氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

全球变暖情景下太平洋年代际振荡（PDO）时空特征变化分析

陈广超 陈峥 黎鑫 李昀英

Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics of the Pacific Decadal Oscillation in Global Warming Scenarios

CHEN Guangchao CHEN Zheng LI Xin LI Yunying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20046

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势研究

Long Term Trend of Tropical Pacific Temperature under Global Warming

气候与环境研究. 2019, 24(6): 723 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18072

CMIP6情景中主要温室气体和气溶胶排放强度的时空分布特征分析

SpatialTemporal Characteristics of the Emission Intensities of Several Major Greenhouse Gases and Aerosols under CMIP6 Scenarios

气候与环境研究. 2020, 25(4): 366 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20005

CMIP5模式对冬季北极涛动的模拟和预估

Simulation and Projection of the Arctic Oscillation in Winter Based on CMIP5 Models

气候与环境研究. 2017, 22(5): 633 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17019

基于PMIP3和CMIP5模拟结果的过去千年特征时段北极涛动的变率特征及成因分析

Characteristics and Cause Analyses of Arctic Oscillation Variability during the Typical Periods in Last Millennium Based on PMIP3 and CMIP5 Simulations

气候与环境研究. 2020, 25(4): 429 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20011

CMIP5耦合模式对欧亚大陆冬季雪水当量的模拟及预估

Simulation and Projection of Snow Water Equivalent over the Eurasian Continent by CMIP5 Coupled Models

气候与环境研究. 2017, 22(3): 253 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16104

中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系

Multi-decadal Variability of Precipitation in Arid and Semi-Arid Region of Northern China and Its Relationship with Pacific Decadal Oscillation Index

气候与环境研究. 2017, 22(6): 643 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈广超, 陈峥, 黎鑫, 等. 2021. 全球变暖情景下太平洋年代际振荡（PDO）时空特征变化分析 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 482−492. CHEN Guangchao, CHEN Zheng, LI Xin, et al. 2021. Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics of the Pacific Decadal Oscillation in Global Warming Scenarios [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 482−492. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20046

全球变暖情景下太平洋年代际振荡（PDO）时空特征变化分析

陈广超[1] 陈峥[2] 黎鑫[1,3] 李昀英[1]

1 国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410000
2 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东青岛 266100
3 中国科学院大气物理研究所地球流体力学与数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 基于 CMIP5 多模式中的历史情景与全球变暖情景资料以及观测海温数据，利用 EOF 分析，回归分析、功率谱分析等方法对北太平洋区域冬季海—气耦合系统进行了研究，进而分析了全球变暖背景下太平洋年代际振荡（PDO）时空特征的变化。通过对比观测资料中 1934 年前后的 PDO 时空特征，发现在全球变暖的背景下，PDO 强度得到加强，PDO 模态的频率向高频移动（周期变短）；再用泰勒图分析方法和功率谱分析方法评估 13 个 CMIP5 模式对 20 世纪太平洋年代际振荡（PDO）的模拟能力；在此基础上，选取评估良好以上的 9 种模式对比分析不同增暖情景下的 PDO 时空特征变化，发现模式中 PDO 对全球变暖的响应与观测结果基本一致。

关键词 全球变暖 PDO CMIP5 EOF 功率谱分析
文章编号 1006-9585(2021)05-0482-11 **中图分类号** P732.6 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20046

Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics of the Pacific Decadal Oscillation in Global Warming Scenarios

CHEN Guangchao[1], CHEN Zheng[2], LI Xin[1,3], and LI Yunying[1]

1 *College of Meteorology and Ocean*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410000
2 *Physical Oceanography Laboratory*, *Ocean University of China*, *Qingdao*, *Shandong Province* 266100
3 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atomospheric and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract In this paper, based on historical and global warming scenarios and observed sea temperature data in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) multimodel, changes in the space–time characteristics of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) were analyzed. Empirical orthogonal function, regression, and power spectrum analyses were used to study the winter sea–air coupled system in the North Pacific region. Comparing the spatiotemporal characteristics of the PDO from the observed data for the periods 1850–1934 and 1934–2017, we found that, under the

收稿日期 2020-04-13；**网络预出版日期** 2021-07-01
作者简介 陈广超，男，1996 年出生，硕士，主要从事海气相互作用研究。E-mail: cgc970101@126.com
通讯作者 黎鑫，E-mail: lixin_atocean@sina.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41605051、41520104008、41975089、42006017，中央高校基本科研业务费专项 201813016，山东省自然科学基金项目 ZR2019BD038、ZR2019ZD12
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41605051, 41520104008, 41975089, and 42006017), Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Universities (Grant 201813016), Natural Science Foundation of Shandong Province (Grants ZR2019BD038 and ZR2019ZD12)

background of global warming, the intensity of the PDO is strengthened, and the frequency of the PDO mode is shifted to high frequency (the period is shorter). Then Taylor diagram analysis and power spectrum analysis were used to evaluate the simulation ability of 13 CMIP5 models of the PDO in the 20th century. On this basis, nine well-evaluated models were selected to compare and analyze the spatial and temporal characteristics of the PDO under different warming scenarios. The response of PDO to global warming in the model was consistent with the observed results.

Keywords Global warming, Pacific Decadal Oscillation, Coupled model intercomparison project phase 5, Empirical orthogonal function, Power spectrum analysis

1 引言

Mantua et al.（1997）发现在北太平洋中纬度地区存在年代际振荡，并称之为太平洋年代际振荡（PDO）。这是一种具有较长周期的太平洋气候模态，亦被一些人描述为一种长期存在的类似厄尔尼诺的太平洋气候多变性模态，而另一些人则将其描述为两种有时相互独立的模态的混合（Mantua and Hare, 2002）。研究表明，这一现象在各类海气要素场上均有反映，在海洋方面，赤道中东太平洋海表温度（SST）年代际异常增高，黑潮及其延伸体区域和北太平洋中部异常变冷，北太平洋东部沿岸 SST 增高；在大气方面，北太平洋海平面气压和 500 hPa 高度场明显降低，阿留申低压异常加深、东移并偏南（Trenberth, 1990; Trenberth and Hurrell, 1994; Deser and Blackmon,1995）。PDO 指数被定义为北太平洋（20°N～70°N，110°E～100°W）EOF 分解后第一模态的时间系数，它有两个周期段，15～25 年和 50～70 年。观测显示，自 1920 年起 PDO 指数与阿留申低压指数（该指数用于表征北太平洋海表面气压变化）在位相上有显著的对应关系，这种一致性变化表明 PDO 是海气相互作用的产物（杨修群等, 2004）。

