

基于CMIP6模式对太平洋 - 北美型遥相关的评估分析

王晏涵¹, 陈 峥^{1,2,3*}

¹中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

²中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

³海洋动力 - 物理环境与智能感知全国重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2026年6月5日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月8日

摘 要

太平洋 - 北美型遥相关(Pacific-North American teleconnection, PNA)是北半球冬季大气环流最重要的低频变率模态之一, 其异常变化对北美乃至整个北半球中高纬度地区的气温、降水及极端天气事件具有深远影响。本研究以再分析资料集NOAA-CIRES和NCEP-NCAR Reanalysis 1为对照组, 33个CMIP6模式为试验组, 对模式结果进行评估分析。在评估过程中, 首先通过时间多模式集合(Temporal Multi-Model Ensemble, TMME)和空间多模式集合(Spatial Multi-Model Ensemble, SMME)的两步筛选, 构建了一套兼顾时间与空间模拟能力的模式遴选框架、形成了时空多模式集合(Temporal Spatial Multi-Model Ensemble, TSMME), 该集合是从参与评估的33个CMIP6模式中筛选出的一个模式子集。评估结果表明, TSMME在PNA指数时间相关性、年际振荡周期的再现以及空间模态的模拟精度等方面均优于或相当于另外两个集合, 有效克服了传统集合平均因模式良莠不齐而导致的模拟能力受限问题, 为后续研究奠定了可靠的模式基础。

关键词

太平洋 - 北美型遥相关, CMIP6, 时空多模式集合, 泰勒图, 谱分析

Assessment of Pacific-North American Teleconnection Based on CMIP6 Models

Yanhan Wang¹, Zheng Chen^{1,2,3*}

¹College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³National Key Laboratory of Marine Dynamics-Physical Environment and Intelligent Perception, Qingdao

*通讯作者。

文章引用: 王晏涵, 陈峥. 基于 CMIP6 模式对太平洋-北美型遥相关的评估分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 706-718. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154075

Shandong

Received: June 5, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 8, 2026

Abstract

The Pacific-North American (PNA) teleconnection pattern is one of the most important low-frequency variability modes of boreal winter atmospheric circulation, and its anomalous changes exert profound influences on temperature, precipitation, and extreme weather events across North America and the mid-to-high latitudes of the Northern Hemisphere as a whole. This study uses reanalysis datasets NOAA-CIRES and NCEP-NCAR Reanalysis 1 as the reference set and 33 CMIP6 models as the experimental set to evaluate and analyze the model results. During the evaluation process, a two-step screening procedure was applied through the Temporal Multi-Model Ensemble (TMME) and the Spatial Multi-Model Ensemble (SMME) to construct a model selection framework that accounts for both temporal and spatial simulation capabilities, thereby forming the Temporal-Spatial Multi-Model Ensemble (TSMME). This ensemble represents a subset of models selected from the 33 CMIP6 models participating in the evaluation. Evaluation results demonstrate that TSMME outperforms or is comparable to another two ensemble methods in terms of the temporal correlation of PNA indices, the reproduction of interannual oscillation periods, and the accuracy of spatial pattern simulation, effectively overcoming the limitations of traditional ensemble averaging caused by uneven model quality, and providing a reliable model foundation for subsequent research.

Keywords

Pacific-North American Teleconnection, CMIP6, Temporal Spatial Multi-Model Ensemble, Taylor Diagram, Spectral Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气遥相关是指空间距离相隔数千公里以上的气象要素之间存在显著统计相关的现象[1] [2]。1981年, Wallace 和 Gutzler 利用单点相关方法系统分析了北半球冬季 500 hPa 位势高度距平场, 首次揭示了五种主要遥相关型, 包括太平洋-北美型(PNA)、西大西洋型(WA)、东大西洋型(EA)、欧亚型(EU)和西太平洋型(WP) [2]。其中, PNA 是北半球中高纬度大气环流最显著的低频变率模态之一, 对北美地区的天气与气候具有深远影响。PNA 的空间结构表现为四个交替排列的正-负-正-负异常中心, 分别位于夏威夷群岛附近、阿留申群岛以南、北美西海岸和美国东南部[2]-[4]。PNA 具有正、负两种位相: 正位相时阿留申低压加深, 北美西部受暖脊控制、东部受冷槽控制; 负位相时各中心极性反转, 有利于极地冷空气南侵[4] [5], 在北半球冬季(12月至次年2月)最为活跃[3] [6]。

利用耦合气候模式评估未来气候变化情景下大气遥相关型的变化, 是当前气候科学研究的重要途径, 利用最新的 CMIP6 气候模式进行研究是当前的主流手段, 借助最新数据或可得到更稳健的预测结果[7] [8]。传统多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)方法通过对多个气候模式输出结果进行等权重算术平均, 旨在抵消模式间的随机误差、降低不确定性[9] [10]。然而, MME 忽视了各模式模拟性能的差异, 模

拟能力较差的模式可能引入显著偏差, 降低集合结果的精度与物理一致性[9] [11]。为克服上述局限, 条件多模式集合(Conditional Multi-Model Ensemble, CMME)方法在 2018 年被提出并在 2024 年得到进一步拓展, 使用时间系数等参数为条件进行模式筛选, CMME 不仅提升了统计精度, 更增强了集合对关键物理机制的再现能力[12]-[14]。

泰勒图(Taylor Diagram)是一种被广泛采用的气候模式诊断工具[15], 通过在同一极坐标图中同时展示模式与观测再分析资料所求出的气候模态之间的空间相关系数、标准差以及中心化均方根误差三项统计指标, 能够直观、定量地综合评价模式对气候变量空间结构的模拟能力。本研究使用 CMME 和泰勒图两种方法, 将通过两步筛选的模式纳入时空多模式集合(Temporal Spatial Multi-Model Ensemble, TSMME)中, TSMME 同时将时间相关性和空间相似性作为筛选条件, 以期在未来预估中得到时空两维度均更可靠的模拟结果, 为物理机制研究提供更坚实的基础。

