

陈可凡, 宁亮, 孙炜毅, 等. 2020. 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 [J]. 气候与环境研究, 25(4): 429–442. CHEN Kefan, NING Liang, SUN Weiyi, et al. 2020. Characteristics and Cause Analyses of Arctic Oscillation Variability during the Typical Periods in Last Millennium Based on PMIP3 and CMIP5 Simulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (4): 429–442. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20011

# 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

陈可凡<sup>1</sup> 宁亮<sup>1,2,3,4</sup> 孙炜毅<sup>1</sup> 覃燕敏<sup>1</sup> 薛姣<sup>1</sup> 刘健<sup>1,2,5</sup> 严蜜<sup>1,2,4</sup>

1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室/江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点/江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心/地理科学学院, 南京 210023

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋—气候—同位素模拟开放工作室, 山东青岛 266237

3 马萨诸塞大学地理科学学院地球科学系气候系统研究中心, 阿姆赫斯特 01003, 美国

4 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710063

5 江苏省大规模复杂系统数值模拟重点实验室/南京师范大学数学科学学院, 南京 210023

**摘要** 利用参与第三次古气候模式评估比较计划 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III, PMIP3) 过去千年气候模拟试验以及参与第五次耦合模式评估比较计划 (Paleoclimate Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 全强迫历史情景试验的 9 个地球系统模式模拟试验结果, 对过去千年 3 个特征时段 (中世纪气候异常期、小冰期和现代暖期) 北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 的变率及成因进行了分析。通过与 NCEP 再分析资料的对比发现, 模式能够较好地模拟出 AO 的空间模态及年际变化周期, 且大部分模式能够模拟出过去 50 年 AO 的增强趋势。过去千年 3 个特征时段中, 不同模式对中世纪气候异常期 AO 位相的模拟并不一致, 但大部分模式显示小冰期 AO 基本呈现负位相, 而现代暖期则表现为显著的正位相, 与重建结果一致。基于多模式集合平均的机制分析表明, 中世纪气候异常期北极地区海平面气压变化不显著, 小冰期北极地区海平面气压显著偏正, 现代暖期海平面气压显著偏负, 这与现代暖期北极温度偏高而小冰期北极温度偏低有关。过去千年中, 小冰期和现代暖期的 AO 变率分别受自然外强迫和人为外强迫的影响。

**关键词** 北极涛动 PMIP3 计划 CMIP5 计划 过去千年 特征时段

文章编号 1006-9585(2020)04-0429-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20011

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

CHEN Kefan<sup>1</sup>, NING Liang<sup>1,2,3,4</sup>, SUN Weiyi<sup>1</sup>, QIN Yanmin<sup>1</sup>,

收稿日期 2020-01-13; 网络预出版日期 2020-03-23

作者简介 陈可凡, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 从事古气候模拟、极端气候事件、全球气候变化的研究。E-mail: kefan\_chen1995@126.com

通讯作者 宁亮, E-mail: ningliangnnu@njnu.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2016YFA0600401, 国家自然科学基金项目 41971021、41420104002、41671197、41631175, 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 SKLLQG1820、SKLLQG1930, 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) XDB40000000

**Funded by** National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600401), National Natural Science Foundation of China (Grants 41971021, 41420104002, 41671197, and 41631175), Open Funds of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (Grants SKLLQG1820 and SKLLQG1930), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDB40000000)

XUE Jiao<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1,2,5</sup>, and YAN Mi<sup>1,2,4</sup>

1 Key Laboratory for Virtual Geographic Environment, Ministry of Education/ State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution of Jiangsu Province/ Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application/ School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

2 Open Studio for the Simulation of Ocean–Climate–Isotope, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong Province 266237

3 Climate System Research Center, Department of Geosciences, University of Massachusetts, Amherst 01003, USA

4 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710063

5 Jiangsu Provincial Key Laboratory for Numerical Simulation of Large Scale Complex Systems, School of Mathematical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

**Abstract** The variability and corresponding mechanisms of the Arctic Oscillation (AO) during three typical periods, the Medieval Climate Anomaly (MCA), Little Ice Age (LIA), and Present Warm Period (PWP), in the last millennium were analyzed using simulations from nine Earth system models (ESMs) from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project Phase III (PMIP3) Last Millennium experiment and Paleoclimate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) historical experiments. Compared with the NCEP reanalysis data, the ESMs reasonably reproduce the AO spatial pattern and inter-annual period, and most ESMs reproduce the AO strengthening trend in the last five decades. Simulations show that there is no consistent AO phase during the MCA among the different models. The eight models simulated generally negative AO phases during the LIA and positive phases during the PWP. These simulated results are consistent with previous studies using proxy reconstructions and observations. The multi-model ensemble mean indicates that there is no significant sea level pressure (SLP) change over the Arctic region during the MCA. The SLP anomalies over the Arctic region are significantly positive during the LIA and significantly negative during the PWP. These changes in SLP are related to the anomalous lower temperature during the LIA and higher temperature during the PWP over the Arctic region. Our study suggests that the AO variability during the LIA and PWP are influenced by the natural and anthropogenic forcing, respectively.

**Keywords** Arctic Oscillation, PMIP3 Project, CMIP5 Project, Last Millennium, Typical period

## 1 引言

北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 作为北半球中高纬度海平面气压变化的主模态, 表征北极与北半球中纬度地区海平面气压反向变化的特征 (Thompson and Wallace, 2000, 2001)。Thompson and Wallace (2001) 的研究表明, AO 能够通过调制中纬度风暴强度、高纬度阻塞高压的发生频率等对北半球中高纬地区的气候产生重要影响。同时很多研究显示, AO 是影响中国气候变化的重要因子。一方面, 冬季 AO 可以通过影响西伯利亚高压和东亚冬季风, 从而影响中国东部的冬季气温和降水 (Wu and Wang, 2002; Gong and Ho, 2003)。龚道溢和王绍武 (2003) 通过分析近百年北极涛动对中国冬季气候的影响, 指出当 AO 指数偏强时, 中国大部分地区冬季气温偏高、降水偏多。另一方面, 春季 AO 会通过亚洲夏季急流 (龚道溢等, 2002)、

北太平洋海温及西太副高等 (Gong et al., 2011) 对中国东部的夏季气候产生影响 (Gong and Ho, 2003; Liu et al., 2019)。因此, 研究 AO 的变率特征对理解中国区域气候变化有重要帮助。

1950 年以来, 观测数据和模式结果均显示 AO 呈现显著的增强趋势 (Feldstein, 2002; 朱献等, 2013)。然而, 目前仍不清楚近几十年 AO 的增强趋势究竟是受外部强迫影响还是由气候系统内部变率所主导 (Gómez-Navarro and Zorita, 2013)。一些学者认为, 近 50 年 AO 的变化趋势是受人为温室气体排放增加的影响 (Gillett et al., 2003; Yukimoto and Kodera, 2005; Miller et al., 2006)。也有研究指出, 近 50 年 AO 的增强趋势与年代—多年代际的气候系统内部变率有关 (Osborn et al., 1999)。目前人们很难利用时间长度较短的器测资料分析当前 AO 增强的原因, 因此, 有必要将 AO 的年代际变率放到更长的时段进行研究。

过去千年包括了工业革命以来由温室气体、土地利用等人为外强迫主导的气候变化时段, 也包含了 1850 年以前由太阳辐射、火山活动等自然外强迫主导的气候变化时段。在过去千年背景下研究 AO 的年代际时空变化特征, 有利于正确认识和区分自然外强迫和人类活动对 AO 年代际变化的影响 (葛全胜和郑景云, 2012)。过去千年曾多次出现持续百年以上的暖期 (Lamb, 1965, 1977; 葛全胜等, 2013), 其中, 中世纪气候异常期的温暖程度可能与现代暖期相当 (葛全胜等, 2013)。IPCC 也强调必须将现代暖期放到过去千年的背景中研究 (IPCC, 2007)。因此, 本文将在过去千年背景下研究 AO 年代际变化特征及相应的成因机理。