PDO 对全球气候有重要影响。一方面，它既是一种长期气候周期的偏离，可直接造成太平洋及其周边区域气候的年代际变化；另一方面，它又是年际变率的重要背景，对年际变化（ENSO 及其诱发的大气遥相关）具有重要的调制作用，可调制 ENSO 事件频率、强度和气候影响（如导致年际 ENSO—季风异常关系的不稳定性或年代际变化）（徐建军等, 1996; 王黎娟和何金海, 1998; 王绍武和朱锦红, 1999; 江志红和屠其璞, 2000; 李崇银, 2000; 王绍武, 2001）。

反过来，气候变化也很可能影响 PDO 时空特征。近百年来全球气候变化特征是温度的显著变暖，平均增暖速率为每 100 年升高 0.6°C，这使得太平洋 SST 发生了显著变化，其最大的增温发生在赤道中东太平洋即 Nino1 至 Nino4 区内，最大的降温在中纬度北太平洋中部。除了北半球太平洋西岸 40°N 附近为降温外，在北半球太平洋沿岸基本上为升温，但太平洋东海岸的升温幅度要远大于西海岸（蔡怡等, 2008）。由此可推测，全球变暖不仅会引起气候平均态的变化，也会引起年代际振荡 PDO 形态特征的变化。前人对全球变暖下的 ENSO 变化已有研究，指出其增暖中心显著西移，周期明显变短（夏杨等, 2017）；同时已有研究指出 PDO 在全球变暖背景下振幅减小，周期缩短（Geng et al., 2019）；也有研究指出 PDO 的空间分布不变（Furtado et al., 2011），二者结论皆与本文结论不同。主要是所使用数据不同与处理方法不同，前者虽然也是用了 CMIP5 数据，但是只对比了多模式集合平均（MMEM）数据变暖前后 PDO 模态的变化，并未给出多数模式的变化；后者使用的数据是 IPCC AR4（Fourth Assessment Report）模式，且也仅仅是讨论了多模式集合平均（MMEM）数据。那么在 CMIP5 各模式中 PDO 这种年代际的海温模态在全球变暖下时空特征有无改变，如何改变？这些关键科学问题前人讨论得还并不充分，因此本文着重通过观测资料和 CMIP5 模式资料分析全球变暖下 PDO 的特征变化。

2 资料和方法

2.1 资料

本文的使用的模式资料为耦合模式比较计划 CMIP5 中的 13 套海气耦合模式模拟海表温度数据，其中 13 套海气耦合模式资料的 SST 数据又分为历史情景模拟和在 RCP4.5 与 RCP8.5（二氧化碳浓度达到 4.5 W/m^2 和 8.5 W/m^2）变暖情景模拟（Taylor et al., 2012）。由于 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的月平均 SST 数据的时间范围是 2006～2100 年（95 年），因此选取相同时长的历史情景下的月平均 SST 数

表 1 CMIP5 中的 13 种模式的来源及分辨率

Table 1 Source and resolution of 13 modes in CMIP5

模式名称	国家和机构	海温场空间分辨率（经度×纬度）
ACCESS1-3	澳大利亚联邦科学与工业研究组织（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology）	1°×0.6°
BNU-ESM	中国北京师范大学	1°×1°
CanESM2	加拿大气候模拟和分析中心（Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis）	1.4°×0.9°
CESM1-CAM5	美国NSF/DOE国家大气研究中心（NSF/DOE National left for Atmospheric Research）	1.125°×0.5°
CMCC-CM	意大利欧洲地中海气候中心（Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici）	2°×1.2°
CMCC-CESM	意大利欧洲地中海气候中心（Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici）	2°×1.2°
GFDL-CM3	美国NOAA地球物理流体动力学实验室（NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）	1°×0.9°
GFDL-ESM2G	美国NOAA地球物理流体动力学实验室（NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）	1°×0.9°
HadGEM2-AO	韩国国家气象研究所（National Institute of Meteorological Research）	1°×0.8°
HadGEM2-ES	韩国国家气象研究所（National Institute of Meteorological Research）	1°×0.8°
IPSL-CM5A-LR	法国皮埃尔·西蒙·拉普拉斯研究所（Institute Pierre Simon LaplaceInstitute Pierre Simon Laplace）	2°×1.2°
MPI-ESM-LR	德国马克斯·普朗克气象研究所（Max Planck Institute for Meteorology）	1.4°×0.8°
NorESM1-ME	挪威气候中心（Norwegian Climate Centre）	1.125°×0.5°

据，时间范围是 1911～2005 年（95 年）。由于 13 套海气耦合模式空间分辨率各异（表 1）因此本文统一将海表温度场空间分辨率插值成 1°（纬度）×1°（经度）。

实际观测的海表温度数据是日本气象厅重建的长时间序列海表温度资料 COBE-SST2 数据，选取的 COBE-SST2 的月平均海表温度数据时间范围是 1850～2018 年（169 年），为格点数据，数据的空间分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）。

2.2 研究方法

2.2.1 统计诊断方法

根据研究需要，本文用到了经验正交函数分析（Empirical Orthogonal Function，EOF）、回归分析、泰勒图方法、功率谱分析以及 Pettitt 突变点检测方法等现代统计诊断方法。其中，EOF 分析可用少量变量代替多变量，提取主要数据特征量。Lorenz 在 1950 年首次将其引入气象和气候研究，目前得到了非常广泛得应用，能够很好地反映要素场的空间分布模态及其随时间的变化因此也被称为时空分解。回归分析是用来研究变量与变量之间相互关系的数学方法。在气象研究中，回归分析也是应用最广泛的内容之一，用它来分析某一变量与一个或多个自变量之间的统计关系，并建立变量依自变量之间的回归方程，然后根据这个方程做出对变量的预测（胡基福, 1996）。

泰勒图是近年来被广泛采用的应用于模式评估与检验的有效方法，能够将多模式的相关信息（标准差、相关系数、均方根误差）集中表示，将多个变量的标准差、与参考值的相关系数以及均方根偏差综合显示在一张二维图上。在泰勒图中，能够全面清晰对多模式的模拟能力进行展示评估。标准差能反映多变量自身的离散程度，标准差越小，这些变量偏离平均值就越少，相关系数表示变量值与参考值的相似性，均方根误差表示模拟模式与参考模式之间的离散度，均方根误差值越小，表明与参考模式自身的离散程度越接近（Taylor, 2001; 陈峥等, 2018）。

功率谱方法则是通过谱分析，将时域转换到频域上，通过分析频域的特征来获取数据的周期特性。由于本文关注的是年代际变率，故首先对数据进行了 8 年的低通滤波，然后再用功率谱提取不同数据中的 PDO 周期（Torrence and Compo, 1998）。

Pettitt 突变点检测方法是对于 n 个样本量的时间序列 x，构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad (k = 2, 3, \cdots, n), \tag{1}$$

