

赵天保, 从靖. 2018. 基于 CCSM4.0 长期积分试验评估不同辐射强迫对中国干旱半干旱区降水的影响 [J]. 大气科学, 42 (2): 311–322. Zhao Tianbao, Cong Jing. 2018. Effects of radiative forcings on precipitation over arid and semi-arid region in China based on CCSM4.0 simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 311–322, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16167.

基于 CCSM4.0 长期积分试验评估不同辐射强迫对中国干旱半干旱区降水的影响

赵天保¹ 从靖^{2,3}

1 中国科学院大气物理研究所中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

2 天津市气象台, 天津 300074

3 兰州大学大气科学院, 兰州 730000

摘 要 本文基于气候系统模式 CESM4.0 长期积分试验, 分析评估了工业革命前 (1850 年) 及当前 (2000 年) 两种辐射强迫作用 (分别为太阳活动和温室气体) 对中国北方干旱半干旱区降水的影响。结果表明, 模拟结果与观测之间尽管存在一定的偏差, 但仍能再现降水气候态的空间分布以及季节变化特征; 两种辐射强迫下的降水长期变化均无明显趋势, 但二者的差异却呈现出 70~100 年的准周期振荡; 由人类活动引起的当前辐射强迫作用对降水的多年际变率幅度有一定影响, 造成极端强降水事件出现的概率增多, 而由太阳活动引起的辐射强迫作用主要对降水多年代际周期具有一定的调制作用。进一步分析表明, 两种辐射强迫下中国北方干旱半干旱区降水年多年代际变率的主要模态基本一致, 但人类活动引起的辐射强迫作用会影响降水多年代际变率与热带海温异常的相互作用的强度, 从而改变降水多年代际变率的幅度。

关键词 辐射强迫作用 CCSM4.0 模式 降水 干旱半干旱区

文章编号 1006-9895(2018)02-0311-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16167

Effects of Radiative Forcing on Precipitation over Arid and Semi-arid Region in China Based on CCSM4.0 Simulation

ZHAO Tianbao¹ and CONG Jing^{2,3}

1 *Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Tianjin Municipal Meteorological Observatory, Tianjin 300074*

3 *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

Abstract Based on long-term simulations of the Community Climate System Model version 4.0 (CCSM4.0) forced by preindustrial (1850) and present (2000) radiative factors (e.g., greenhouse gases and aerosols, solar, and volcanic aerosols), effects of radiative forcing on precipitation over the arid and semi-arid region in China are investigated. The result shows that the model simulations can well capture the spatial pattern and seasonal variation of long-term mean precipitation despite certain biases in the simulations. There exists little difference in long-term precipitation trend

收稿日期 2016-04-29; **网络预出版日期** 2017-06-30

作者简介 赵天保, 男, 1976 年出生, 研究员, 从事气候变化检测归因研究。E-mail: zhaotb@tea.ac.cn

资助项目 国家重点研发项目 2016YFA0600402, 国家自然科学基金项目 41675094、91425304、91525101

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600402), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675094, 91425304, 91525101)

between the simulations forced by the preindustrial and present radiations; however, regional mean difference in precipitation between the two simulations shows a 70–100-year quasi-periodic change. The simulation with present radiative forcing displays large amplitude in multi-decadal precipitation variation and obvious increases in the frequency of heavy and extreme precipitation. In contrast, the simulation with preindustrial radiative forcing shows a roughly 100-year quasi-periodic variation that is likely related to the solar magnetic activity cycle. Further analysis shows that the leading modes of multi-decadal precipitation variability forced by the preindustrial radiation are nearly consistent with those forced by the present radiation, while the present radiative forcing related to human activities can affect the interaction between the multi-decadal precipitation variability and tropical sea surface temperature (SST) anomaly, which in turn modulates the amplitude of the multi-decadal precipitation variability over the arid and semi-arid region in China.

Keywords Effects of radiative forcing, CCSM 4.0 model, Precipitation, Arid and semi-arid region

1 引言

全球陆地约有 30% 的地区为干旱半干旱区, 自 20 世纪 70 年代开始, 全球干旱化问题日益显著, 干旱半干旱区面积扩大了近两倍 (Dai et al., 2004; Huang et al., 2016)。如果全球温室气体排放量持续增加, 全球干旱半干旱区面积将会加速扩张, 到 21 世纪末将占全球陆地表面的 50% 以上 (Dai 2011a, 2011b, 2013; Feng and Fu, 2013; Zhao and Dai, 2015, 2016; Huang et al., 2016)。其中, 全球干旱半干旱区扩张面积的四分之三将发生在发展中国家, 干旱半干旱区扩张将使发展中国家面临土地进一步退化的风险, 并加剧这些地区的贫穷程度 (Huang et al., 2016)。观测事实表明, 干旱半干旱区也是近 100 年来温度增加最显著的地区, 尤其在冬季北半球中纬度干旱半干旱区增温达 1.72°C, 是全球陆地平均增温的 2 倍, 对全球陆地变暖的贡献达到 44% (Huang et al., 2012; Ji et al., 2014)。因此, 深入认识干旱半干旱区气候变化的成因和规律对全球气候变化检测归因研究具有重要意义。

作为气候和生态系统过渡带, 干旱半干旱区气候干燥、水资源缺乏、土地覆盖率低, 生态环境极其脆弱, 对全球气候变化以及人类活动的响应十分敏感 (符淙斌和温刚, 2002; 马柱国, 2005; Narisma et al., 2007)。研究表明, 北美地区在 20 世纪 20 年代出现突变性持续干旱, 以及西非 Sahel 地区 1960 年代干旱化剧变, 且持续几十年难以恢复, 都很有可能是人类活动的影响 (Nicholson et al., 1998)。我国干旱半干旱区面积约占国土总面积的近一半, 是北半球中纬度干旱半干旱带中面积最广最大的 (Sun and Ye, 1996)。近几十年来, 不合理的人类活动引起这一地区自然植被减少, 减弱了夏季风的强度, 使得向内陆的水汽输送也在减少, 从而导致

沙尘天气频发, 使干旱面积有逐渐向东南方向扩展的趋势 (马柱国和符淙斌, 2005; 符淙斌和马柱国, 2008)。然而, 由于长期连续同步观测资料的匮乏, 目前对干旱半干旱区气候变化形成机理的认识还非常有限, 还难以从观测事实中区分自然变化与人类活动的相对贡献。

近年来, 地球气候系统模式的不断完善和发展为深入研究气候变化的规律和成因提供了重要工具, 使我们能够定量研究和估算自然变化和人类活动引起辐射强迫对全球和区域气候变化的影响。研究发现, 有效太阳辐射 (太阳辐射+火山活动) 是影响全球地表气温和季风降水百年尺度变化的最主要的外强迫因素 (Liu et al., 2009, 2011), 但与区域尺度上气候变化的相关性很低 (Breitenmoser et al., 2012)。王志远等 (2016) 利用地球系统模式 CESM1.0 模拟研究了太阳辐射和温室气体引起的敏感性差异, 发现自然和人为因子所引起的降水变化基本一致, 但人为因子引起的气候变暖效应要明显强于自然因子。此外, 基于 CMIP5 多模式 (Taylor et al., 2012) 研究表明, 人类活动 (温室气体、气溶胶和大尺度土地利用) 可解释近 60 年来中我国干旱半干旱区增暖的 90% 以上, 其中温室气体的增温效应约是实际观测结果的两倍; 但对于降水来说, 不同模拟结果之间具有较大的差异, 人类活动的影响相对较弱且不易被检测 (李春香等, 2014; Zhao et al., 2016; Li et al., 2017)。但是在百年尺度上, 自然和人为因素引起的辐射强迫对我干旱半干旱区降水变化的影响目前尚缺乏定量研究与评估。