2. 数据与方法

2.1. 数据

2.1.1. 再分析资料

位势高度(Geopotential Height, GPH, 单位: m)月平均数据的前半段(时间: 1900.1~1947.12)来自美国国家海洋和大气局-环境科学协作研究所(NOAA-CIRES)二十世纪再分析数据集 2c 版(20th Century Reanalysis (V2c), 20CRV2c) [16], 分辨率 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$; 后半段(时间: 1948.1~2024.12)来自美国国家环境预测中心-美国国家大气研究中心(NCEP-NCAR)再分析数据集 1 (Reanalysis 1) [17], 分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。由于不同数据集的分辨率有所不同, 将所有数据全部插值为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的分辨率, 以便后续的比较和分析; 再分析资料 NOAA-CIRES 20CRV2c, NCEP-NCAR Reanalysis 1 的下载网址如下:

https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

2.1.2. CMIP6 多模式资料

本研究选择第六次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)作为模式资料来源[18]。CMIP6 模式资料中包含不同时间段的不同情景, 其中, 历史阶段的常用情景为 Historical。

本研究选取各模式 1900 年 1 月至 2014 年 12 月的 Historical 数据作为试验组, 将同时段的再分析资料作为对照组, 进行模式评估, 共选用 33 个模式的位势高度数据, 模式名称、机构简称、所属地区以及分辨率如表 1 所示, 与再分析资料相对应。

由于不同模式资料的分辨率有所不同, 将所有数据全部插值到 1 经度 $\times$ 1 纬度分辨率的规整网格以便后续的比较和分析。CMIP6 资料的下载网址为: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>。

Table 1. Details of the 33 CMIP6 models used in this paper

表 1. 本文使用的 33 个 CMIP6 模式详细信息

序号	模式名称	机构简称及所属地区	分辨率(经度 $\times$ 纬度)	
			大气	海洋
1	ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS, 澳大利亚	192 $\times$ 144	360 $\times$ 300
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO, 澳大利亚	192 $\times$ 144	360 $\times$ 300
3	AWI-CM-1-1-MR	AWI, 德国	384 $\times$ 192	830,305 个非结构化网格点
4	BCC-CSM2-MR	BCC, 中国	320 $\times$ 160	360 $\times$ 232

续表

5	CAMS-CSM1-0	CAMS, 中国	320 × 160	360 × 200
6	CanESM5	CCCma, 加拿大	128 × 64	361 × 290
7	CAS-ESM2-0	CAS, 中国	256 × 128	362 × 196
8	CESM2-WACCM	NCAR, 美国	288 × 192	320 × 384
9	CIESM	THU, 中国	288 × 192	320 × 384
10	CMCC-CM2-SR5	CMCC, 意大利	288 × 192	362 × 292
11	CMCC-ESM2	CMCC, 意大利	288 × 192	362 × 292
12	EC-Earth3	EC-Earth-Consortium, 欧盟	512 × 256	362 × 292
13	EC-Earth3-CC	EC-Earth consortium, 欧盟	512 × 256	362 × 292
14	EC-Earth3-Veg	EC-Earth consortium, 欧盟	512 × 256	362 × 292
15	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth consortium, 欧盟	320 × 160	362 × 292
16	FGOALS-f3-L	CAS, 中国	288 × 180	360 × 218
17	FGOALS-g3	CAS, 中国	180 × 80	360 × 218
18	FIO-ESM-2-0	FIO-QLNM, 中国	288 × 192	320 × 384
19	GFDL-ESM4	NOAA-GFDL, 美国	288 × 180	720 × 576
20	IITM-ESM	CCCR-IITM, 印度	192 × 94	360 × 200
21	INM-CM4-8	INM, 俄罗斯	180 × 120	360 × 318
22	INM-CM5-0	INM, 俄罗斯	180 × 120	720 × 720
23	IPSL-CM6A-LR	IPSL, 法国	144 × 143	362 × 332
24	KACE-1-0-G	NIMS-KMA, 韩国	192 × 144	360 × 200
25	KIOST-ESM	KIOST, 韩国	192 × 96	360 × 200
26	MIROC6	MIROC, 日本	256 × 128	360 × 256
27	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M, 德国	384 × 192	802 × 404
28	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M, 德国	192 × 96	256 × 220
29	MRI-ESM2-0	MRI, 日本	320 × 160	360 × 364
30	NESM3	NUIST, 中国	192 × 96	362 × 292
31	NorESM2-LM	NCC, 挪威	144 × 96	360 × 384
32	NorESM2-MM	NCC, 挪威	288 × 192	360 × 384
33	TaiESM1	AS-RCEC, 中国	288 × 192	320 × 384

2.2. 方法

2.2.1. PNA 冬季空间模态及时间指数的求解

对于再分析及各模式资料的位势高度(GPH)数据,均选取 500 hPa 层级,截取出 120°E~60°W, 10~80°N 区域的数据后,去除线性趋势和气候态后选取每年 12 月和次年 1、2 月(DJF)的数据组成冬季的位势高度异常(GPHa)场,进行纬度加权后进行经验正交函数(EOF)分解,分解得到的第一主成分 PC1 标准化后则为 PNA 指数,再将 DJF GPHa 场回归到 PNA 指数上,可得到标准化 PNA 空间模态(单位: m)。

2.2.2. 条件多模式集合(CMME)

传统多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)通过对所有模式进行算术平均后得到,由于 MME 能

够消除各模式模拟偏差中的随机部分, 其结果通常优于大多数单个模式[19]。若共有 n 个模式, 每个模式记为 $M_i (i=1,2,\dots,n)$, 则多模式集合的平均值为:

$$M_i (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

Yu 等人在此基础上提出了条件多模式集合方法[14] (Conditional Multi-Model Ensemble, CMME), 该方法引入额外的筛选条件 C 对模式进行过滤: 若共有 n 个模式, 其中满足条件的模式有 s 个, 则条件多模式集合的平均值为:

$$\overline{\text{CMME}} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^n \delta_i M_i \quad (2)$$

其中,

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{模式满足条件 } C \\ 0, & \text{模式不满足条件 } C \end{cases}, s = \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (3)$$

