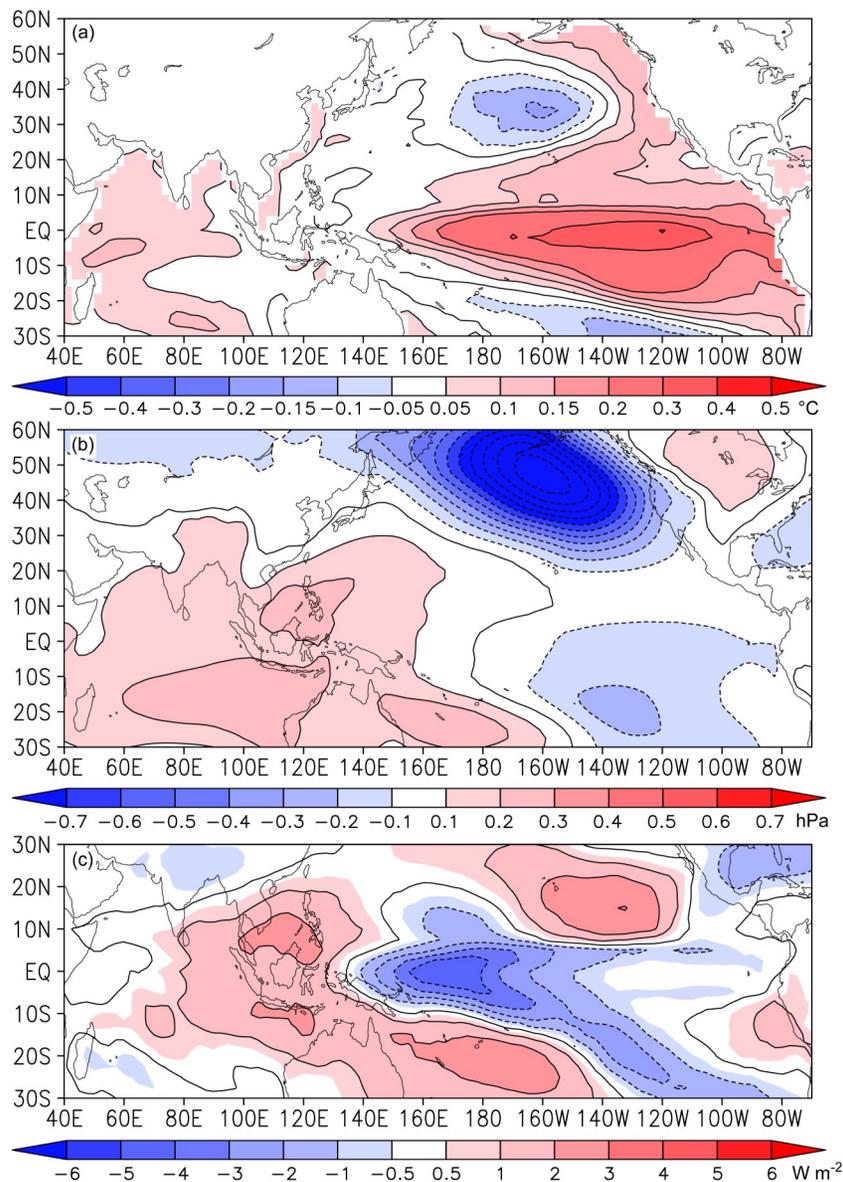


图5 同图4, 但为第一类模式集合平均

Fig. 5 As in Fig. 4, but for the category-1 models ensemble mean

较成功: 热带太平洋 SSTA 年代际变化导致的热带 OLRA 和 SLPA 场的变化, 热带太平洋 SSTA 年代际变化激发的 PNA 型遥相关及对 AL 和北太平洋区海表温度的影响模式均能很好体现。

4 全球增暖背景下 PDO 的未来预估

RCP (典型浓度路径) 试验着重研究在不同 CO₂ 不同排放情景下对未来的预估。本文着重给出在中排放 (RCP4.5) 典型浓度路径下 21 世纪北太平洋海表温度年代际变率的主要特征。由于第一类模式对 PDO 模拟效果较好, 下面就给出该类模式

