

ENSEMBLES耦合模式对中国冬季气候预测能力的评估

王探文¹, 林 蓉², 林益同²

¹化隆县气象局, 青海 海东

²沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年12月20日; 录用日期: 2023年1月22日; 发布日期: 2023年1月31日

摘 要

利用ENSEMBLES (Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts)计划中提供的5个全球海气耦合模式回报数据, 评估了模式对1980~2005年中国地区(15°~55°N, 70°~140°E)冬季(12月、1月和2月)降水, 风场以及2 m气温气候态的预测能力。结果表明: 模式能较好地预测出中国地区冬季降水主要集中在东南地区的特征, 但高估了东南地区的降水, 且青藏高原东部边缘存在虚假的降水中心; 模式低估了青藏高原北部的偏西风, 高估了中国大部地区的2 m气温, 新疆地区和西南地区出现了冷偏差。对ENSEMBLES预测的冬季降水和2 m气温进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析, 发现模式可以预测出中国冬季降水和2 m气温变化的主要空间模态, 各个模式的预测效果在不同的程度上受起报时间的影响。

关键词

ENSEMBLES, 冬季气候, 模式评估

Assessment of Forecast Capability of Winter Climate in China in the Coupled Models of ENSEMBLES

Tanwen Wang¹, Rong Lin², Yitong Lin²

¹Hualong Meteorological Bureau, Haidong Qinghai

²Regional Climate Center of Shenyang, Shenyang Liaoning

Received: Dec. 20th, 2022; accepted: Jan. 22nd, 2023; published: Jan. 31st, 2023

文章引用: 王探文, 林蓉, 林益同. ENSEMBLES耦合模式对中国冬季气候预测能力的评估[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 150-161. DOI: 10.12677/ccr.2023.121016

Abstract

Using the hindcast data from five global ocean-atmosphere coupled models provided by the Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES) project for the period of 1980~2005, the forecast capability of winter (December, January and February) climate in China (15°~55°N, 70°~140°E) is assessed mainly from the aspects of precipitation, 2 m air temperature, and atmospheric circulations. The results show that the ENSEMBLES can predict the characteristics that winter precipitation in China mainly concentrates in the southeastern region of China, but overpredicts the precipitation in the southeast, and there is a false precipitation center in the eastern edge of the Tibetan Plateau. The model underestimates the westerly winds in the northern part of the Tibetan Plateau and overpredicts the 2 m temperature in most parts of China, and cold bias occurs in Xinjiang and the Southwest China. The ENSEMBLES can dominant empirical orthogonal function (EOF) modes of precipitation and 2 m air temperature, with some differences arising from different initialization months.

Keywords

ENSEMBLES, Winter Climate, Model Assessment

Copyright © 2023 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

气候变化对社会以及经济的长远发展有着重要的影响，发展季节预测，提高季节预测的准确率已经显得越来越重要[1]。在季节预测长期发展的过程中，学者们提出了不同的预测方法与工具。在预测季节气候变化研究这方面，气候系统模式是主要的科学工具[2]。近年来，新版本的气候系统模式的发展与建立在研究气候变化的过程中发挥着一定的作用[2]。国内外的研究学者应用气候系统模式对温度、降水以及环流场等进行了评估[3]。自政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一次评估报告以来，气候系统模式在研发与应用方面有了很大的提高，从 IPCC 第五次评估报告(IPCC AR5)中可以看出，第四次评估报告到第五次评估报告，在再现历史气候方面，参与国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的气候模式的预测能力在很多方面有了明显的提高[4]。气候系统模式在再现历史气候变化，研究现在以及预测未来气候变化方面发挥的作用越来越大[2]。

中国地处东亚季风区，青藏高原大地形、盆地以及平原交错，由于季风活动以及复杂地形的原因，气候异常对中国造成了不同程度的影响[5] [6]，因此，研究降水、气温等要素的特征变化及评估气候系统模式模拟其变化规律的能力对防灾减灾具有重要参考价值。近年来气象学者们利用不同的全球气候模式对中国夏季降水进行了较为全面的研究，研究结果表明，CMIP5 的 10 个模式降水预测误差小值区在夏半年位于东部季风区，而在青藏高原以及西北部分地区，误差偏多[7]。刘等[8]研究发现，13 个 IPCC AR4 模式对于中国地区地面气温的预测能力较好，然而预测值系统性偏低，模式的预测能力在中西部地区较低，在东部地区较高；模式高估了北方地区以及西北干旱少雨地区的降水量，多数模式对于中国东部季风区夏季雨带的北抬具有一定的预测能力，但是预测结果较观测的偏北。FGOALS-S2 耦合模式具有再现

1961~2005 年中国区域夏季降水分布特征的预测能力, 然而, 在 EOF 空间场上, 模式对于中国东部地区典型的模态分布型的预测能力较低[3]。

中国地区冬季降水量偏小, 南方为主雨区, 并且降水年际变化明显, 降水的异常可能会造成不同程度的影响[9]。国内外的气象学者对中国冬季降水的研究相较于夏季降水少, 因此, 本研究评估了 ENSEMBLES 对中国地区冬季降水、2 m 气温以及 850 hPa 风场的预测能力, 为提高季节性预报的准确率和气象防灾减灾提供一定的科学依据。

2. 资料和方法

2.1. 资料

2.1.1. ENSEMBLES 介绍

ENSEMBLES (Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts) 计划是由欧洲联盟发展的多模式集合系统, 它利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的 ECMWF 模式, 基尔大学莱布尼茨海洋科学研究所(Leibniz Institute of Marine Sciences at Kiel University)的 IFM-GEOMAR 模式, 法国气象局(Météo-France)的 MF 模式, 英国气象局(UK Met Office)的 UKMO 模式, 以及欧洲-地中海气候变化中心(Euro-Mediterranean Center for Climate Change)的 CMCC-INGV 模式 5 个全球海气耦合模式, 提供了 1960~2005 年的回报试验[10] [11]。

