

张永瑞, 李丽平, 靳泽辉, 等. 2017. CMIP5 模式对冬季北极涛动的模拟和预估 [J]. 气候与环境研究, 22 (5): 633–642. Zhang Yongrui, Li Liping, Jin Zehui, et al. 2017. Simulation and projection of the Arctic oscillation in winter based on CMIP5 models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (5): 633–642, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17019.

CMIP5 模式对冬季北极涛动的模拟和预估

张永瑞^{1,2} 李丽平¹ 靳泽辉³ 刘璞⁴ 康喜⁵

¹ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

² 山西省气象灾害防御技术中心, 太原 030002

³ 山西省五台山气象站, 山西五台县 035515

⁴ 山西省预警信息发布中心, 太原 030002

⁵ 山西省代县气象局, 山西代县 034200

摘 要 基于 NCEP/NCAR 再分析资料和 CMIP5 的 19 个模式结果, 从异常模态、年代际趋势和周期特征等方面评估了 CMIP5 耦合模式对冬季北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 的模拟能力, 并对未来 RCP4.5、RCP8.5 两种浓度路径下 AO 的可能变化趋势给出了定性的预估。CMIP5 模式历史试验结果显示, 大多数模式都能够模拟出 AO 模态的基本结构, 但是对中心位置、强度的模拟存在较大的偏差, 其中 MPI-ESM-LR 和 HadGEM2-AO 能较好地模拟出 AO 整体模态来。在历史演变和周期特征的刻画方面, 模式的冬季海平面气压经验正交函数分解第一模态时间序列 (Principal Component, PC1) 基本能够反映出 1950~1970 年以来的减弱趋势, 但对 1970 年以后的增长趋势模拟并不明显, 而北半球环状模指数 (Zonal Index, ZI) 序列对两个阶段的趋势均可模拟出来, 模式的 PC1 和 ZI 序列总体表现为正的变化趋势。有一半以上的模式对 2~3 a 高频周期模拟较好, 但对 20 a 左右的周期模拟较差, 其中仅有 CanESM2、CNRM-CM5、GFDL-ESM2G 这 3 个模式对 ZI 指数的两个周期变化模拟较好。在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下, ZI 序列有显著的上升趋势, 从长期趋势系数看 RCP4.5 路径下有 14 个模式呈现正的变化趋势, 其中有 10 个模式通过了检验。RCP8.5 浓度路径下, 16 个模式为正变化趋势, 有 11 个模式通过了检验, 集合平均结果正变化趋势较为显著。两种浓度路径下不同时段的海平面气压变化趋势表明, ZI 序列的年代际变化明显, 存在 3 个不同的变化阶段——2006~2039 年、2070~2100 年为两个上升阶段, 2040~2069 年为缓慢下降阶段。

关键词 CMIP5 模式 冬季 北极涛动 模拟和预估

文章编号 1006-9585 (2017) 05-0633-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17019

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

ZHANG Yongrui^{1,2}, LI Liping¹, JIN Zehui³, LIU Pu⁴, and KANG Xi⁵

¹ College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Shanxi Province Meteorological Disasters Prevention Technology Center, Taiyuan 030002

³ Wutai Shan Weather Station, Shanxi Province, Wutai Xian Shanxi 035515

⁴ Shanxi Province Early Warning Information Release Center, Taiyuan 030002

⁵ Dai Xian Meteorological Office, Shanxi Province, Dai Xian Shanxi 034200

收稿日期 2017-02-14; 网络预出版日期 2017-07-13

作者简介 张永瑞, 男, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事气象灾害研究。E-mail: ccolos@163.com

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB453202, 公益性 (气象) 行业专项 GYHY201406024, 国家自然科学基金重点项目 41330425

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2015CB453202), Special Scientific Fund for Non-profit Public Industry (Meteorology) (Grant GYHY201406024), National Natural Science Foundation of China (Grant 41330425)

Abstract On the basis of the NCEP/NCAR reanalysis data and CMIP5 19 model results, this work examined the performance of 19 CMIP5 models in the simulation of temporal variability and spatial pattern of the Arctic Oscillation (AO), and estimated the future changes of AO under two typical Representative Concentration Pathway scenarios (i.e., RCP4.5 and RCP8.5). Results show that most of the models can capture the basic structure of the AO mode, while MPI-ESM-LR and HadGEM2-AO can better simulate the overall AO mode than other models. However, some models overestimate the anomalous distribution on the Pacific side. Regarding the time series and temporal variability, the first mode of principal component (PC1) of the CMIP5 models basically can reproduce the weakening trend since 1950–1970, but the growing trend after 1970 is not obvious in the simulations. Nevertheless, the zonal index (ZI) sequence can simulate the trend in the two stages. On the whole, most of the PC1 and ZI sequences during 1950–2005 show a positive trend. More than half of the CMIP5 models can well simulate the high frequency cycles with 2–3 a; however, the simulations of 20-aquasi-periodic oscillation are poor. Among all the models, only CanESM2, CNRM-CM5, and GFDL-ESM2G can better simulate the ZI cycle inversion. It is found that the ZI sequence shows a significant upward trend under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, and the interdecadal variation is obvious with three different stages, i.e., 2006–2039 and 2070–2001 correspond to two rising phases, while 2040–2069 is the slow descending phase. A majority of the simulation results reveals a positive trend, and more than 10 out of the 19 CMIP5 models have passed the test under both concentration scenarios.