的集合预估结果。

图 8 给出了第一类模式 RCP4.5 情景下北太平洋海表温度 EOF 第一、第二模态。各模式第一模态的解释方差范围为 40%~73%。在 RCP4.5 情景下北太平洋海表温度主要模态为均一的正值分布 (图 8a), 这与 20 世纪北太平洋海表温度变率的主要模态 PDO 模态有显著差异, 而且该模态呈现明显上升的趋势 (图 8c)。北太平洋中部区域平均海表温度变化序列图也显示 (图略), 相比于 20 世纪, 21 世纪北太平洋区域海表温度呈现明显的增暖趋势, 这可能说明未来温室气体增加引起的北太平洋增温超过了自然变率的影响。EOF 第二模态

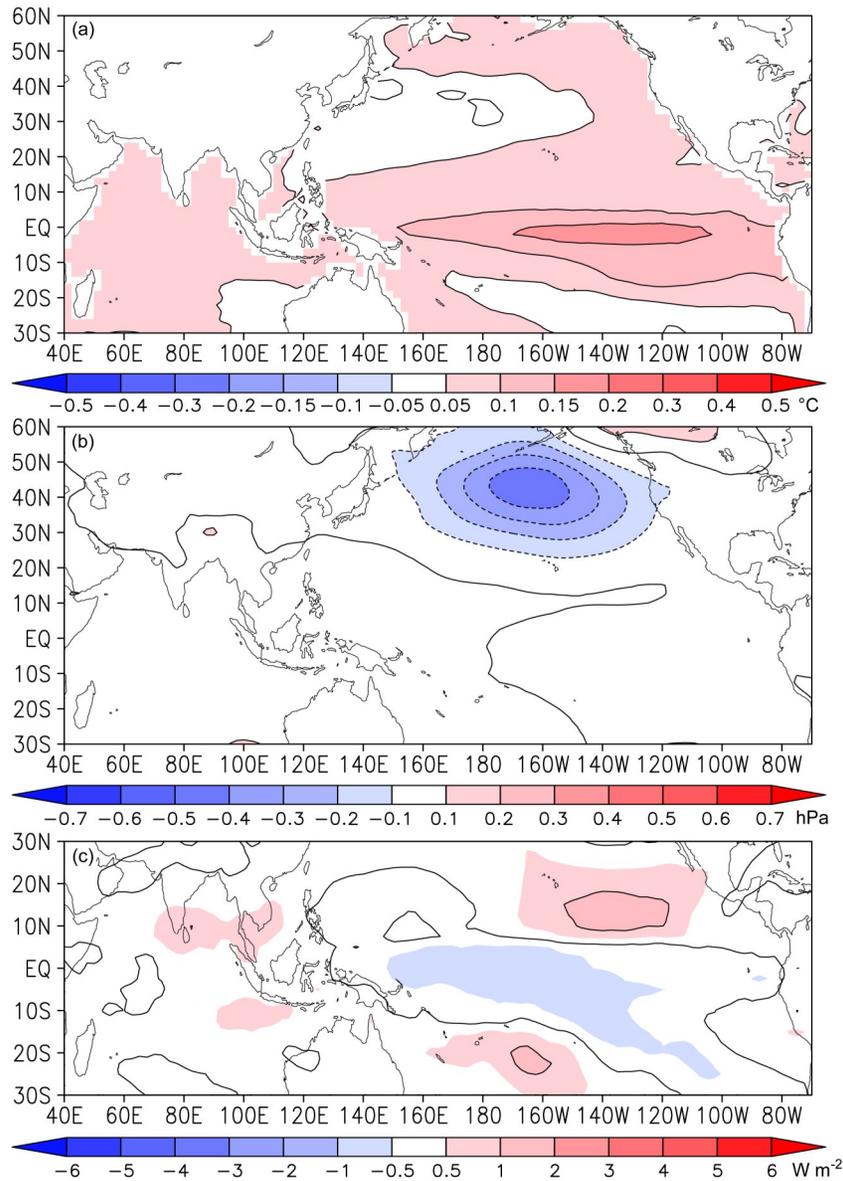


图6 同图4, 但为第二类模式集合平均

Fig. 6 As in Fig. 4, but for the category-2 models ensemble mean

的空间分布呈现北太平洋中部和北美西岸反相变化的马蹄型分布特征, 这与20世纪北太平洋的主要模态PDO模态比较一致。第二模态的时间序列与20世纪的PDO模态一样有明显年代际变化周期(图8c), 功率谱分析表明, 模式集合平均的年代际周期为10~20年, 峰值为15年。RCP4.5情景下, 北太平洋海表温度EOF第一、第二模态的分析表明, 未来北太平洋区域海表温度年代际变化和长期上升趋势都比较明显。基于CMIP5的预估结果与CMIP3结果比较一致(Overland and Wang, 2007)。

