

张丽霞,张文霞,周天军,等. 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, doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2017. 04. 0409. [Zhang Lixia, Zhang Wenxia, Zhou Tianjun, et al. Assessment of the decadal prediction skill on global land summer monsoon precipitation in the coupled models of ENSEMBLES[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(4): 409-419, doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2017. 04. 0409. ]

## 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\*

张丽霞<sup>1,2</sup>, 张文霞<sup>1,3</sup>, 周天军<sup>1,3</sup>, 吴波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**全球季风区降水对当地社会经济、全球大尺度环流及能量循环至关重要。采用欧洲联盟 ENSEMBLES 计划 Stream 2 的年代际回报试验, 评估了其对 1960—2015 年全球陆地季风夏季降水年代际变化的回报能力, 并探讨了北半球陆地季风区夏季 (NHSM) 降水年代际变化可预报性的可能来源。分析发现 ENSEMBLES 对全球及南半球陆地季风区夏季降水的年代际回报技巧不高, 但其对 NHSM 降水具有一定的预报能力, 能合理回报出观测中 NHSM 降水在 1960 年至 1970s 末期的减弱趋势和 1990s 之后的增强趋势, 其缺陷在于模式中 NHSM 降水最小值出现在 1970s 末期, 较之观测提前了近 10 年, 未能回报出 1980s 中期至 1990s 初期 NHSM 的干旱期。mega-ENSO 与大西洋多年代际振荡 (AMO) 是影响 NHSM 降水年代际变化的 2 个重要驱动因子。分析发现模式回报的 NHSM 降水与 mega-ENSO、大西洋多年代际振荡 (AMO) 的正相关明显大于观测, 能合理再现 2 个指数在 1960 年至 1970s 末期和 1990s 后的变化趋势, 是模式对这 2 个时段内 NHSM 降水回报技巧的重要来源。虽然 ENSEMBLES 对 AMO 的年代际变化具有较高的回报能力 (与观测的最大相关系数高达 0.85), 但是对 mega-ENSO 的回报技巧较弱, 进而限制了模式 1980s 中期至 1990s 初 NHSM 的年代际预报技巧。因此, 提高模式对 mega-ENSO 的预报能力, 是提升 NHSM 降水年代际预报水平的重要途径。

**关键词:**全球季风; 年代际预测; 可预报性; 耦合模式

**中图分类号:** P426.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8166(2017)04-409-11

### 1 引言

季风区作为全球降水变率最大的区域, 居住着全球 2/3 的人口<sup>[1]</sup>。受全球质量守恒的制约, 全球辐合辐散环流之间相互联系, 不同季风系统彼此之

间紧密关联, 进而气候学家提出全球季风的概  
念<sup>[1-5]</sup>。考虑到全球季风区降水多寡对当地居民生活、农业生产和经济发展至关重要, 与此同时, 全球季风区降水释放的巨大潜热可以影响到全球的能量循

\* 收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2017-02-05.

\* 基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项项目“基于 FGOALS-s, CMA 和 CESM 气候系统模式的年代际集合预测系统的建立与研究” (编号: GYHY201506012); 国家自然科学基金项目“20 世纪全球季风变化模拟和未来变化预估” (编号: 41330423) 资助。

作者简介: 张丽霞 (1982-), 女, 河北保定人, 副研究员, 主要从事季风区旱涝变化机理的研究. E-mail: lixiazhang@mail.iap.ac.cn

环和大尺度环流<sup>[6]</sup>,因此,研究全球季风区降水变率及其可预报性具有重要的社会价值和科学意义。

愈来愈多的证据表明,全球不同区域的季风系统在气候态、年际、年代际以及长期趋势等方面,彼此之间存在着紧密联系<sup>[7-9]</sup>。就年代际变化而言,过去百年,全球季风区降水经历了明显的年代际变化,主要体现为 1900—1950 年全球陆地季风区降水显著增加,之后至 1980s 末下降<sup>[9-12]</sup>,近 30 年海洋和陆地的全球季风区降水逐渐恢复<sup>[13,14]</sup>。1970s 末东亚夏季风“南涝北旱”型的年代际转变,可视作全球季风降水变化的局地体现<sup>[15]</sup>。