鉴于此, 本文将进一步利用最新版本的通用气候系统模式 CCSM4.0, 通过“固定”的工业化前 (B1850) 与现时 (B2000) 两组辐射强迫的敏感性试验, 模拟工业革命以来全球气候变化特征, 重点研究自然及人为因素引起辐射强迫在千年尺度上

对我国北方干旱半干旱区降水变化的影响及区域差异, 揭示人类活动在降水多年代际变率及其长期趋势中的相对贡献, 从而为区域气候变化的检测归因、以及预测和预估研究提供一定的科学参考。

2 试验设计及验证

2.1 模式与试验设计

通用气候系统模式 CCSM (Community Climate System Model) 是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 研发的新一代耦合气候系统模式之一, 在气候与环境的演变机理、自然和人类与气候变化的相互作用以及气候变化的研究和预测等诸多方面应用广泛, 目前已成为 IPCC 系列评估报告所使用的主要的气候模式之一, 在古气候模拟研究方面也有很广泛的应用 (如: 田芝平等, 2012; 田芝平和姜大膀, 2013)。CESM 模式是由大气、海洋、陆面、海冰四大模块组成, 并考虑大气化学、生物地球化学和人文过程之间的耦合和相互作用 (Blackmon et al., 2001)。最新版本的 CCSM 4.0 于 2010 年 6 月发布, 模式整体性能较以前版本有了较大改进 (Gent et al., 2011)。除了支持更高的时空分辨率外, 模式中各模块的参数化方案、物理过程和计算能力方面均较以前版本有明显改进 (详见 <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/> [2017-06-30])。

本文所用的 CCSM4.0 长期积分试验结果是美国国家海洋大气管理局 (NOAA) 地球系统研究室 (Earth System Research Laboratory) 在全球尺度上开展的两组“平衡态”长期模拟试验 (Quan et al., 2014), 即在积分过程中, 太阳辐照度、温室气体浓度等外强迫场固定为工业革命前水平 (1850 年) 和当前水平 (2000 年) 而进行的耦合积分 (下文分别统称为 B1850 和 B2000)。数值试验使用的太阳辐照度和温室气体等参数由 IPCC AR5 所提供 (表 1), 而气溶胶和臭氧的浓度值也是分别取 CMIP5 试验在 1850 年和 2000 年的平均值 (参见 <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/forcing.html> [2017-06-30])。模式水平分辨率为 $1.25^\circ \times 0.9^\circ$, 垂直方向为 26 层 σ - p

混合坐标, 积分时间长度为 2133 年。模拟试验中所用的海温 (SSTs) 和海冰 (sea ice) 等资料都是模式本身的预报结果, 而非实际观测资料。具体试验设计可参考 Quan et al. (2014) 研究工作, 但本文所用试验结果的积分时间更长。为了消除气候飘移的影响, 本文取最后 1000 年的积分结果进行分析。

2.2 模拟结果验证

为了检验模式的模拟性能, 我们采用的基准数据是全球降水气候中心 (GPCC) 最新版本 (V7.0)、空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐月降水再分析资料 (Schneider et al., 2014)。为了便于比较, 本文将模拟结果采用双线性插值的方法插值到与基准观测数据相同的空间格点上。由于两组模拟试验主要是为了检验自然变化背景下与人类活动影响辐射强迫对全球气候变化的影响, 模拟结果的验证只取最后 30 年结果与 1971~2000 年 GPCC 平均降水进行对比。而且只能对比气候态的空间分布和季节变化特征, 二者的年际变化特征及其长期趋势则没有可比性。对比分析的结果表明, CCSM 4.0 两组模拟结果基本能够再现近 30 年 (1971~2000 年) 全球陆地观测降水的空间分布特征和季节变化特征, 但降水的强度仍然存在一定偏差, 特别是在一些热带区域比较明显 (图略)。这也是大多数 CMIP5 耦合模式对降水模拟所反映出来的共有局限性 (赵天保等, 2014)。从我国干旱半干旱区 (1961~1990 年 GPCC 年总降水小于 500 mm 的区域) 来看, CCSM4.0 基本能够模拟出北方干旱半干旱区观测降水的空间分布特征 (两组模式试验结果与观测空间模态的相关系数分别达 0.68 和 0.67), 但除新疆中部和东北地区外, 模拟降水在其他区域均比观测结果偏高, 而两组模拟结果之间并无明显差别 (图 1b, c)。模式也能够模拟出观测降水的季节变化特征, 但降水幅度明显要强于观测结果, 特别是在暖季 (4~9 月) 的差异可达 1 mm d^{-1} , 而且当前辐射强迫结果 (B2000) 要比工业革命前辐射强迫结果 (B1850) 偏强约 0.1 mm d^{-1} (图 1d)。如前所述, 模拟与观测的降水强度并不具有可比性, 因为模拟

表 1 CCSM4.0 模拟所用的工业革命前 (B1850) 与现时 (B2000) 辐射强迫清单

Table 1 Preindustrial (B1850) and Present-day (B2000) radiative forcing factors used in CCSM4.0 simulations

	温室气体浓度/ $\mu\text{L L}^{-1}$					太阳常数/ W m^{-2}
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CFC11	CFC12	
工业革命前 (B1850)	284.7	275.68×10^{-3}	791.6×10^{-3}	12.48×10^{-6}	0	1360.89
现时 (B2000)	368.9	316.0×10^{-3}	1760×10^{-3}	653.45×10^{-6}	535.0×10^{-6}	1361.27