本研究选取 1980~2005 年期间的 5 个模式的回报试验结果与观测结果作比较。5 个全球海气耦合模式各自包含 9 个初始条件不同的成员, 均从每年的 2 月 1 日、5 月 1 日、8 月 1 日和 11 月 1 日起报, 其中 2 月、5 月和 8 月起报的试验向后预测 7 个月, 11 月起报的试验(CMCC-INGV 除外)向后预测 14 个月。因此, 冬季(12 月、1 月和 2 月, DJF)可以分别从 8 月(超前四个月)和 11 月(超前一个月)起报的试验结果中获得。

2.1.2. 观测资料

本文中用于与模式对比的观测资料为: 1) 1980~2005 年全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)提供的分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的逐月降水资料[12]; 2) 1980~2005 年美国国家环境预报中心和美国能源部(National Centers for Environmental Prediction-U.S. Department of Energy, NCEP-DOE)提供的 NCEP2 逐月 2 m 气温和风场再分析资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [13]。

2.2. 方法

本研究在关注各个模式的模拟效果的同时也着重关注多模式集合平均(Multi-Model Ensemble, MME)的预测结果[14] [15]。

本研究引入了 Taylor 图分析方法对气候态的预测效果进行评估[16]。泰勒图提供了一种图形化的方法来总结预测场和观测场之间的对应程度, 两个场之间的相似性通过相对标准差、均方根误差和相关系数来量化。

图 1 为泰勒图分析方法示意图, 在图 1 中, REF 所表示的点代表观测场的位置, 图中的每一个字母表示不同的模式。预测场和观测之间的均方根误差用 REF 到字母间的距离表示, O 点和字母间的长度代表预测场和观测场之间的相对标准差, OA 延长线与最外圈圆弧的交点坐标值表示预测场与观测的相关系数。图中字母的位置离 REF 点越近, 表明预测的结果与观测的结果相似度越好, 位于虚线弧上的模式具有正确的标准差, 表明模式的变化幅度是正确的[16]。由图 1 可以看到, 模式 A 的预测效果优于模式 B。

本文中也使用了相关分析和 EOF 分析方法来评估模式预测的能力。

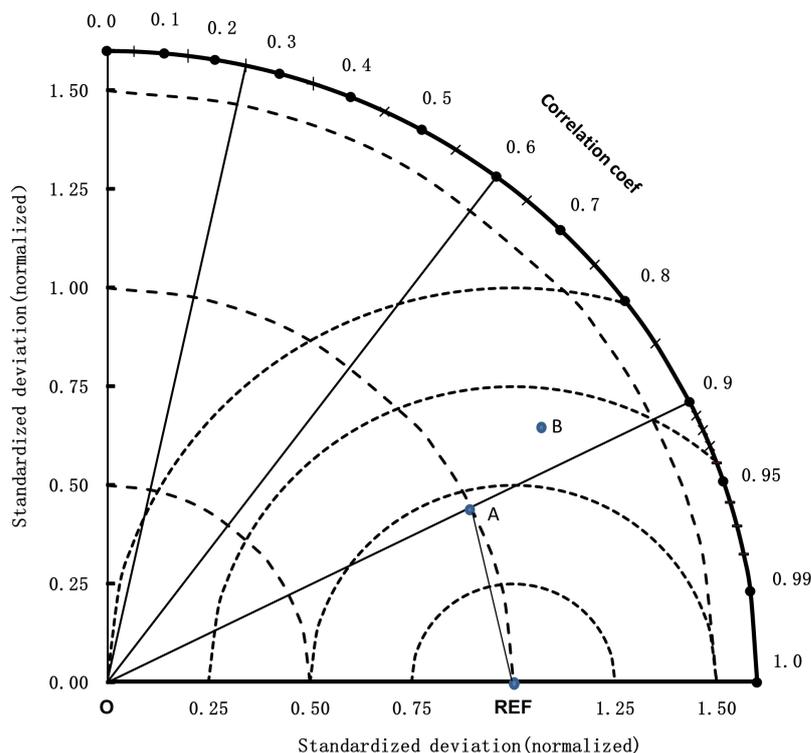


Figure 1. The schematic diagram of Taylor method
图 1. Taylor 图方法示意图

3. 中国冬季降水、2 m 气温、850 hPa 风场的评估

3.1. 气候场空间分布模拟能力的评估

图 2 中逐月对比了观测与 ENSEMBLES 中 8 月和 11 月起报的冬季多年平均降水与风场气候态。由观测场可以看出，从 12 月到 2 月，降水量在逐月增加，其中 12 月降水量较少，主要位于中东部地区，至 2 月，降水区域略微西伸，长江以南降水强度逐渐增大，降水大值中心出现在江西以及福建，其中福建东部沿海地区降水强度达到了 4.9 mm/d。对于风场，由 12 月到 2 月的逐月观测结果可以看出，在青藏高原地区，偏西风强盛。内蒙古东部、东北以及华北地区维持着强盛的西北风。

从基于不同起报时间的多模式集合平均的结果来看，逐月降水与环流场同观测场的空间分布相似性较高，相关系数均大于 0.91。在中国的大部地区，预测的逐月降水量及范围均高于观测。MME 预测的降水区域较观测的偏西，降水大值中心略微偏北，这在 2 月尤为明显。对于风场，MME 低估了青藏高原的偏西风。总体上看，MME 较好地模拟出了冬季逐月降水、环流场的分布特征，超前一个月的 MME 的预测能力略高于超前四个月的预测能力。

从观测的(图 3)和由 8 月起报的中国冬季平均降水以及 850 hPa 风场的气候态可以看出，MME (图 3(b)) 以及各个模式(图 3(c)~(g))对中国地区冬季降水强度、位置的预测效果较好，基本能预测出中东部地区雨水集中的特点。对比观测与 ENSEMBLES 预测结果，可以看出模式预测的降水范围均偏北且模式预测的青藏高原地区东部边缘的降水偏多。对于风场，MME 以及各个模式能够较好地预测出环流场气候态，模式对于内蒙古东部、东北以及华北地区的西北风预测效果较好，然而对于青藏高原地区风场的预测结果偏弱。总体而言，模式对于内蒙古东部、东北以及华北地区风场的预测能力高于青藏高原地区。11 月起报的结果(图略)与 8 月起报的结果类似。