其中，当 $x_i > x_j$ 时，r_i=1；当 $x_i = x_j$ 时，r_i=0；当 $x_i < x_j$ 时，r_i=−1（j=1, 2, …, i）。可见，这里秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。Pettitt 法是直接利用秩序列来检测突变点的。若 t_0 时刻满足 $k_{t_0}=|S_k|$ (k=2, 3, …, n)，则 t_0 处为突变点。$P=2\exp[-6k_{t_0}^2(n^3+n^2)]$，若 $P\leqslant 0.5$，则认为检测出的突变点再统计意义上是显著的。

2.2.2　PDO 主模态的获取

本文使用的是 COBE-SST2 海表温度数据及插值过后的 CMIP5 多模式模拟的 SST 数据进行提取，提取范围为北太平洋（20°N～70°N，120°E～90°W）的海温数据，由于 PDO 模态在冬季表现最显著，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。使用多种统计分析方法进行分析处理各模式的冬季海温资料。本文采用的获取 PDO 主模态的具体方法如下：

（1）对 COBE-SST2 海表温度场和 13 个 CMIP5 中的历史情景与全球变暖情景模拟数据的各 95 年海温场进行线性去趋势。将去趋势之后的海温场再进行 3 个月滑动平均并去除逐月海温平均态得到异常场。

（2）从中取出 12 月、1 月和 2 月（DJF）组成一个新的连续冬季场。由于 PDO 是大尺度的，受地球表面效应的影响，不同维度的格点的面积权重不一样，所以将数据的空间格点乘以其所在维度余弦值的平方根即乘以纬度权重，得到新的异常场。

（3）对这个冬季场进行时空变换，将三维场变为时间—空间二维场之后进行 EOF 分解得到第一主成分对应的时间序列，将这个时间序列标准化处理，再将步骤二的太平洋冬季异常场回归到标准化时间序列上，从而最终得到 PDO 空间模态。

3　观测资料中全球变暖前后 PDO 时空特征变化

首先我们从图 1 和图 2 的对比中可以发现，全球变暖的超低频趋势对 PDO 的时间序列有很大影响，使其有一个很明显上升的趋势。接着对未去掉全球变暖超低频趋势的时间序列做 Pettitt 突变点检测，从图 3 中可以很明显地看到突变点在 1934 年附近，并通过了显著性检验，再对 1934 年前后俩段分别做其趋势线，可以发现前后有明显的增强趋势。综上可以能看出 1934 年前后 PDO 受全球变暖影响明显产生了变化，所以选取 1934 年作为分界点来对比观测资料中全球变暖对 PDO 的影响。从空间模态上来看（图 4），1934 年前后的 PDO 模态中整个太平洋都呈现“马蹄形”的 SST 异常，赤道中东太平洋，太平洋东部沿岸表现为正的异常中心，北太平洋的中部表现为一个负的异常中心。从前后强度对比来看，PDO 变得更强。北太平洋中部的负异常中心范围有所增大，且向西扩展，中心值也变得更大，由 0.5°C 增强到 0.7°C；同样在赤道中东太平洋，太平洋东部沿岸的正异常中心，中心值和范围都有所增大，赤道中东太平洋的中心值增大了 0.1°C 左右，太平洋东部沿岸增大了 0.2°C 左右，也呈现出增强的趋势。由以上可知，在全球愈发变暖的背景下，PDO 强度得到加强。

对比 1934 前后的 PDO 指数（图 5）可以发现 PDO 的反相变化加快，年代际周期明显变短。再对 1934 年前后 PDO 指数进行功率谱分析（图 6），1934 前 PDO 观测指数的峰值周期在 50～70 年，而 1934 后 PDO 观测指数的峰值周期在 40 年，结果同样表明 PDO 模态的频率向高频移动（周期变短）。

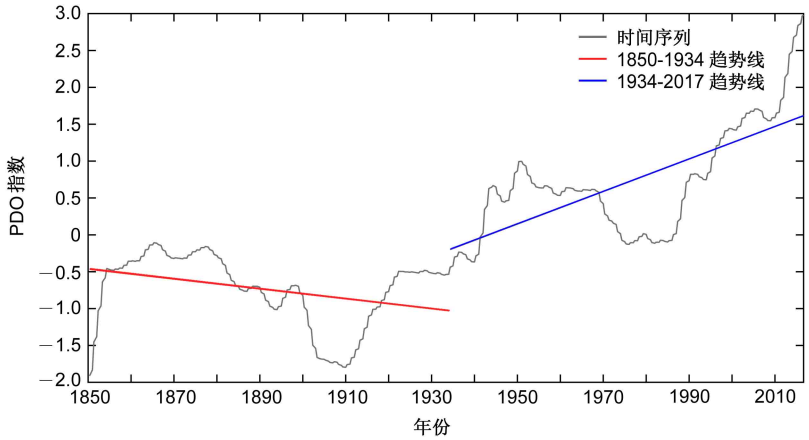

图 1　1850～2017 年观测数据中未去掉全球变暖超低频趋势的 PDO 指数时间序列及趋势

Fig. 1　The time series and trend of PDO (Pacific Decadal Oscillation) index under the global warming ultralow frequency trend is not removed from the observation data during 1850–2017

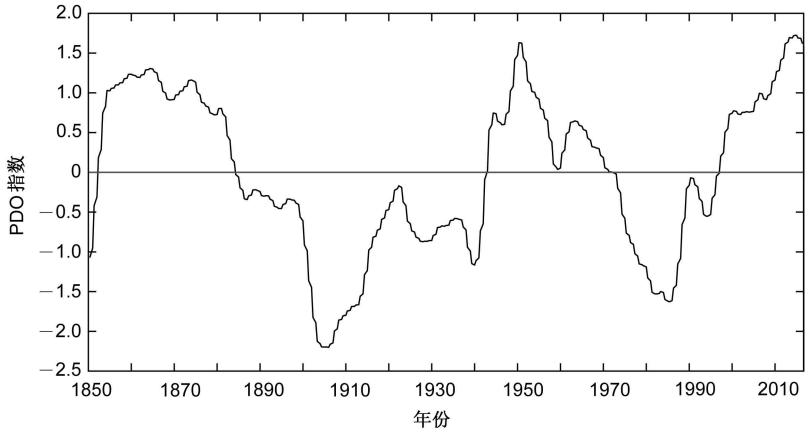

图 2 1850～2017 年观测数据中去掉全球变暖超低频趋势的 PDO 指数时间序列

Fig. 2 The time series of PDO index under the global warming ultralow frequency trend is removed from the observation data during 1850–2017