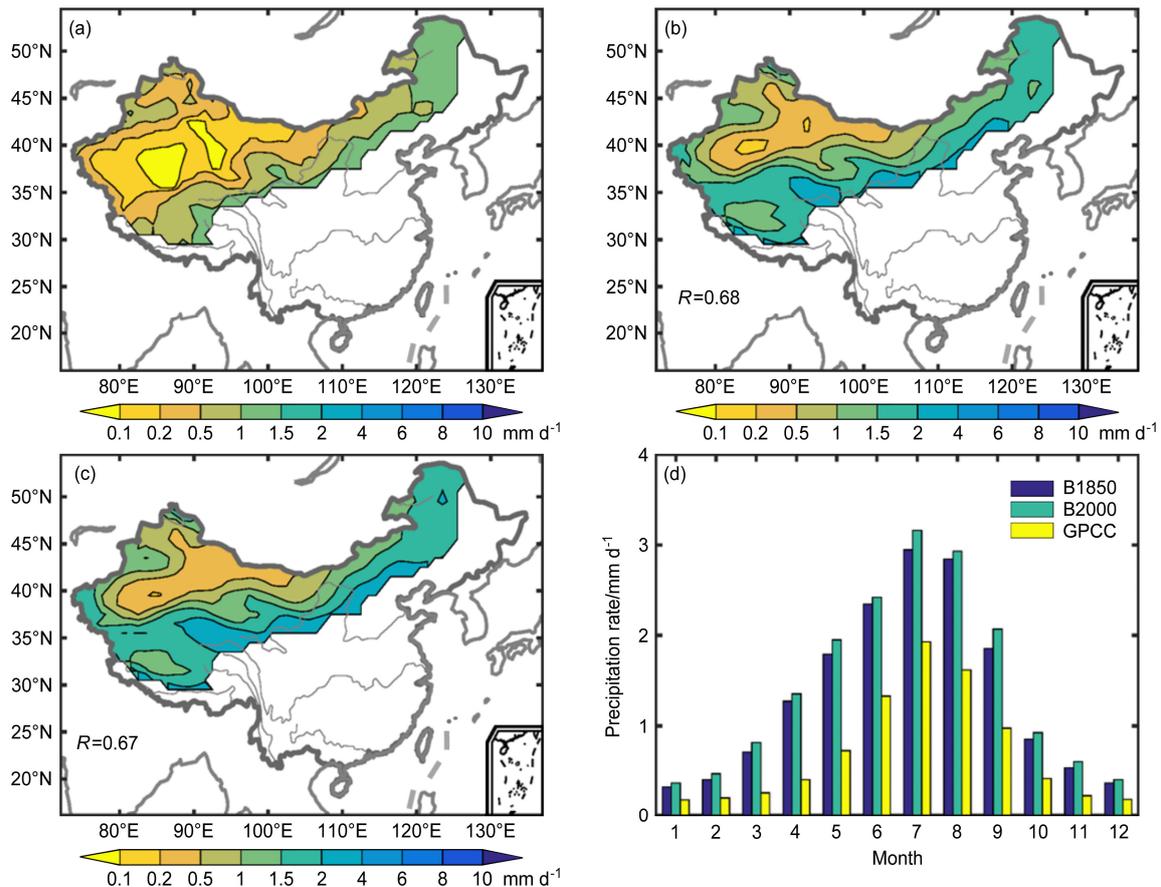


图1 多年平均降水空间分布图及其季节变化(单位: mm d^{-1}): (a) 1970~2005年GPCC观测降水量; (b) B1850模拟降水量; (c) B2000模拟降水量; (d) 区域平均降水季节变化。 R 表示图(a)与(b)以及图(a)与(c)空间模态相关系数

Fig. 1 Spatial patterns and seasonal variability of observed and simulated multi-year average precipitation (units: mm d^{-1}): (a) GPCC precipitation during 1970–2005; (b) simulated precipitation for B1850; (c) simulated precipitation for B2000; (d) seasonal variation of simulated and observed precipitation averaged over whole China. The spatial correlation coefficient between (a) and (b) and that between (a) and (c) are denoted by R in the panels

结果只反映的降水变化对某一时间节点外强迫的响应,而非对历史气候变化的真实模拟(包含了气候系统内部自然变率和外强迫响应)。

3 结果分析

3.1 时空分布特征与差异

在不同辐射强迫下长期积分结果的平均中,由气候系统内部自然变率引起的降水变化可认为被相互抵消了(Quan et al., 2014),因此可以认为两组辐射强迫的差异(B2000–B1850)主要表征了人类活动引起的辐射强迫(主要是温室气体增加)对降水产生的影响。从多年平均降水率差值图来看(图2a),北方干旱半干旱区降水对人类活动的响应较为明显,主要由温室气体增加导致辐射强迫的改变使得该区降水普遍增多,尤其新疆南部及青海

地区对温室气体增加的响应极为敏感,在高原东北侧出现的最大正中心可达 0.2 mm d^{-1} 以上。分析季节差异,四个季节降水对温室效应的响应大体一致但又略有差异。北方干旱半干旱区降水主要集中在夏季,模式也能很好地模拟出这一特征(图1d),故夏季降水对人类活动响应的敏感性决定了年降水的敏感性响应分布,也能够反应出新疆南部及青海一带的极强正响应中心(最大中心值达 0.3 mm d^{-1} 以上);但值得注意的是,河套以西甘肃中部、新疆北部边境区、区域西南青藏高原区差值图表现为负响应区,说明温室气体增加使得这些区域夏季降水减少,因此年降水率在这三个区表现的正响应主要是由春、秋、冬三个季节所贡献的(图2b)。而从冬季的分布来看,温室效应使得整个区域降水增多,并也能基本反映出新疆南部及青海地区对温室气

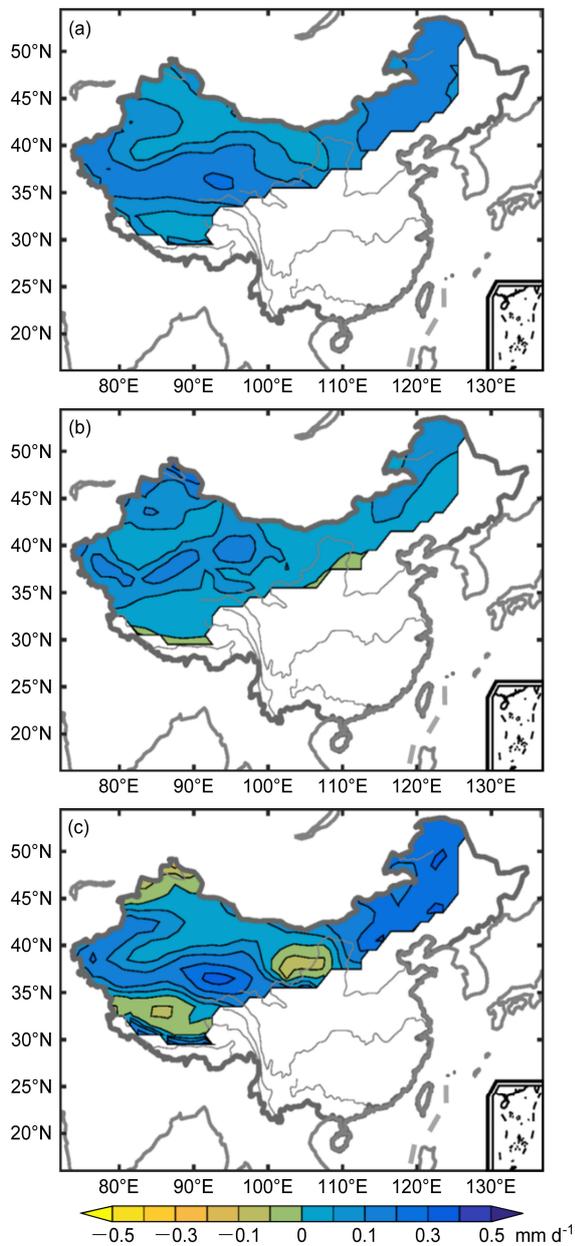


图2 现时辐射强迫降水(B2000)与工业革命前辐射强迫结果(B1850)的差异(单位: mm d^{-1}): (a) 年平均; (b) 冬季(DJF); (c) 夏季(JJA)
 Fig. 2 Differences in long-term mean precipitation (units: mm d^{-1}) between simulations with present-day (B2000) and preindustrial (B1850) radiative forcing: (a) Annual mean; (b) winter (DJF); (c) summer (JJA)