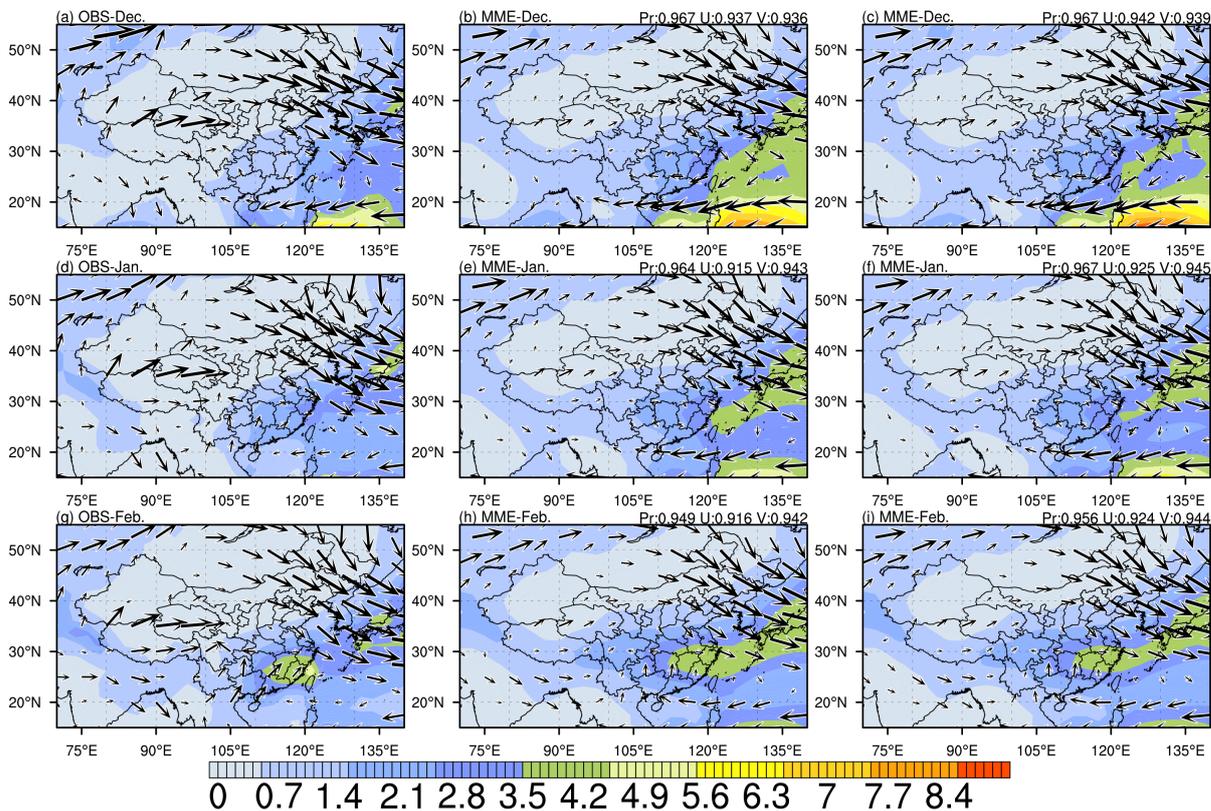
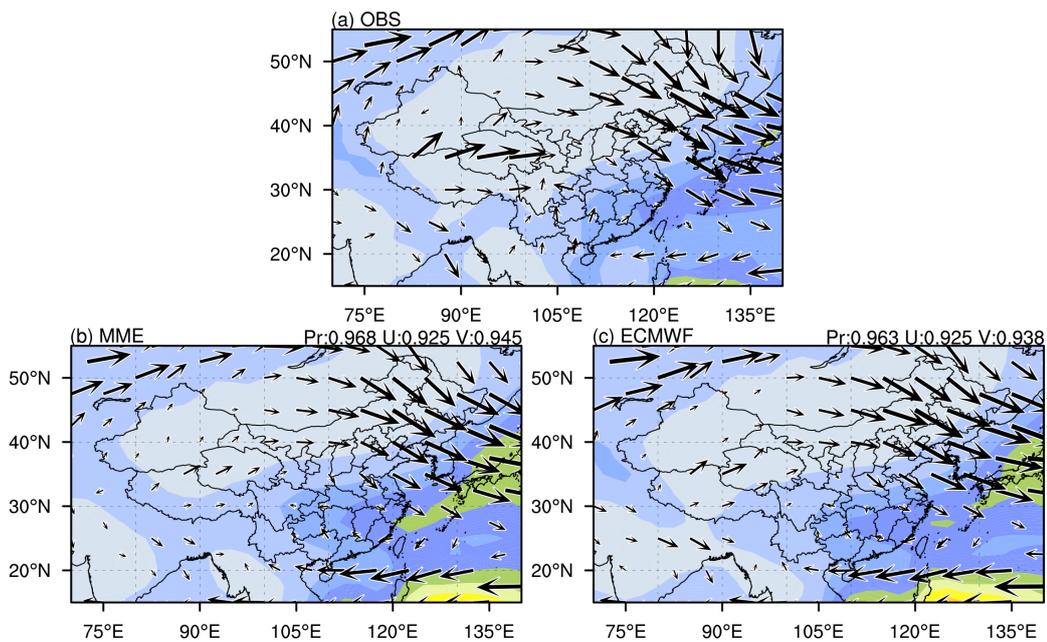


Figure 2. Monthly precipitation (Unit: mm/d) and 850 hPa wind field (Unit: m/s) climatology in winter in China (1980~2005); (a), (d), (g) is the observation field, (b), (e), (h) is the MME for August initialization, (c), (f), (i) is the MME for November initialization; the values of Pr, U and V on the upper right represent the spatial correlation coefficients of precipitation, U and V between MME and observation field

图 2. 中国冬季逐月降水(单位: mm/d)和 850 hPa 风场(单位: m/s)气候态(1980~2005); (a), (d), (g)为观测场, (b), (e), (h)为 8 月起报的多模式集合平均, (c), (f), (i)为 11 月起报的多模式集合平均; 右上 Pr, U, V 的值分别表示 MME 与观测场之间降水, U, V 风的空间相关系数