关于全球季风降水的年代际变化,有 2 个重要的自然驱动因子,分别是太平洋海温异常(如 mega-ENSO)和大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)<sup>[7]</sup>。mega-ENSO 是一个多时间尺度指数,在年际变率尺度, mega-ENSO 与 ENSO 指数高度相关,而在年代际变化尺度, mega-ENSO 主要体现了太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)变率。当 mega-ENSO 处于正位相(PDO 负位相)时,全球陆地季风区降水增加。如 1950s 以来全球陆地季风区降水的年代际减弱趋势,受 PDO 在 1970s 末由负位相向正位相转变影响,在给定观测海温驱动下,模式可以合理模拟出该趋势<sup>[11]</sup>。近 30 年来由于 PDO 在 2000 年左右由正位相转为负位相,对应东太平洋变冷而西太平洋变暖的海温变化型,导致季风区垂直上升运动增强,垂直水汽输送增加,季风区降水增加<sup>[14]</sup>。对于 AMO 而言,其处于正位相时,北大西洋增暖抑制了热带中太平洋地区降水,造成西太平洋的东风异常和北半球其他区域的西风异常,进而增强北半球夏季风环流及降水<sup>[7]</sup>。

除了自然变率之外,人类活动所导致的全球变化亦具有重要作用。温室气体强迫导致全球变暖,由于北半球陆地面积大于南半球,且陆地热容量小于海洋,致使北半球增暖幅度大于南半球,陆地增暖幅度大于海洋,故北半球夏季风环流增强,加之全球变暖增加了大气水汽含量,二者共同作用导致北半球夏季季风降水增加<sup>[16,17]</sup>。如工业革命以来人类排放的 CO<sub>2</sub> 增加导致全球变暖,对过去 30 年全球季风降水增加亦具有不容忽视的贡献<sup>[13-17]</sup>。此外,火山气溶胶及 1950s 以来人为气溶胶排放的增加,气溶胶直接效应可能会通过减弱入射短波辐射和降低地表温度,造成北半球季风区降水减弱<sup>[18-20]</sup>。

近年来,未来 10~30 年的近期气候预测逐渐得

到气候学界的关注,有效的年代际预测可以为应对气候变化的政府决策提供有利信息,以便更有效地解决气候变化造成的各种经济和社会问题<sup>[21,22]</sup>。虽然当前对全球季风降水年代际变率机理已具备一定的认识,但实际观测的季风区降水年代际变化机理非常复杂,可能是多种因子共同作用的结果,当前模式对其年代际变化是否具有预测能力尚不清楚。年代际预测试验为研究模式对全球季风降水的年代际预测能力提供了重要工具。本文拟利用欧洲联盟 ENSEMBLES 计划 Stream 2 年代际回报试验,重点考察如下问题:当前全球海气耦合模式对全球陆地季风降水是否具有年代际回报能力?如存在,模式的年代际回报能力可能来源是什么?

## 2 资料和方法

### 2.1 ENSEMBLES 年代际预测试验

本文采用欧洲联盟 ENSEMBLES 计划 Stream 2 年代际预测试验<sup>[23]</sup>,共包含 4 个耦合模式,即欧洲中期预报中心 IFS/HOPE 模式、英国气象局的 HadGEM2-AO 模式、法国气象局的 ARPEGE/OPA 模式以及德国基尔大学莱布尼兹海洋科学研究所的 ECHAM5/MPI-OM1 模式。所有模式均采用观测的海温和海冰状况对模式进行初始化,并加入观测的辐射强迫。这 4 个模式海洋初始化方案有所不同,其中 HadGEM2-AO, ARPEGE/IPA 和 ECHAM5/MPI-OM1 等 3 个模式直接初始化观测的 SST, IFS/HOPE 将观测的 SST 距平和模式模拟的气候态之和作为模式初始化场,此外,ENSEMBLES 计划还包含一组物理参数化扰动试验,该试验同时扰动影响 HadGEM3 海洋模式中 SST 和盐度偏差发展的物理参数,采用不同物理参数组合开展年代际预测试验。