5 结论和讨论

本文利用CMIP5的40个耦合模式的20世纪历史模拟资料, 分析了耦合模式对太平洋年代际振荡(PDO)的模拟能力。功率谱分析结果表明, CMIP5模式对PDO年代际周期有着较好的刻画能力, 多数模式模拟的PDO年代际周期峰值为15~30年, 多模式集合的年代际周期为30年左右, 与观测PDO的15~30年的振荡周期比较吻合。利用综合评估指标评估了模式对PDO模态的模拟性能, 发现CMIP模式对PDO模态的模拟能力存在较大差异, 小部分模式模拟效果较差, 不能再现北太平洋

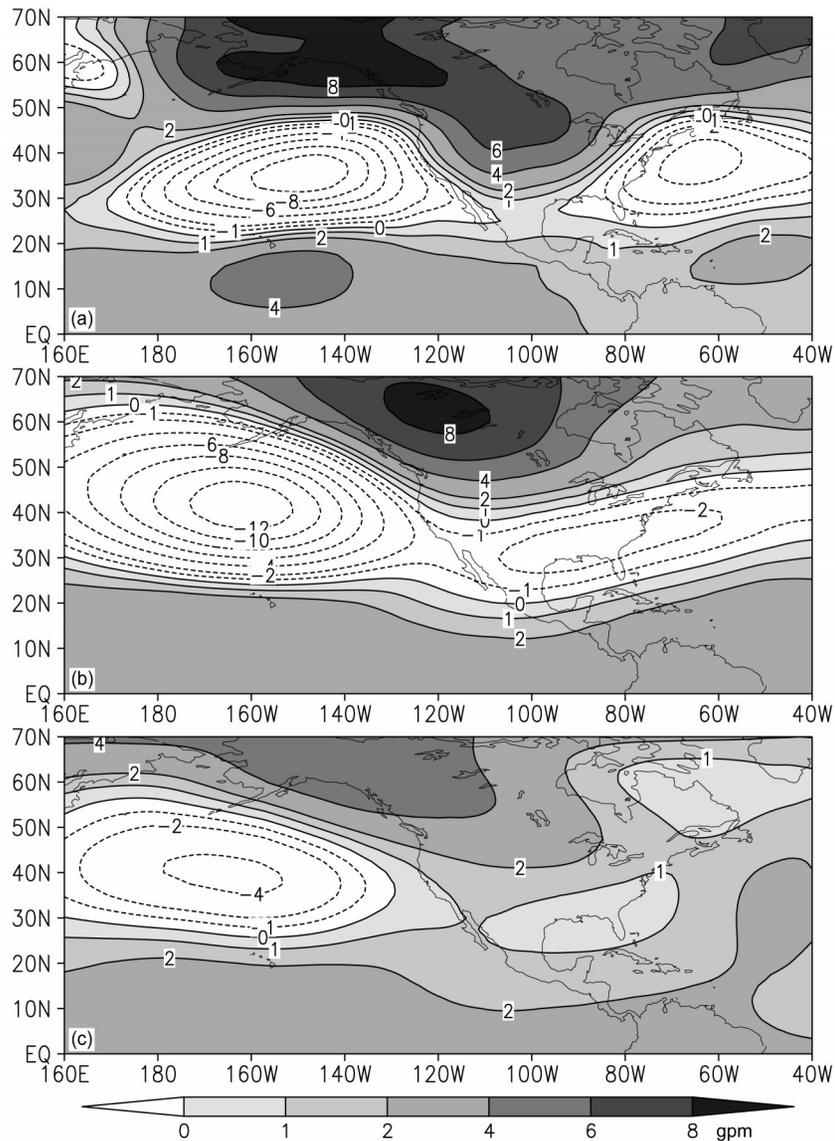


图7 年代际ENSO指数回归的500 hPa位势高度场异常(单位:gpm): (a) 观测; (b) 第一类模式集合平均; (c) 第二类模式集合平均
Fig.7 Regressed 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm) based on the decadal ENSO index: (a) Observations; (b) category-1 models ensemble mean; (c) category-2 models ensemble mean