体增加的正响应中心(图 2a)。就区域平均而言,过去百年在温室效应的作用下,北方干旱半干旱区的降水在不同季节均有增加(图 1d)。

除了分析多年平均降水(气候态)对工业革命前及当前辐射强迫响应的空间分布特征(即 B2000 与 B1850 的差异),我们还需要进一步探讨在两种辐射强迫条件下我国干旱半干旱区降水的长期趋

势及随时间的演变特征。从长期变化趋势来看,两种辐射强迫引起的降水长期变化趋势在整个干旱半干旱区域几乎都不显著,但是二者所估算的年平均降水的长期趋势在整个干旱半干旱区的空间分布基本相反, B2000 长期变化以增加为主, B1850 则以负变化为主(图 3a、b)。二者在各季节降水的长期变化趋势也呈现出 inconsistent 的空间分布特征,尤其在夏季的差别比较明显。从冬季来看,两种辐射强迫下降水长期变化趋势并不显著也未出现明显差异,除了研究区域西南地区外,其他区域基本都是增多的趋势(图 3c、d);到了夏季, B2000 在高原东北侧的地区呈现出明显正趋势中心,而 B1850 则在该区域表现为减少趋势(图 3e、f)。除了复杂的地形影响外,可以看到,高原东北地区夏季降水对人类活动引起辐射强迫的响应更为敏感。

就区域平均而言,两种辐射强迫下降水具有明显的系统性偏差,即 B2000 要比 B1850 的降水偏多 $0.07\sim 0.12 \text{ mm d}^{-1}$, 二者的偏差呈现出微弱增加的趋势,且具有大约 100 年左右的周期变化(图 4a),这可能与太阳活动的格莱斯堡周期(70~100 年)变化有关。两种辐射强迫条件下的降水长期变化基本没有明显线性趋势,但多年代际周期变化大体一致(相关系数 $R=0.33$, 通过了 0.05 的显著性检验),只是 B2000 的结果在最后 200 年的明显增加、多年代际变率变大(图 4b)。表明二者尽管存在一定的系统性偏差,但这种偏差并不是线性稳定的。

3.2 频谱特征与差异

除了分析降水响应的时空分布特征外,本文还对比分析了两种不同辐射强迫下降水的频谱分布特征以及其差异。图 5 给出了两种辐射强迫下整个中国北方干旱半干旱区降水的概率密度分布函数(PDF)。从图中可以明显的看出,当降水率小于 18 mm d^{-1} 时,两条概率密度曲线基本重合,但随着降水量的增加, B2000 结果出现强降水的频率明显要强于 B1850 的结果,表明当前人类活动的贡献会使极端强降水事件出现的概率增多。这一结果进一步证实了由人类活动引起温室气体浓度的增加会导致极端强降水的概率增多(IPCC, 2007, 2013)。

图 6 进一步给出了整个中国干旱半干旱区年平均降水距平的 Morlet 小波分析结果。可以看到,两种辐射强迫下降水序列 20 年以下周期的小波功率谱分布较为相似,小波谱曲线极大值位置较为一致,均能分析出 5 年、10 年、14 年左右的主要周

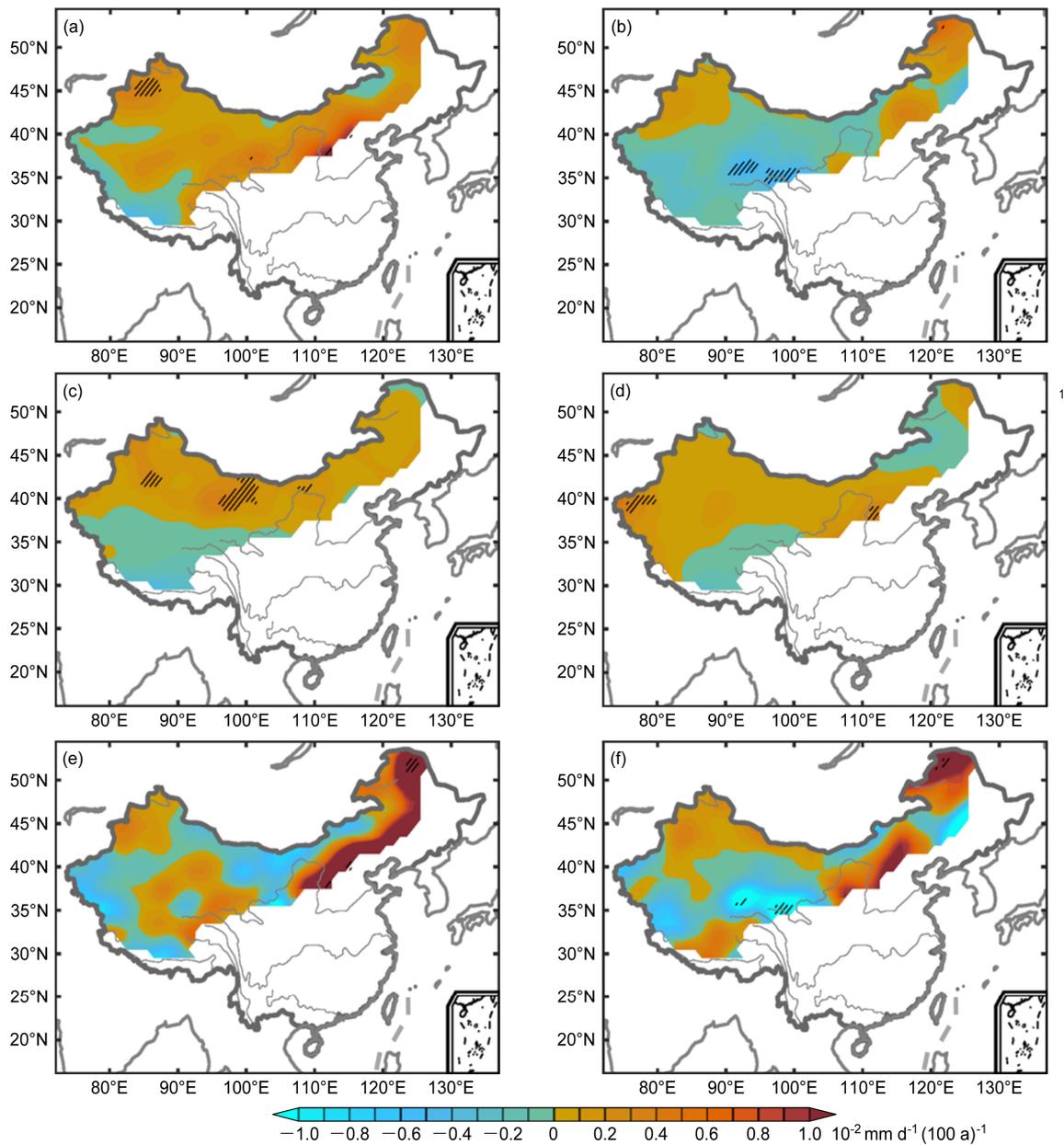


图3 现时辐射强迫(B2000, 左列)与工业革命前辐射强迫(B1850, 右列)降水的长期趋势 [单位: $10^{-2} \text{ mm d}^{-1} (100\text{a})^{-1}$]: (a, b) 年平均; (c, d) 冬季; (e, f) 夏季。图中所示阴影区域通过 0.05 显著性检验