每个模式均从 1960—2005 年的 11 月每隔 5 年(1960 年、1965 年、1970 年,以此类推)向后预测 10 年,共包含 10 组 10 年回报试验。除了 UKMO 的 HadGEM2-AO,模式有 9 个成员外,其他 3 个模式均有 3 个成员。本文重点关注多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)平均的结果,同时给出各个模式成员作为参考。

### 2.2 模式验证资料与分析方法

本文使用的观测资料包括:①最新的 CRU 全球陆地逐月降水和地表温度资料(CRU TS v. 3.23)<sup>[24]</sup>,分辨率为 0.5°×0.5°;②美国 NOAA/NCDC 的延伸重建海温资料(ERSST)<sup>[25]</sup>。所用资料时段均为 1960—2015 年,为了与模式结果进行比

较,采用距离权重插值,将观测资料插值到与模式一致的 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 格点上。

由于年代际预测试验水平可能依赖于预测时段,参照 IPCC 第五次评估报告中的分析方法,本文分析了模式预测的滑动的4年平均季风区降水预测技巧,即对每组试验回报的降水做连续4年平均,再求得每个时段对应的观测降水,共存在6个4年滑动平均时段,分别为模式回报的第1~4年、2~5年、3~6年、4~7年、5~8年和6~9年,每个4年平均都有10个时刻,即10个样本。以模式回报的第1~4年平均为例,指的是1960年起报的1961—1964年平均,1965年起报的1966—1969年平均,1970年起报的1971—1974年平均,以此类推,一直到2005年起报的2006—2009年平均,共有10个样本。

本文主要采用时间相关系数和均方根误差技巧(RMSSS)2个指标来衡量年代际预测的水平。其中:

$$RMSSS = \left(1 - \frac{RMSE_p}{RMSE_{obs}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$RMSE_p$  为预测相对于观测的均方根误差, $RMSE_{obs}$  为观测的标准差。当  $RMSSS > 0$  时,表明存在预测技巧,值越大表示技巧越高<sup>[26]</sup>。

## 3 ENSEMBLES 对全球陆地季风降水的年代际预测

### 3.1 ENSEMBLES 年代际预测能力评估

因为本文关注的是全球陆地季风降水的变化,因此季风区域亦从降水年变化角度来定义。参照参考文献[5],季风区定义为为降水年较差与年平均降水之比大于0.5,且降水年较差大于2 mm/d的区域,其中北半球(南半球)降水年较差为5~9月(11~3月)降水与11~3月(5~9月)降水之差。图1给出全球陆地季风区范围内 ENSEMBLES 耦合模式 MME 回报的第1~4年和第6~9年平均夏季降水距平与观测之间的相关系数分布。根据参考文献[5]的定义,本文中的北半球夏季降水为每年5~9月,南半球夏季降水是11月到来年3月。从图1可以看出,大部分陆地季风区内相关系数小于0,表明模式对陆地季风区夏季降水的时间演变整体回报水平有限。但是,北非季风区、印度南部地区、中国华北地区和北美、南非南部等地区出现较显著的相关系数,即使到了模式预测的第6~9年,北非及南美南部季风区的显著相关仍存在且有所增强,最大相关系数位于第6~9年平均的北非季风区( $>0.60$ )。

为了衡量模式回报的降水与观测之间在量值上

的差异,本文采用 RMSSS 将模式结果与观测进行了比较,MME 回报的第1~4年和第6~9年平均降水与观测间 RMSSS 的水平分布如图2所示。与图1相关系数分布一致,较大的 RMSSS 出现在北非季风区和中国华北地区,但仅有少数格点通过了10%的显著性检验水平。比较而言,第6~9年的 RMSSS 值大于第1~4年,意味着随着模式回报的时长增加,模式对全球陆地季风夏季降水的年代际回报能力有所提高。