中西部和北美西岸海表温度异常的反相变化。进一步的分析表明,对PDO模态模拟较好的第1类模式,能较好地再现热带太平洋与北太平洋SSTA年代际变化间的关系,与热带海表温度年代际增暖相联系的热带太平洋对流区的东移、热带太平洋SLP纬向梯度减弱、阿留申低压的加强及北太平洋中部的负海表温度异常等模式均能成功再现,热带太平洋SSTA年代际变化激发的PNA型遥相关模式也能模拟出来。对PDO模态模拟差的模式,则不能合理模拟出热带太平洋SSTA对北太平洋SSTA影响的遥相关过程。

利用CMIP5中等排放情景RCP4.5预估结果,

从空间分布和变化趋势方面,分析了CMIP5模式预估的北太平洋年代际变率的特征,发现21世纪北太平洋海表温度年代际变率的主要模态为一致的正异常分布且呈现明显的上升趋势,第二模态则表现为类似于20世纪典型PDO的马蹄型SSTA分布,且有明显的年代际周期,未来北太平洋海表温度年代际变化和长期上升趋势都比较明显。

本文研究也证实了热带太平洋地区海表温度的年代际变率对PDO的重要影响,热带太平洋SSTA对北太平洋SSTA的影响是通过大气遥相关实现的。要成功模拟北太平洋年代际变率的基本特征,需要模式能较准确模拟出热带太平洋海表温度影响