Fig. 3 Spatial patterns of long linear trends of precipitation change [units: $10^{-2} \text{ mm d}^{-1} (100\text{a})^{-1}$] simulated by CCSM 4.0 model under present-day (B2000, left column) and pre-industrial (B1850, right column) radiative forcing: (a, b) Winter; (c, d) summer; (e, f) annual mean. The stippling indicates statistical significance at 0.05 level

期; 而 20 年以上周期的分布出现了较为明显的差异, B1850 降水序列具有 30 年左右的周期变化而 B2000 降水序列并未出现这个尺度的周期变化。这说明我国干旱半干旱区降水的多年代际震荡(30 年)主要受太阳活动等自然因素的调制, 而受人类活动引起温室气体强迫的影响则不明显。

总的来看, 人类活动引起温室气体浓度的增加

会使我国干旱半干旱区出现极端强降水事件概率增多, 而太阳活动等自然因素外强迫主要对降水的多年代际周期变化具有一定的调制作用。

3.3 EOF 分析

为了进一步对比两种辐射强迫下降水变率的主要模态特征及其差异, 我们采用经验正交函数(EOF)对最后 1000 年的模拟结果进行了分解。结

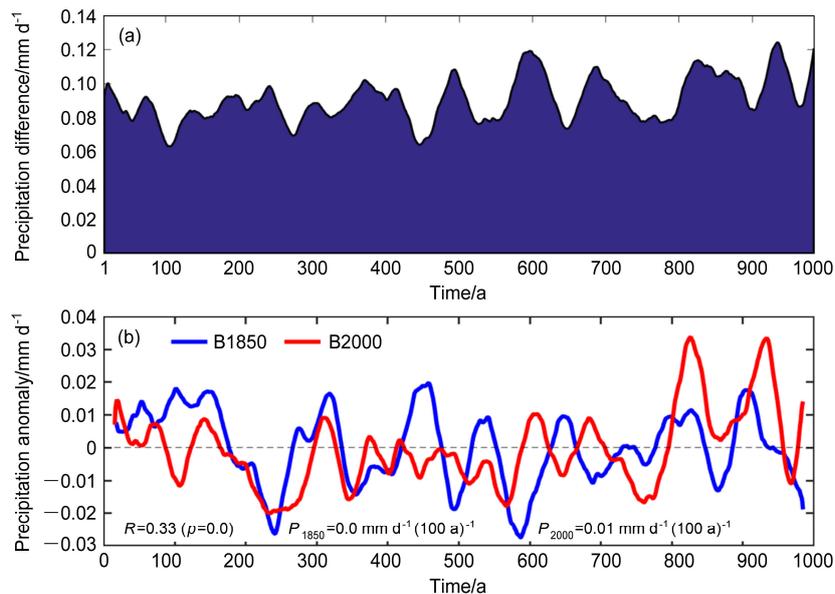


图 4 区域平均降水量差异及其距平时间序列：(a) 现时辐射强迫降水 (B2000) 与工业革命前辐射强迫结果 (B1850) 的差异 (单位：mm d⁻¹)；(b) 现时辐射强迫降水量距平 (B2000) 与工业革命前辐射强迫结果 (B1850) 的时间序列 (单位：mm d⁻¹)。图中所示阴影区域以及时间序列均为两次 31 年滑动平均结果，图 (b) 中的 R 为二者的相关系数， P_{1850} 与 P_{2000} 为二者的长期趋势

Fig. 4 (a) Regionally averaged difference in annual precipitation rate (units: mm d⁻¹) between the B2000 and B1850 simulations, and (b) regionally averaged time series of annual precipitation anomalies (units: mm d⁻¹) derived from two simulations. The long-term trends derived from the two time series (P_{1850} and P_{2000}) and the correlation coefficient of the simulated precipitation (R) between the B1850 and B2000 are also shown in (b)

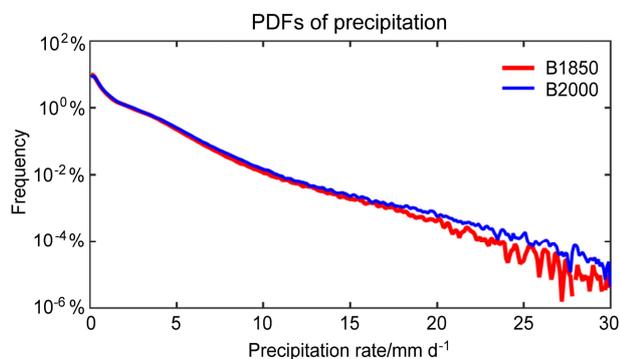


图 5 不同辐射强迫下整个区域所有格点降水的距平时间序列的概率密度分布函数 (PDFs)

Fig. 5 Probability density distribution function of time series of precipitation anomalies at all grid points within the study region in the present-day (B2000) and pre-industrial (B1850) simulations of CCSM4.0 model

果显示，B1850 和 B2000 前两个主要特征向量的空间分布基本完全一致，两个 EOF 模态的解释方差也非常接近，总体解释方差超过了 40%。其中，除东北地区外在其他区域均为正异常外第一空间模态最大正异常中心出现在青藏高原北部，解释方差为 27% 左右 (图 7a, b)；而第二模态呈现的是高原地区为负异常、其他北方地区为正异常的空间分布，

解释方差均为 14% 左右 (图 6c, d)。从第一模态时间系数的长期变化来看，B1850 与 B2000 结果显著正相关 (相关系数为 0.28，统计检验的置信区间 $p=0.05$)，这一模态主要描述的是整个干旱半干旱降水的多年代际变化特征 (图 7e)，与前面图 4b 的结果基本一致。从第二模态的时间系数来看，二者的长期变化显著正相关 (相关系数为 0.56，统计检验的置信区间 $p=0.05$) 这一模态可能主要反映的自然变化过程 (如太阳活动) 对降水长期变化的调制作用，变化周期约为 70~100 年，但 B2000 约在后 500 年的多年代际变率明显较大 (图 7f)。

通过上述分析表明，尽管现代人类活动引起的辐射强迫作用对降水的年际、多年代际变化特征及其长期趋势没有明显的影响，但却能改变降水的强度和多年代变率幅度；自然因素外强迫则对我国干旱半干旱区降水的多年代际 (70~100 年) 周期振荡有一定的调制作用。

3.4 不同辐射强迫下降水与热带海温异常的关系

热带海温异常是影响我国降水的重要因子之一。为了检验辐射强迫差异对海—气相互作用的影响，本文进一步对两种辐射强迫下 CCSM4.0 模拟的降水与海温异常的相关性进行了对比分析。图 8