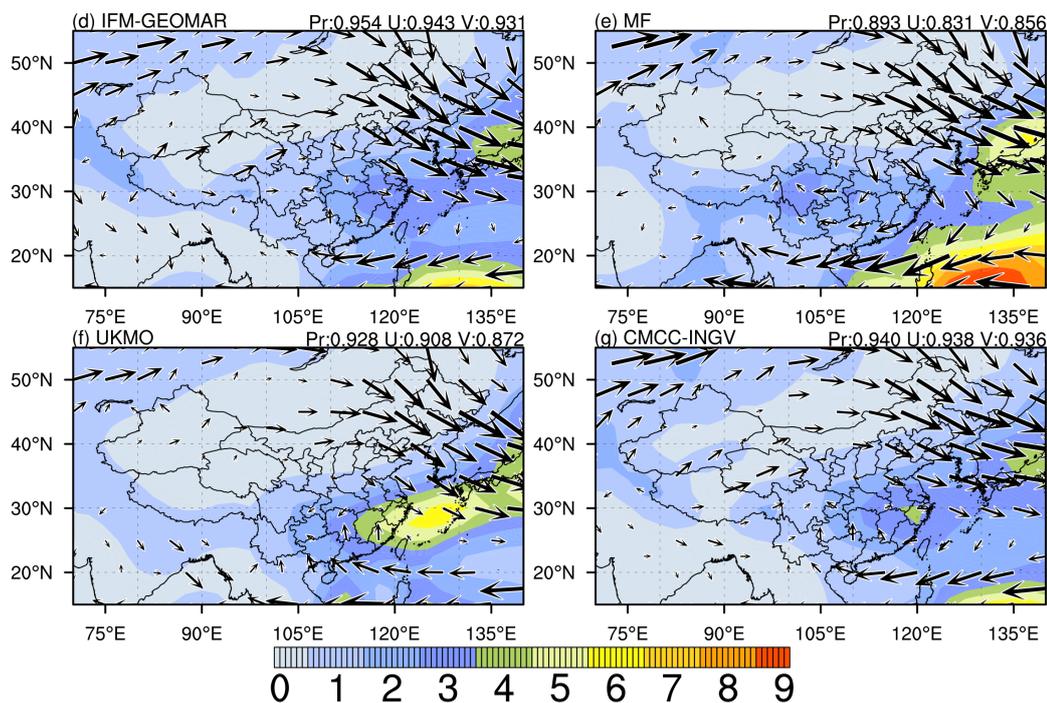


Figure 3. Winter mean precipitation (mm/d), 850 hPa wind field (m/s) climatic state (1980~2005), model results reported from August; (a) is the observation field, (b) is the MME, and (c)~(g) is the prediction result of individual models respectively. The values of Pr, U and V in the upper right represent the spatial correlation coefficients of precipitation, U and V between the model and the observation field

图 3. 中国冬季平均降水(mm/d), 850 hPa 风场(m/s)气候态(1980~2005), 模式结果由 8 月起报; (a)为观测场, (b)为多模式集合平均, (c)~(g)分别为单个模式的预测结果; 右上 Pr, U, V 的值分别表示模式与观测场之间降水, U, V 风的空间相关系数

为了进一步直观明了地比较模式对中国地区冬季平均降水、2 m 气温以及 850 hPa 风场气候态的预测效果, 在图 4 中给出了各个模式以及 MME 预测的结果和相应观测资料对比的泰勒图。从图 4 可以看出, 对于降水, 各个模式预测与观测的相对标准差都大于 1, 表明模式预测结果偏强, 各个模式预测场和观测场的相关系数均大于 0.89, 通过了 95%显著性检验, 两者相似性较高。各个模式预测场和观测场的均方根误差在 0.25~0.6 之间。由图 4 可以看出, MME 及各个模式(MF 模式除外)对中国冬季降水具有较好的预测效果, 11 月起报的预测效果优于 8 月起报。结合图 5(a)由 8 月起报的 MME 冬季降水模拟与观测结果之间的差值场(11 月起报的结果相似)可以看到, MME 高估了中国大部地区的降水, 且在青藏高原东部边缘地区存在一个虚假的大值中心, 对比刘敏等[8]评估 13 个 CMIP5 模式以及陈晓晨等[17]评估 43 个 CMIP5 模式预测降水的能力时发现, 相比于 CMIP3 模式, CMIP5 模式同样存在对青藏高原地区降水系统性高估的特征, 产生这个误差的原因可能是全球模式对于高原的动力热力作用的描述能力有限[8]。从对中国地区冬季平均降水预测的 5 个模式间标准差可以看到(图 5(b)), 各个模式对于降水气候态预测的一致性有待于进一步的提高。模式对于北方大部地区预测的一致性高于南方地区, 对于西南部分地区以及华东地区的降水, 五个模式间预测存在较大的差异。

对于 2 m 气温, 由图 4 可以看到, 各个预测场与观测场的相关系数大于 0.96, 通过了 95%显著性检验, 均方根误差小于 0.5, 各模式与观测的相对标准差处于 0.75~1.25 之间。不难看出, UKMO 模式的预测能力低于其他模式。图 5(c)由 8 月起报的 MME 冬季 2 m 气温模拟与观测结果之间的差值场(11 月起报的结果相似)可以看到, 青藏高原地区、内蒙古中部地区以及东北东部地区存在虚假的高值中心, 南疆和西南地区出现了冷偏差。预测所产生的误差可能是由于这些地区地形陡峭且变化较大, 实际地形和模式

地形之间不匹配而造成的[8]。总体而言，MME 能够较好地预测出中国地区 2 m 气温气候态的分布特征，但对大部地区有所高估。由图 5(d)可以看到，对于北方地区，五个模式间预测差异较大，尤其在西北地区，差异更为明显，而在东部沿海地区，五个模式预测的一致性较高。