2.2.3. 泰勒图(Taylor Diagram)

本文采用泰勒图[15]对各模式进行空间评估。泰勒图能够同时将通过再分析资料求出的空间模态(观测或参考值)以及各模式空间模态(模式模拟值)的标准差 σ (Standard Deviation)、相关系数 R (Correlation Coefficient)、中心化均方根误差 E (Centered Root Mean Square Difference/Error)集中展示在同一张极坐标图上, 直观反映各模式对空间模态的模拟能力。

在画泰勒图之前, 观测及模式的标准差、中心化均方根误差均需要做归一化处理(统一除以观测的标准差)。在图中, 标准差反映模式模拟场的离散程度, 空间相关系数衡量模式与观测空间分布型的相似程度, 中心均方根误差反映观测和模式结果之间的空间偏差。图中, 某模式与参考点(观测)距离越近, 则该模式的模拟能力越强。

2.2.4. 泰勒技能评分(Taylor Skill Score)

泰勒技能评分(Taylor Skill Score)是 Taylor 提出的另一种评估模拟能力的指标[15], 公式如下:

$$s = \frac{4(1+R)^4}{(\hat{\sigma}_f + 1/\hat{\sigma}_f)^2 (1+R_0)} \quad (4)$$

在公式(4)中, R 是模式与观测之间的相关系数, R_0 是各模式中的最大相关系数(本研究中假设为 1)。 $\hat{\sigma}_f$ 是模式中 PNA 模态的标准化标准差, 即模式标准差(σ_f)与观测 PNA 标准差(σ_r)的比值。模式的性能随着 S 的增加而提高, S 的范围为从 0 到 1。

2.2.5. 功率谱分析

周期性连续信号的频谱可转化为离散的非周期序列, 它的幅度频谱的平方所排成的序列被称作该周期信号的“功率谱”, 功率谱表示了信号功率随着频率的变化关系[20]。为研究 PNA 的功率谱周期特性, 本文对观测及各模式资料的 PNA 标准化时间序列进行了功率谱分析, 从而对各模式模拟 PNA 时间特征能力进行评估。谱分析的具体方法如下:

(1) 对于观测及各模式资料, 将经过去线性趋势和去气候态处理之后的全年连续 GPHa 场(三维变量)投影到 PNA 空间模态上, 构建 PNA 的扩展系数(Expansion coefficient, EC)时间序列[21]——首先将 GPHa 场(三维变量)的经度和纬度合并为一个维度得到二维 GPHa 场, 并将 PNA 的空间模态(二维变量)用同样的方法降为一维, 再用二维 GPHa 场除以一维 PNA/WP 模态, 即得到该模态的扩展时间序列 EC_{PNA} (一维变量); (2) 将观测及各模式资料的 EC_{PNA} 代入功率谱分析的函数中, 得到各自对应的功率和周期; (3) 对

观测及各模式资料的功率做标准化处理——将各周期的功率除以总功率, 得到功率百分比(标准化功率), 最后采用 90%置信水平的 F 检验[22]。

3. 结果与分析

3.1. 时间评估与时间多模式集合(TMME)

基于 1900~2014 年冬季平均的 500 hPa 位势高度异常场, 通过 2.2.1 中的方法得到各模式及再分析资料(OBS)的 PNA 指数。将各模式 PNA 指数与 OBS 求相关, 得到 33 个相关系数(绝对值在 0 和 0.216 之间)。设定相关系数阈值从 0 到 0.21, 计算不同阈值下 TMME (满足条件的模式集合平均)与 OBS 的相关系数(图 1 左 y 轴)以及此时达到阈值的模式数量(图 1 右 y 轴)。当阈值等于 0.05 时, TMME 与 OBS 的相关系数达到最大值 0.446, 此时纳入 19 个模式, 在此之后, 阈值增大则模式数量减少, 相关系数下降。

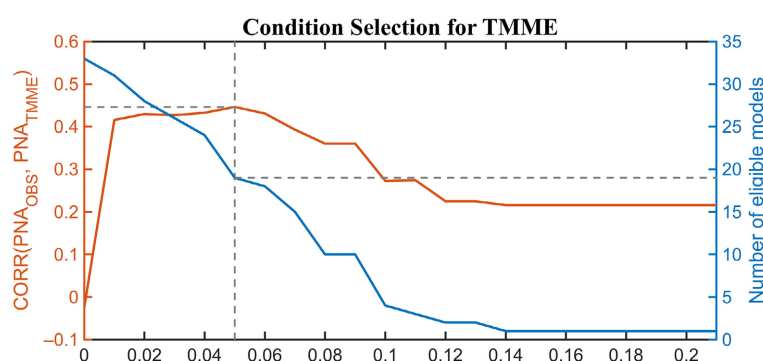


Figure 1. The correlation coefficients between the PNA indices of TMME and OBS (see left y-axis) corresponding to different thresholds set for the correlation coefficients between the PNA indices of each mode and OBS (see x-axis), along with the number of models in TMME at that condition (see right y-axis)

图 1. 基于各模式与 OBS 的 PNA 指数的相关系数设置的不同阈值(见 x 轴)对应的 TMME 与 OBS 的 PNA 指数的相关系数(见左 y 轴)以及此时 TMME 中的模式数量(见右 y 轴)