基于气候代用指标的重建数据是研究过去千年 AO 变率的主要依据 (Huang et al., 2010)。D'Arrigo et al. (2003) 通过树轮重建的 1650~1975 年 AO 指数显示小冰期 AO 主要呈现出负位相。重建的 AO 的一部分——北大西洋涛动指数 (North Atlantic Oscillation, NAO) (Wallace, 2000; 龚道溢和王绍武, 2003) 显示, 中世纪气候异常期 NAO 呈现出持续的正位相 (Trouet et al., 2009)。但也有研究认为中世纪气候异常期没有显著持续的 NAO 正位相, 但 13~14 世纪 NAO 为正位相, 另外, 小冰期 NAO 为负位相 (Ortega et al., 2015)。还有学者认为小冰期 AO 的位相相对偏负, 而中世纪气候异常期的 AO 并无明显变化 (Olsen et al., 2012)。可见, 不同的重建资料对 AO 在中世纪气候异常期的位相变化特征仍存在较大争议。

由于重建资料存在一定的不确定性, 同时难以揭示 AO 年代际变率的物理机制, 因此需要借助气候系统模式。本文利用 PMIP3 关于过去千年气候模拟试验的结果以及 PMIP5 全强迫历史情景试验

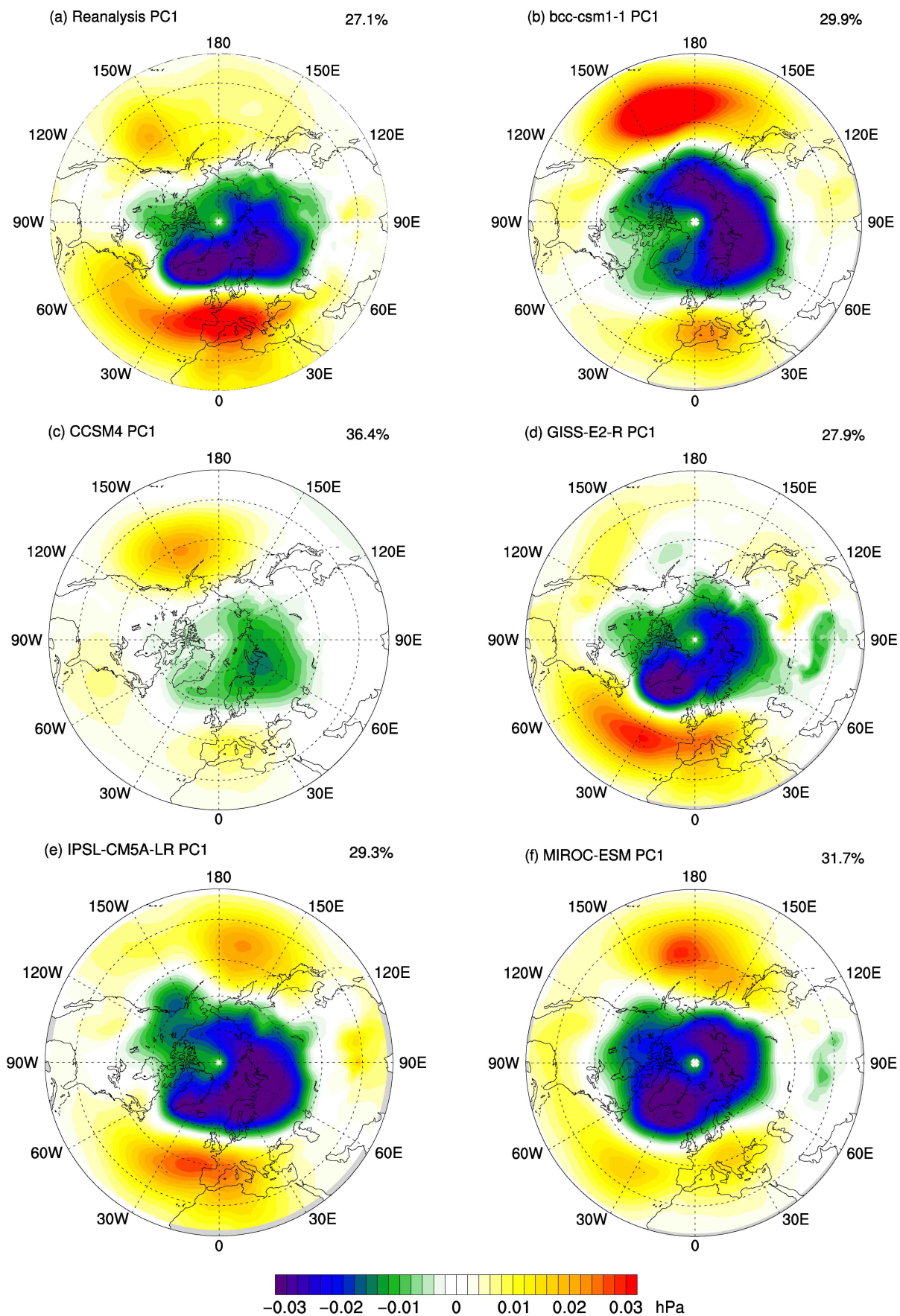
的模拟结果, 对过去千年特征时期 AO 的时空变化特征进行了分析, 并对 AO 年代际变化的机制以及近 50 年来 AO 出现增强趋势的原因进行了探究。

## 2 数据和方法

本文使用了 9 个参与 PMIP3 关于过去千年的气候模拟试验 (Last Millennium Experiment) 以及 CMIP5 全强迫历史情景试验的耦合模式模拟结果。9 个模式分别为中国气象局北京气候中心气候系统模式 1-1 版 (bcc-csm1-1), NCAR 通用气候系统模式第 4 版 (CCSM4), NASA 戈达德空间研究所海气耦合模式 (GISS-E2-R), 英国气象局哈德利气候预测和研究中心耦合模式第 3 版 (HadCM3), 法国皮埃尔—西蒙·拉普拉斯研究所低分辨率气候模式第 5 版 (IPSL-CM5A-LR), 德国马克斯·普朗克研究所地球系统模式古气候版 (MPI-ESM-P), 澳大利亚联邦科学与工业研究组织低分辨率全球海气耦合模式 1-2 版 (CSIRO-MK3L-1-2), 日本国立环境研究所地球系统模式 (MIROC-ESM), 日本气象研究所低分辨率地球系统模式 (MRI-ESM-LR)。9 个模式的详细信息见表 1。选取的 9 个模式能够提供本文分析所需的全部变量, 包括海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP)、表面温度等。PMIP3 过去千年气候模拟试验的积分时段为 850~1850 年。CMIP5 全强迫历史情景试验的积分时段为 1850~2005 年, 其中 HadCM3 模式缺少 1851~1859 年的数据。所有模式模拟结果的时间分辨率均为月尺度。此外, 为了便于评估和比较, 9 个模式的模拟结果均统一插值到  $1.4^{\circ}$  (纬度)  $\times 2.8^{\circ}$  (经度) 的格网上。模拟试验采用的外强迫包括火山

表 1 本文所用的 9 个模式的详细信息  
Table 1 Detailed information of the nine models

| 名称             | 分辨率 (大气模式)  | 分辨率 (海洋模式)  | 研发机构              |
|----------------|-------------|-------------|-------------------|
| bcc-csm1-1     | 128×64×L40  | 360×232×L40 | 中国气象局北京气候中心       |
| CCSM4          | 288×192×L26 | 320×384×L60 | NCAR              |
| GISS-E2-R      | 144×90×L40  | 288×180×L32 | NASA戈达德空间研究所      |
| HadCM3         | 96×73×L19   | 288×144×L20 | 英国气象局哈德利气候预测和研究中心 |
| IPSL-CM5A-LR   | 96×95×L39   | 182×149×L31 | 法国皮埃尔—西蒙·拉普拉斯研究所  |
| MPI-ESM-LR     | 196×98×L47  | 256×220×L40 | 德国马克斯·普朗克气象研究所    |
| CSIRO-MK3L-1-2 | 64×56×L18   | 128×112×L21 | 澳大利亚联邦科学与工业研究组织   |
| MIROC-ESM      | 128×64×L80  | 256×192×L44 | 日本国立环境研究所         |
| MRI-CGCM3      | 320×160×L48 | 364×368×L51 | 日本气象研究所           |