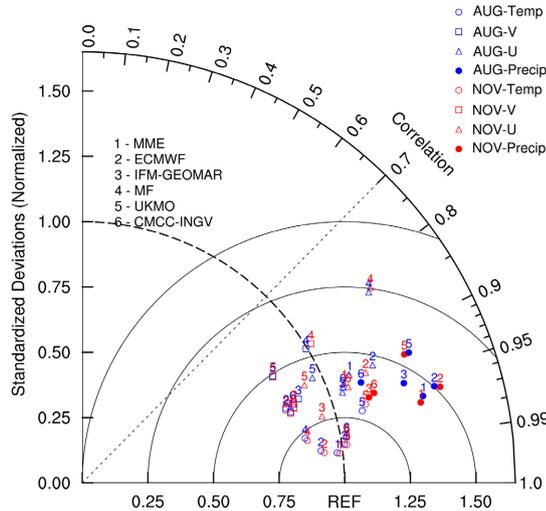


Figure 4. Taylor diagram of the winter mean precipitation (Precip), 2 m air temperature (Temp), and 850 hPa wind (V, U) over the period of 1980~2005 in China (15°~55°N, 70°~140°E). REF is the position of the observed field in the Taylor diagram. Blue is for August initialization (AUG), and red is for November initialization (NOV)

图 4. 1980~2005 年中国地区(15°~55°N, 70°~140°E)冬季平均降水(Precip), 2 m 气温(Temp)和 850 hPa 风(V, U)的泰勒图。REF 表示泰勒图中观测场的位置。蓝色表示 8 月起报(AUG), 红色表示 11 月起报(NOV)

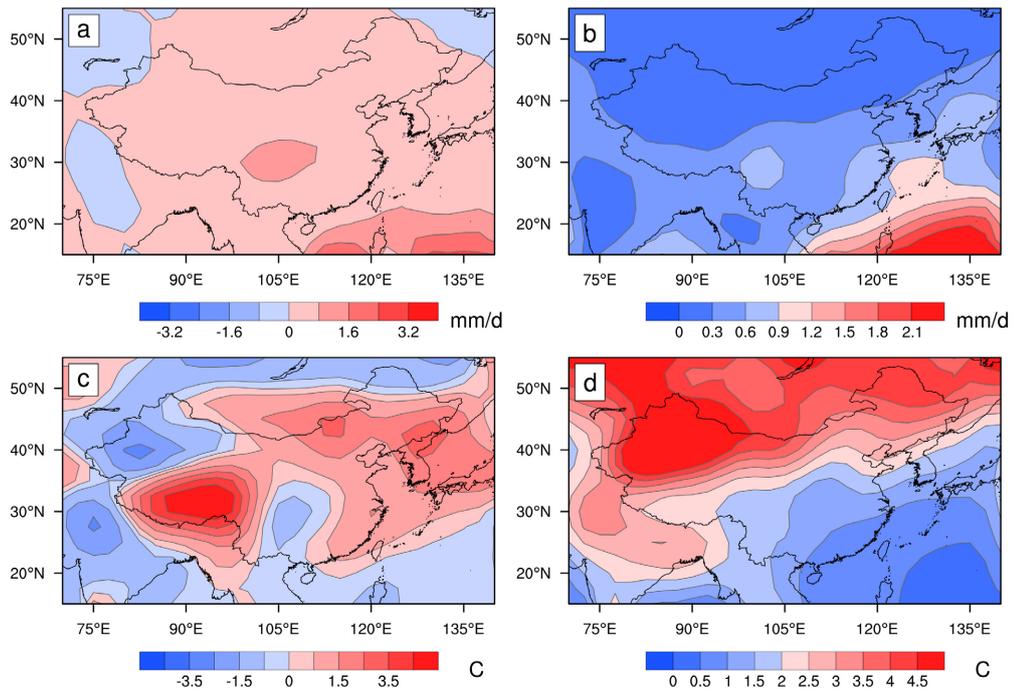


Figure 5. The deviation between observation ((a), (c)) and the winter mean precipitation (mm/d; (a), (b)) and 2 m temperature (°C; (c), (d)) predicted by MME from August, as well as standard deviation between 5 models ((b), (d))

图 5. 观测((a), (c))和由 8 月起报的 MME 冬季平均降水(mm/d; (a), (b))和 2 m 气温(°C; (c); (d))间的偏差以及 5 个模式间标准差((b), (d))

对于 850 hPa 风场, 由图 4 可以看到, 各模式预测的中国冬季经向风场、纬向风场和观测场的相关系数处于 0.82~0.96 之间, 通过了 95% 显著性检验, 均方根误差处于 0.25~0.75 之间。对于纬向风场, 相对标准差处于 0.8~1.1 之间; 对于经向风场, 相对标准差处于 0.75~1 之间。MME 预测场与观测场之间的相关系数较高, 标准差以及均方根误差较小, MME 对于 850 hPa 风场的模拟能力较高。各个模式之间对于 850 hPa 风场的预测差异性比较大。

总体上看, 各个模式都具备预测中国冬季降水、2 m 气温以及 850 hPa 风场主要特征的能力, 对比不同起报时间模拟的结果, 不难发现, 超前四个月起报的 MME 和各模式对于降水以及风场气候态的预测效果略逊于超前一个月起报的效果(MF 模式除外)。模式对于 2 m 气温的预测效果是最优的, 模式对冬季降水的预测效果低于对 2 m 气温的预测效果。贾小龙等[18]利用最优 BP-CCA 模型对中国冬季降水以及温度进行研究时, 同样发现, 模式对于降水的可预报性低于温度。此外, 无论是 8 月还是 11 月起报, 在模拟效果方面, MME 都表现出了较好的预测能力。

3.2. 年际变化相关性检验

图 6 对观测和基于 11 月和 8 月起报的 ENSEMBLES 多模式集合平均预测的冬季降水和 2 m 气温年际变化的相关性进行了检验。对于降水, 由 11 月(图 6(a))和 8 月(图 6(b))起报的 MME 与观测的相关系数通过 95% 显著性检验的区域位于南疆和长江中下游地区, 而对于东北、内蒙古、华北地区, MME 预测效果最差。对于 2 m 气温, 由 11 月(图 6(c))和 8 月(图 6(d))起报的相关系数通过 95% 显著性检验的区域主要位于新疆西部, MME 对于西藏预测效果最差。可以看到, 不同时间起报的 MME 对于新疆大部地区的冬季降水和 2 m 气温都具有较高的预报技巧。