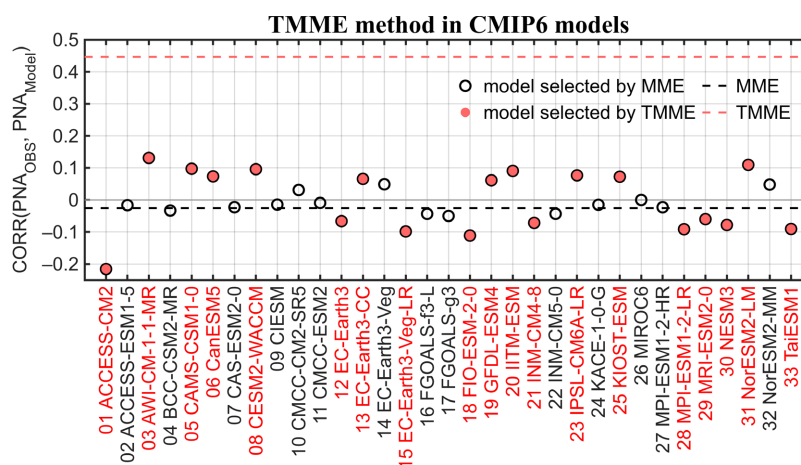


Figure 2. Correlation coefficients between the PNA indices of the OBS and the individual models of MME, as well as their ensemble means, and between the PNA indices of the OBS and the individual models of TMME, as well as their ensemble means (All 33 models belong to MME, with the values of each model and the ensemble mean represented by black hollow dots and dashed lines respectively. Among them, 19 models also belong to TMME, with the values of each model and the ensemble mean represented by red solid dots and dashed lines respectively, and names of models are also marked in red)

图 2. MME 各模式及其集合平均与 OBS 的 PNA 指数之间的相关系数以及 TMME 各模式及其集合平均与 OBS 的 PNA 指数之间的相关系数(33 个模式都属于 MME, 各模式值和集合平均值分别用黑色空心点和虚线表示, 其中有 19 个模式同时属于 TMME, 各模式值和集合平均值分别用红色实心点和虚线, 模式名称也标记为红色)

图 2 比较了各模式(见圆点)及 MME、TMME (见虚线)与 OBS 的相关系数。传统 MME (所有模式等权平均)与 OBS 的相关系数为-0.026, TMME (19 个模式, 平均前将各模式指数调整为与 OBS 正相关)的相关系数为 0.446, 比表现最好的单个模式 ACCESS-CM2 (0.216)也高出了 1 倍多, 这表明基于时间相关性的筛选显著提升了多模式对 PNA 时间特征的模拟能力。

3.2. 空间评估与空间多模式集合(SMME)

在本节, 使用 3.1 节提到的方法获取再分析资料(同 3.1 节, 以下简称 OBS)及各模式的 PNA1900/1901 年 DJF 至 2013/2014 年 DJF 这 114 年冬季平均的 PNA 空间模态之后, 运用泰勒图进行空间评估, 泰勒图如图 3 所示。

图 3 中的蓝色点划线、黑色虚线及绿色实线分别为再分析资料(图中的参考值 REF)及各模式与 REF 的相关系数、归一化标准差(以下简称“标准差”)以及归一化、中心化均方根误差(以下简称“均方根误差”)的数值参照线。归一化的方法是将标准差和中心化均方根误差均统一除以 OBS 的标准差。在该图中, 离 REF 点越近的模式, 综合三个物理参数后的空间表现最好, 大多数的模式点分布集中。从标准化标准差来看, 多数模式的归一化标准差介于 0.8 至 1.2 之间, 说明 CMIP6 模式对 PNA 模态的振幅总体模拟合理, 既无系统性的显著高估, 也无明显低估; 少数模式(如 20 号 IITM-ESM)标准差严重偏离 1.0, 表明其对 PNA 振幅的再现能力较弱。参照公式(4)~(6), 相关系数 R 和均方根误差 E 能体现出各模式和 OBS 之间的关系, 所以选用这两者为指标, 将 $R \geq 0.8$ 和 $E \leq 0.5$ 设定为空间评估结果良好的标准, 同时满足两条标准的模式共 20 个, 序号及名称在图 3 中标记为蓝色。将这 20 个空间表现最好的模式组合成 SMME, 用于后续分析。

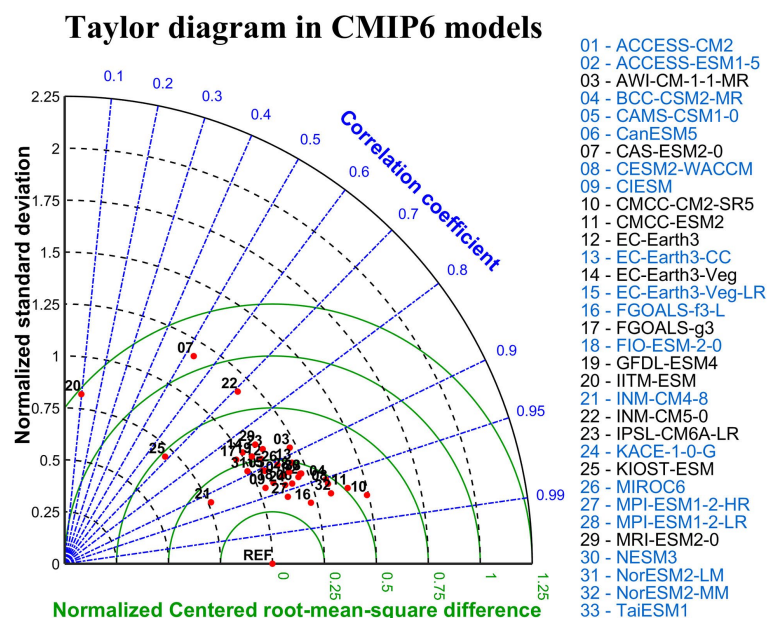


Figure 3. Normalized Taylor diagram of PNA spatial patterns simulated by CMIP6 models (Blue dotted line represents correlation coefficient R , black dotted line represents standard deviation σ , green solid line represents root mean square error E ; REF represents the spatial pattern obtained from the OBS data, the numbers labeled in the upper-left corner of the data for entries 1~30 correspond to the legend on the right, they represent the spatial patterns simulated by models; the model numbers and names included in the SMME set are highlighted in blue)

图 3. CMIP6 多模式对 PNA 空间模态模拟结果的标准化泰勒图(蓝色点划线代表相关系数 R , 黑色虚线代表标准差 σ , 绿色实线代表均方根误差 E ; REF 代表再分析资料所得空间模态, 1~30 号数据左上方标注的序号与右侧图例相对应, 它们代表各模式模拟出的空间模态; 选入 SMME 集合的模式序号及名称标记为蓝色)

3.3. 时空多模式集合(TSMME)