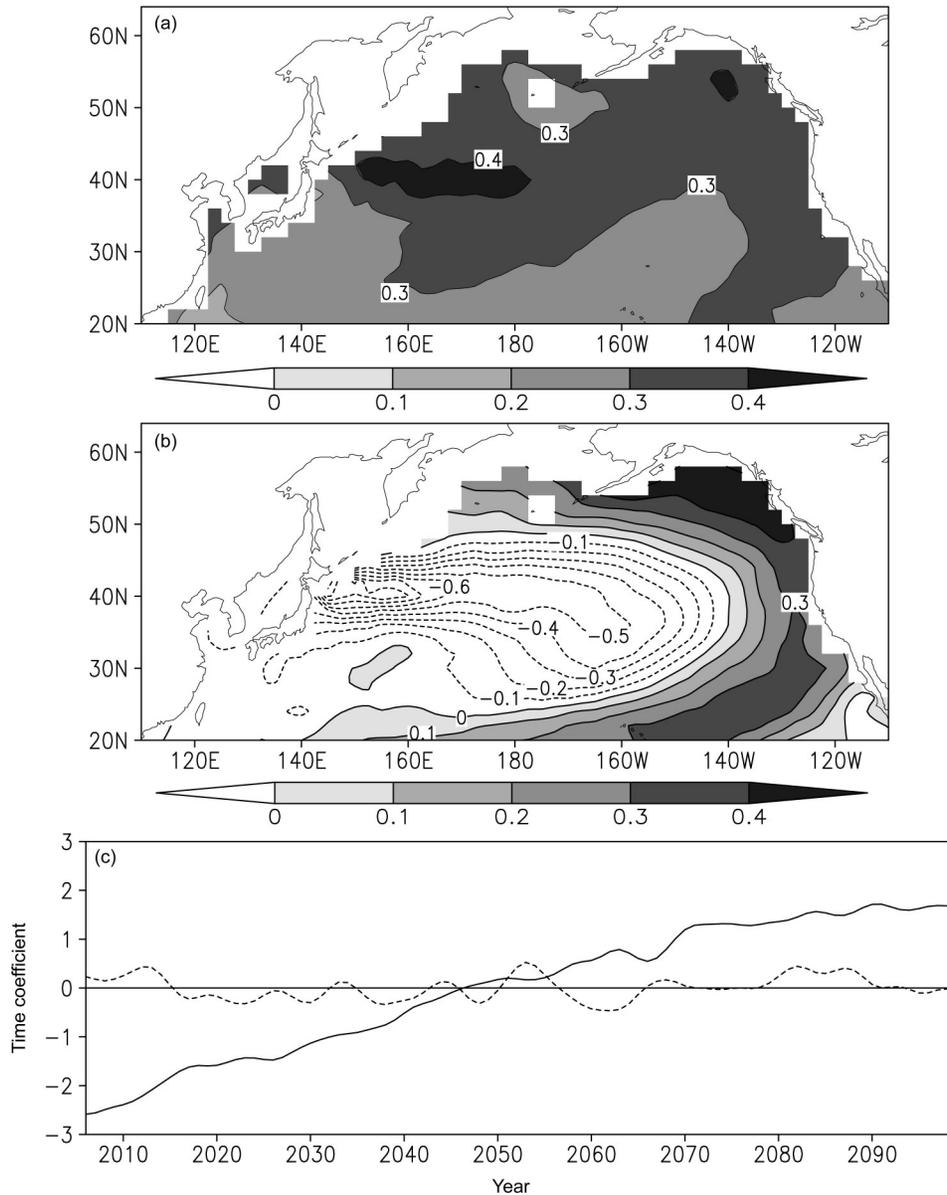


图8 北太平洋海表温度异常EOF分解的 (a) 第一模态EOF1、(b) 第二模态EOF2及其 (c) 对应的时间系数PC1 (实线)、PC2 (虚线)
Fig. 8 EOF (empirical orthogonal fuction) decomposition for SSTA over the North Pacific: (a) The first EOF1 mode, (b) the second EOF2 mode, (c) principal componets (PC1, soild line; PC2, dashed line) time series corresponding to the EOF1 and EOF2

北太平洋海表温度的遥相关过程。影响PDO的机制目前尚未定论,除热带海表温度作用外,可能还有其他因素,如中纬度局地海气相互作用等的影响,需要更深入的研究。目前耦合模式对PDO的模拟效果显示出较大的差异,存在较大的不确定性,因此我们在利用模式进行未来预估时,要首先注意选择模拟性能较好的模式,这样也才会提高未来预估的可信度。从本文的预估结果看,在全球变暖背景下未来北太平洋区海表温度呈现显著的增暖趋势,这可能会导致中国东部夏季雨型的变化,华

北夏季降水可能会增加。

参考文献 (References)

Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J. Climate*, 15(16): 2205-2231. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2
Allan R, Ansell T. 2006. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2003 [J]. *J. Climate*, 19(22): 5816-5842. doi:10.1175/JCLI3937.1
陈红, 薛峰. 2013. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模