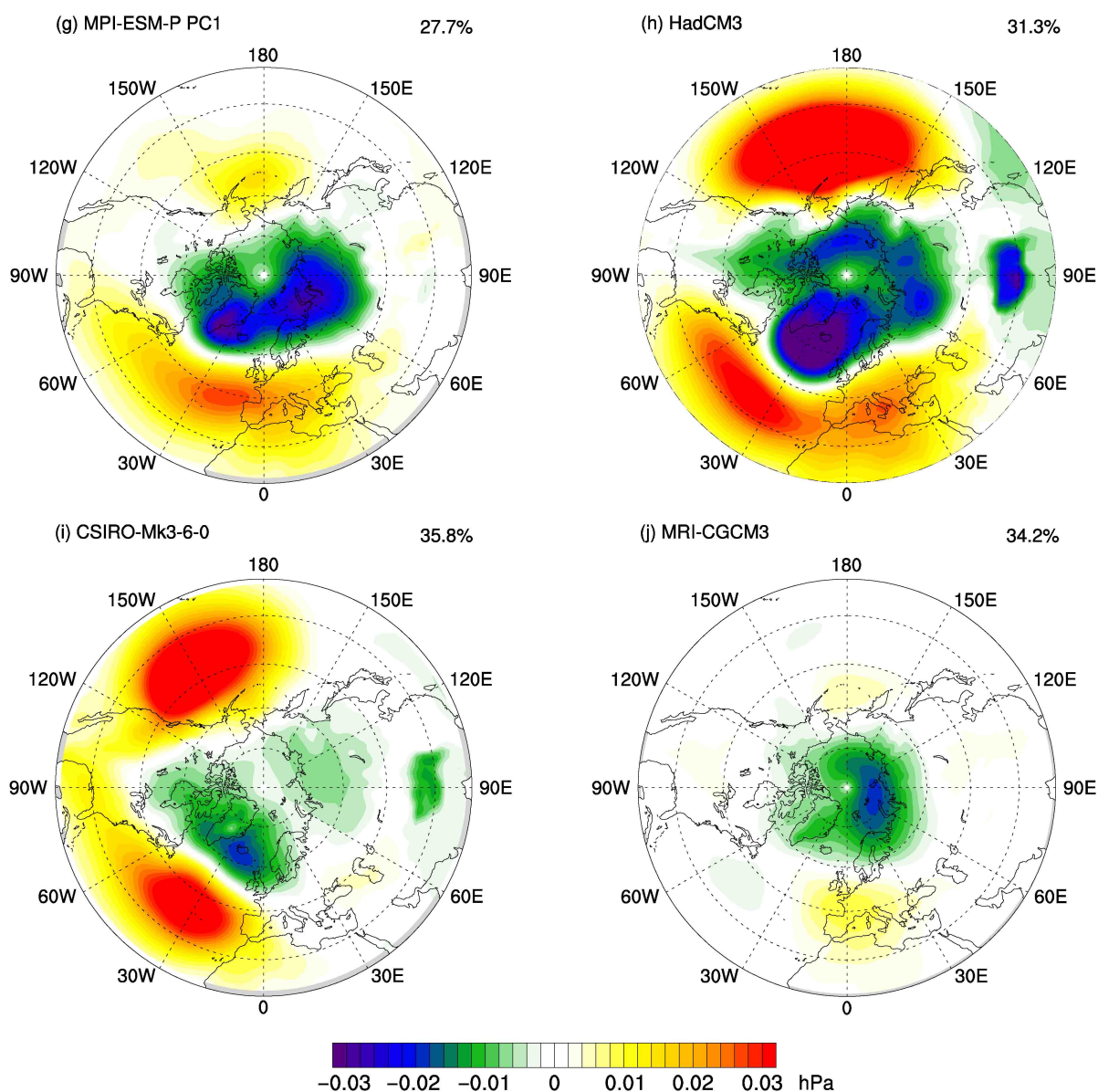


图1 (a-j) NCEP 再分析资料以及 9 个模式模拟的 1950~2000 年北半球热带外 (20°N 以北) 海平面气压距平 EOF 分解第一模态的空间场  
Fig. 1 (a-j) The first mode of Empirical Orthogonal Function (EOF) spatial patterns of sea level pressure (SLP) anomaly over the extratropical Northern Hemisphere (north of 20°N) from the NCEP reanalysis data and nine model simulations for the period 1950~2000

气溶胶、太阳辐射等自然外强迫, 以及温室气体、土地利用、人为气溶胶等人为外强迫。关于外强迫的具体信息可参照 PMIP3 过去千年试验的官方网站 ([https://wiki.lsce.ipsl.fr/pmip3/doku.php/pmip3:design:lm:index\[2020-01-01\]](https://wiki.lsce.ipsl.fr/pmip3/doku.php/pmip3:design:lm:index[2020-01-01])) 以及 CMIP5 的试验设计官方网站 ([http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment\\_design.html\[2020-01-01\]](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment_design.html[2020-01-01]))。此外, 本文利用 1950~2005 年的 NCEP 再分析资料对模式结果进行评估, 再分析资料的分辨率为 2.5° (纬度) × 2.5° (经度)。

本文采用 Thompson and Wallace (2000) 的方

法, 将冬季北半球热带外 (20°N 以北) 海平面气压距平场经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解的第一模态定义为 AO 模态, 其时间序列定义为 AO 指数。本文采用的分析方法主要包括相关分析, 功率谱分析等常用的气候统计诊断方法。

### 3 结果分析

#### 3.1 模式对冬季 AO 变率的模拟评估

图 1 给出了 NCEP 再分析资料和 9 个模式模拟

的 1950~2000 年 AO 空间模态。NCEP 再分析资料显示, AO 以北极地区为中心呈现典型的环状模态, 北半球 60°N 以北的北极地区与 45°N 左右的中纬度地区的海平面气压呈反相变化特征 (图 1a)。在北极地区, 极涡负异常很强, 极值中心位于格陵兰岛和欧洲北部。中纬度地区则存在北太平洋和北大西洋两个正异常中心, 其中北大西洋中心位于西欧和北大西洋东侧, 其强度明显大于北太平洋中心的强度。

9 个模式均能模拟出北极与中纬度地区气压反相变化的环状特征 (图 1b-1j), 但对极值中心的位置和强度的模拟存在一定偏差。GISS、IPSL、MIROC、MPI、HadCM3 和 CSIRO 等 6 个模式 (图 1d-1i) 模拟出了格陵兰岛和欧洲以北的负异常, 极值中心的位置与再分析资料较为一致, 而 bcc、CCSM4、MRI 三个模式 (图 1b、1c、1j) 模拟的北极负异常中心位于亚洲以北 (俄罗斯北部), 与再分析资料存在差异。在中纬度区域, 除 GISS 模式外, 其余 8 个模式 (bcc、CCSM4、IPSL、MIROC、MPI、HadCM3、CSIRO 和 MRI 模式) 均模拟出了北太平洋和北大西洋两个正异常极值中心。而在模拟出两个正极值中心的模式中, IPSL 和 MPI 模拟出了北大西洋极值中心强于北太平洋极值中心的特征, 与再分析资料一致。而 bcc、CCSM4 和 MIROC 模式模拟的北太平洋极值中心强于北大西洋极值中心, 与再分析资料结果相反。HadCM3、CSIRO 以及 MRI 模式模拟的两个极值中心强度没有明显差别。

NCEP 再分析资料显示 (图 2a), AO 既有明显的年际变化, 也呈现显著的增强趋势。1950~1980 年时段 AO 为持续的负位相, 而 1980~2000 年时段 AO 为显著的正位相, AO 位相大致以 1980 年为转折点, 经历了由负变正的转变过程。模式模拟结果中, bcc、CCSM4、GISS、MPI、HadCM3、CSIRO 和 MRI 7 个模式均模拟出了 AO 近 50 年由负到正的位相变化过程 (图 2b-2d、2g-2j), IPSL 虽然模拟出了 AO 的增强但增强的时间段并不连续 (图 2e), MIROC 模式模拟的 AO 位相变化与再分析资料完全相反 (图 2f)。

图 3 为 1950~2000 年再分析资料和模式模拟的 AO 指数功率谱。由于 AO 指数本身有显著的自相关, 因此依据红噪音谱对 AO 的周期变率进行信度检验。通过功率谱分析发现, 再分析资料中,

AO 的变化具有显著的 2~3 a 的年际变化周期 (图 3a)。9 个模式中, 除 MIROC 外 (图 3f), 其他模式均模拟出了显著的年际变率, 与再分析资料结果一致 (图 3b-3e、3g-3j)。