3.3.1. 筛选步骤

时空多模式集合(TSMME)经历两个筛选步骤: 首先经过时间评估, 得到时间表现较好的模式, 即 3.1 节中的步骤, 接着, 将 3.1 节所得 TMME 代入 3.2 节, 利用这种空间评估方法挑选出时间表现好的模式当中, 空间表现好的那部分, 并命名为 TSMME。通过使用该方法, 所选模式在时间和空间维度上都能表现出更好的模拟能力。

图 4 将筛选方法很好地体现在了图像上, 该图中共有 19 个 TMME 中的模式点, 与图 2 对应, 模式的序号及名称皆为红色, 接着, 对它们沿用 3.2 节中的标准进行空间评估, 序号及名称标为紫色的 12 个模式通过了该标准, 形成新的时空多模式集合 TSMME, 这部分模式的序号及名称需在红色的基础上叠加蓝色标记从而形成紫色。图中 20 号模式严重偏离大多数模式所处位置, 虽然它的时间维度模拟能力较好、能通过评估, 但空间模拟能力过差, 与参考值的空间相关系数仅为 0.1。经过时、空两个维度的评估, 才可将此模式剔除, 由此可见筛选时空多模式集合 TSMME 的必要性。

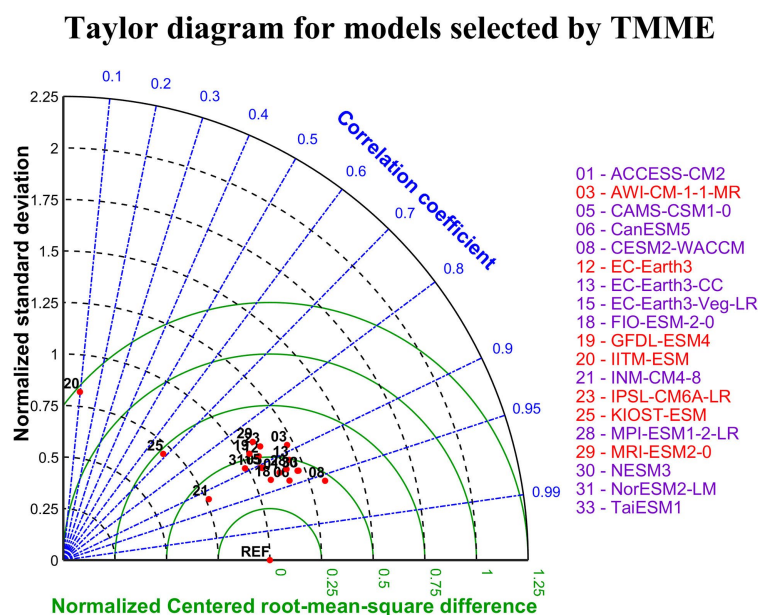


Figure 4. Normalized Taylor diagram of PNA spatial patterns simulated by 19 models in TMME (In the legend on the right, models with numbers and names in purple are included in the TSMME set, while the rest are not included in TSMME, and see more in Figure 3)

图 4. 19 个 TMME 中的模式对 PNA 空间模式模拟结果的标准化泰勒图(右侧图例中, 序号及名称为紫色的模式选入 TSMME 集合, 剩下的未选入 TSMME, 更多说明见图 3)

3.3.2. TSMME 的时间表现

为全面展现 TSMME 的时间表现, 先将其与 MME, TMME, SMME 进行对比, 体现出这种集合方法在时间维度上的优越性, 再分别分析集合中每个模式的具体时间表现。

图 5 显示 1900~2014 年冬季 OBS 及四种集合平均的标准化 PNA 指数序列。TMME 和 TSMME 与 OBS 的相关系数分别为 0.45 和 0.31, 远优于 MME (-0.03)和 SMME (0.04), 由此可见, TMME 和 TSMME 对于 PNA 时间特征的模拟能力都是较为可靠的。

功率谱分析(图 6)表明: TSMME 能够重现 OBS 的 EC_{PNA} 在 1~2 年、2~4 年和 4~8 年周期上的显著功率峰值, MME 和 TMME 方法能够模拟出 4、7~13 年以及 4 年和 5~8 年的周期信号, 但 2 年内以及较大

的年代际周期都没有模拟出来, SMME 方法能够较好地再现 2~4 年、4~8 年以及年代际变率, 但对 2 年内周期信号的模拟存在不足。综合以上, SMME 和 TSMME 对周期信号的模拟能力差不多, 但由于本研究着眼于年平均冬季 PNA 特征的捕捉且根据图 5, SMME 的 PNA 指数与 OBS 的 PNA 指数之间的相关系数很小, 因此, TSMME 的时间模拟综合表现最好。TSMME 重现的周期当中, 2~4 年的显著周期与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的典型周期相吻合, 反映了热带太平洋海温异常通过大气桥机制对 PNA 遥相关的强迫作用, 而 1~2 年的次年际信号则可能与大气内部动力过程(如平流层-对流层耦合及北极涛动的下传)有关。

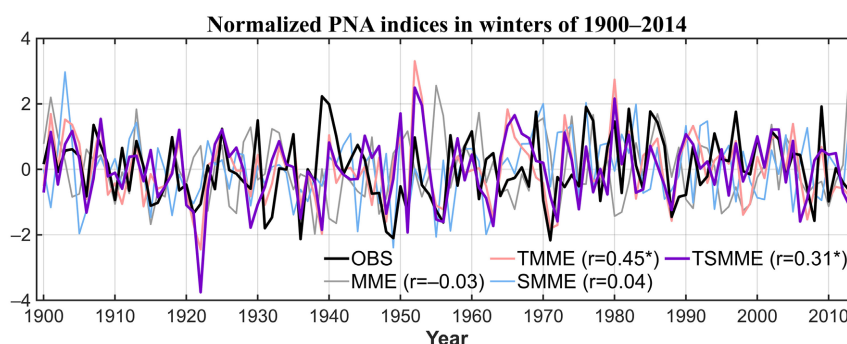


Figure 5. Normalized PNA index time series of OBS, MME, TMME, SMME and TSMME in winters of 1900–2014 (In the legend, r denotes the correlation coefficient between standardized PNA indices of each ensemble mean and OBS; values marked with * have passed a Student's t -test at the 95% confidence level)