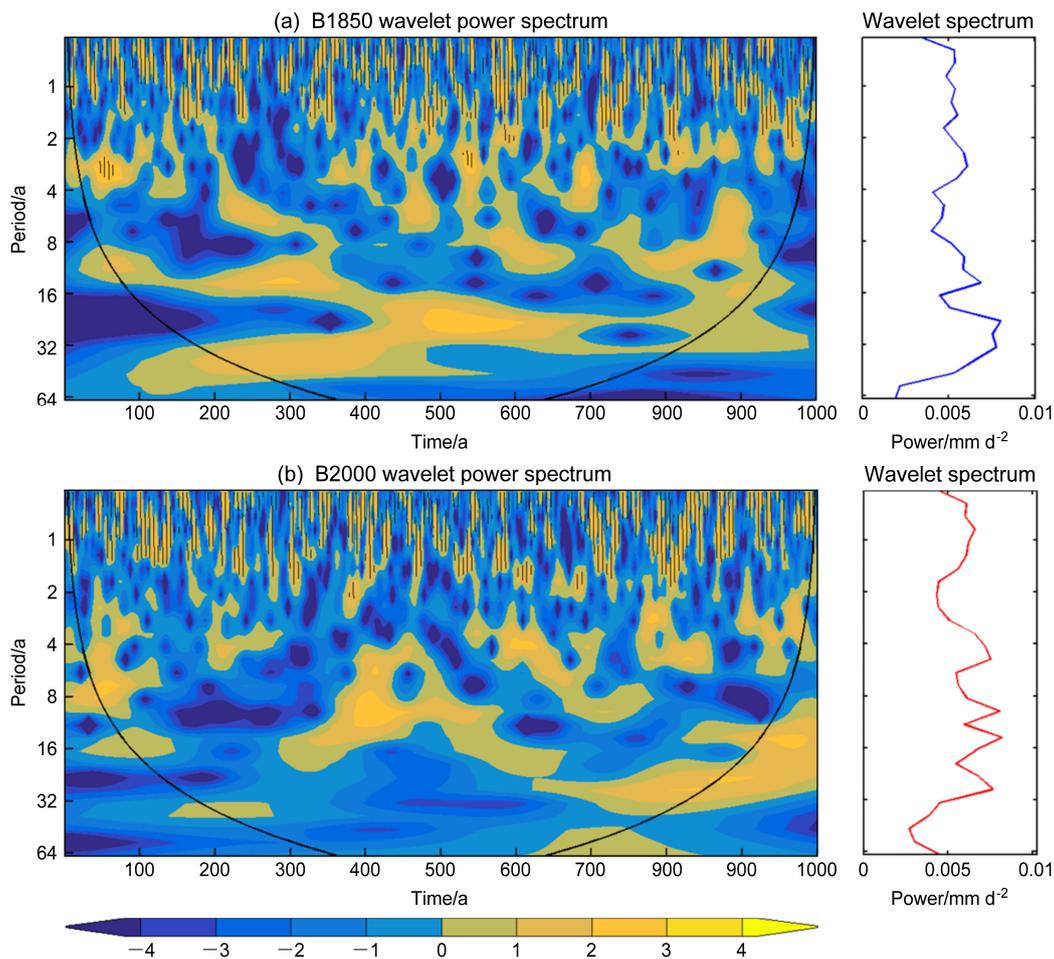


图6 两种辐射强迫下区域年平均标准化降水时间序列小波功率谱(左列)及波谱(右列)

Fig. 6 Wavelet power spectra (left) and wavelet spectra (right) derived from annual precipitation anomalies averaged over the arid and semi-arid region in China based on B1850 and B2000 simulations, respectively. Annual precipitation is normalized by local standard deviation

给出的B1850和B2000两组模拟试验中年平均降水EOF模态时间系数(PC)与热带海温异常(SST)相关系数的空间分布图。可以看到,两种辐射强迫下降水的长期变化与热带海温异常遥相关分布大体相似但强度有所差异。PC1与 150°E 以东的赤道东太平洋地区SST呈现出显著的负相关关系,但在B1850试验中显著负相关的区域更大(图8a);与热带中东太平洋地区情形相反,PC1与赤道西太平洋及印度尼西亚海域SST呈现出显著的正相关关系,特别是B2000试验结果中在印度尼西亚海域具有更大显著正相关区域(图8b)。结合图7的结果来看,当赤道中东太平洋地区海温异常偏冷,赤道西太平洋地区海温异常偏暖时,中国北方干旱半干旱降水增加,且内蒙古中东部对海温异常响应最强烈。而在人类活动引起的温室气体增暖的作用下,中国北

方干旱半干旱区降水与东太平洋海温异常的负相关性减弱,与西太平洋海温异常的正相关性增强。

从降水PC2与热带海温异常的遥相关分析进一步可以看出,现时辐射强迫下(B2000)中国北方干旱半干旱区降水的多年际变率与热带西太平洋北部、热带印度洋以及加勒比海等区域的海温异常的正相关关系要明显强于工业革命前辐射强迫的结果(图8c, d)。这表明,人类活动引起的辐射强迫会影响降水多年代际变率与海温异常的关系。同时,这也进一步证实人类活动引起的辐射强迫通过影响海—气相互作用的强度来调节我国干旱半干旱区降水多年代际变率的幅度。

4 结果与讨论

本文基于通用气候系统模式CESM4.0开展的

工业革命前（1850 年）及当前（2000 年）两种辐射强迫气候效应的长期积分试验，对比研究了人类活动（温室气体浓度变化）以及自然因素外强迫对我国干旱半干旱区降水变化的影响，主要得到了以