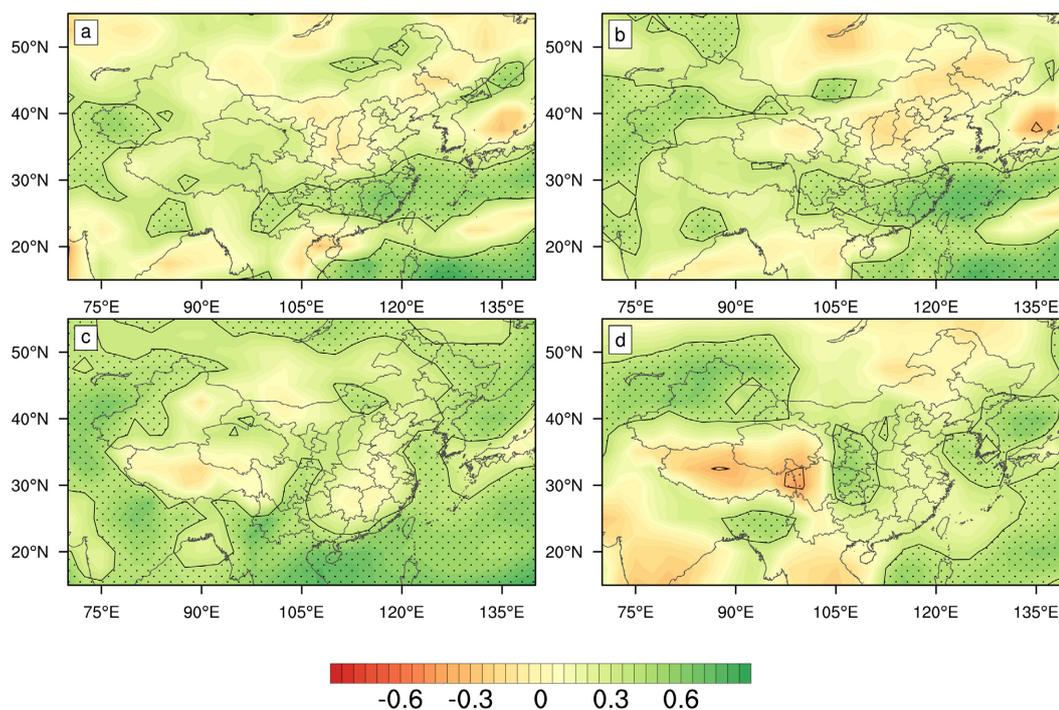


Figure 6. Correlation coefficients distribution of the annual variation between observation and the winter mean precipitation (mm/d; (a), (b)) and 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$; (c), (d)) predicted by MME from November ((a), (c)) and August ((b), (d)). The stippling area means passing 95% significance test

图 6. 观测和由 11 月((a), (c))和 8 月((b), (d))起报的 MME 预测冬季平均降水(mm/d; (a), (b))和 2 m 气温($^{\circ}\text{C}$; (c), (d))的年际变化的相关系数分布。打点区域表示通过 95% 的显著性检验

3.3. EOF 主要模态

图 7 中对观测和基于 11 月和 8 月起报的 MME 预测的中国地区冬季降水和 2 m 气温分别做 EOF 分析。

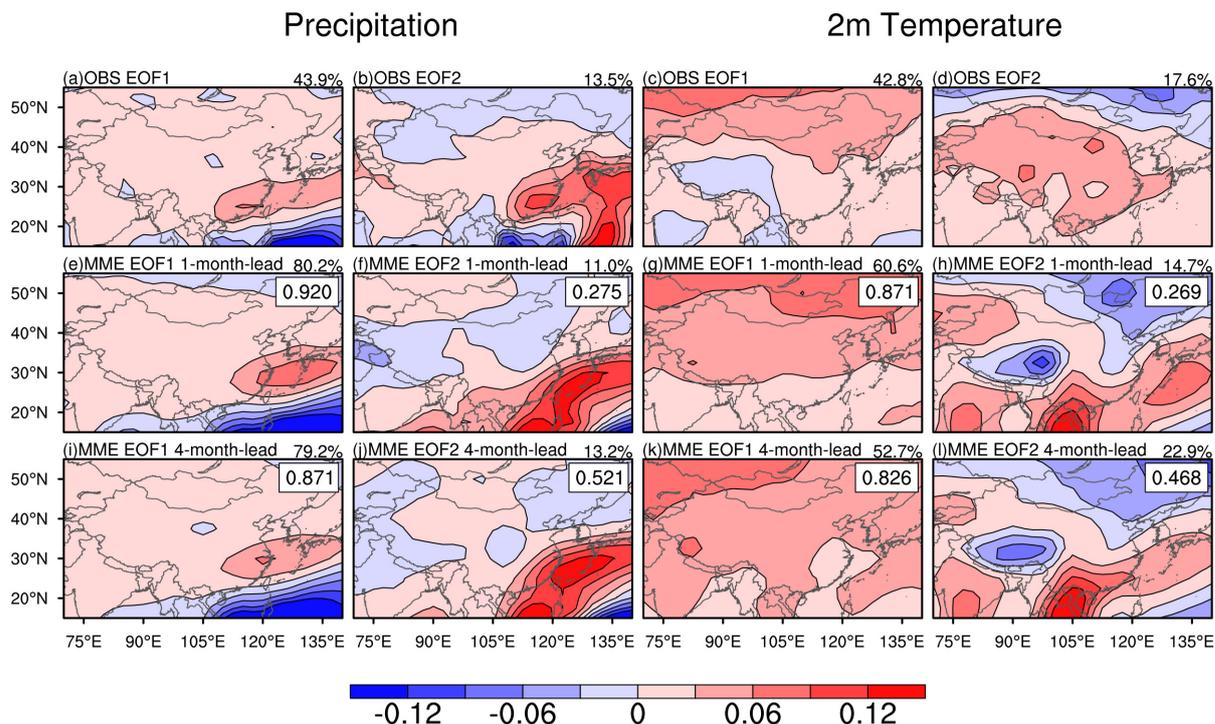


Figure 7. The first two modes (1980–2005) of winter mean precipitation (left) and 2 m temperature (right) EOF observed (a)~(d) and MME in China, the predicted results are based on (e)~(h) November and (i)~(l) August initialization, and the value in the upper right label is the spatial correlation coefficient between MME and observation results. The percentage above the spatial correlation coefficient is the variance contribution of each mode