为了更清楚地体现 ENSEMBLES 对全球陆地季风降水的回报能力,图3给出了北半球、南半球和全球陆地季风区区域平均的4年平均夏季降水与观测之间的相关系数随预测时长的演变。全球陆地季风区夏季降水为北半球陆地季风区夏季和南半球陆地季风区夏季降水之和<sup>[5]</sup>。北半球陆地季风区夏季(Northern Hemispheric Summer Monsoon, NHSM)降水与观测之间的相关系数保持在0.4左右,到了模式预测的第6~9年,其相关系数达到最高(0.5),通过10%显著性检验水平,说明模式 MME 对观测中 NHSM 降水的年代际变化具有一定的预测能力。比较而言,MME 回报的南半球和全球陆地季风区夏季降水与观测之间的相关系数均小于0.2,2~5年之后,相关系数甚至小于0,表明模式对南半球和全球陆地季风区降水的年代际变化无回报能力。

由于 ENSEMBLES 年代际回报试验对 NHSM 降水具有较好的回报能力,图4进一步给出观测和 MME 回报的 NHSM 降水的时间演变。观测中(图4中黑色实线),北半球陆地季风区降水自1960s至1980s中期减少,到1980s中期达到最小值,并在此后恢复增强。MME(图4中灰色实线)合理回报出观测中1960年至1970s末期 NHSM 降水减弱趋势和1990s之后的增加趋势,但是模式中 NHSM 降水最小值出现在1970s末期,较之观测提前了近10年,进而未能回报出1980s中期至1990s初期北半球陆地季风区的干旱期。

### 3.2 ENSEMBLES 年代际预测技巧的可能来源

如引言部分介绍, mega-ENSO 和 AMO 是调制 NHSM 降水年代际变化的最重要的2个自然驱动因子<sup>[7]</sup>。Wang 等<sup>[7]</sup>定义了 mega-ENSO 指数,即西太平洋“K”型区域平均的 SST 与东太平洋三角形区域平均的 SST 之差,以代表全球海表面温度年际一年代际尺度的主导模态,并指出 mega-ENSO 与 NHSM 降水存在显著正相关,相应的物理机制如下: mega-ENSO 正位相时,南北半球副热带高压及相应的信

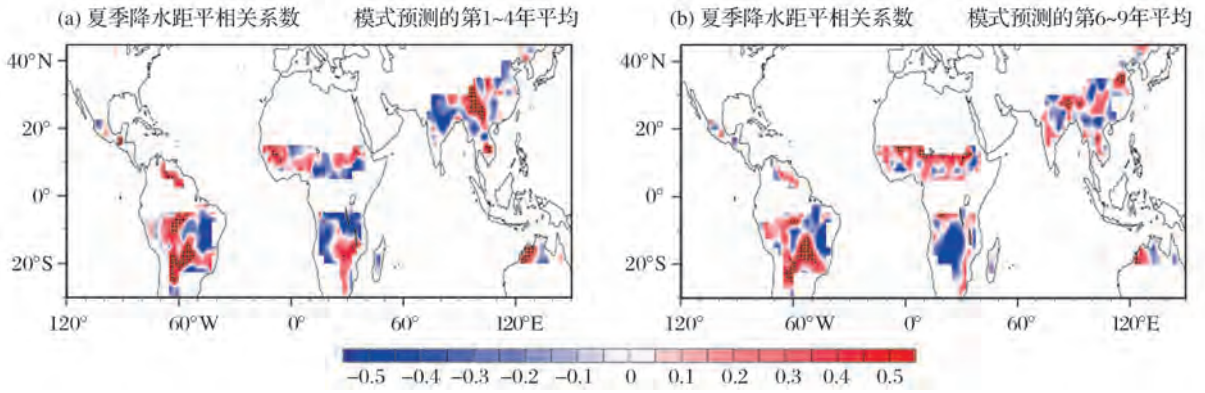


图 1 ENSEMBLES 多模式集合 (MME) 平均预测的 (a) 第 1~4 年和 (b) 第 6~9 年平均夏季降水距平与观测的相关系数分布

Fig. 1 The correlation coefficient of summer precipitation anomalies between MME prediction and observation averaged over the hindcast years (a) 1~4 years and (b) 6~9 years