Keywords CMIP5 model, Winter, Arctic Oscillation, Simulation and projection

1 引言

北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 是冬季北半球最显著的模态, 也称为北半球环状模 (North Annular Mode), 诸多研究表明 AO 对北半球气候变化具有重要的影响, Wu and Wang (2002) 指出北极涛动不仅影响北极和北大西洋区域气候, 而且可能影响冬季西伯利亚高压, 以及东亚季风强弱变化。陈文和康丽华 (2006) 研究表明, AO 通过影响准定常行星波的传播, 从而引起底层西伯利亚高压和阿留申低压同时减弱或增强, 最终导致东亚地区异常偏冷或偏暖。AO 对我国冬季气候具有较强的影响, 当 AO 指数偏高 (低) 时, 我国大部分地区冬季气温偏暖 (冷), 同时降水也显著偏多 (少) (龚道溢和王绍武, 2003; 顾雷等, 2008)。AO 与滞后的夏季长江中下游地区降水也有明显的影响作用, 春季北极涛动偏强 (弱) 时, 之后的夏季急流位置通常偏北 (南), 雨带位置也北 (南) 移, 从而造成梅雨降水偏少 (多) (龚道溢等, 2002)。左金清等 (2013) 基于 26 个 CMIP5 模式, 利用 Thompson and Wallace (1998) 对北极涛动指数的定义方法, 对冬季海平面气压经验正交函数分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 模态和对应的逐月时间序列功率谱进行了分析, 表明大多数模式能够较好地再现冬季北极涛动的主要特征。本文将基于 19 个有别于前者的 CMIP5 模式试验结果和 Li and Wang (2003) 定义的北半球环状模指数 (Zonal Index, ZI),

对冬季北半球海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP) 和北极涛动的长期变化进行评估和预估。

2 资料与方法

2.1 资料

本文采用 CMIP5 模式的历史试验 (Historical) 和典型浓度路径试验 (RCPS) 下 19 个耦合模式的数据 (Taylor et al., 2012), 其中历史试验以工业革命前控制试验 (piControl) 为模式初始场, 从 1850 年积分至 2005 年。该试验主要目的是通过与历史时期气候观测资料比对来评估模式水平。RCPS 试验以历史试验最后一年为初始场。本文所选用的历史试验的时段为 1950~2005 年, 为了便于模式间的相互比较, 以及与观测值进行对比分析, 将所有的数据都插值为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度), 选用中排放 (RCP4.5) 和高排放 (RCP8.5) 进行预估。预估的时段为 2006~2100 年。为了与模式结果进行比较, 本文采用 NCEP/NCAR 海平面气压再分析资料作为参考, 其分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。表 1 给出了所选模式的基本信息。

2.2 方法

Lorenz (1951) 最早指出北半球纬向平均海平面气压存在南北反向变化, Thompson and Wallace (1998) 重新进行了研究, 并用 EOF 方法提取了其指数, 并命名为北极涛动, 其第一模态为 AO 模态。然而, 有些学者认为它是由 EOF 这种数学方法构造出来的, 而不是真实存在的现象, 因此, 北极涛动

的真实性被质疑 (Kerr, 1999; Ambaum et al., 2001)。Li and Wang (2003) 对 AO 的真实性及其物理本质进行了研究, 提出北半球热带外大气环流存在两个环状活动带, 一个位于副热带和中纬度地区, 一个

位于高纬度地区, 两个环状活动带的中心分别位于 35°N 和 65°N , 两者之间的海平面气压存在反向变化结构, 并依此定义了一种新的北极涛动指数, 该指数利用这两个环状活动带中心纬度 35°N 和 65°N