图 5. 1900~2014 年冬季 OBS 与 MME, TMME, SMME, SMME 四种集合的标准化 PNA 指数时间序列(图例中的 r 为每种集合平均与 OBS 的标准化 PNA 指数之间的相关系数, 标有*的通过了 95%置信水平的学生 t 检验)

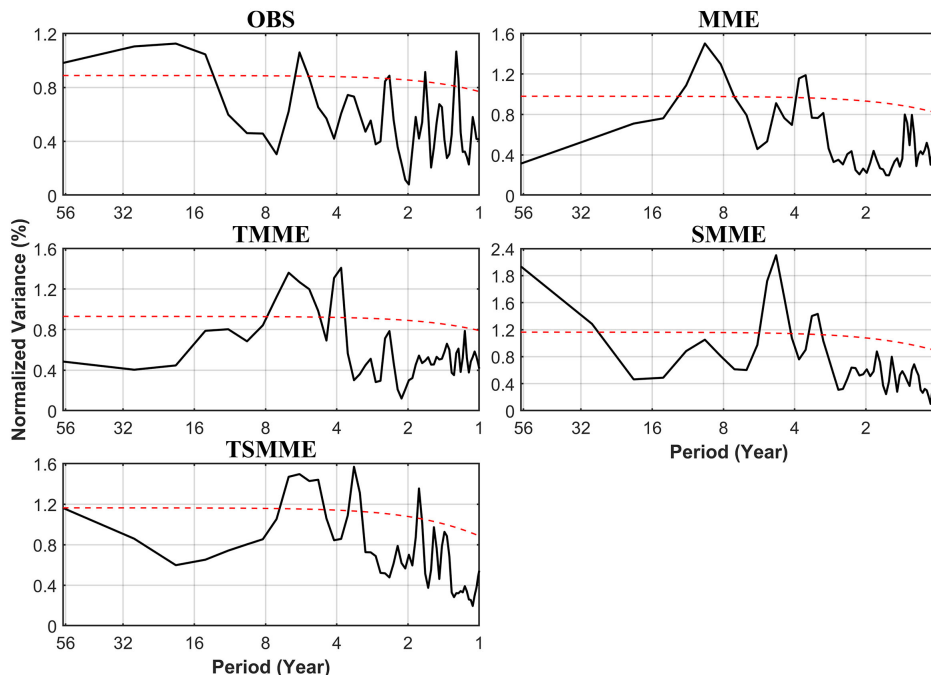


Figure 6. EC_{PNA} -normalized power spectra of OBS, MME, TMME, and SMME from 1900 to 2014 (The red dotted line represents the F-test line at the 90% confidence level. The values of the black curve above the red dotted line have passed the test.)

图 6. 1900~2014 年 OBS 与 MME, TMME, SMME, TSMME 四种集合的 EC_{PNA} 标准化功率谱(红色虚线为 90%置信水平的 F 检验线, 高于红色虚线的黑色数值通过检验)

图 7 进一步展示了 TSMME 中 12 个模式的个体功率谱：多数模式能再现 4~8 年年际信号，但仅少数（如 CESM2-WACCM、INM-CM4-8、NorESM2-LM）能模拟出 16 年以上年代际振荡，且峰值位置存在偏差，这表明，CMIP6 模式对 PNA 年代际变率的物理过程模拟仍存在较大的模式间离散度。各模式对上述峰值的模拟能力差异，在一定程度上反映了其对热带强迫及大气内部变率相对贡献的不同表征方式，这也是造成模式间 PNA 时间变率模拟差异的重要物理根源。

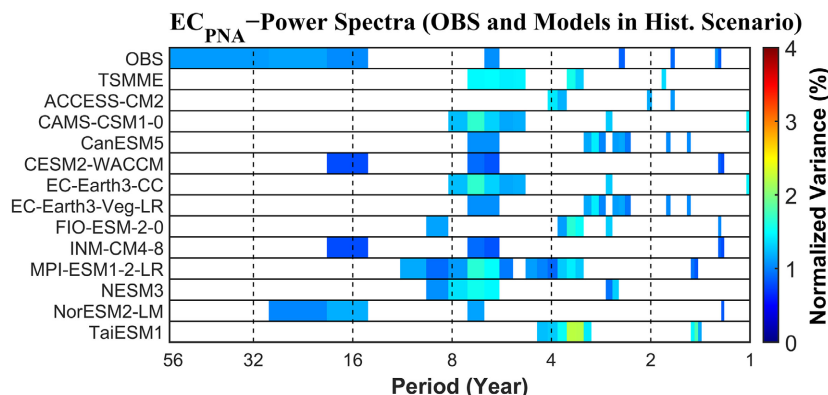


Figure 7. EC_{PNA} -normalized power spectra of OBS, TSMME and each of the 12 models in this ensemble from 1900 to 2014 (The normalized variance corresponding to the colored area have passed the F-test at the 90% confidence level, the legend is shown on the right color bar, and values in the blank areas didn't pass the test)

图 7. 1900~2014 年 OBS 与 TSMME 及该集合中 12 个模式各自的 EC_{PNA} 标准化功率谱(图中填色区域对应的标准化功率通过了 90%置信水平的 F 检验，图例见右侧色带，空白区域的值未通过检验)

3.3.3. TSMME 的空间表现

图 8 给出了 OBS 及四种集合的标准化 PNA 空间模态。OBS 呈现典型四极型波列：北太平洋中部负中心、阿留申以北及北美西岸正中心。MME 的空间相关系数 $r = 0.76$ 、泰勒技能评分 $s = 0.60$ ，模拟精度有限；TMME 的 $r = 0.86$, $s = 0.75$ ；SMME 表现最优， $r = 0.98$, $s = 0.95$ ；TSMME 的 $r = 0.97$, $s = 0.94$ ，与 SMME 高度接近，远优于 MME 和 TMME，表明时空联合筛选能在兼顾时间性能的同时保持高空间精度。