打点区域通过了 10% 显著性检验水平; 其中北半球夏季是 5~9 月平均, 南半球夏季是 11 月到来年 3 月平均  
The dotted areas are statistically significant at 10% level; The summer precipitation in northern hemisphere and southern hemisphere is that averaged from May to September and from November to March, respectively

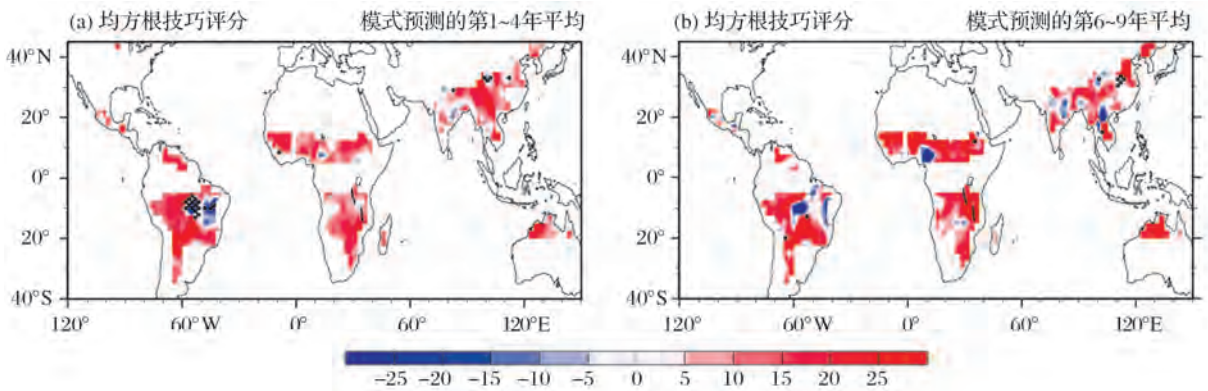


图 2 ENSEMBLES 多模式集合 (MME) 平均预测的 (a) 第 1~4 年和 (b) 第 6~9 年平均夏季降水距平与观测之间的均方根技巧评分 (RMSSS) 的水平分布

Fig. 2 The distribution of Root Mean Square Skill Score (RMSSS) of summer precipitation anomalies between MME prediction and observation averaged over the hindcast years (a) 1~4 years and (b) 6~9 years

打点区域通过了 10% 显著性检验水平; 其中北半球夏季是 5~9 月平均, 南半球夏季是 11 月到来年 3 月平均  
The dotted areas are statistically significant at 10% level; The summer precipitation in northern hemisphere and southern hemisphere is that averaged from May to September and from November to March, respectively

风增强, 导致向亚洲和非洲季风区的水汽输送增加, 季风区水汽异常辐合, 进而 NHSM 降水增加。对于第二个强迫因子 AMO 亦与 NHSM 降水年代际变化显著正相关, 原因在于 AMO 正位相时, 北大西洋增暖抑制了热带中太平洋地区降水, 造成西太平洋的东风异常和北半球其他区域的西风异常, 进而增强 NHSM 环流及降水<sup>[7]</sup>。

为了考察模式对 NHSM 降水年代际变化回报能力的可能来源, 本文首先给出观测和模式中 NHSM 降水与 mega-ENSO 和 AMO 的关系。图 5 给出

观测和 MME 回报的 mega-ENSO 指数与北半球夏季陆地季风区之间的相关系数分布。在回报时段内, 对于模式回报的第 1~4 年和第 6~9 年, 观测中北半球季风区夏季降水与 mega-ENSO 正相关区域均主要位于非洲季风区、东南亚—青藏高原季风区和南美季风区北部地区, 其中非洲中部和东南亚—青藏高原地区的相关系数在 0.5 以上, 通过了 10% 显著性检验。就北半球陆地季风区而言, MME 回报的第 1~4 年夏季平均降水与 mega-ENSO 的显著正相关 (图 5b) 区域范围和强度均明显大于观测, 其中北