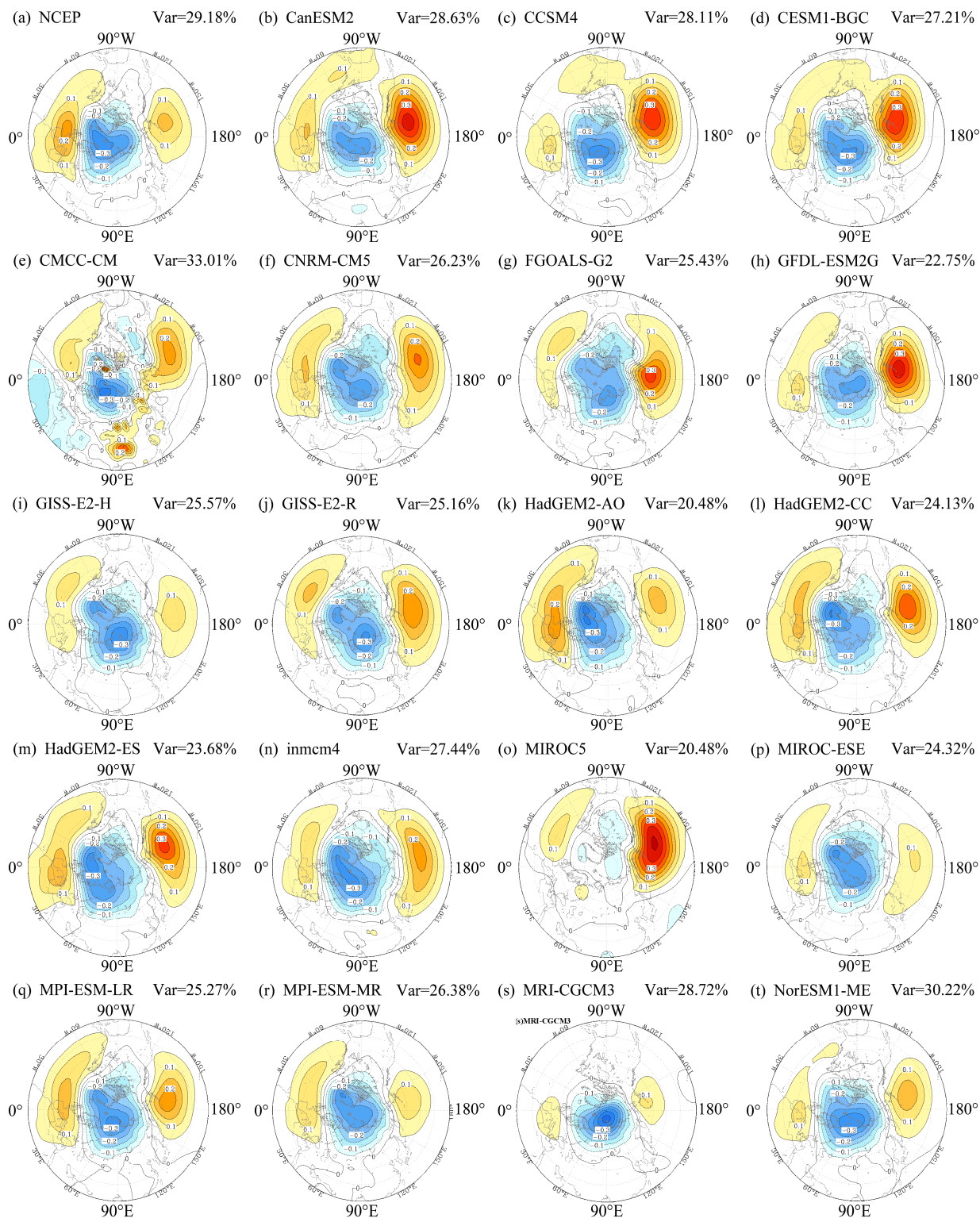


图1 (a) NCEP/NCAR 观测数据、(b-t) CMIP5 模式模拟的北半球冬季海平面气压 EOF 第一模态 (EOF1)

Fig. 1 Spatial patterns of the first Empirical Orthogonal Function (EOF) mode (EOF1) of the Dec to next Feb sea level pressure (DJF SLP) in the Northern Hemisphere from (a) NCEP/NCAR reanalysis data and (b-t) CMIP5 models

表 1 参与 CMIP5 试验的 19 个模式主要信息
Table 1 Description of the 19 coupled climate models participating in the CMIP5

模式名称	研发国家	水平分辨率
CanESM2	加拿大	2.8° (纬度) × 2.8° (经度)
CCSM4	美国	1.25° (纬度) × 0.94° (经度)
CESM1-BGC	美国	1.25° (纬度) × 0.94° (经度)
CMCC-CM	意大利	0.75° (纬度) × 1.5° (经度)
CNRM-CM5	法国	1.4° (纬度) × 1.4° (经度)
FGOALS-G2	中国	2.8° (纬度) × 2.8° (经度)
GFDL-ESM2G	美国	2.5° (纬度) × 4.0° (经度)
GISS-E2-H	美国	2.5° (纬度) × 2.0° (经度)
GISS-E2-R	美国	2.5° (纬度) × 2.0° (经度)
HadGEM2-AO	韩国	1.875° (纬度) × 1.25° (经度)
HadGEM2-CC	英国	1.875° (纬度) × 1.25° (经度)
HadGEM2-ES	英国	1.875° (纬度) × 1.25° (经度)
inmcm4	俄罗斯	2.0° (纬度) × 1.5° (经度)
MIROC5	日本	1.4° (纬度) × 1.4° (经度)
MIROC-ESM	日本	2.8° (纬度) × 2.8° (经度)
MPI-ESM-LR	德国	1.9° (纬度) × 1.9° (经度)
MPI-ESM-MR	德国	1.9° (纬度) × 1.9° (经度)
MRI-CGCM3	日本	1.1° (纬度) × 1.1° (经度)
NorESM1-ME	挪威	2.5° (纬度) × 1.875° (经度)

上的标准化纬向平均海平面气压差来表征 AO 的强弱，其公式如下：

$$I_z = \hat{p}_{35^{\circ}\text{N}} - \hat{p}_{65^{\circ}\text{N}}, \quad (1)$$

其中 $\hat{p}_{35^{\circ}\text{N}}$ 、 $\hat{p}_{65^{\circ}\text{N}}$ 分别为 35°N 和 65°N 标准化的纬向

平均海平面气压。

3 气候特征的模拟评估

3.1 北半球海平面气压异常模态

从 20°N 以北冬季海平面气压 EOF 分析的第一模态 (EOF1) 来看，最显著的特征是热带外中纬度地带和北极地区之间的反位相变化，其方差贡献为 29.18% (图 1a)。从 CMIP5 模式的结果看，19 个模式第一模态基本都能反映出这种分布结构 (图 1b-t) 来，方差贡献在 20%~33%之间，有 10 个模式对北大西洋和北美洲一侧的异常活动带模拟较好，而大多数模式对北太平洋一侧模拟偏强，对极地负异常模拟强度较为合理，但中心位置偏差较大；其中模式 MPI-ESM-LR 和 HadGEM2-AO 能较好地模拟出 AO 整体模态来；CanESM2、CCSM4、CESM1-BGC、GFDL-ESM2G、FGOALS-G2、HadGEM2-CC、HadGEM2-ES 等模式对北太平洋上的异常中心模拟情况明显偏强；CMCC-CM、MIROC5、MRI-CGCM3 模式对 AO 模态的强度、中心位置存在显著的偏差。CMIP5 模式与再分析资料 EOF1 的泰勒图 (图 2) 显示，其空间相似

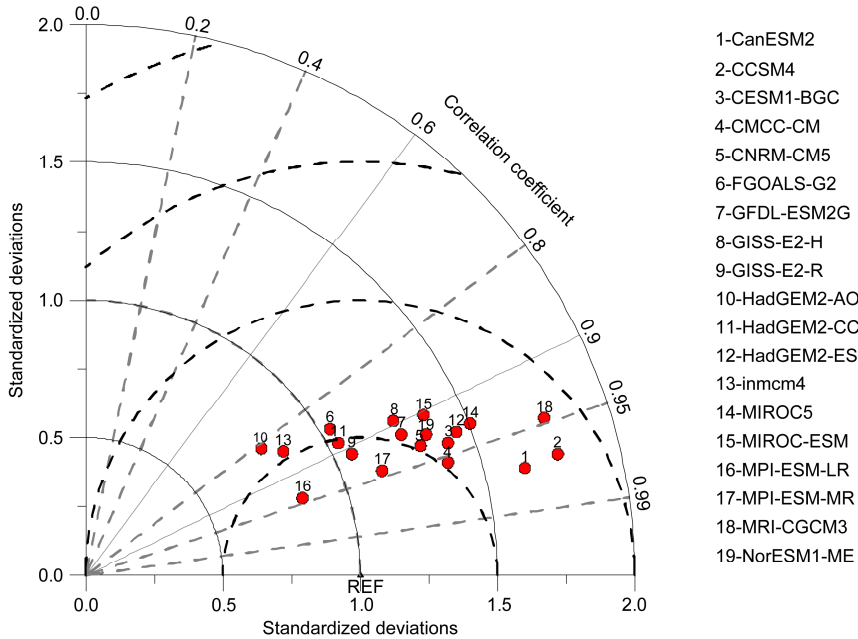


图 2 NCEP/NCAR 观测数据与 CMIP5 模式模拟的海平面气压 EOF1 的泰勒图 (REF 参考点代表观测资料，各模式到原点的半径代表其相对于观测值的标准差，模式在图中方位角的余弦代表模式与观测的相关系数，模式到参考点的距离代表其均方根误差)