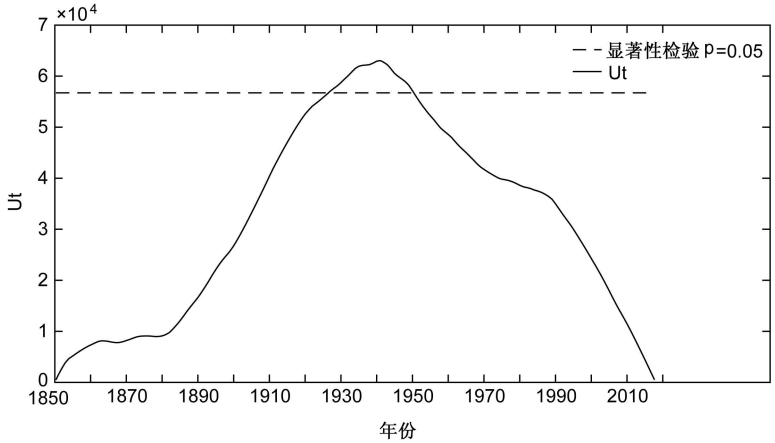

图 3 对 1850～2017 年观测数据时间序列的 Pettitt 突变点检测值（Ut）

Fig. 3 The map of Pettitt mutation point detectionin time series (Ut) from the observation data during 1850–2017

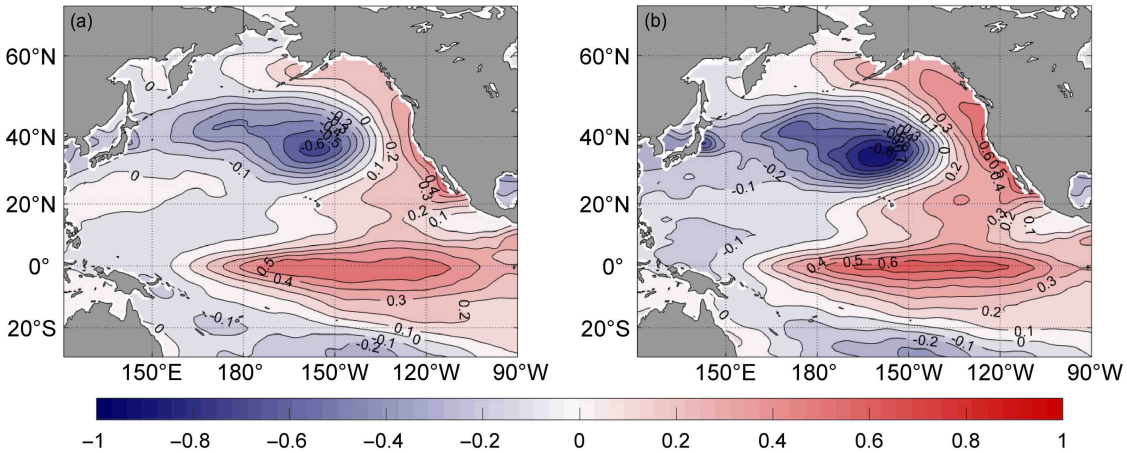

图 4 观测数据中 1934 年前、后的 PDO 模态（单位：°C）：（a）1850～1934 年；（b）1934～2017 年

Fig. 4 PDO mode from the observation data around 1934: (a) 1850–1934; (b) 1934–2017

4 CMIP5 多模式对 PDO 模拟能力的评估分析

本文利用泰勒图来评估 CMIP5 多模式对观测数据中 PDO 的模拟能力，俩者时间长度皆为 95 年（1911～2005 年）。由于对泰勒图（图 7）进行了标准化，所以相关系数 R=0.5 对应均方根误差 E≈1，定义模式模拟合格标准为 R≥0.5，E≤1，良好标

准为 $R \geqslant 0.7$，$E \leqslant 0.8$，优秀标准为 $R \geqslant 0.8$，$E \leqslant 0.6$。从图 5 上可以看出 13 种模式的模拟程度相关系数都在 0.6～0.9，均方根偏差基本都在 0.5～1，除了 CMCC-CESM 模式外，均具有与观测相似的 PDO 幅度（标准差 σ 在 1±25% 范围内），以上 13 种模式都达到了合格。其中模拟程度达到良好的模式有 BNU-ESM 模式、Had-GEM-AO 模式、IPSL-CM5A-LR 模式和 NorESM1-ME 模式，模拟优秀的模式有 ACCESS1-3 模式、CanESM2 模式、CMCC-CM 模式、GFDL-CM3 模式和 HadGEM2-ES 模式。

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。对观测数据（图 8）进行功率谱分析，可以发现 PDO 年代际振荡明显，55 年和 25 年左右周期的峰值最大。CMIP5 多模式模拟的 PDO 指数显示出不同年代际特征，以模拟优秀 HadGEM2-ES 模式、CMCC-CM 模式和 ACCESS1-3 模式为例（图 9）：HadGEM2-ES 模式显示为 25 年左右的峰值周期；CMCC-CM 模式显示为 50 年和 25 年左右的峰值周期；ACCESS1-3

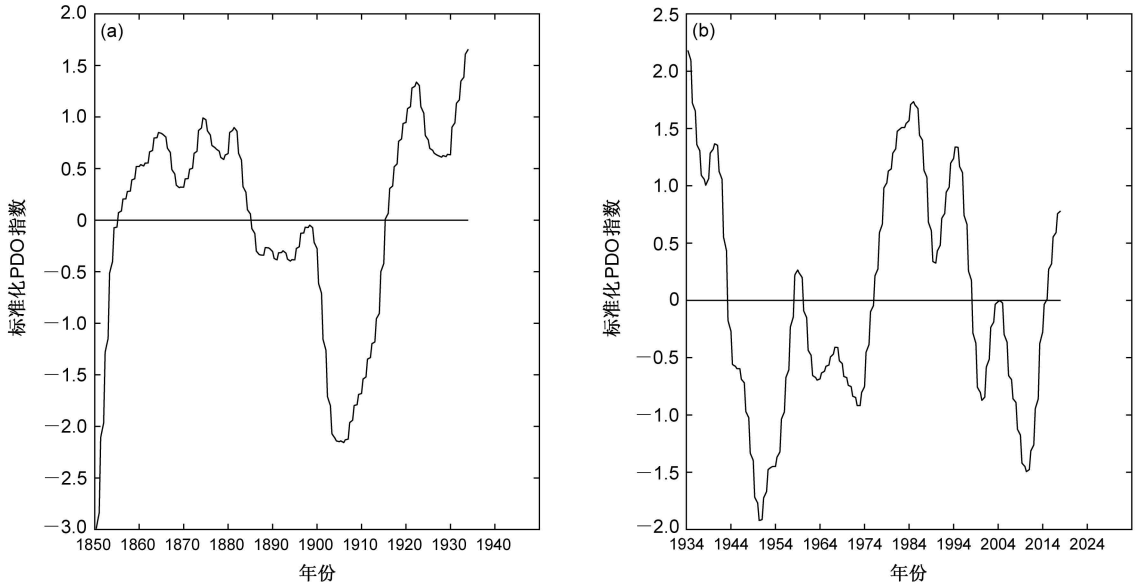

图 5　观测数据中 1934 年前、后标准化的 PDO 指数：（a）1850～1934 年；（b）1934～2017 年

Fig. 5　Standardized PDO index from the observation data around 1934: (a) 1850–1934; (b) 1934–2017