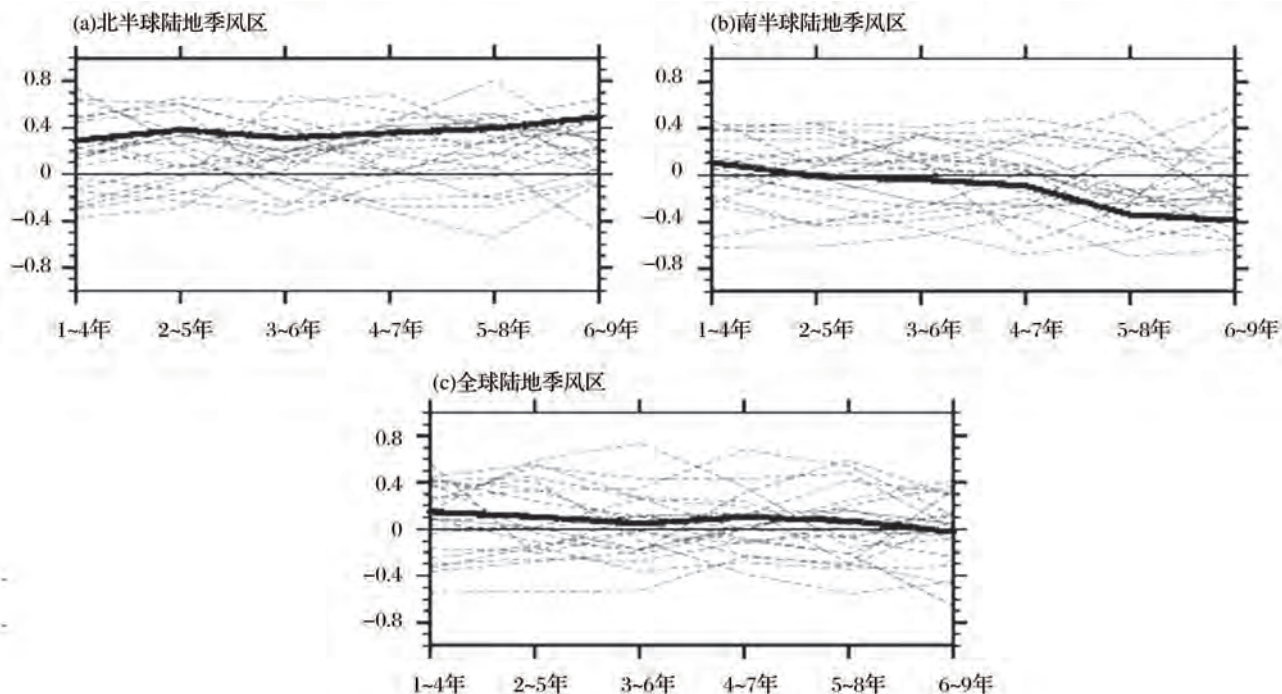


图3 模式预测的陆地季风区区域平均的4年平均夏季降水距平与观测的相关系数随预报时长的变化

Fig. 3 The evolution of correlation coefficient between model predicted 4 years summer mean precipitation and that of observation regional average

(a) 北半球陆地季风区夏季降水; (b) 南半球陆地季风区夏季降水; (c) 全球陆地季风区夏季降水。其中黑色实线和灰色虚线分别代表所有多模式集合(MME)平均和不同模式成员结果, 全球季风区夏季降水是(a)与(b)的平均

(a) Northern hemispheric land monsoon; (b) Southern hemispheric land monsoon; (c) Global land monsoon regions. The black and dashed lines show the MME and individual realization, respectively. The global land monsoon summer precipitation is the average of (a) and (b)