Fig. 2 Taylor diagram of the CMIP5 simulated SLP EOF1 compared to the NCEP/NCAR reanalysis data (REF indicates the reference value of 1.0; the radial distance from the model code point to the origin is the standardized deviation ratio of the model output relative to the observation. The spatial correlation coefficient between the model output and observations is shown by the cosine of the azimuthally angle of model code point, and the root-mean-square error is given by the distance from the model code point to REF)

系数在 0.4~0.8 之间,模式的标准差范围在 0.6~1.8 之间,均方根误差控制在 1.0 之内,表明模式 AO 模态的振幅与观测值较为接近,同时模式对北半球海平面气压的气候态模拟能力较好。

图 3 给出了 20°N 以北的海平面气压 EOF 分解的第一模态时间序列(PC1)和 ZI。再分析资料显示 1950~1970 年北极涛动有明显的减弱,1970 年以后呈现持续上升趋势,在参考的 PC1 和 ZI 序列中均反映出了这种变化趋势,二者相关系数为 0.48,超过了 0.05 的信度水平。与再分析资料相比,CMIP5 模式的 PC1 基本能够反映出 1950~1970 年以来的减弱趋势,但对 1970 年以后的增长趋势模拟并不明显,ZI 序列对两个阶段的趋势均可明显地

模拟出来。已有的研究也表明 1935~1970 年是强的冬季 AO 负位相时期;自 1970 年以来冬季 AO 指数一直呈现持续增长趋势,且近 20 多年来处于强的冬季 AO 正位相期(范丽军等, 2003; 杨辉和李崇银, 2008)。从 1950~2005 年观测的线性趋势系数来看,PC1 和 ZI 总体呈现上升趋势,两者趋势系数分别达到了 0.21 和 0.19,其线性趋势均通过了 0.05 的显著性水平。与再分析资料相比,有 14 个模式的 PC1 表现出了正的变化趋势,其中有 5 个模式通过了 0.05 的显著性水平, GFDL-ESMG2、inmcm4、HadGEM2-CC、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3 表现出了负的变化趋势(图 4a),有 15 个模式的 ZI 表现出了正的变化趋势,其中 11 个模式

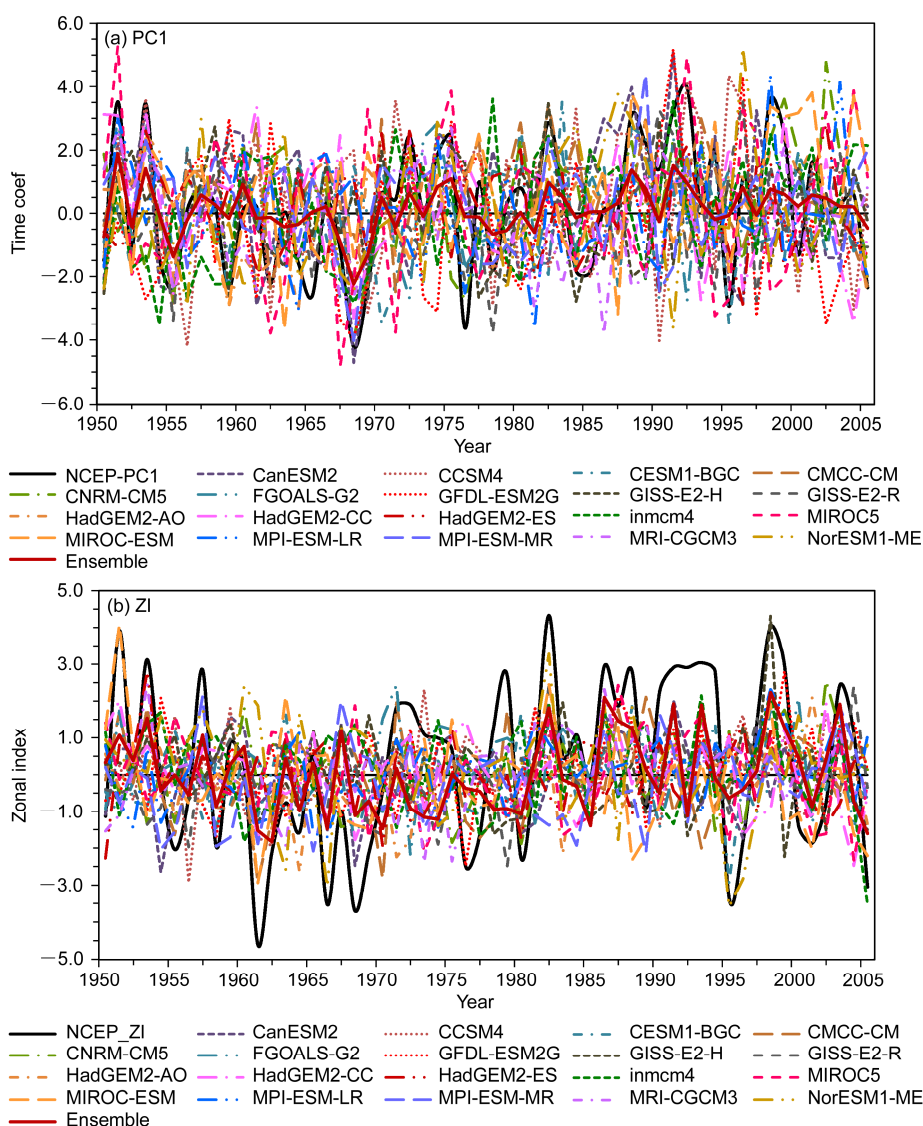


图 3 1950~2005 年 NCEP/NCAR 与 CMIP5 模式的冬季海平面气压 (a) PC1 和 (b) ZI 的时间序列

Fig. 3 The time series of the DJF SLP (a) first principal component (PC1) and (b) zonal index (ZI) during 1950 to 2005 from CMIP5 models and NCEP/NCAR reanalysis data