下几点结论：

（1）CCSM4.0 能够模拟出全球陆地以及我国北方干旱半干旱区降水气候态的空间分布特征以及季节变化特征，但模拟的降水偏多，特别是在暖季

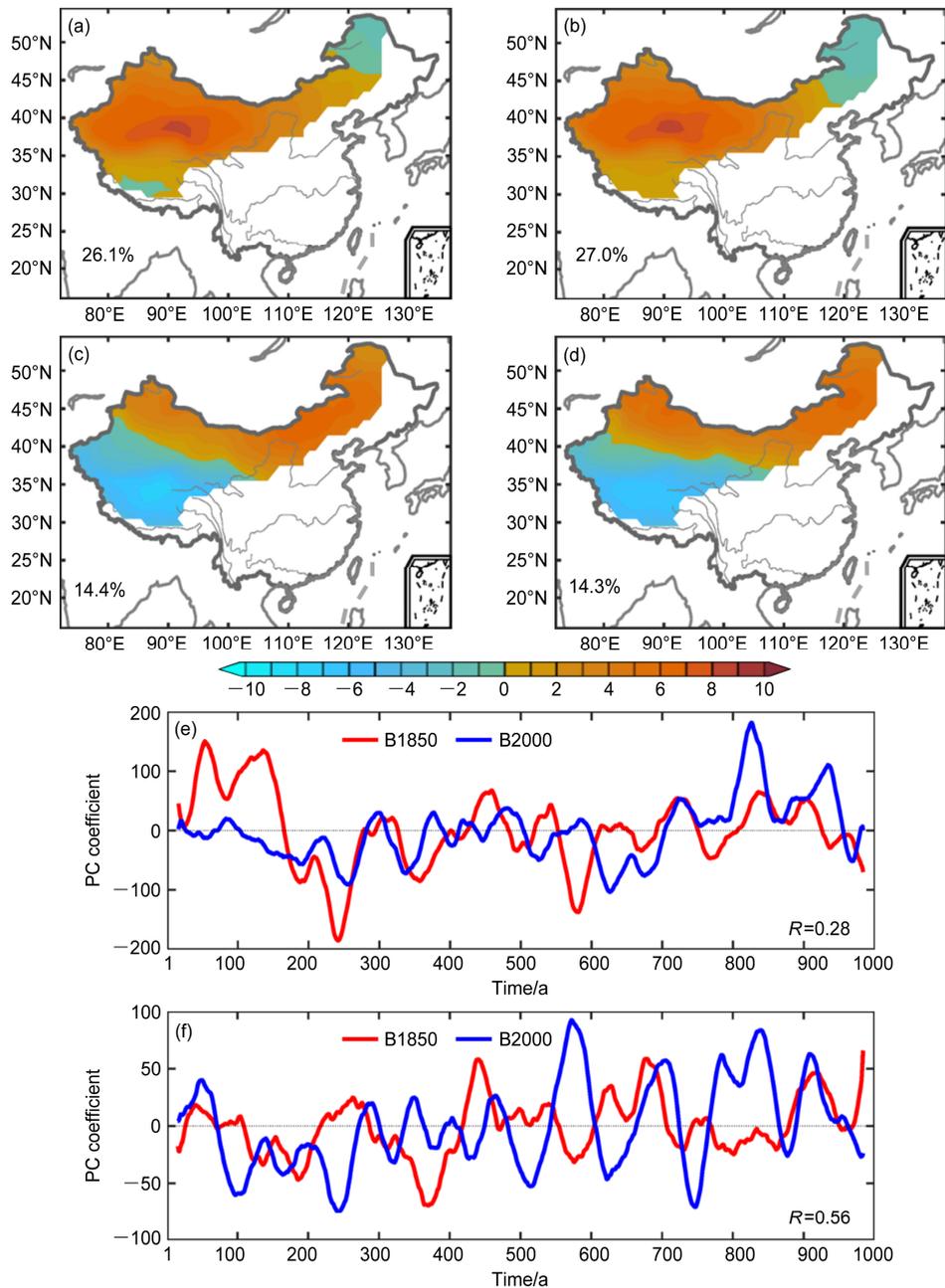


图 7 两种不同辐射强迫降水的 EOF 模式及其时间系数 (PC) 序列: (a, c) 工业革命前辐射强迫 (B1850) 降水 (a) EOF1 与 (c) EOF2 模式; (b, d) 当前辐射强迫 (B2000) 降水 (b) EOF1 与 (d) EOF2 模式; (e, f) 分别经过两次 31 年平滑的 (e) PC1 和 (f) PC2。各模式的解释方差在图中以百分数表示, PC1 和 PC2 中两时间序列的相关系数以 R 表示; EOF 分解是基于年平均标准化降水距平

Fig. 7 The first two leading EOF modes and the corresponding twice 31-point-moving averaged PC time series derived from the CESM 4.0 simulations: (a, c) the (a) first and (c) second EOF modes for the B1850; (b, d) display the (b) first and (d) second EOF modes for the B2000; (e, f) the (e) first and (f) second PC time series. The annual precipitation anomalies were normalized by local standard deviation and multiplied by the square root of cosine of the latitude at each grid box before the EOF analysis. The percentage shows explained variance in Figs. 7a–d, and the PC correlation coefficients (R) between the two simulations are shown in Figs. 7e–f

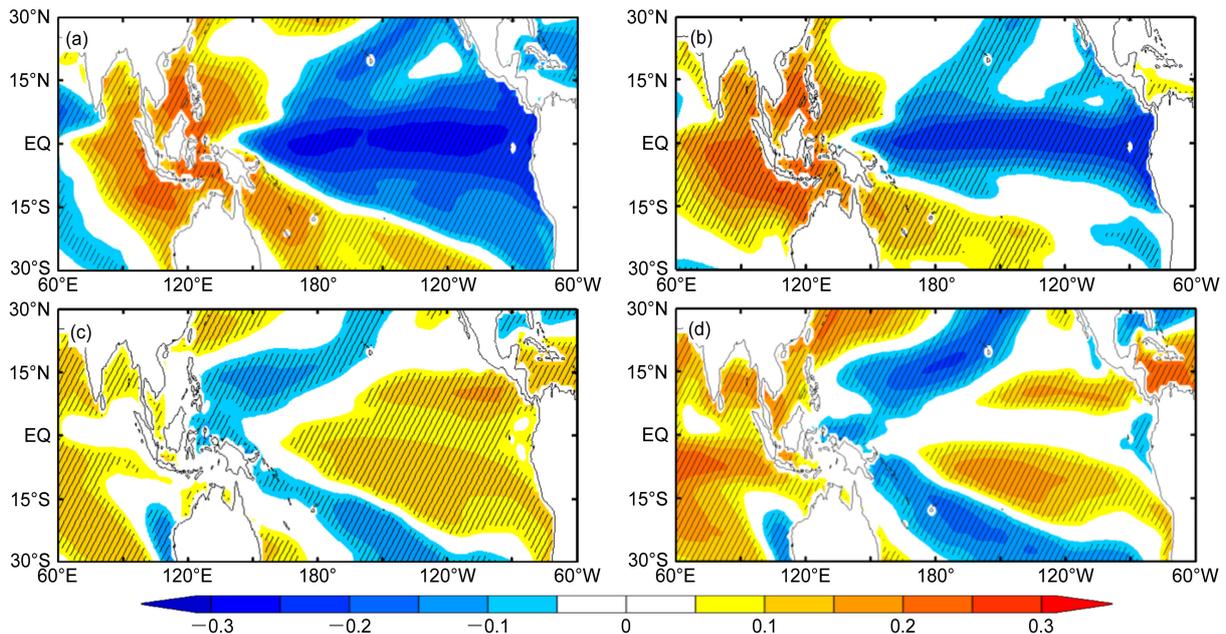


图 8 两种辐射强迫下年降水 EOF 分解时间系数 (PC) 与热带海温 (SST) 年平均距平相关性: (a, c) B1850 试验中降水 EOF 前两模态的 (a) PC1 和 (c) PC2 (图 7e, f 中的蓝线) 与 SST 的相关系数空间分布; (b, d) 同 (a, c), 但为 B2000 模拟试验。图中斜线阴影区表示通过了 0.05 的显著性检验

Fig. 8 Spatial patterns of correlations between the PC time series corresponding to the first two EOF leading modes of annual precipitation anomalies and annual anomalies of the tropical sea surface temperature (SST) in the CESM 4.0 simulations forced by the preindustrial (B1850) and present-day (B2000) radiations, respectively. (a) and (c) are the correlation coefficients of the (a) PC1 and (c) PC2 (blue lines in Figs. 7e, f) with the SST, respectively, based on the B1850 simulation; (b) and (d) are same as (a) and (c) but for the B2000 simulation. The stippling indicates that the value is statistically significant at the 5% level

比较明显。而这种系统性偏差除了模式本身的性能以及地形影响外,也与试验设计有关。因为本文所用的模拟试验结果仅是“平衡态”的气候敏感性试验,而非对真实历史气候变化的模拟。

(2) 两种辐射强迫下我国干旱半干旱区降水的长期变化均无明显趋势,但二者的差异却呈现出 70~100 年的准周期振荡,这可能与太阳活动的格莱斯堡周期有关;而且由人类活动引起的现实辐射强迫降水 (B2000) 在最后约 200 年的时段具有更大的变率。