非东部、印度季风区的相关系数可达0.8以上。模式中回报的第6~9年结果(图5d)与第1~4年相似, 只是强度有所减弱。比较图5b, d与图5a, c可以发现, 模式仅合理回报出回报时段内观测中mega-ENSO与非洲季风区、华北夏季降水的正相关关系, 尤其是无法合理再现观测中mega-ENSO与印度季风降水的相关。

图6为观测和MME中AMO指数与北半球夏季季风区降水的相关系数, 观测中北半球季风区大部分地区夏季降水与AMO正相关, 其中北半球通过10%显著性检验的区域位于北非季风区、青藏高原季风区和北美季风区, 最大相关系数处于北美季风区, 高达0.80(图6a, c)。MME合理回报出观测中北非季风区和北美季风区降水与AMO的显著相关, 但是高估了印度南部和华北部分地区夏季降水与AMO的相关。这些高相关区域与图1中模式年代际预测技巧较高的区域一致。MME回报的第1~4年降水与AMO指数的相关系数分布与第6~9年空间分布一致。比较而言, 模式中AMO与NHSM

降水的相关系数大于mega-ENSO, 说明模式中AMO对NHSM降水的调制作用大于mega-ENSO。

从图5和图6可以看出, 模式回报的NHSM降水与mega-ENSO及AMO的显著正相关, 说明模式中mega-ENSO与AMO是调制NHSM降水的主要因子, 当模式中mega-ENSO或AMO出现增加趋势时, NHSM降水亦增加。同时模式中NHSM降水与mega-ENSO, AMO的相关系数明显大于观测, 其可能原因在于观测中降水的年代际变化除了诸如mega-ENSO, AMO等年代际变化因子的调制作用之外, 还包括天气尺度扰动带来的大气噪音。图5和图6给出的是21个模式成员集合平均的结果, 部分消除了大气噪音, 使得模式模拟的降水与年代际变化因子之间的关系更强, 因此相关系数比观测显著得多。

图7给出观测和模式回报的北半球夏季mega-ENSO与AMO的时间演变。对应1960年至1980s中期观测中NHSM降水的减弱趋势, 观测的mega-ENSO和AMO在1960年至1970s末期均存在下降