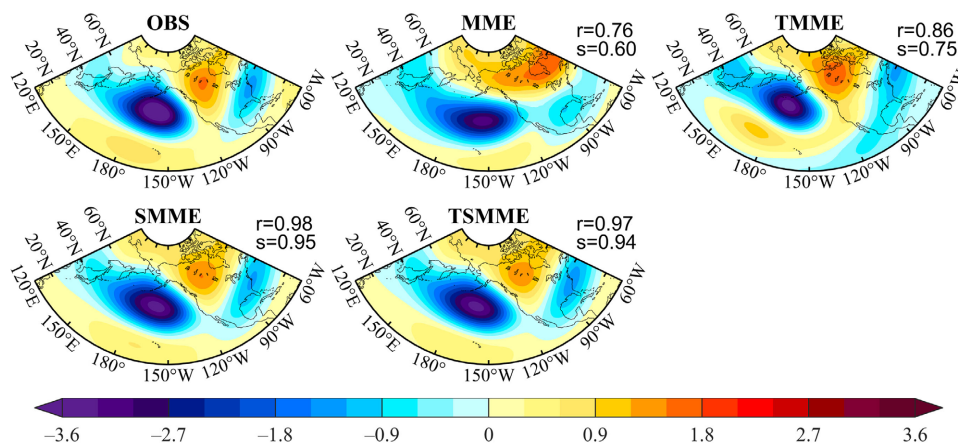


Figure 8. Standardized PNA spatial patterns of OBS, MME, TMME, SMME and TSMME in winters from 1900 to 2014

图 8. 1900~2014 年冬季 OBS 与 MME, TMME, SMME, TSMME 四种集合的标准化 PNA 空间模态

图 9 展示了 TSMME 中 12 个模式各自的标准化空间模态。所有模式均能再现基本的四极型波列结构， r 介于 0.89 和 0.96 之间， s 介于 0.80 和 0.92 之间。其中 CESM2-WACCM 表现最优($r = 0.96$, $s = 0.92$)；

NorESM2-LM 略低 ($r = 0.89, s = 0.80$) 但仍优于 MME。部分模式(如 ACCESS-CM2、FIO-ESM-2-0)在北美东部模拟出偏强正信号, 反映系统性偏差, 但核心区域模拟一致。TSMME 集合平均有效抑制了个体偏差, 与 OBS 高度吻合, 充分体现了优选模式集合平均在降低不确定性、提升模拟可信度方面的重要优势。从物理机制角度而言, 入选 TSMME 的模式在北太平洋风暴轴位置及强度的模拟上普遍更为准确, 有助于更真实地再现中纬度波流相互作用过程, 从而使 PNA 四极型波列的空间结构得到较好刻画。而部分模式(如 ACCESS-CM2、FIO-ESM-2-0)在北美东部呈现偏强正常信号, 可能与其模拟的热带太平洋海温异常强迫偏强有关, 导致 Rossby 波列在下游传播过程中产生系统性偏差。上述物理过程的差异是造成各模式空间模拟能力分化的重要原因, 有待在后续研究中进一步定量检验。

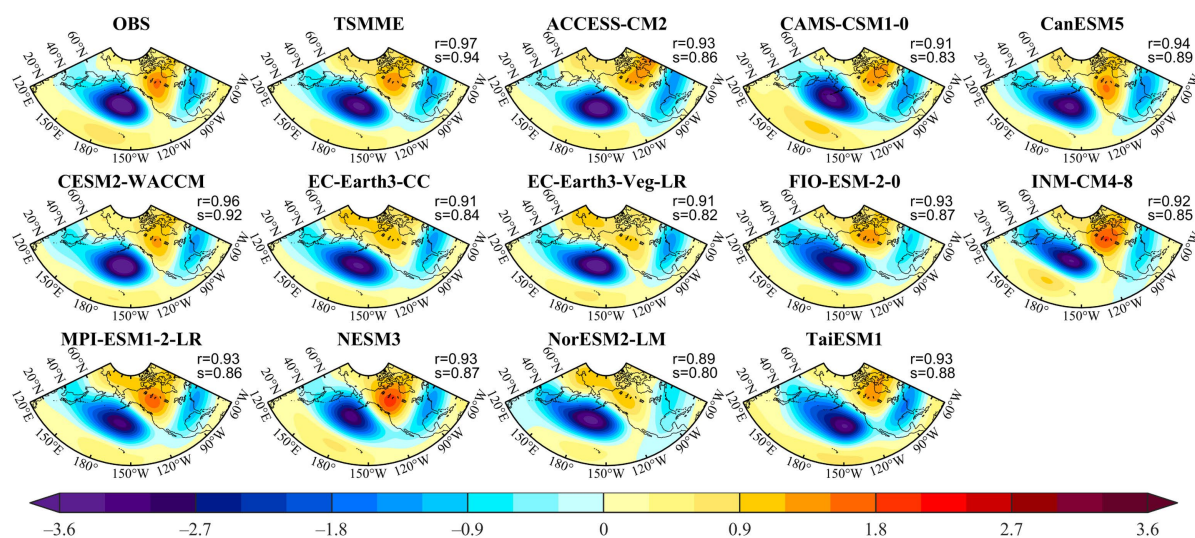


Figure 9. Standardized PNA spatial patterns of OBS, TSMME and each of the 12 models in this ensemble in winters from 1900 to 2014

图 9. 1900~2014 年 OBS 与 TSMME 及该集合中 12 个模式各自的标准化 PNA 空间模态

4. 总结

本文在传统多模式集合(MME)的基础上, 结合条件多模式集合(CMME)思路与泰勒图评估方法, 从时间和空间两个维度对 33 个 CMIP6 模式模拟 1900~2014 年冬季 PNA 特征的能力进行了评估与筛选, 构建了时间多模式集合(TMME)、空间多模式集合(SMME)和时空多模式集合(TSMME), 并通过与 MME 的对比验证了 TSMME 在时间变率再现和空间模态刻画两方面的综合优势。