(3) 从频谱分布来看,由人类活动引起的现实辐射强迫作用 (B2000) 会使我国干旱半干旱区极端强降水事件出现的概率增多;而由太阳活动引起的辐射强迫作用 (B1850) 主要对降水多年代际周期 (30 年左右) 具有一定的调制作用。

(4) 从 EOF 分解的结果来看,两种辐射强迫下我国干旱半干旱区降水变率的主要模态基本一致,进一步分析表明人类活动引起的辐射强迫作用对降水的年代际、多年代际变率及其长期趋势没有明

显的影响,而自然因素外强迫 (太阳活动) 对降水的多年代际周期振荡有一定影响。

(5) 研究结果还表明,中国北方干旱半干旱区降水变化与热带海温异常显著相关,人类活动引起的辐射强迫会影响降水多年代际变率与海温异常相互作用的强度,从而调节中国北方干旱半干旱区降水多年代际变率的幅度。

由于降水的年际、多年代际变率及其长期趋势主要受气候系统内部变率调控,但目前气候模式仍然无法捕捉大尺度海温 (SST) 的年代际—多年代际等气候系统内部自然变率信号,对降水的模拟主要反映的是对人类活动 (温室气体、气溶胶等) 以及自然因素 (太阳活动和火山喷发) 等外强迫的响应 (Dai, 2013)。因此,改进和提高气候模式的模拟能力仍然是当前气候变化检测归因研究所面临的关键科学问题之一。

参考文献 (References)

Blackmon M, Boville B, Bryan F, et al. 2001. The community climate

- system model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (11): 2357–2376, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<2357:TCCSM>2.3.CO;2.
- Breitenmoser P, Beer J, Brönnimann S, et al. 2012. Solar and volcanic fingerprints in tree-ring chronologies over the past 2000 years [J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 313–314: 127–139, doi:10.1016/j.palaeo.2011.10.014.
- Dai A G, Trenberth K, Qian T T. 2004. A global dataset of palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *J. Hydrometeorol.*, 5 (6): 1117–1130, doi:10.1175/JHM-386.1.
- Dai A G. 2011a. Drought under global warming: A review [J]. *Wiley Interdiscip. Rev. Climate Change*, 2 (1): 45–65, doi:10.1002/wcc.81.
- Dai A G. 2011b. Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900–2008 [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D12): D12115, doi:10.1029/2010JD015541.
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nat. Climate Change*, 3 (1): 52–58, doi:10.1038/nclimate1633.
- Feng S, Fu Q. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (6): 14637–14665, doi:10.5194/acp-13-14637-2013.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 22–29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 22–29, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.01.003.
- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. *大气科学*, 32 (4): 752–760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32 (4): 752–760, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.05.
- Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. 2011. The community climate system model version 4 [J]. *J. Climate*, 24 (19): 4973–4991, doi:10.1175/2011JCLI4083.1.
- Huang J P, Guan X D, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (12): 5391–398, doi:10.5194/acp-12-5391-2012.
- Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 6 (2): 166–171, doi:10.1038/nclimate2837.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend [J]. *Nature Climate Change*, 4 (6): 462–466, doi:10.1038/nclimate2223.
- 李春香, 赵天保, 马柱国. 2014. 基于 CMIP5 多模式结果评估人类活动对全球典型干旱半干旱区气候变化的影响 [J]. *科学通报*, 59 (30): 2972–2988. Li Chunxiang, Zhao Tianbao, Ma Zhuguo. 2014. Impacts of anthropogenic activities on climate change in arid and semiarid areas based on CMIP5 models [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 59 (30): 2972–2988, doi:10.1360/N972014-00039.
- Li C X, Zhao T B, Ying K R. 2017. Quantifying the contributions of anthropogenic and natural forcings to climate changes overland during 1946–2005 [J]. *Climatic Change*. (in press)
- Liu J, Wang B, Ding Q H, et al. 2009. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: Results from ECHO-G model [J]. *J. Climate*, 22 (9): 2356–2371, doi:10.1175/2008JCLI2353.1.
- Liu J, Wang B, Wang H L, et al. 2011. Forced response of the East Asian summer rainfall over the past millennium: Results from a coupled model simulation [J]. *Climate Dyn.*, 36 (1–2): 323–336, doi:10.1007/s00382-009-0693-6.
- 马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. *地球物理学报*, 48 (5): 1011–1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 48 (5): 1011–1018, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2005.05.006.
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. *地球物理学报*, 48 (3): 519–525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 48 (3): 519–525, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2005.03.008.
- Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (6): L06710, doi:10.1029/2006GL028628.
- Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (5): 815–829, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2.
- Quan X W, Hoerling M P, Perlwitz J, et al. 2014. How fast are the tropics expanding? [J]. *J. Climate*, 27 (5): 1999–2013, doi:10.1175/JCLI-D-13-00287.1.
- Schneider U, Becker A, Finger P, et al. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 115 (1–2): 15–40, doi:10.1007/s00704-013-0860-x.
- Sun G W, Ye Q. 1996. A study on the variation of drought periods occurring in Northwest China and other Africa-Asia continental regions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 10 (4): 473–484.
- 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.
- 田芝平, 姜大膀. 2013. 不同分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力分析 [J]. *大气科学*, 37 (1): 171–186. Tian Zhiping, Jiang Dapang. 2013. Evaluation of the performance of low- to high-resolution CCSM4 over East Asia and China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 37 (1): 171–186, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12050.
- 田芝平, 姜大膀, 张冉, 等. 2012. CCSM4.0 的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估 [J]. *大气科学*, 36 (3): 619–632. Tian Zhiping, Jiang Dapang, Zhang Ran, et al. 2012. Long-term climate simulation of CCSM4.0 and evaluation of its performance over East Asia and China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 36 (3): 619–632, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11092.
- 王志远, 刘健, 王晓青, 等. 2016. 地球系统模式 CESM1.0 对太阳辐射

- 和温室气体的敏感性差异研究 [J]. 第四纪研究, 36 (3): 758–767.
- Wang Zhiyuan, Liu Jian, Wang Xiaoqing, et al. 2016. Divergent sensitivity of Earth System Model CESM 1.0 to solar radiation versus greenhouse gases [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 36 (3): 758–767, doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2016.03.24.
- 赵天保, 陈亮, 马柱国. 2014. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估 [J]. 科学通报, 59 (12): 1148–1163. Zhao Tianbao, Chen Liang, Ma Zhuguo. 2014. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 49 (4): 412–429, doi:10.1007/s11434-013-0003-x.
- Zhao T B, Dai A G. 2015. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario [J]. J. Climate, 28 (11): 4490–4512, doi:10.1175/JCLI-D-14-00363.1.
- Zhao T B, Dai A G. 2016. Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part II: Model-simulated historical and future drought changes [J]. Climatic Change, doi:10.1007/s10584-016-1742-x.
- Zhao T B, Li C X, Zuo Z Y. 2016. Contributions of anthropogenic and external natural forcings to climate changes over China based on CMIP5 model simulations [J]. Science China Earth Sciences, 59 (3): 503–517, doi:10.1007/s11430-015-5207-2.