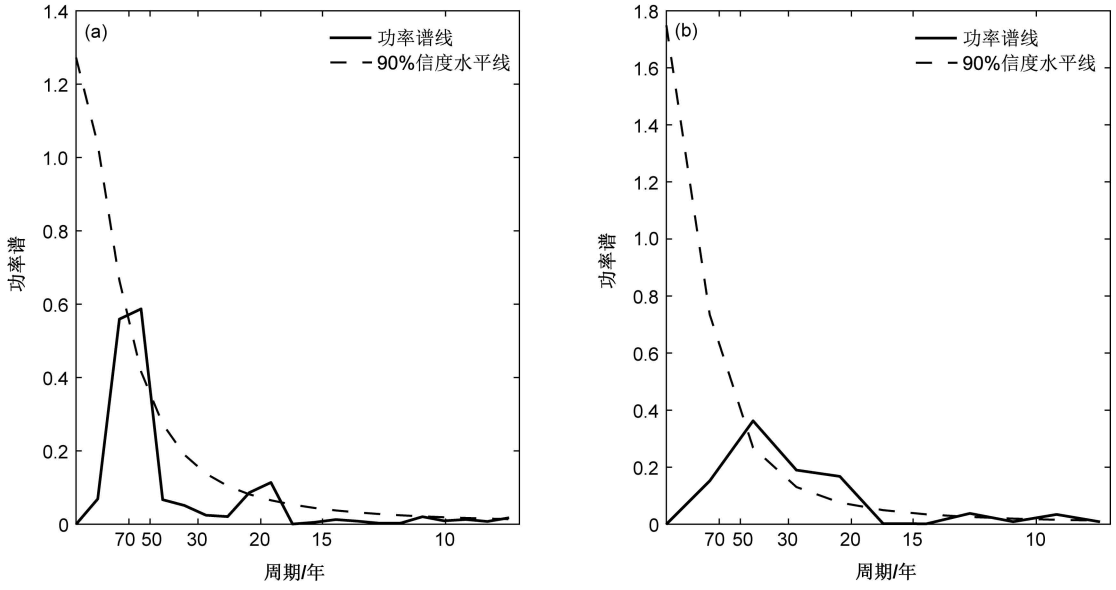

图 6　观测数据中 1934 年前、后 PDO 指数功率谱：（a）1850～1934 年；（b）1934～2017 年

Fig. 6　Power spectra of PDO index from the observation data around 1934: (a) 1850–1934; (b) 1934–2017

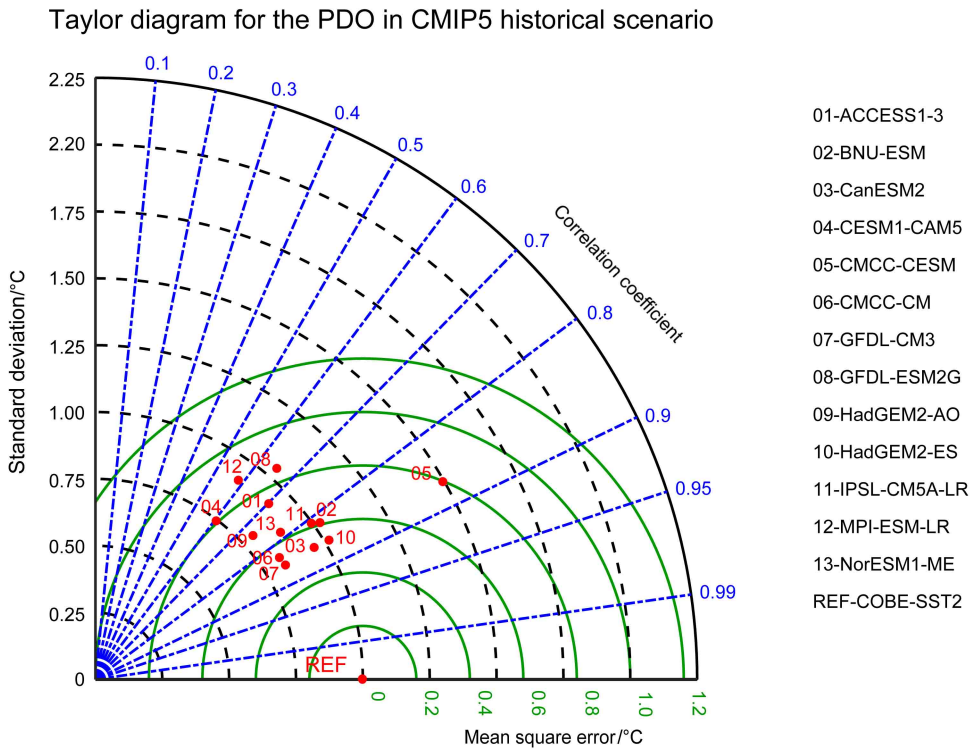

图 7 CMIP5 多模式对 PDO 模拟结果泰勒图。图中蓝色线表示与观测模式的相关系数；绿线表示各 CMIP5 模式与参考值间的均方差误差；黑色线表示标准差；REF 为观测模式参考值；带序号红点对应为各模式所提取得 PDO 模态，各 CMIP5 模式名称及对应序号见图右上侧

Fig. 7 CMIP5 multimode Taylor diagram of PDO simulation results. The blue line in the figure represents the correlation coefficient with the observation mode. The green line represents the mean square error between each CMIP5 mode and the reference value.; the black line indicates the standard deviation; REF is the reference value of the observation mode; the red dot with the serial number corresponds to the PDO mode extracted by each mode. The names and corresponding serial numbers of each CMIP5 mode are shown in the upper right

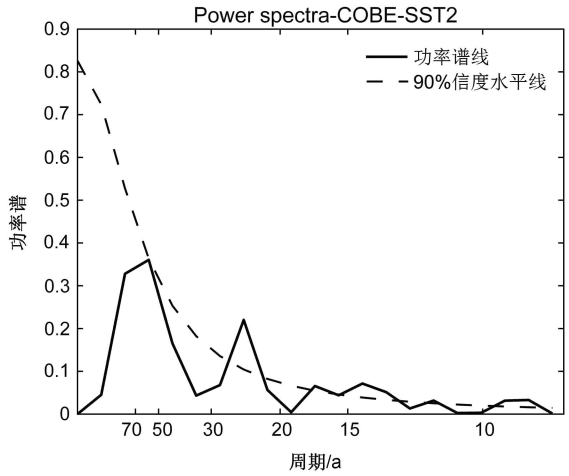

图 8 1911～2015 年观测数据的 PDO 指数功率谱

Fig. 8 Power spectra of PDO indices from the observation data during 1911–2015

模式显示为 55 年和 15 年左右的峰值周期。总的来说，CMIP5 多模式年代际峰值周期显示在 15～30 年、50～70 年。其中表现出 15～30 年左右周期的模式有 13 种，4 种模式显示为 15 年左右的峰值周期， 3 种模式显示为 20 年左右的峰值周期，有 5 种模式显示为 25 年左右的峰值周期，1 种模式显示为 30 年左右的峰值周期。表现出 50～70 年左右周期的模式有 8 种，2 种模式显示为 50 年左右的峰值周期， 4 种模式显示为 55 年左右的峰值周期，2 种模式显示为 70 年左右的峰值周期。总体而言，就良好以上模式来说，年代际周期与观测事实是基本相符的。