整体而言, 模式对 AO 空间模态、趋势变化及年际变率的模拟较为合理, 但对 AO 空间模态的极值中心的位置和强度的模拟存在误差。9 个模式中 MPI 对 AO 时空变化特点的模拟效果最好, 且该模式模拟的 1950~2000 年 AO 空间模态与再分析资料的 AO 空间模态相关程度最高 ( $r=0.93$ ), 模拟结果与再分析资料最为接近。此外, bcc、CCSM4、GISS、IPSL、HadCM3、MRI 以及 CSIRO 对于 AO 空间模态和时间变化的模拟效果与再分析资料较为一致, 他们与再分析资料的空间相关系数分别为 0.78、0.69、0.93、0.91、0.63、0.79 和 0.54。MIROC 模拟的 AO 指数变率与再分析资料相反, 且该模式没有模拟出显著的周期变化, 对 AO 时空变化的模拟能力较差。

### 3.2 过去千年特征时期 AO 的时空特征及机制分析

模拟和观测资料均显示 1950 年以来 AO 呈现出显著的增强趋势 (图 2) (Feldstein, 2002; 朱献等, 2013), 然而, 对该时期 AO 增强趋势的成因机理还存在争议。过去千年是研究 AO 年代—百年际时空变化特征和成因机理的关键时段, 尤其是工业革命之前的特征时期主要受气候系统内部变率及自然外强迫 (包括太阳辐射和火山活动) 的影响。已有研究表明, 中世纪气候异常期太阳辐射相对偏强、火山活动发生频率相对较低, 导致北半球地表温度相对偏高 (Mann et al., 2009; Diaz et al., 2011; Ljungqvist et al., 2012); 在小冰期, 太阳辐射减弱、火山活动频繁发生, 导致北半球地表温度偏冷 (Mann et al., 2009; Ljungqvist et al., 2012); 现代暖期的异常增温则可能与自然、人为外强迫以及气候系统内部变率有关 (IPCC, 2001)。图 4 为 9 个模式模拟的 850~2000 年北半球年平均温度距平序列, 其中除了 MIROC 模式 (图 4e) 未能模拟出过去千年 3 个典型特征时期外, 其他模式均模拟出了中世纪气候异常期的增暖现象、小冰期的降温现象以及现代暖期的增暖现象 (图 4a-4d、4f-4i)。其中, bcc、CCSM4、GISS、MPI 和 MRI 五个模式模拟的中世纪气候异常期为 850~1200 年; HadCM3 和 CSIRO 模拟的中世纪气候异常期分别为 900~1200 年和 900~1950 年; IPSL 模拟的中世纪

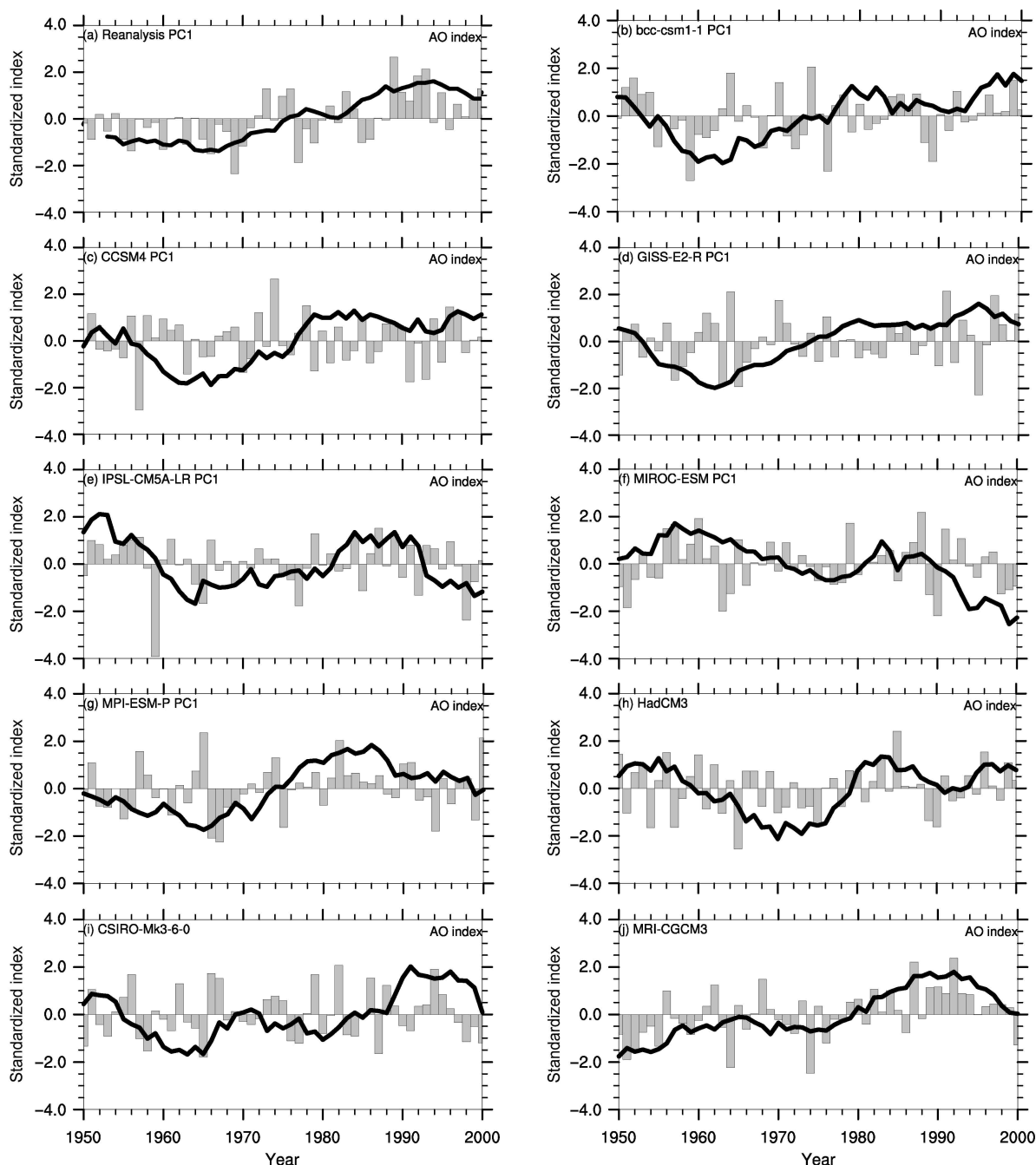


图2 (a-j) NCEP 再分析资料以及 9 个模式模拟的 1950~2000 年北半球热带外 (20°N 以北) 海平面气压距平 EOF 分解第一模态的时间序列 (柱状图) 以及 11 年滑动平均的海平面气压 EOF 分解第一模态的时间序列 (黑线)

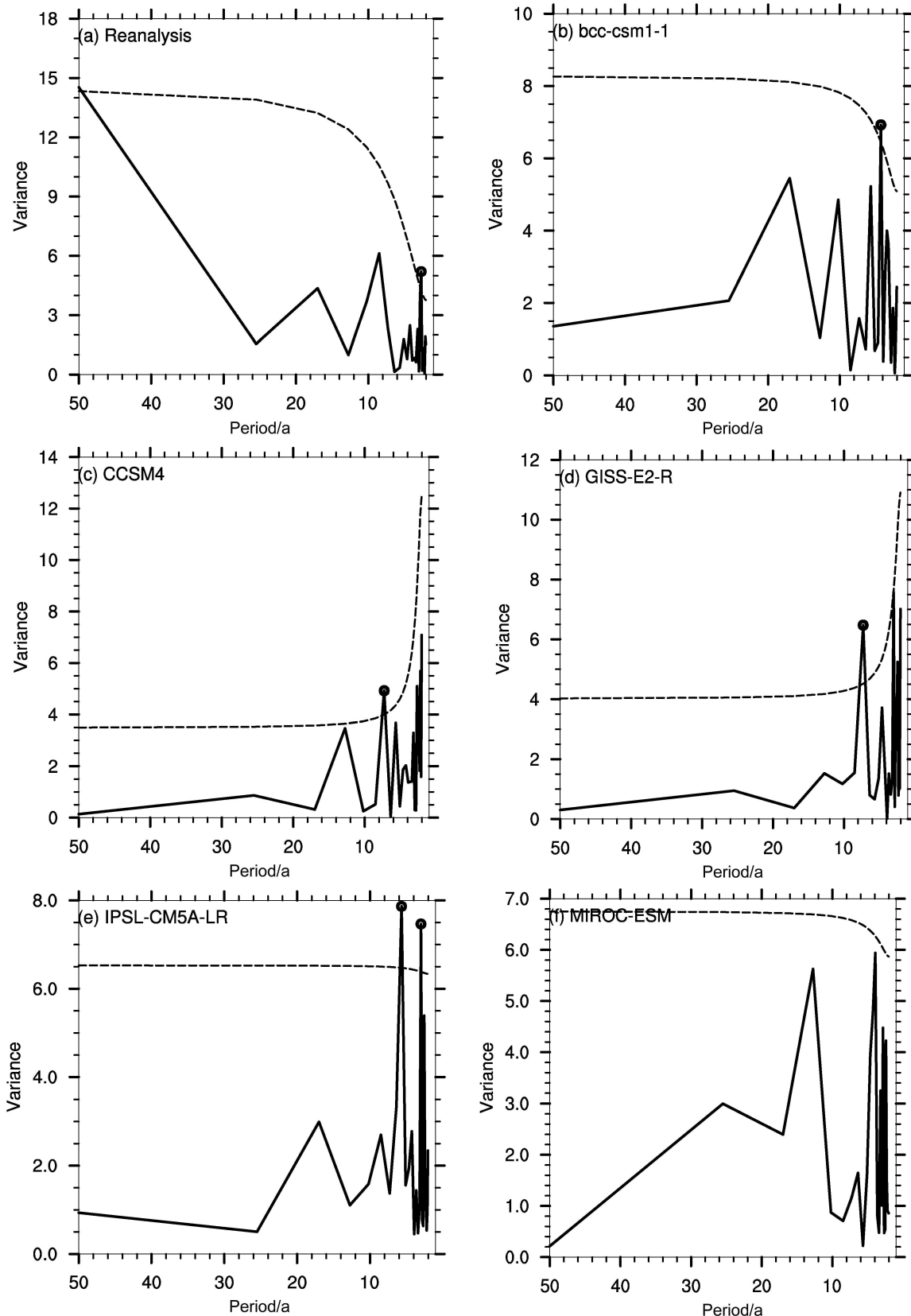
Fig. 2 (a-j) The first EOF principal components of the SLP (bars) and its 11-year running average time series (black line) over the extratropical Northern Hemisphere (north of 20°N) from the NCEP reanalysis data and nine model simulations for the period 1950–2000