时间评估方面, 以各模式 PNA 指数与再分析资料(OBS)的相关系数为筛选指标, 确定最优阈值 0.05, 保留相关系数绝对值不低于 0.05 的 19 个模式组合成 TMME。TMME 集合平均与 OBS 的相关系数达到 0.446, 远高于 MME (-0.026)和最优单模式 ACCESS-CM2 (0.216), 表明对时间模拟能力较好的模式进行筛选能有效提升 PNA 时间变率的再现能力。

空间评估方面, 以空间相关系数($R \geq 0.8$)和归一化均方根误差($E \leq 0.5$)为标准, 从 33 个模式中选出 20 个组合成 SMME。泰勒图评估显示, SMME 的空间相关系数(0.98)和泰勒技能评分(0.95)均大幅优于 MME (0.76, 0.60), 验证了空间筛选策略对提升模式对 PNA 空间型模拟能力的有效性。

接着, 从 19 个 TMME 模式中进一步筛选出空间表现优异的 12 个模式, 构成 TSMME。例如 20 号模式 IITM-ESM 虽通过时间评估, 但与 OBS 所求空间模态的相关系数仅 0.1, 这体现了进行时间、空间筛选两个步骤的必要性。

筛选后的 12 个模式集合 TSMME 的 PNA 指数与 OBS 的相关系数为 0.31 (通过 95% 置信检验), 优于 MME (-0.03) 和 SMME (0.04), 功率谱分析表明, TSMME 能再现 OBS 在 1~2 年、2~4 年和 4~8 年周期上的显著峰值, 对年际变率的模拟综合表现最佳; 空间表现上, TSMME 的空间相关系数(0.97)和泰勒技能评分(0.94)与 SMME 高度相当, 且同时保证了对时间变率的再现能力, 是时、空维度均表现优异的综合最优集合。TSMME 包含的 12 个模式 ACCESS-CM2、CAMS-CSM1-0、CanESM5、CESM2-WACCM、EC-Earth3-CC、EC-Earth3-Veg-LR、FIO-ESM-2-0、INM-CM4-8、MPI-ESM1-2-LR、NESM3、NorESM2-LM、TaiESM1, 在 PNA 时间指数相关性、振荡周期特征以及空间模态的位置、强度与范围等方面, 均与再分析资料保持了较高的一致性。

基金项目

国家自然科学基金项目(42006017), 山东省自然科学基金项目(ZR2019ZD12, ZR2019BD038)资助。

参考文献

- [1] 陶祖钰. 大气的遥相关现象[J]. 广西气象, 1988(2): 1-5.
- [2] Wallace, J.M. and Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, **109**, 784-812.
- [3] Barnston, A.G. and Livezey, R.E. (1987) Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review*, **115**, 1083-1126. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:csapol>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;2)
- [4] Leathers, D.J., Yarnal, B. and Palecki, M.A. (1991) The Pacific/North American Teleconnection Pattern and United States Climate. Part I: Regional Temperature and Precipitation Associations. *Journal of Climate*, **4**, 517-528. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0517:tpatpa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0517:tpatpa>2.0.co;2)
- [5] 杨丹宁. 太平洋北美型遥相关(PNA)事件的变化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [6] Feldstein, S.B. (2006) Fundamental Mechanisms of the Growth and Decay of the PNA Teleconnection Pattern. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **128**, 775-796. <https://doi.org/10.1256/0035900021643683>
- [7] Chen, Z., Gan, B., Huang, F., Li, J., Wu, L., Fan, L., et al. (2022) The Influence of Pacific-North American Teleconnection on the North Pacific SST Anomalies in Wintertime under the Global Warming. *Climate Dynamics*, **60**, 1481-1494. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>
- [8] Fredriksen, H.B., Berner, J., Subramanian, A.C. and Capotondi, A. (2020) How Does El Niño-Southern Oscillation Change under Global Warming—A First Look at CMIP6. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL090640. <https://doi.org/10.1029/2020gl090640>
- [9] Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J. and Meehl, G.A. (2010) Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, **23**, 2739-2758. <https://doi.org/10.1175/2009jcli3361.1>
- [10] Tebaldi, C. and Knutti, R. (2007) The Use of the Multi-Model Ensemble in Probabilistic Climate Projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365**, 2053-2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- [11] Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M.A. and Appenzeller, C. (2010) Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections. *Journal of Climate*, **23**, 4175-4191. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3594.1>
- [12] An, Q., Li, J. and Yang, J. (2024) Evaluation of Sea Surface Temperature Interhemispheric Dipole in CMIP6 Historical Simulations. *Climate Dynamics*, **62**, 10347-10362. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07455-0>
- [13] Yu, M., Li, J. and Zhao, S. (2024) Improvement of ENSO Simulation by the Conditional Multi-Model Ensemble Method. *Climate Dynamics*, **62**, 5307-5330. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07164-8>
- [14] Yu, M., Li, J., Zheng, F., Wang, X. and Zheng, J. (2018) Simulating the IPOD, East Asian Summer Monsoon, and Their Relationships in CMIP5. *Theoretical and Applied Climatology*, **135**, 1307-1322. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2442-4>
- [15] Taylor, K.E. (2001) Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000jd900719>
- [16] Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., et al. (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 1-28. <https://doi.org/10.1002/qj.776>

-
- [17] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., *et al.* (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:tnyrp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2)
 - [18] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., *et al.* (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
 - [19] Hurtt, G.C., Chini, L., Sahajpal, R., Froking, S., Bodirsky, B.L., Calvin, K., *et al.* (2020) Harmonization of Global Land Use Change and Management for the Period 850-2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **13**, 5425-5464. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020>
 - [20] 陈崢, 甘波澜, 吴立新. 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 (自然科学版), 2018, 48(1): 1-11.
 - [21] Furtado, J.C., Di Lorenzo, E., Schneider, N. and Bond, N.A. (2011) North Pacific Decadal Variability and Climate Change in the IPCC AR4 Models. *Journal of Climate*, **24**, 3049-3067. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3584.1>
 - [22] Torrence, C. and Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:apgtwa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:apgtwa>2.0.co;2)