5 CMIP5 多模式下 PDO 对不同变暖情景响应的时空特征分析

前文的分析已表明，挑选的 13 个 CMIP5 模式大部分对 PDO 有一定模拟能力，可以用来分析评估 PDO 对于气候变暖的响应。且通过对比观测资料中 1934 年前后的 PDO 时空特征，发现在全球变暖的背景下，PDO 强度得到加强，PDO 模态的频率向高频移动（周期变短）。那么 CMIP5 模式在不同的排放情景下，PDO 的响应特征是否与观测

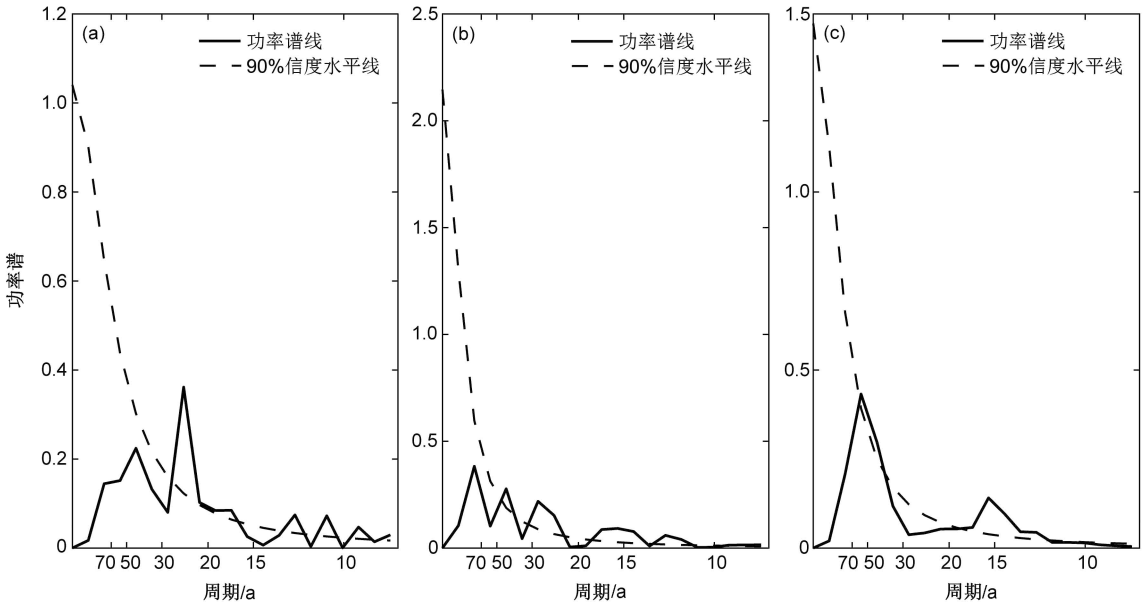

图 9　CMIP5 模式中的 PDO 指数功率谱：（a）HadGEM2-ES 模式；（b）CMCC-CM 模式；（c）ACCESS1-3 模式

Fig. 9　Power spectra of the PDO indices from CMIP5 mode: (a) HadGEM2-ES mode; (b) CMCC-CM mode; (c) ACCESS1-3 mode

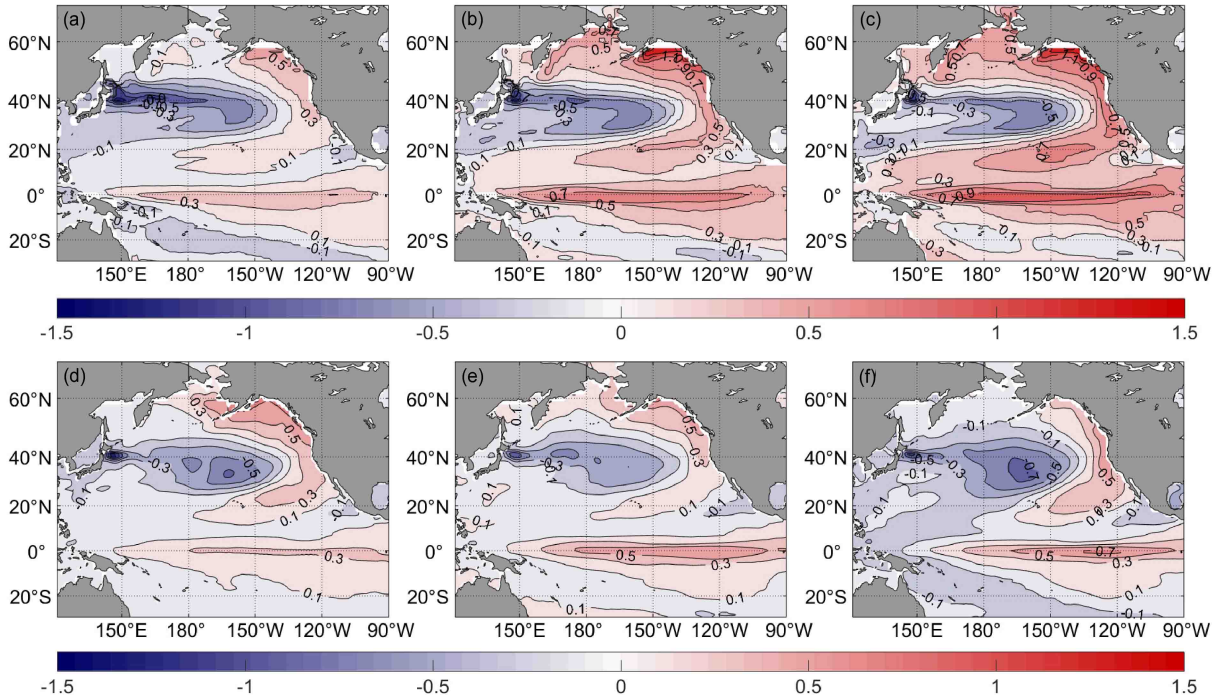

图 10　CMIP5 模式中 CanESM2 模式（第一行）、GFDL-CM3 模式（第二行）全球变暖前后 PDO 模态：（a、d）历史情景下的 PDO；（b、e）RCP4.5 情景下的 PDO；（c、f）RCP8.5 情景下的 PDO

Fig. 10　PDO mode before and after global warming in the CMIP5 model CanESM2 mode (the first line) and GFDL-CM3 mode (the second line): (a, d) PDO in historical scenarios; (b, e) PDO in RCP4.5 scenarios; (c, f) PD0 in RCP8.5 scenarios