图 7. 中国地区观测(a)~(d)和 MME 的冬季平均降水(左)和 2 m 气温(右) EOF 的前两个模态(1980~2005), 其中(e)~(h)为 11 月起报, (i)~(l)为 8 月起报, 右上角标签内数值为 MME 与观测结果的空间相关系数, 空间相关系数上方的百分数为各模态的方差贡献

对于降水, 由观测可以看到(图 7(a), 图 7(b)), EOF1 解释了总方差的 43.9%, 最主要的特征除西藏和西北地区中部外, 其他地区表现为一致的正信号, 正信号大值区位于华东、华中、华南地区; EOF2 解释了总方差的 13.5%, 主要表现为中国大部地区为正信号。由 MME 预测的冬季降水前两个主要模态可以看到, 基于 11 月起报和 8 月起报的 MME 的第一模态和观测的空间相关系数均高于 0.87, 通过了 95% 的显著性水平检验。11 月起报的 MME 第一模态主要表现为内蒙古东部、黑龙江与其他地方呈反相位变化, 第二模态在北疆、西北中部、内蒙古和华北地区表现为负信号。8 月起报的 MME 第一模态表现为西北地区中部、内蒙古东部为负信号, 第二模态正信号的大值区位于华东、华南地区。不论是 11 月起报还是 8 月起报的 MME, 对观测的第一模态的模拟能力均高于第二模态。不同时间起报的 MME 均能很好地表征出中国冬季东部地区的降水特征。

对于 2 m 气温, 由观测(图 7(c), 图 7(d))可以看到, EOF1 解释了总方差的 42.8%, EOF2 解释了总方差的 17.6%, EOF1 的主要特征为青藏高原地区以及云南为负信号, 与其他地区呈反相位变化。EOF2 的主要特征为内蒙古东部与东北地区表现为负信号。基于 11 月和 8 月起报的 MME 的第一模态与观测的空间系数均高于 0.82, 通过了 95% 的显著性水平检验。11 月和 8 月起报的 MME 的第一模态均呈中国地区

一致的变化特征，第二模态表现为青藏高原地区有一个负信号中心，华南地区为正信号中心。不同时间起报的 MME 在模拟空间分布变化特征方面具有一定的模拟能力，且对于观测的第一模态的模拟能力优于第二模态，然而，MME 模拟的第一模态未能表现出中国地区反相位变化特征。

图 8 中评估了 MME 以及各模式对中国地区冬季平均降水和 2 m 气温 EOF 空间型和时间序列的预测效果。

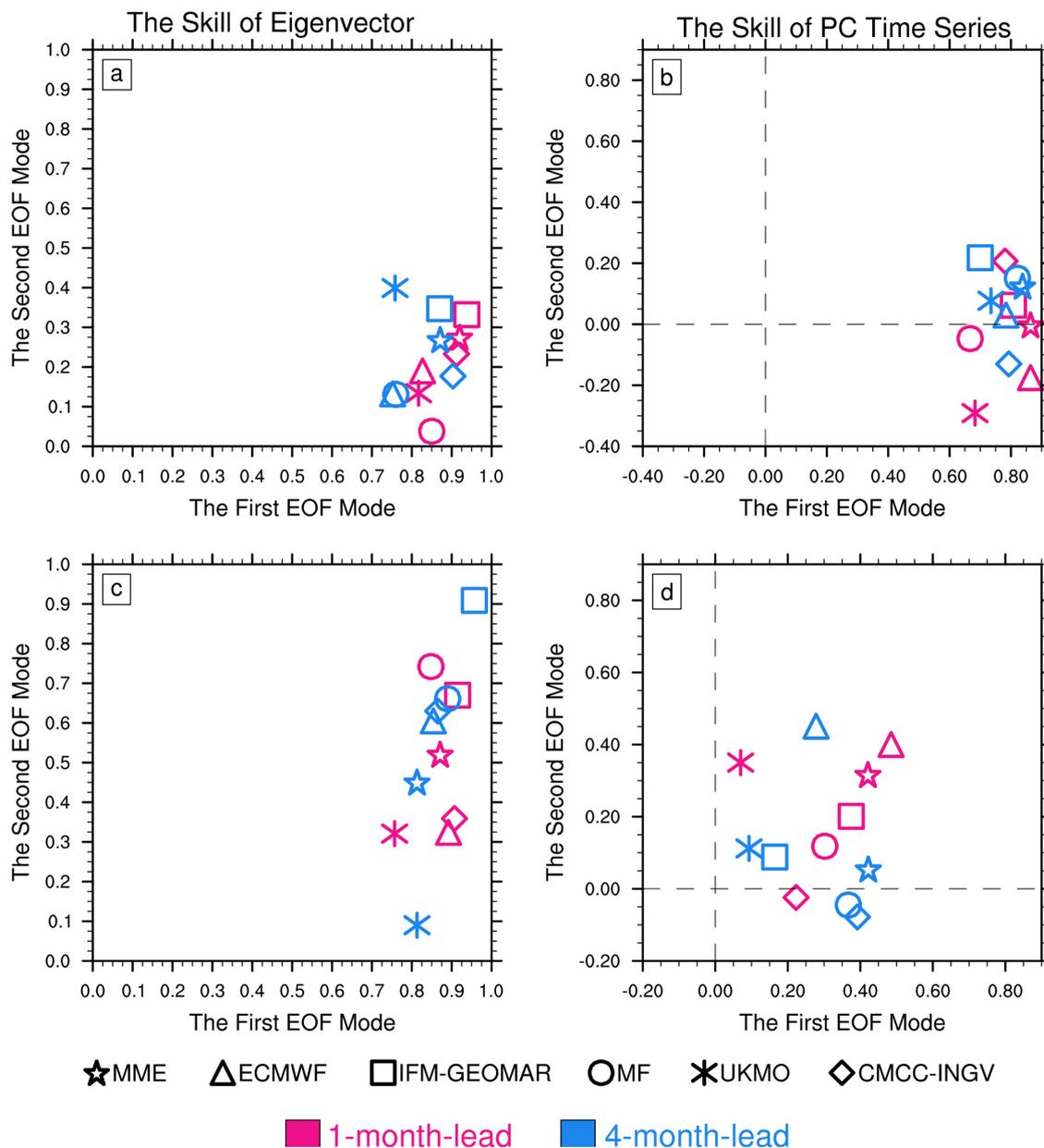


Figure 8. Prediction effect of MME and individual models on EOF spatial pattern and time series of winter mean precipitation ((a), (b)) and 2 m temperature ((c), (d)) over China. On the left are the spatial correlation coefficients of the first and second modes of EOF observation and prediction results, and on the right are the correlation coefficients of time series. Pink is for November initialization (NOV), and blue is for August initialization (AUG)