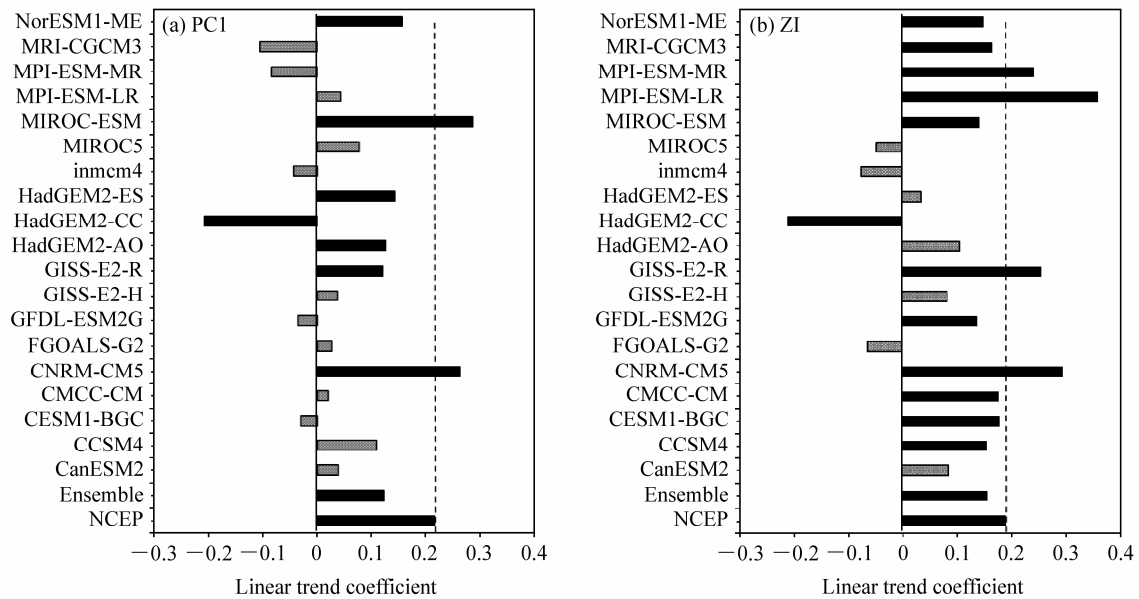


图4 1950~2005年NCEP/NCAR观测数据与CMIP5模式模拟的冬季海平面气压(a)PC1和(b)ZI的线性趋势系数(黑色表示通过了0.05显著性检验)

Fig. 4 Linear trend coefficients of the DJF SLP (a) PC1 and (b) ZI during 1950 to 2005 from NCEP/NCAR reanalysis data and CMIP5 models (the black box indicates that it is significant at the 0.05 level)

通过了0.05的显著性水平, MIROC5、inmcm4、HadGEM2-CC、FGOALS-G2为负的变化趋势(图4b), 而PC1和ZI的集合平均趋势系数均为正的变化趋势。

3.2 ZI的周期特征分析

图5为再分析资料和CMIP5模式的冬季ZI序列功率谱。最大落后长度为12年(序列长度为57年)。参考结果显示ZI序列集中在2~3 a、20 a左右的振荡周期, 相应的周期均通过了0.05的显著性水平红噪声检验(图5a)。与参考结果相比, 有一半以上的模式模拟出了2~3 a的高频变化, 但是仅有6个模式显示了20 a左右的长周期变化。此外, 许多模式还存在准1 a的变化周期, 这也反映了CMIP5模式模拟的ZI序列存在很强的年际变率, 但是再分析资料这个周期并不明显, CanESM2、CNRM-CM5、GFDL-ESM2G这3个模式对ZI指数的两个变化周期模拟较好。

通过分析评估19个CMIP5模式对北半球海平面气压EOF1、PC1和ZI序列等多项指标的模拟能力, 虽然大部分模式都能够模拟出冬季北极涛动的异常模态, 但是对中心位置强度的模拟存在较大的偏差, 这也表明多数模式仅能抓住AO的某些特征, 几乎没有一个模式能全面地表现出AO的时空

特征。

4 未来情景下AO的可能变化趋势

为了考察两种浓度路径下21世纪北极涛动的可能变化趋势, 本研究以19个模式北半球海平面气压的集合平均计算的ZI序列来表征未来变化(图6a)。从图可以看出, 在RCP4.5情景下, ZI指数总体呈现上升态势, 年代际变化比较明显, 2006~2030年ZI序列呈现下降趋势, 2030~2045年表现出上升趋势, 2045~2055年再次出现短暂下降, 2055~2085年呈现较长时间的增长, 2085~2100年上升趋势有所减缓, RCP8.5情景下ZI指数变化趋势与RCP4.5类似, 但是变化幅度较大, 后期增长仍然较为明显(图6b)。从长期趋势系数看RCP4.5路径下有14个模式呈现正的变化趋势, 其中有10个模式通过了检验, 但集合平均结果未能通过检验(图6b)。RCP8.5浓度路径下, 16个模式为正变化趋势, 有11个模式通过了检验, 集合平均结果正变化趋势较为显著。