相同呢？这里以模拟优秀的 CanESM2 模式和 GFDL-CM3 模式为例展开分析。从空间模态（图 10）上来看，变暖前后的 PDO 模态中整个太平洋都呈现“马蹄形”的 SST 异常，CanESM2 模式在 RCP4.5 情景下，PDO 变强，北太平洋中部的负异常中心向东部移动，其值也增大 0.1°C 左右，同样在赤道中东太平洋，太平洋东部沿岸的正异常中心，中心值和范围都有所增大，赤道中东太平洋的中心值增大了 0.4°C 左右，太平洋东部沿岸增大了 0.4°C 左右，在 RCP8.5 情景下，PDO 强度相比 RCP4.5

情景下变得更强。北太平洋中部的负异常中心值增大0.2°C左右，赤道中东太平洋的中心值增大了0.6°C左右，太平洋东部沿岸增大了0.6°C左右。GFDL-CM3模式在RCP4.5情景下，北太平洋中部的负异常中心值与变暖前相差不大，在赤道中东太平洋中心值和范围都有所增大，赤道中东太平洋的中心值增大了0.2°C左右，太平洋东部沿岸的正异常中心值范围和值都略有减小，幅度在0.2°C左右，在RCP8.5情景下，与变暖前对比北太平洋中部的负异常中心值增大0.2°C左右，范围也有所增大向西拓展，赤道中东太平洋的中心值增大了0.4°C左右，太平洋东部沿岸的正异常中心向南移动，其值几乎不变。

从不同情景下功率谱分析（图11）来看，CanESM2模式各情景下PDO指数的年代际周期特征明显，历史情景中显示为70年和35左右的峰值周期；RCP4.5情景中显示为70年和10年左右的峰值周期；RCP8.5情景中显示为15～30年的峰值周期。GFDL-CM3模式历史情景中显示为70年和25左右的峰值周期；RCP4.5情景中显示为70年

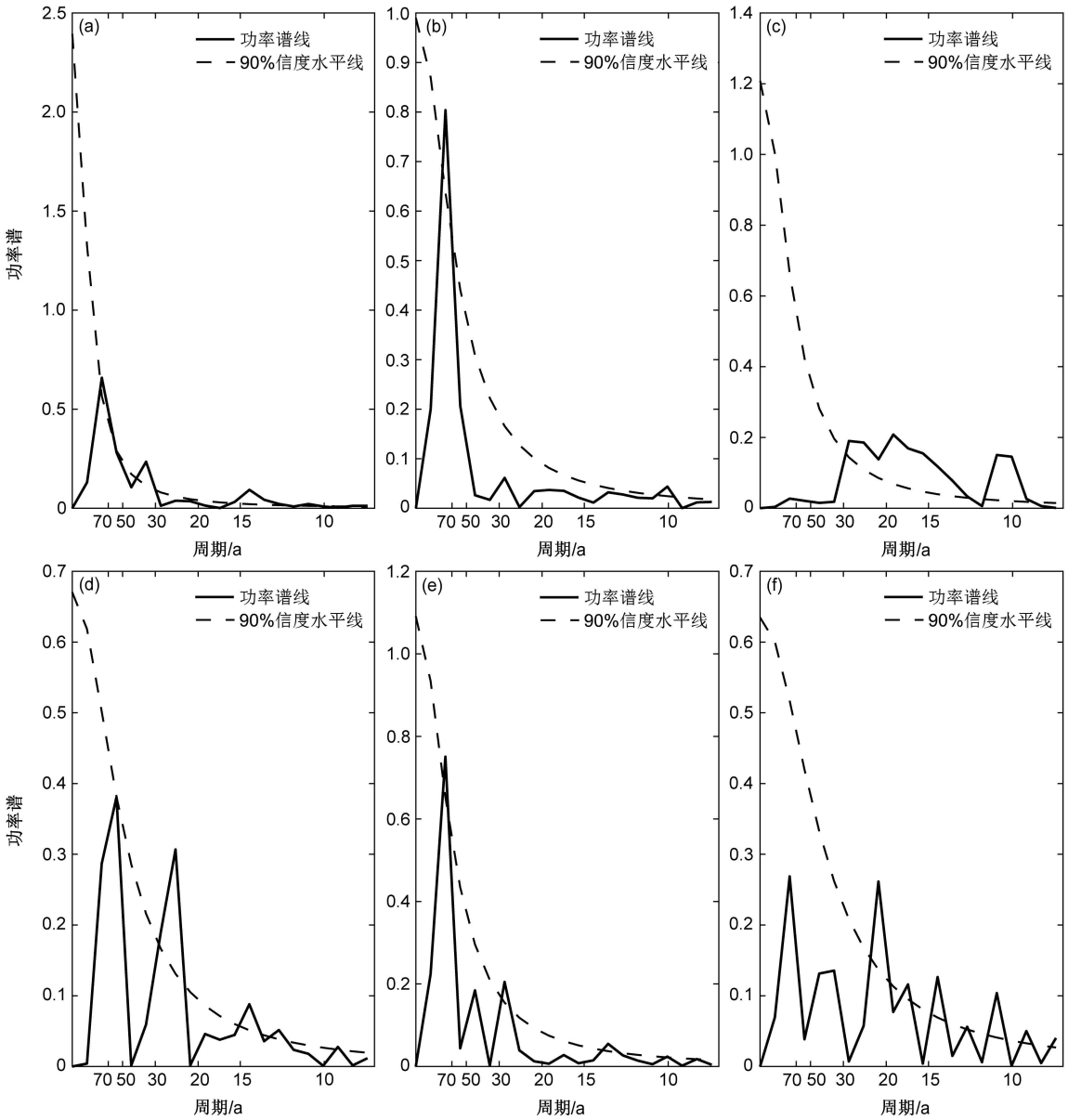

图11 CMIP5模式中CanESM2模式（第一行）、GFDL-CM3模式（第二行）PDO指数功率谱：（a、d）历史情景；（b、e）RCP4.5情景；（c、f）RCP8.5情景

Fig. 11 PDO index power spectrum in CMIP5 model CanESM2 mode (the first line) and GFDL-CM3 mode (the second line): (a, d) PDO in historical scenarios; (b, e) PDO in RCP4.5 scenarios; (c, f) PDO in RCP8.5 scenarios

和 25 年左右的峰值周期；RCP8.5 情景中显示为 25 年左右的峰值周期。以上两种模式中 RCP4.5 情景与变暖前对比，年代际峰值周期变化不大，RCP8.5 情景下，年代际峰值周期都变小。分析表明，随全球变暖程度加大，PDO 模态的频率向高频移动 (周期变短)。