气候异常期为 900~1250 年。考虑到大部分模式在 900~1200 年模拟的温度偏暖, 故选取该时段作为后续分析中的中世纪气候异常期。此外, 为了在分析中与中世纪气候异常期 300 年的时间长度对应, 本文选取了降温最显著的 1500~1800 年作为后续分析中的小冰期。此外, bcc、CCSM4、GISS、

IPSL、MPI 和 CSIRO 模式模拟的中世纪气候异常期增暖幅度较大, 中世纪气候异常期和小冰期的差异也更明显。由于 MIROC 模式未能模拟出 AO 的变化特征及周期, 且未能模拟出过去千年的温度变化特征, 因此下文采用其余 8 个模式对过去千年特征时期 AO 的变化特征及成因机制进行分析。

重建资料显示, AO 在小冰期主要表现为负位相 (D'Arrigo et al., 2003)。8 个模式中有 6 个模式 (bcc、CCSM4、CSIRO、HadCM3、IPSL 和

MPI) 模拟出了小冰期 AO 的负位相 (图 5a、5b、5d-5g), 8 个模式集合平均的海平面气压距平场也表现出极地气压偏高和中纬度区域气压偏低的空



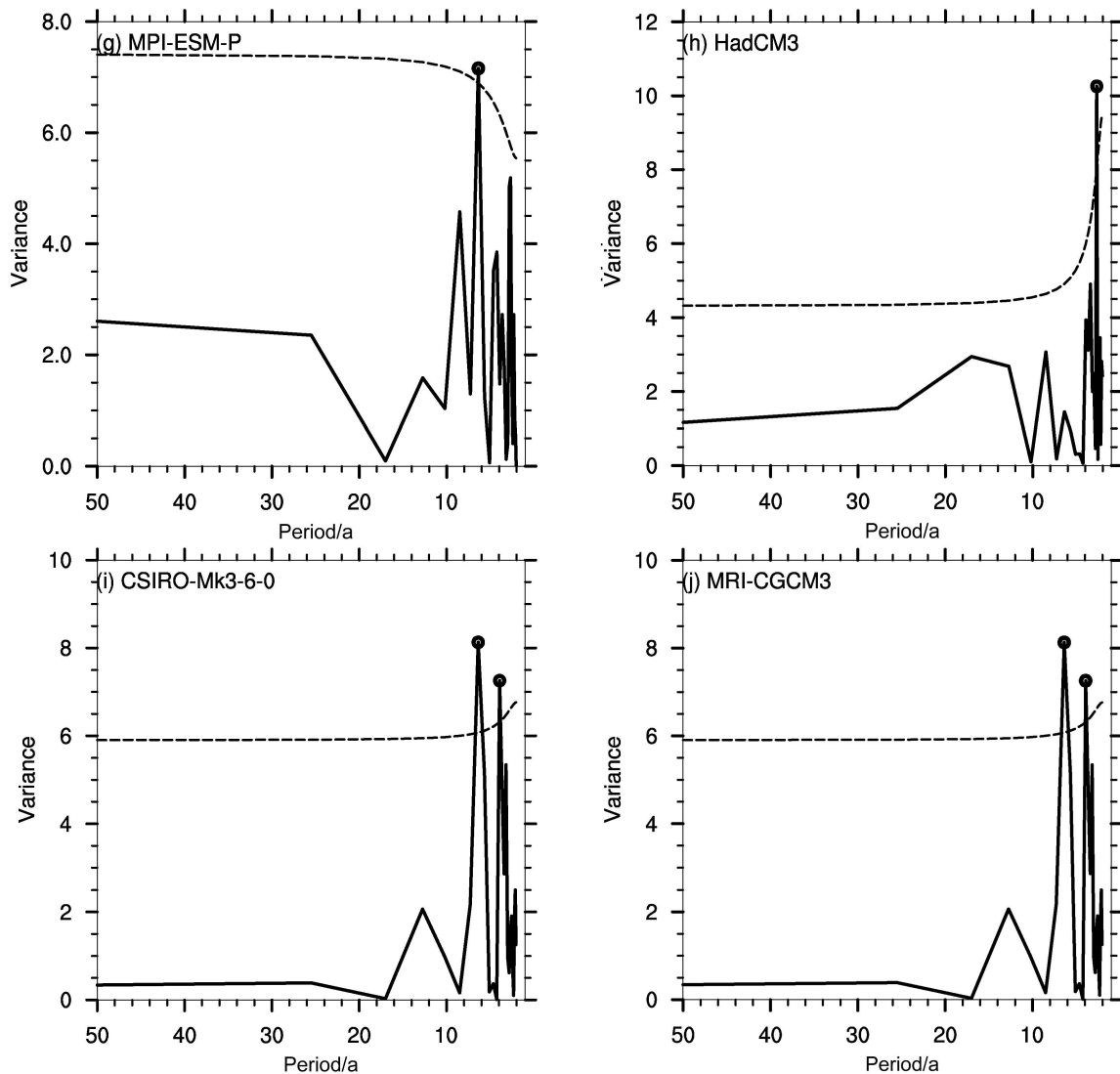


图3 (a–j) NCEP 再分析资料和 9 个模式的模拟结果中 1950–2000 年 AO 指数第一模态时间序列的功率谱 (虚线表示红噪声信度检验 95% 的置信水平, 圆圈表示周期变化通过 95% 的显著性检验)

Fig. 3 (a–j) Power spectra of the AO index for the period 1950–2000 from the NCEP reanalysis and nine model simulations (dash lines indicate the 95% confidence level of the red noise confidence test and circles indicate that the changes in periods are significant at the 95% confidence level)

间模态 (图 6b), 与重建结果一致。这说明太阳辐射的减弱和火山活动的频繁发生 (自然外强迫) 所导致的百年冷期会造成 AO 的负位相。

对于中世纪气候异常期, 重建资料所反映的 AO 位相还存在争议 (Olsen et al., 2012)。模拟资料显示, 尽管有 8 个模式模拟出了中世纪气候异常期的增暖现象 (图 4a–4d、4f–4i), 但是对该时期 AO 位相的模拟并没有一致的结果。bcc、IPSL、HadCM3 和 CSIRO 的模拟结果显示 AO 指数为正 (图 5a、5d、5f、5g), CCSM4、GISS、MPI 和 MRI 则显示 AO 指数为负 (图 5b、5c、5e、5h)。8 个模式集合平均的海平面气压距平场反映的 AO