总体来说, 随着排放强度的增强, ZI序列有显著的上升趋势, 在RCP8.5情景下上升幅度最大, RCP4.5情景下也呈现类似的变化情况, 但是后期上

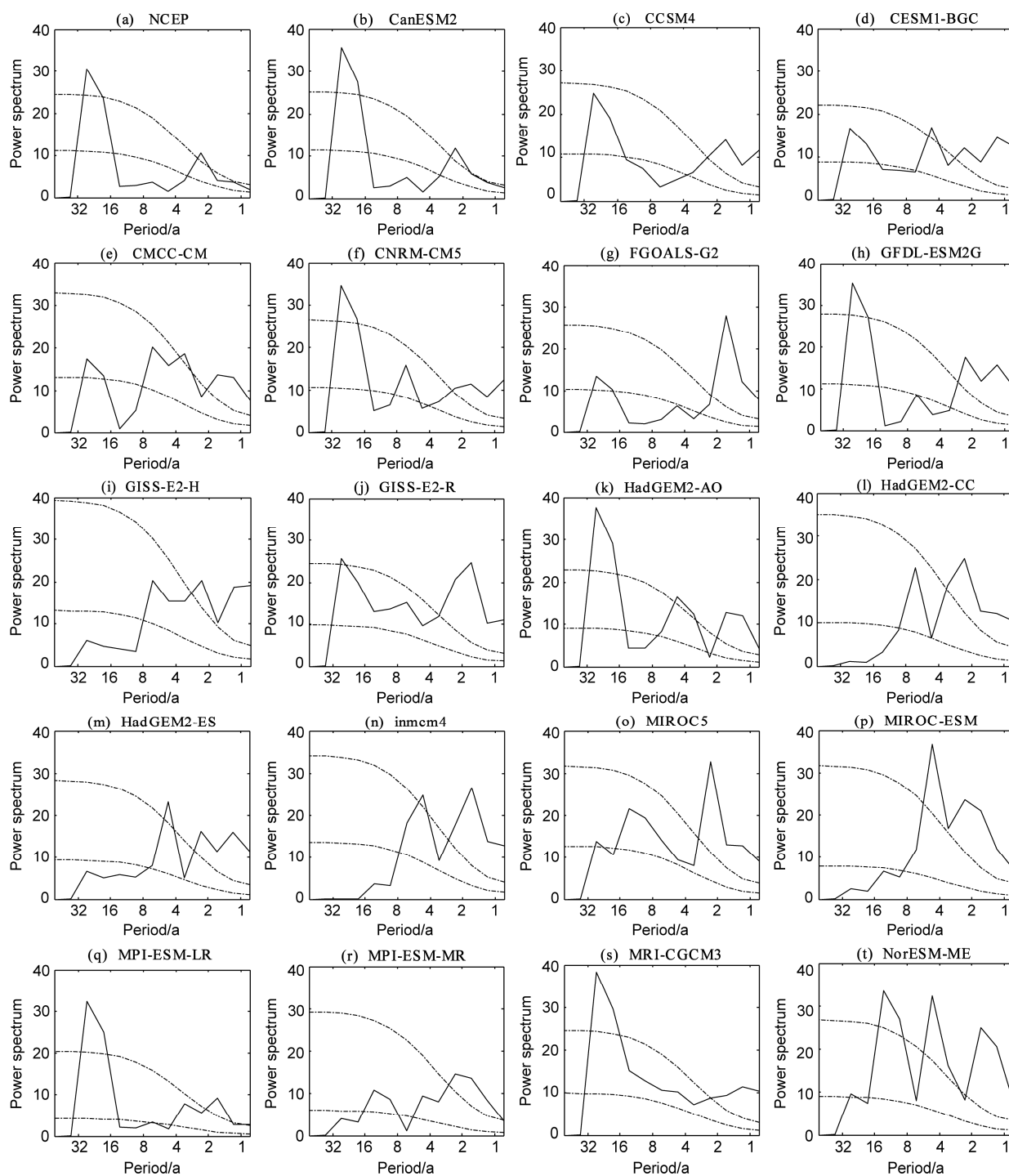


图5 NCEP/NCAR 观测数据和 CMIP5 模式模拟的 DJF ZI 序列功率谱 (实线, 两条虚线分别为 0.05 和 0.1 显著性水平对应的红噪声检验)

Fig. 5 Power spectra (solid lines) of the DJF ZI from the (a) NCEP /NCAR reanalysis data and (b-t) the CMIP5 model simulations (dashed lines indicate significance at the 0.05 and 0.1 levels by red noise test)

升势头较弱。

相对于 1981~2005 参考时段, 在 RCP4.5 情景下, 不同时段的海平面气压集合平均在各纬度带表现出了不同的变化 (图 7a-c), 2006~2039 年欧亚

大陆、北大西洋和北太平洋中纬度线性趋势为 $1 \text{ hPa} (10 \text{ a})^{-1}$, 阿留申低压的变化趋势为 $-2 \sim -4 \text{ hPa} (10 \text{ a})^{-1}$; 2040~2069 年北极地区的阿留申群岛、欧亚大陆北部和北大西洋东岸变化趋势为 -2 hPa