- 拟 [J]. 大气科学, 37(5): 1143–1153. Chen Hong, Xue Feng. 2013. Numerical simulation of decadal variations in the East Asian summer monsoon and summer rainfall in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 1143–1153. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12130
- Feng J M, Wei T, Dong W J, et al. 2014. CMIP5 / AMIP GCM simulations of East Asian summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(4): 836–850. doi:10.1007/s00376-013-3131-y
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results [J]. Climate Dyn., 10(3): 135–162. doi: 10.1007 / BF00210626
- Graham N E, Barnett T P, Wilde R, et al. 1994. On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual to interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation [J]. J. Climate, 7(9): 1416–1441.
- Gu D F, Philander S G H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics [J]. Science, 275(5301): 805–807. doi:10.1126/science.275.5301.805
- 顾薇, 李崇银. 2010. IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析 [J]. 大气科学学报, 33(4): 401–411. Gu Wei, Li Chongyin. 2010. Evaluation of the IPCC AR4 climate models in simulating the interdecadal variations of the East China summer precipitation, PDO and NAO [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(4): 401–411. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.04.003
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation [J]. Mon. Wea. Rev., 109(4): 813–829. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0813:PSAPAW>2.0.CO;2
- 金晨曦, 周天军. 2014. 参加 CMIP5 的四个中国气候模式模拟的东亚冬季风年际变率 [J]. 大气科学, 38(3): 453–468. Jin Chenxi, Zhou Tianjun. 2014. Analysis of the interannual variations of the East Asian winter monsoon simulation by four CMIP5 GCMs [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 453–468. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13180
- Jin F F, Kimoto M, Wang X C. 2001. A model of decadal ocean-atmosphere interaction in the North Pacific basin [J]. Geophys. Res. Lett., 28(8): 1531–1534. doi:10.1029/2000GL008478
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. Science, 266(5185): 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(10): 2407–2423. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2407:DCVOTN>2.0.CO;2
- Lau N C, Nath M J. 1996. The role of the "atmospheric bridge" in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies [J]. J. Climate, 9(9): 2036–2057. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2036:TROTBI>2.0.CO;2
- 李恺霖, 智海, 白文蓉. 2016. CMIP5 多模式对阿留申低压气候特征的模拟检验与预估 [J]. 气候与环境研究, 21(5): 533–546. Li Kailin, Zhi Hai, Bai Wenrong. 2016. Evaluation and projection of the climatic characteristics of Aleutian low based on CMIP5 models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(5): 533–546. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15161
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(6): 1275–1277.
- Lysne J, Chang P, Giese B. 1997. Impact of the extratropical Pacific on equatorial variability [J]. Geophys. Res. Lett., 24(21): 2589–2592. doi:10.1029/97GL02751
- 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(6): 1069–1080. doi: 10.1175 / 1520-0477 (1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2
- Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. 1994. Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies [J]. Climate Dyn., 9(6): 287–302. doi: 10.1007 / BF00204744
- Nakamura H, Lin G, Yamagata T. 1997. Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78(10): 2215–2226. doi:10.1175 / 1520-0477(1997)078<2215:DCVITN>2.0.CO;2
- Nitta T, Yamada S. 1989. Recent warming of tropical sea surface temperatures and its relationship to the Northern Hemisphere circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 67(3): 375–383. doi:10.2151 / jmsj1965.67.3_375
- Oshima K, Tanimoto Y. 2009. An evaluation of reproducibility of the Pacific Decadal Oscillation in the CMIP3 simulations [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 87(4): 755–770. doi:10.2151/jmsj.87.755
- Overland J E, Wang M Y. 2007. Future climate of the North Pacific Ocean [J]. Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, 88(16): 178–182. doi: 10.1029/2007EO160003
- Park J H, An S I, Yeh S W, et al. 2013. Quantitative assessment of the climate components driving the Pacific Decadal Oscillation in climate models [J]. Theor. Appl. Climatol., 112(3–4): 431–445. doi: 10.1007/s00704-012-0730-y
- Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131(612): 2961–3012. doi:10.1256/qj.04.176
- Wang Huijun. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18(3): 376–386. doi:10.1007/BF02919316
- 吴其重, 冯锦明, 董文杰, 等. 2013. BNU-ESM 模式及其开展的 CMIP5 试验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 9(4): 291–294. Wu Qizhong, Feng Jinming, Dong Wenjie, et al. 2013. Introduction of the CMIP5 experiments carried out by BNU-ESM [J]. Adv. Climate Change Res. (in Chinese), 9(4): 291–294. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.04.008
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. 大气科学, 28(6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et

- al. 2004. Advances in studies of Pacific Decadal Oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(6): 979–992. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15
- Zhang L P, Delworth T L. 2015. Analysis of the characteristics and mechanisms of the Pacific Decadal Oscillation in a suite of coupled models from the geophysical fluid dynamics laboratory [J]. J. Climate, 28(19): 7678–7701. doi:10.1175/JCLI-D-14-00647.1
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 31(6): 1290–1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1290–1300. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.23
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. J. Climate, 10(5): 1004–1020. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2
- Zhong Y F, Liu Z Y, Jacob R. 2008. Origin of Pacific multidecadal variability in Community Climate System Model version 3 (CCSM3): A combined statistical and dynamical assessment [J]. J. Climate, 21(1): 114–133. doi:10.1175/2007JCLI1730.1
- Zhong Y F, Liu Z Y. 2009. On the mechanism of Pacific multidecadal climate variability in CCSM3: The role of the subpolar North Pacific Ocean [J]. J. Climate, 39(9): 2052–2076. doi:10.1175/2009JPO4097.1
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61(6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61(6): 641–654. doi:10.11676/qxxb2003.065