图 8. MME 及单个模式对中国地区冬季平均降水((a), (b))和 2 m 气温((c), (d)) EOF 空间型和时间序列的预测效果。左边为观测与预测结果的 EOF 第一、第二模态空间相关系数，右边为时间序列相关系数。粉色为 11 月起报的结果，蓝色为 8 月起报的结果

对于降水,由图 8(a)可以看到,观测与预测的第一空间模态的相关系数大于 0.7,通过了 95%的显著性水平检验。可以看到,观测与预测的第二模态的空间相关系数并不高,模式对于第二模态的预测能力一致性的差。个别模式的预测能力受起报时间的影响较大,UKMO 模式较为明显。由图 8(b)可以看出,各个模式预测降水的第一时间序列与观测的相关系数均大于 0.7,第二时间序列与观测的相关系数很低且个别模式呈负相关。

对于 2 m 气温,从图 8(c)可以看到观测与各模式预测的第一模态的空间相关系数均大于 0.7,与第二模态的空间相关系数基本在 0.3~0.9 之间(除 UKMO 模式),表明各模式对第二模态预测能力差异性较大。其中 MF 模式和 IFM-GEOMAR 模式的预测技巧优于其他模式。由图 8(d)可以看到,模式预测 2 m 气温的第一、第二时间序列与观测结果没有明显的相关性。

4. 总结

本文利用 ENSEMBLES 回报试验数据对 1980~2005 年期间模式预测中国地区冬季降水和 2 m 气温以及 850 hPa 风场的的能力进行了评估,得出的结论如下:

1) ENSEMBLES 海气耦合模式具有对中国地区冬季降水、2 m 气温以及 850 hPa 风场的回报能力,能够较好地预测出三者的气候特征,且相比于降水和风场,模式对气温的预测效果是最好的。模式高估了中国大部分地区的降水,青藏高原东部边缘地区存在一个虚假的高值中心;对青藏高原北部偏西风的预测能力较弱;模式预测 2 m 气温在青藏高原、内蒙古中部以及东北东部地区存在虚假的高值中心。

2) MME 的预测效果较好,MME 具备预测中国地区冬季降水和 2 m 气温 EOF 主要模态空间分布型的能力,8 月和 11 月起报的 MME 的预测技巧相当,但是强度和范围有一定的差异。

参考文献

- [1] 丁一汇,刘一鸣,宋永加,等.我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验[J].气候与环境研究,2002,7(2): 236-246.
- [2] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会.第二次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2011: 155-162.
- [3] 顾飞.FGOALS-S2 耦合模式对中国区域降水的模拟及其未来预估研究[C]//中国气象学会.第 31 届中国气象学会年会——S3 短期气候预测理论、方法与技术.北京:气象出版社,2014: 1-18.
- [4] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会.第三次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2015: 213-217.
- [5] 许崇海,罗勇,徐影.全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估[J].气候变化研究进展,2010,6(6): 398-404.
- [6] 张丽霞,张文霞,周天军,吴波.ENSEMBLES 耦合模式对全球陆地季风区夏季降水的年代际预测能力评估[J].地球科学进展,2017,32(4): 409-419.
- [7] 张蓓,戴新刚.2006-2013 年 CMIP5 模式中国降水预估误差分析[J].大气科学,2016,40(5): 981-994.
- [8] 刘敏,江志红.13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40a 气候模拟能力的评估[J].南京气象学院学报,2009,32(2): 256-268.
- [9] 钱卓蕾.长江中下游冬季降水特征和影响因素分析[J].高原气象,2013,32(6): 1795-1802.
- [10] Doblas-Reyes, F.J., Weisheimer, A., Palmer, T.N., et al. (2010) Forecast Quality Assessment of the Ensembles Seasonal-to-Decadal Stream 2 Hindcast. ECMWF Technical Memorandum, 45 p.
- [11] Weisheimer, A., Doblas-Reyes, F.J., Palmer, T.N., et al. (2009) ENSEMBLES: A New Multi-Model Ensemble for Seasonal-to-Annual Predictions—Skill and Progress beyond DEMETER in Forecasting Tropical Pacific SSTs. *Geophysical Research Letters*, **36**, 147-148. <https://doi.org/10.1029/2009GL040896>
- [12] Adler, R.F., Huffman, G.J., Chang, A., et al. (2003) The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *Hydrometeor*, **4**, 1147-1167. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2)

-
- [13] Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., *et al.* (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 1631-1643. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>
- [14] Krishnamurti, T.N., Kishtawal, C.M., Larow, T.E., *et al.* (1999) Improved Weather and Seasonal Climate Forecasts from Multi-Model Superensemble. *Science*, **285**, 1548-1550. <https://doi.org/10.1126/science.285.5433.1548>
- [15] Doblas-Reyes, F.J., *et al.* (2010) Multi-Model Spread and Probabilistic Forecasts in PROVOST. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **126**, 2069-2087. <https://doi.org/10.1002/qj.49712656705>
- [16] Taylor, K.E. (2001) Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- [17] 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 姚遥. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 217-225.
- [18] 贾小龙, 陈丽娟, 李维京, 等. BP-CCA 方法用于我国冬季温度和降水的可预报性研究和降尺度季节预测[J]. 气象学报, 2010, 68(3): 398-410.