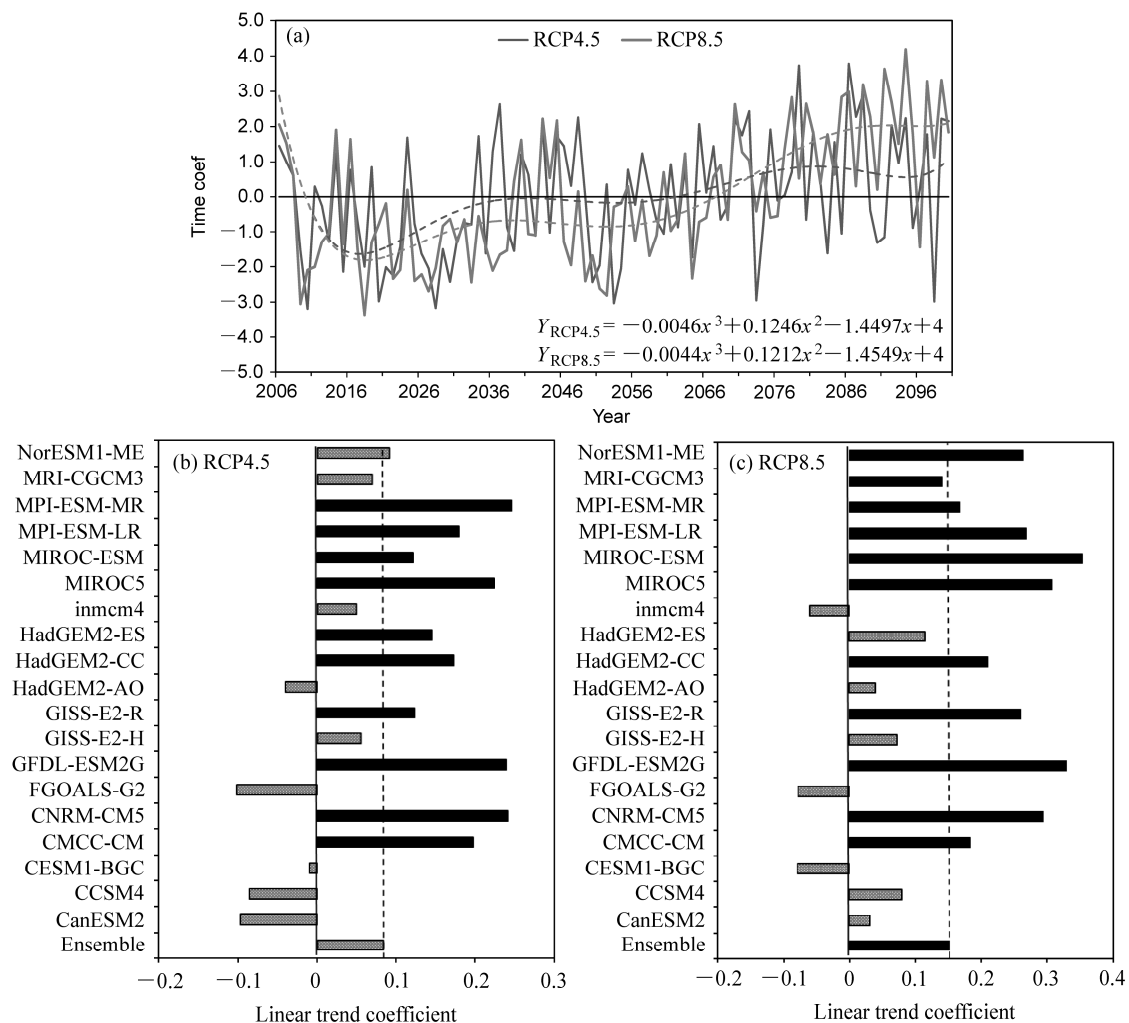


图6 (a) RCP4.5和RCP8.5的ZI时间序列以及(b) RCP4.5、(c) RCP8.5 ZI的趋势系数(黑色表示通过了0.05显著性检验)

Fig. 6 (a) Time series of ZI under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and linear trend coefficients of ZI under (b) RCP4.5 scenario and (c) RCP8.5 scenario (black bars indicate that the values are significant at the 0.05 level)

(10 a)⁻¹; 2070~2100年北太平洋、欧亚大陆和北大西洋均为正的变化趋势, 北太平洋正的变化趋势最显著为2~8 hPa (10 a)⁻¹, 北美大陆和西欧为负变化趋势为-1~-2 hPa (10 a)⁻¹。在RCP8.5情景下, 变化趋势较RCP4.5更显著, 2006~2039年中低纬度变化趋势为1~3 hPa (10 a)⁻¹, 北极地区主要为负的变化趋势, 最明显的是欧亚大陆东北部变化趋势为-2~-4 hPa (10 a)⁻¹之间。2040~2069年北太平洋、欧亚大陆北部和北大西洋均为负的变化趋势, 变化趋势为-2~-8 hPa (10 a)⁻¹之间, 冰岛及周边海域和欧亚大陆南部为正的变化趋势, 面积显著小于负的变化趋势, 2070~2100年北半球中纬度地带均为正的变化趋势, 北太平洋中纬度地带尤为明显, 变化趋势为2~6 hPa (10 a)⁻¹, 北极地区为负变化趋

势, 阿留申群岛尤为显著, 变化趋势为-2~-10 hPa (10 a)⁻¹。这种变化对应的3个时段与ZI指数的年代际变化较为吻合, 第一阶段30°N~50°N为正变化趋势, 而北极地区大部分区域均为负的变化趋势, 这种情况下ZI序列有所上升; 第二阶段北半球中高纬度大部分地区为负的变化, 尤其在RCP8.5情景下更为显著, 在ZI序列中同时也显现了下降的变化趋势; 第三阶段, 30°N~50°N与极圈之间反向变化分布越发明显, 对应于ZI指数的上升趋势也更加明显。