在中世纪气候异常期并无显著的位相特点 (图 6a)。这意味着模拟结果存在一定的模式依赖性, 可能与模式对太阳辐射偏强、火山活动较弱的自然外强迫的响应不同有关。

模拟结果还显示, 现代暖期的增温幅度高于中世纪气候异常期 (图 4), 且两个典型暖期的 AO 时空变化特征存在明显的差异。7 个模式 (bcc、GISS、IPSL、MPI、HadCM3、CSIRO 和 MRI) 的模拟结果显示在现代暖期, AO 呈现为持续正位相 (图 5a、5c–5h), 同时, 8 个模式集合平均的海平面气压距平场也显示, 现代暖期 AO 表现为显著的正位相模态 (图 6c), 说明人为排放的温室气

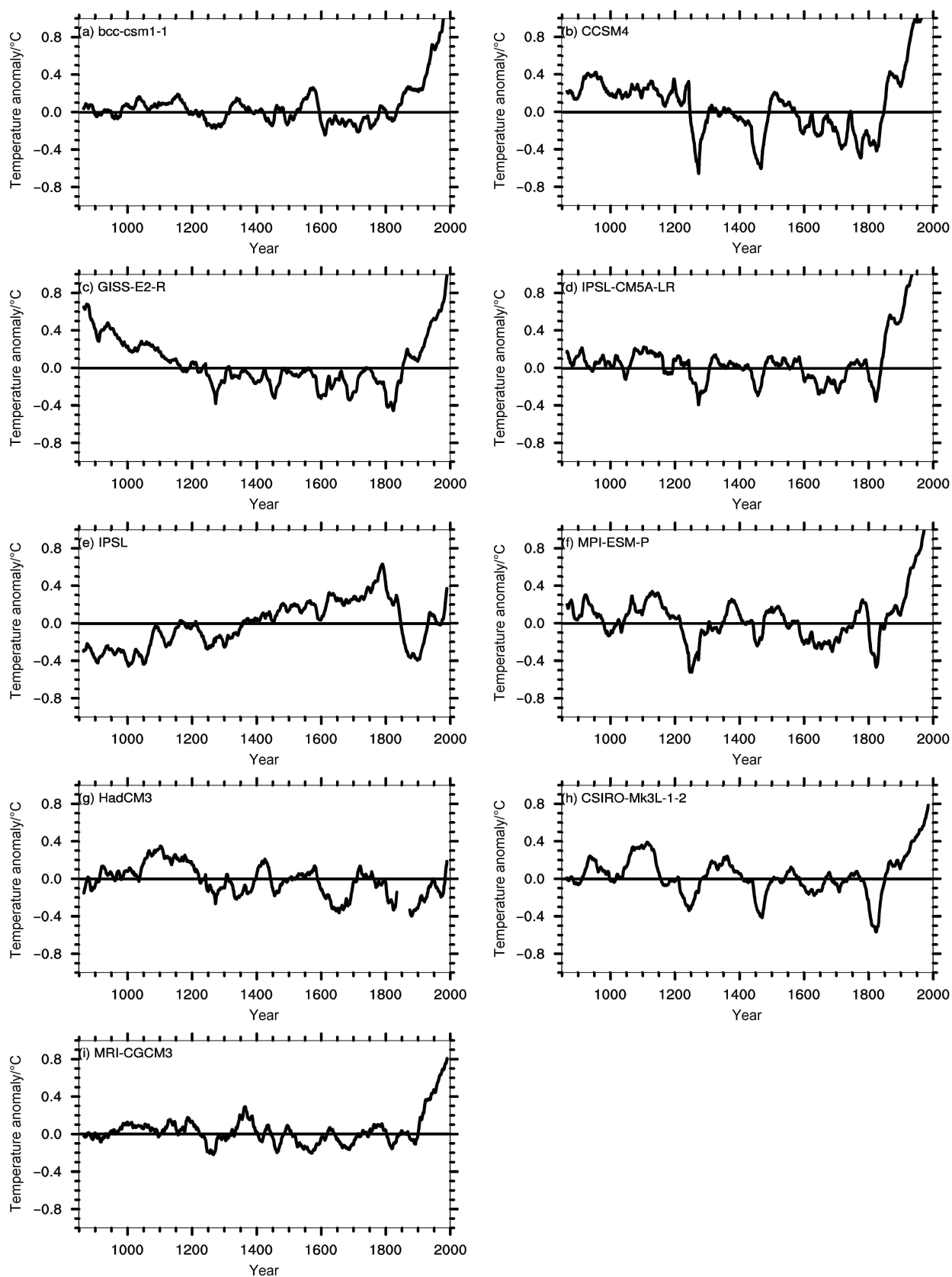


图4 (a-i) 9个模式模拟结果中850~2000年北半球年平均温度距平序列

Fig. 4 (a-i) Time series of annual mean surface temperature anomalies over the Northern Hemisphere during AD 850–2000 from the nine model simulations

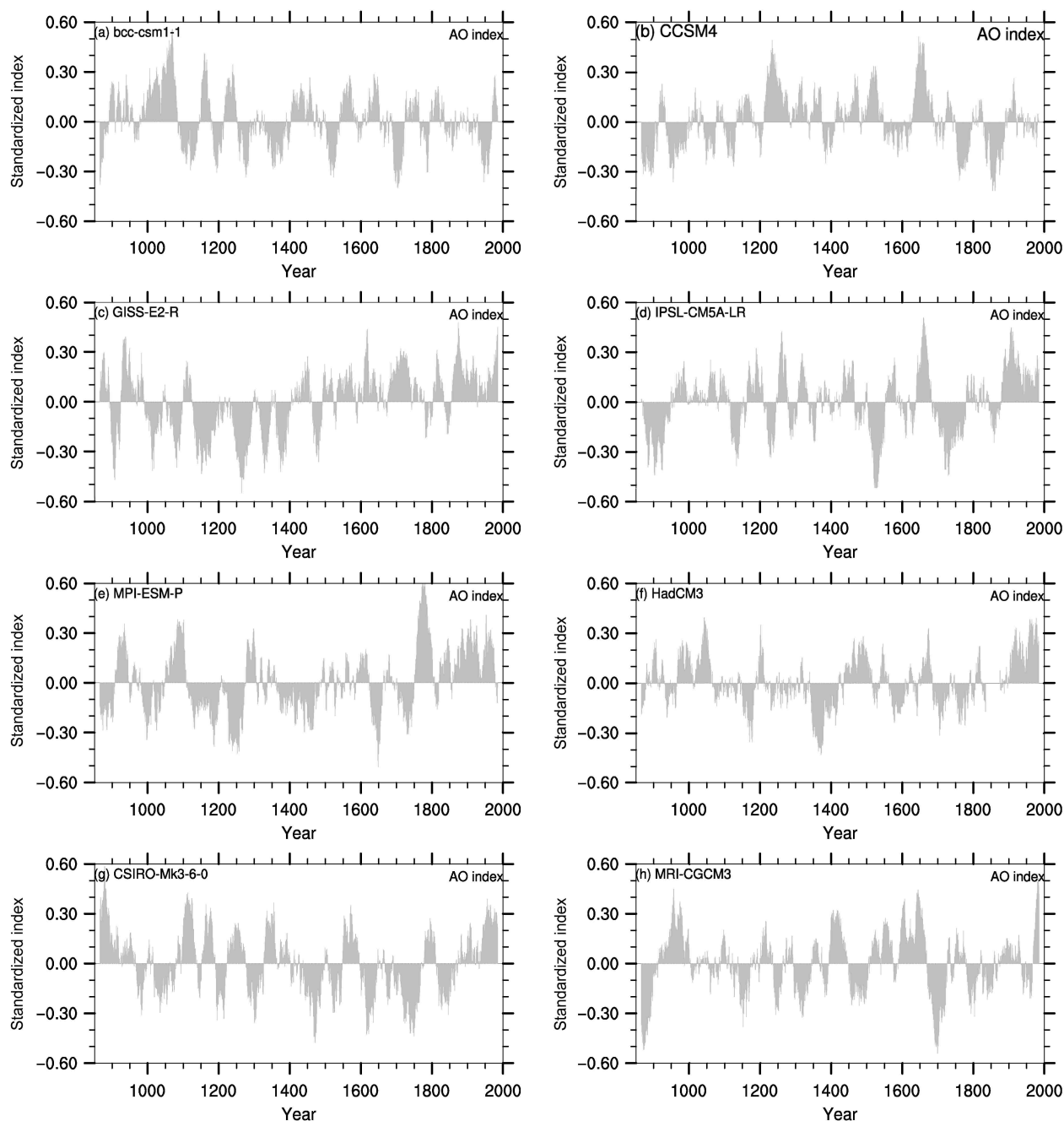


图5 (a–h) 8个模式模拟结果中850~2000年北半球热带外(20°N以北)31年滑动平均的海平面气压距平EOF分解第一模态的时间序列  
Fig. 5 (a–h) The first EOF principal components of the 31-year running averages of SLP anomalies over the extratropical Northern Hemisphere (north of 20°N) from the eight model simulations for the period AD 850–2000