从对模拟良好以上模式的统计结果来看：空间特征上在赤道中太平洋异常中心 9 种模式在全球变暖愈发变暖的背景下异常中心值都在增加，其范围一般也向西扩展；在北太平洋东部沿岸异常中心 9 种模式中有 7 种模式在全球变暖的背景下异常中心值在增加，范围也是在扩展，只有在 CMCC-CM 和 GFDL-CM3 模式下异常中心值稍有减小，但异常中心的范围也是在向西扩展；在北太平洋中部异常中心 9 个模式中有 7 个模式在全球变暖的背景下异常中心值在增加，在 CMCC-CM、HadGEM2-AO 模式下，中心值在减弱，且范围也有所减小。时间特征上,对模拟良好以上的模式进行功率谱分析，分析得出 9 种模式有 7 种模式 PDO 模态的频率向高频移动（峰值周期变小），只有 HadGEM2-ES、NorESM1-ME 模式表现出 PDO 模态向低频移动（峰值周期变大）。

6 结论和讨论

本文首先对比观测数据 1934 年前后的 PDO 时空特征发现：在全球变暖的背景下，PDO 振幅得到加强，赤道中东太平洋、太平洋东部沿岸和北太平洋的中部异常中心值和范围都明显增强；而其频率则表现为向高频移动，说明其周期变短。接着，基于 CMIP5 多个海气耦合模式的 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，发现选取的 CMIP5 模式对 PDO 有着较好的模拟能力，都能一致地刻画出 PDO 的空间模态和年代际周期特征。进而，从中挑取出模拟良好以上的 9 种模式看 PDO 对不同变暖情景响应的时空特征是否与观测符合。结果表明：在全球变暖加剧的情景下，有 8 种模式表现出在赤道中太平洋异常中心的值显著增加，其范围一般也向西扩展；在北太平洋东部沿岸异常中心，有 7 种模式表现出振幅增加，范围也是在扩展；在北太平洋中部异常中心，有 7 个模式的强度在增加. 时间特征上，根据功率谱分析结果，有 7 种模式 PDO 模态的频率向高频移动（峰值周期变小），只有 HadGEM2-ES、NorESM1-ME 模式表现出 PDO 模态向低频移动（峰值周期变长）。这些结果表明，全球变暖可导致 PDO 的振幅加强，而周期变短，与观测基本相符。

值得思考的是为何全球变暖背景下 PDO 会得到加强？根据前人的相关研究，可以初步推测：太平洋东部沿岸和北太平洋中部的异常中心得到加强的原因可能与 PNA 有关；赤道中东太平洋变得更暖的原因可能与 ENSO 有关；黑潮及其延伸体区域黑潮及其延伸体区域异常中心发生变化的原因可能是全球变暖导致海洋 Rossby 波波速发生变化（Newman et al., 2016）。至于这种推测是否合理，PDO 对全球变暖的具体响应过程和机制，还需要下一步深入探讨。

参考文献（References）

蔡怡, 王彰贵, 乔方利. 2008. 全球变暖背景下最近 40 年太平洋海温变化数值模拟 [J]. 海洋学报, 30(5): 9−16. Cai Yi, Wang Zhanggui, Qiao Fangli. 2008. The simulation of Pacific ocean temperature with the global warming during 1960-1999 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 30(5): 9−16. doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2008.05.002

陈峥, 甘波澜, 吴立新. 2018. 基于 CMIP3 与 CMIP5 模式对北太平洋大气环流模态的评估分析 [J]. 中国海洋大学学报, 48(1): 1−11. Chen Zheng, Gan Bolan, Wu Lixin. 2018. The assessment of North Pacific atmospheric circulation patterns based on CMIP3 and CMIP5 models [J]. Periodical of Ocean University of China, 48(1): 1−11. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.20170085

Deser C, Blackmon M L. 1995. On the Relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations [J]. J. Climate, 8(6): 1677−1680. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1677:OTRBTA>2.0.CO;2

Furtado J C, Di Lorenzo E, Schneider N, et al. 2011. North Pacific decadal variability and climate change in the IPCC AR4 models [J]. J. Climate, 24(12): 3049−3067. doi:10.1175/2010JCLI3584.1

Geng T, Yang Y, Wu L X. 2019. On the mechanisms of Pacific decadal oscillation modulation in a warming climate [J]. J. Climate, 32(5): 1443−1459. doi:10.1175/JCLI-D-18-0337.1

胡基福. 1996. 气象统计原理与方法 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 29–30 Hu Jifu. 1996. Principles and Methods of Meteorological Statistics (in Chinese) [M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 29–30.

江志红, 屠其璞, 施能. 2000. 年代际气候低频变率诊断研究进展 [J]. 地球科学进展, 15(3): 342−347. Jiang Zhihong, Tu Qipu, Shi Neng. 2000. Advance in diagnosis study of mutidecadal low frequency variability [J]. Advances in Earth Science, 15(3): 342−347. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2000.03.019

李崇银. 2000. 气候动力学引论 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 421–448 Li Chongyin. 2000. Introduction to Climate Dynamics (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 421–448.

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

Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation [J]. Journal of Oceanography, 58(1): 35−44. doi:10.1023/A:1015820616384

Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited [J]. J. Climate, 29(12): 4399−4427. doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1

Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 106(D7): 7183−7192. doi:10.1029/2000JD900719

Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93(4): 485−498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(1): 61−78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71(7): 988−993. doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2

Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere –ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9(6): 303−319. doi:10.1007/BF00204745

王黎娟, 何金海. 1998. 海温的年际和年代际变化及其对东亚季风影响的国内研究进展 [J]. 气象教育与科技, 20(2): 24−29. Wang Lijuan, He Jinhai. 1998. Inter-annual and inter-decadal changes in SST and their impacts on the East Asian monsoon [J]. Meteorological Education and Science, 20(2): 24−29.

王绍武. 2001. 现代气候学研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 348–370 Wang Shaowu. 2001. Research Progress in Modern Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press, 348–370.

王绍武, 朱锦红. 1999. 国外关于年代际气候变率的研究 [J]. 气象学报, (3): 376−384. Wang Shaowu, Zhu Jinhong. 1999. A review of overseas study on inter decadal variability [J]. Acta Meteorologica Sinica, (3): 376−384.

夏杨, 孙旭光, 闫燕, 等. 2017. 全球变暖背景下 ENSO 特征的变化 [J]. 科学通报, 62(16): 1738−1751. Xia Yang, Sun Xuguang, Yan Yan, et al. 2017. Change of ENSO characteristics in response to global warming [J]. Chinese Science Bulletin, 62(16): 1738−1751. doi:10.1360/N972016-01225

徐建军, 朱乾根, 施能. 1996. 年代际气候变率问题的研究 [J]. 南京气象学院学报, 19(4): 488−495. Xu Jianjun, Zhu Qiangen, Shi Neng. 1996. Review of studies on interdecadal varibility in climate [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 19(4): 488−495.

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, 28(6): 979−992. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15