5 结论和讨论

利用CMIP5的19个模式模拟结果, 从异常模

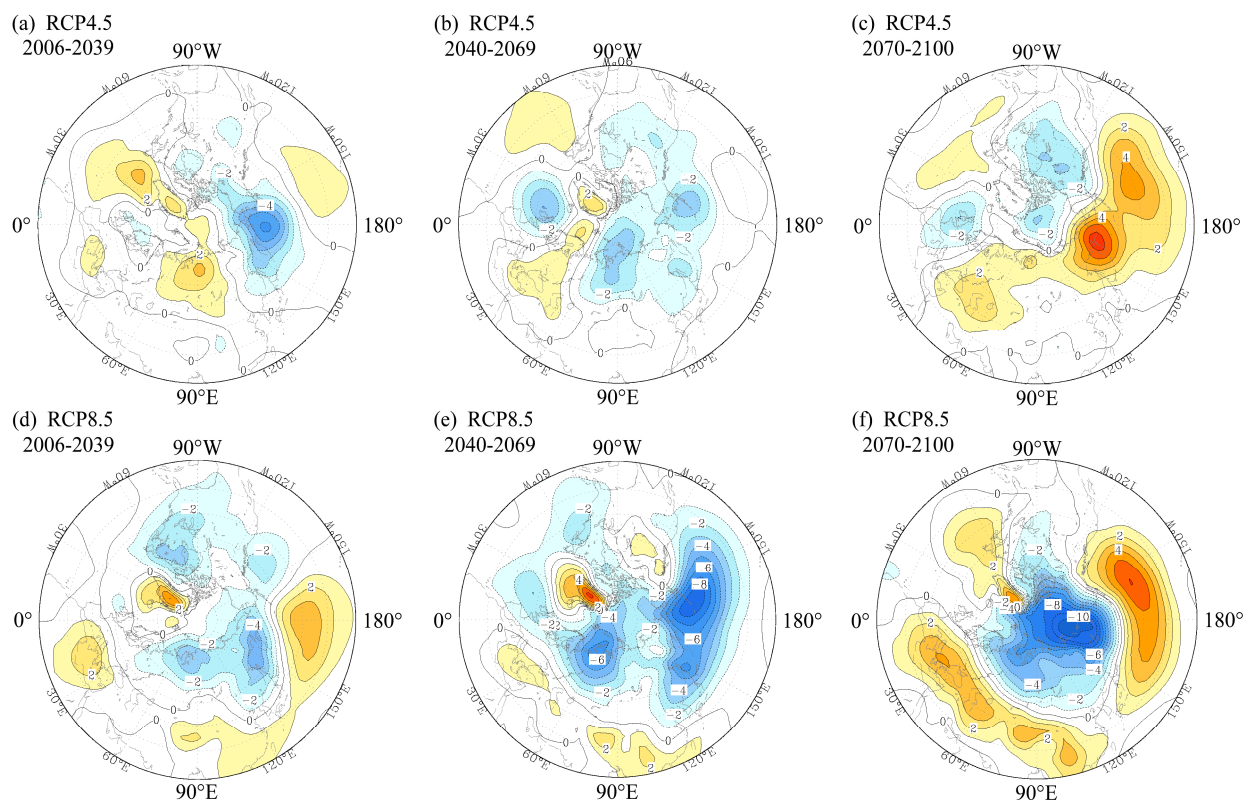


图7 相对于1981~2005年参考时段, (a-c) RCP4.5和(d-f) RCP8.5不同时段冬季海平面气压的线性变化趋势 [单位: $\text{hPa} (10 \text{ a})^{-1}$]

Fig. 7 Linear trends [$\text{hPa} (10 \text{ a})^{-1}$] of annual DJF SLP changes under (a-c) RCP4.5 and (d-f) RCP8.5 scenarios in different stages relative to 1981-2005

态、变化振幅、年代际趋势和周期特征等方面评估了CMIP5耦合模式对AO的模拟能力。在此基础上,对未来RCP4.5、RCP8.5两种浓度路径下AO的可能变化趋势给出了定性的预估。结果发现:

(1) CMIP5模式历史试验结果显示,大多数模式都能够模拟出AO模态的基本结构,其中MPI-ESM-LR和HadGEM2-AO能较好地模拟出AO整体模态,但是,许多模式对太平洋一侧的异常分布估计过高;虽然大部分模式都能够模拟出冬季北极涛动的异常模态,但是对中心位置强度的模拟存在较大的偏差,这也表明多数模式仅能抓住AO的某些特征。

(2) 模式对历史演变和周期特征的刻画方面,CMIP5模式的PC1基本能够反映出1950~1970年以来的减弱趋势,但对1970年以后的增长趋势模拟并不明显,ZI序列对两个阶段的趋势均可明显地模拟出来。大多数模式的PC1和ZI序列主要表现为正的变化趋势,与NCEP/NCAR再分析资料的结果一致;有一半以上的模式对2~3a高频周期模拟较好,但对20a左右的周期模拟较差,其中仅有

CanESM2、CNRM-CM5、GFDL-ESM2G这3个模式对ZI指数的两个变化周期模拟较好。

(3) 在RCP4.5和RCP8.5两种浓度路径下,ZI序列有显著的上升趋势,从长期趋势系数看RCP4.5路径下有14个模式呈现正的变化趋势,其中有10个模式通过了检验。RCP8.5浓度路径下,16个模式为正变化趋势,有11个模式通过了检验,集合平均结果正变化趋势较为显著。RCP4.5和RCP8.5两种浓度路径下不同时段的海平面气压变化趋势表明,ZI序列的年代际变化明显,存在3个不同的变化阶段2006~2039年、2070~2100年为两个上升阶段,2040~2069年为缓慢下降阶段。

参考文献 (References)

- Ambaum M H P, Hoskins B J, Stephenson D B. 2001. Arctic oscillation or north Atlantic oscillation? [J]. J. Climate, 14 (16): 3495-3507, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<3495:AOONAO>2.0.CO;2.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863-870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary

- planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.15.
- 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 419–424. Fan Lijun, Li Jianping, Wei Zhigang, et al. 2003. Annual variations of the arctic oscillation and the Antarctic oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 419–424, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.11.
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关 [J]. 科学通报, 47 (7): 546–549. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. Significant relationship between spring AO and the summer rainfall along the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 47 (11): 948–951, doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2002.07.013.
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 559–568. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 559–568, doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2003.04.010.
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 405–418. Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian monsoon system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 405–418, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.06.
- Kerr R A. 1999. A new force in high-latitude climate [J]. Science, 284 (5412): 241–242, doi: 10.1126/science.284.5412.241.
- Li J P, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (12): 1632, doi: 10.1029/2003GL017441.
- Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile [J]. J. Meteor., 8 (1): 52–59, doi: 10.1175/1520-0469(1951)008<0052:SAIVOT>2.0.CO;2.
- 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.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophys. Res. Lett., 25 (9): 1297–1300, doi: 10.1029/98GL00950.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (19): 3-1–3-4, doi: 10.1029/2002GL015373.
- 杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 395–404. Yang Hui, Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic oscillation on temperature and precipitation in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 395–404, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.05.
- 左金清, 李维京, 任宏利. 2013. CMIP5 模式对北极涛动的模拟评估 [J]. 气候变化研究进展, 9 (3): 157–164. Zuo Jinqing, Li Weijing, Ren Hongli. 2013. The arctic oscillation in the CMIP5 models [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (3): 157–164, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.001.