体会加强AO正位相。另外,大部分模式模拟出了观测资料中1950年以来AO的增强趋势,说明该增强趋势可能是由人为温室气体排放造成的。

3个特征时期AO的位相与北极地区(60°N~90°N)和中纬度地区(30°N~60°N)的海平面气压距平(图6)、温度距平(图7)有关。8个模式的模拟结果均显示小冰期北极地区温度距平显著低于中纬度区域,北极温度显著偏冷,中纬度地区

降温幅度较北极偏弱,加大了南北温度梯度(图7b),导致小冰期出现北极高压异常和中纬度地区低压异常(图6b),使得北半球出现AO负位相。在中世纪气候异常期,北极地区虽然温度偏暖,但并不显著(图7a),不利于北极低压异常和中纬度高压异常的形成(图6a),因此该时期AO并无明显变化。在现代暖期,8个模式均显示北极低压和中纬度高压的模式,即显著的AO正位相(

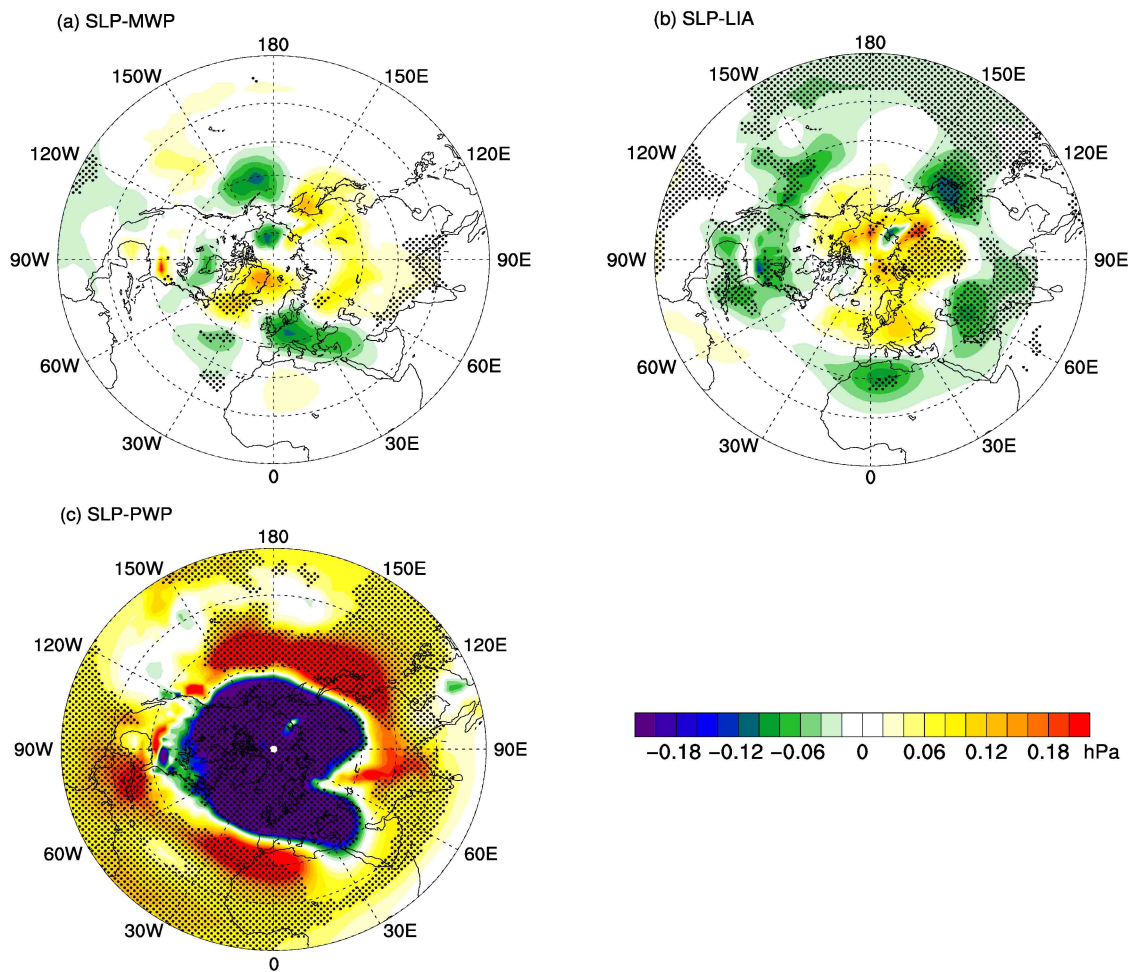


图6 8个模式集合平均的(a)中世纪气候异常期900~1200年、(b)小冰期1500~1800年和(c)现代暖期1850~2000年北半球31年滑动平均的海平面气压距平场(相对于850~1850年的海平面气压平均值)。打点区域表示海平面气压距平通过95%的显著性检验

Fig. 6 The ensemble means of the SLP anomalies over the Northern Hemisphere from the eight model simulations during the (a) Medieval Climate Anomaly (MIA) AD 900–1200, (b) Little Ice Age (LIA) AD 1500–1800, and (c) Present Warm Period (PWP) AD 1850–2000. The stippling indicates that the SLP anomalies are significant at 95% confidence level

图6c)。现代暖期北极地区的显著增温(图7c), 是AO正位相形成的重要原因。

然而, 模式模拟的现代暖期增暖幅度偏大、北极放大效应更强, 导致AO正位相更强, 这可能与现有模式对温室气体的响应较为敏感有关。这是在以后的研究中需要考虑的问题。

## 4 结论

本文评估了参与PMIP3过去千年气候模拟试验和CMIP5全强迫历史情景试验的9个地球系统模式对AO空间模态和时间变化的模拟能力, 并基于其中的8个模式进一步探究了过去千年3个特征时期AO的年代—百年际时空变化特征及相应的成

因机制。

与再分析资料相比, 9个模式中有8个(除MIROC外)能较好地模拟出AO的空间模态及年际变化周期, 且这8个模式都模拟出了观测资料中过去50年AO的增强趋势。总体而言, 大部分模式对AO时空变化特征的模拟较为合理, MPI模式对于AO时空变率的模拟效果与再分析资料最为接近。

在过去千年的3个特征时段中, 8个模式对中世纪气候异常期AO位相的模拟并不一致, 大部分模式都模拟出了小冰期持续的AO负位相和现代暖期持续的AO正位相, 8个模式均模拟出了近50年AO的增强趋势, 这与重建及观测结果一致。基于多模式集合平均的机制分析表明, 北极地区的海

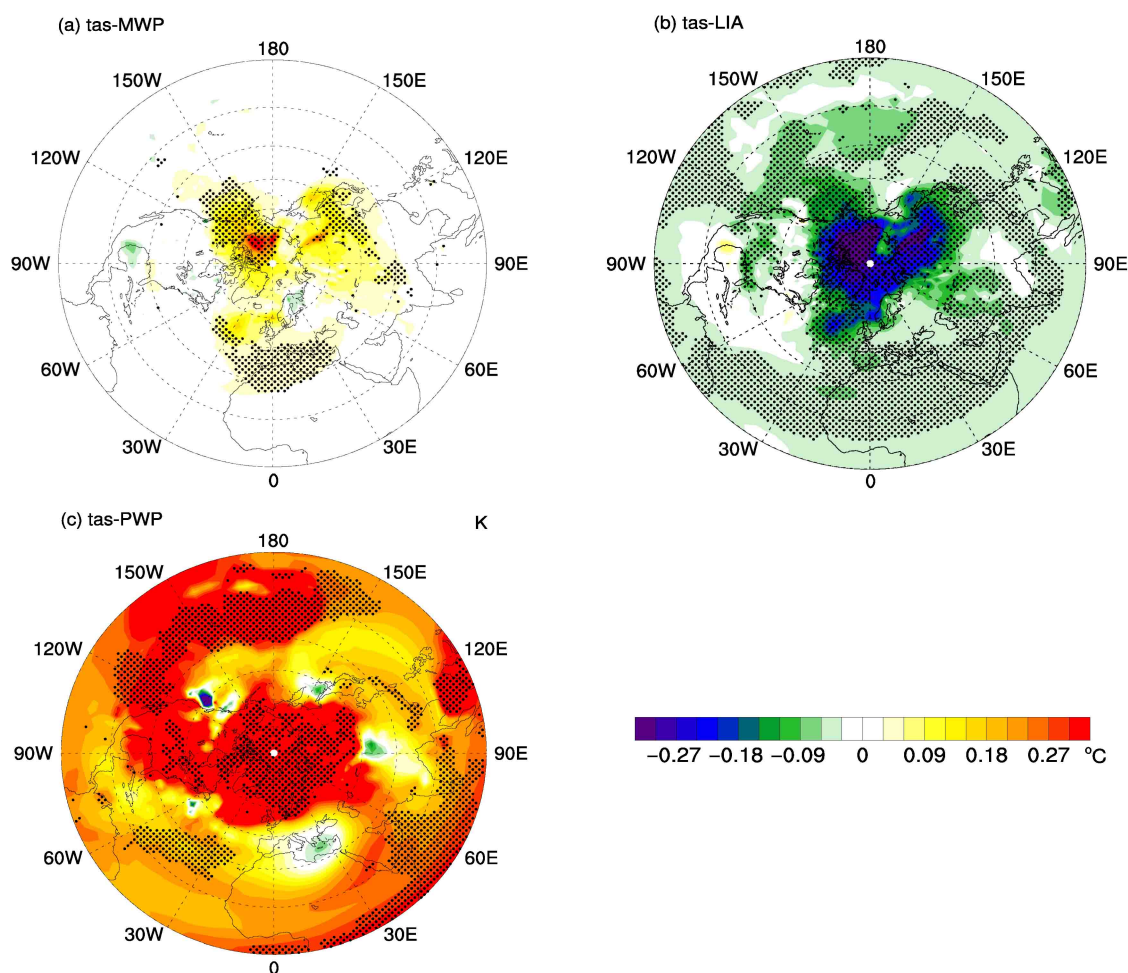


图7 同图6, 但为表面温度距平场

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the surface temperature anomalies

平面气压在小冰期显著偏正,而在现代暖期显著偏负,中世纪气候异常期北极地区海平面气压并无明显变化。这与极地温度在3个时期的变化特征有关,小冰期极地温度偏低导致气压偏高,形成AO的正位相,而现代暖期的机制则相反。中世纪气候异常期北极地区增温较弱,不利于AO正位相的形成。此外,中世纪气候异常期和小冰期AO位相的差异表明AO的年代—百年际时空变化特征对太阳辐射低值及频繁的火山活动更加敏感。现代暖期和中世纪气候异常期AO位相的差异则表明在年代—百年尺度上,温室气体对AO的作用更强。

### 参考文献 (References)

- D' Arrigo R D, Cook E R, Mann M E, et al. 2003. Tree-ring reconstructions of temperature and sea level pressure variability associated with the warm-season Arctic Oscillation since AD 1650 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30: 1549. doi:10.1029/2003GL017250
- Diaz H F, Trigo R, Hughes M K, et al. 2011. Spatial and temporal characteristics of climate in medieval times revisited [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92(11): 1487–1500. doi:10.1175/BAMS-D-10-05003.1
- Feldstein S B. 2002. The recent trend and variance increase of the annular mode [J]. *J. Climate*, 15(1): 88–94. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0088:TRTAVI>2.0.CO;2
- 葛全胜, 郑景云. 2012. “过去2000年全球典型暖期的形成机制及其影响研究”进展 [J]. *地理研究*, 31(4): 769. Ge Quansheng, Zheng Jingyun. 2012. Research on the mechanism and impact of the typical global warm period in the past 2000 [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 31(4): 769. doi:10.11821/yj2012040018
- 葛全胜, 刘健, 方修琦, 等. 2013. 过去2000年冷暖变化的基本特征与主要暖期 [J]. *地理学报*, 68(5): 579–592. Ge Quansheng, Liu Jian, Fang Xiuqi, et al. 2013. General characteristics of temperature change and centennial warm periods during the past 2000 years [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 68(5): 579–592. doi:10.11821/xb201305001
- Gillett N P, Allen M R, Williams K D. 2003. Modelling the atmospheric response to doubled CO<sub>2</sub> and depleted stratospheric ozone using a stratosphere-resolving coupled GCM [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,

- 129(589): 947–966. doi:10.1256/qj.02.102
- Gómez-Navarro J J, Zorita E. 2013. Atmospheric annular modes in simulations over the past millennium: No long-term response to external forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12): 3232–3236. doi:10.1002/grl.50628
- Gong D Y, Ho C H. 2003. Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D2): 4066. doi:10.1029/2002JD002193
- 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:10.11821/xb200304010
- 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 Jinjiang, Wang Shaowu. 2002. Significant correlation between summer rainfall in Yangtze River Basin and early Arctic Oscillation [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 47(7): 546–549. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2002.07.013
- Gong D Y, Yang J, Kim S J, et al. 2011. Spring Arctic Oscillation–East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 37(11): 2199–2216. doi:10.1007/s00382-011-1041-1
- Huang J B, Wang S W, Gong D Y, et al. 2010. Atmospheric oscillations over the last millennium [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55(22): 2469–2472. doi:10.1007/s11434-010-3210-8
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability [M]//Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1032.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1–92.
- Lamb H H. 1965. The early medieval warm epoch and its sequel [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1: 13–37. doi:10.1016/0031-0182(65)90004-0
- Lamb H H. 1977. Climate: Present, Past and Future (Vol. 2: Climatic History and the Future) [M]. London: Methuen, 835pp.
- Liu L, Zhou T, Ning L, et al. 2019. Linkage between the Arctic Oscillation and summer climate extreme events over the middle reaches of Yangtze River Valley [J]. *Climate Research*, 78(3): 237–247. doi:10.3354/cr01542
- Ljungqvist F C, Krusic P J, Brattström G, et al. 2012. Northern Hemisphere temperature patterns in the last 12 centuries [J]. *Climate of the Past*, 8(1): 227–249. doi:10.5194/cp-8-227-2012
- Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. 2009. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly [J]. *Science*, 326(5957): 1256–1260. doi:10.1126/science.1177303
- Miller R L, Schmidt G A, Shindell D T. 2006. Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D18): D18101. doi:10.1029/2005JD006323
- Olsen J, Anderson J N, Knudsen M F. 2012. Variability of the North Atlantic Oscillation over the past 5, 200 years [J]. *Nature Geoscience*, 5(11): 808–812. doi:10.1038/ngeo1589
- Ortega P, Lehner F, Swingedouw D, et al. 2015. A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium [J]. *Nature*, 523(7558): 71–74. doi:10.1038/nature14518
- Osborn T J, Briffa K R, Tett S F B, et al. 1999. Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled climate model [J]. *Climate Dyn.*, 15(9): 685–702. doi:10.1007/s003820050310
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13(5): 1000–1016. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2
- Thompson D W J, Wallace J M. 2001. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode [J]. *Science*, 293(5527): 85–89. doi:10.1126/science.1058958
- Trouet V, Esper J, Graham N E, et al. 2009. Persistent positive North Atlantic oscillation mode dominated the medieval climate anomaly [J]. *Science*, 324(5923): 78–80. doi:10.1126/science.1166349
- Wallace J M. 2000. North Atlantic Oscillation/Annular Mode: Two paradigms-one phenomenon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126(564): 791–805. doi:10.1002/qj.49712656402
- Wu B Y, Wang J. 2002. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19(2): 297–320. doi:10.1007/s00376-002-0024-x
- Yukimoto S, Kodera K. 2005. Interdecadal Arctic Oscillation in twentieth century climate simulations viewed as internal variability and response to external forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(3): L03707. doi:10.1029/2004GL021870
- 朱献, 董文杰, 郭彦. 2013. CMIP3 及 CMIP5 模式对冬季和春季北极涛动变率模拟的比较 [J]. *气候变化研究进展*, 9(3): 165–172.
- Zhu Xian, Dong Wenjie, Guo Yan. 2013. Comparison of simulated winter and spring Arctic Oscillation variability by CMIP5 and CMIP3 coupled models [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese)*, 9(3): 165–172. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.002