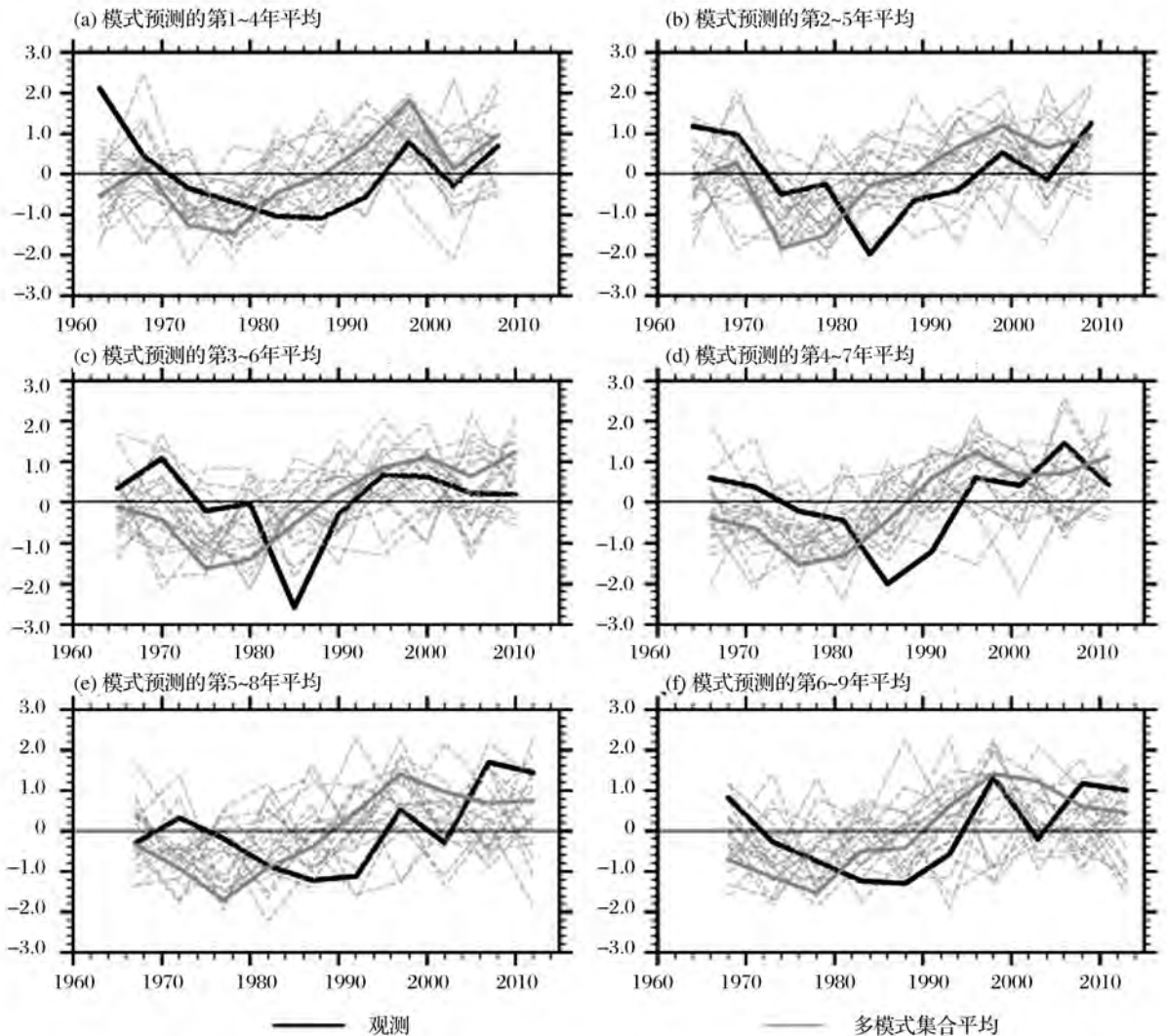


图 4 标准化之后模式预测的第(a) 1~4 年平均, (b) 2~5 年, (c) 3~6 年, (d) 4~7 年, (e) 5~8 年和 (f) 6~9 年及相应年份观测的 NHSM 降水距平

Fig. 4 The normalized precipitation anomalies evolution regional averaged over northern hemispheric land monsoon region (black and blue lines) and northern hemispheric summer monsoon circulation (red and green lines) in observation and MME hindcast for the (a) 1~4 years, (b) 2~5 years, (c) 3~6 years, (d) 4~7 years, (e) 5~8 years and (f) 6~9 years

黑色实线为观测, 灰色实线和虚线分别代表多模式集合平均和每个模式成员结果

The black line, grey line and grey dashed lines denote the observation, multimodel ensemble mean and each realization, respectively

趋势, 在观测中 1970s 初期至 1990s 初期的 NHSM 干旱期, mega-ENSO 指数存在 1970s 末期由正到负的位相转变, 而 AMO 则一直维持在负位相。在 1990s 中期之后 NHSM 降水的增加时期, mega-ENSO 与 AMO 均呈现增加趋势且发生位相由负到正的转变, mega-ENSO 位相转变出现在 2000 年左右, 比 AMO 位相转变滞后 5 年左右。

从图 7 可以看出, MME 中 mega-ENSO 与 AMO

指数在 1960 年至 1970s 末期和 1990s 初期之后均存在减弱和增加趋势, 该特征与观测一致, 同时模式中 2 个指数均与 NHSM 降水显著正相关, 因此模式中模拟的 NHSM 降水在这 2 个时段分别呈现与观测一致的减弱和增加的特征(图 4)。因此, 模式对这 2 个时段 mega-ENSO 和 AMO 演变的合理回报是 NHSM 降水回报技巧的重要来源。1980 年到 1990s 中期, 模式回报模式的 mega-ENSO 与 AMO 最小值

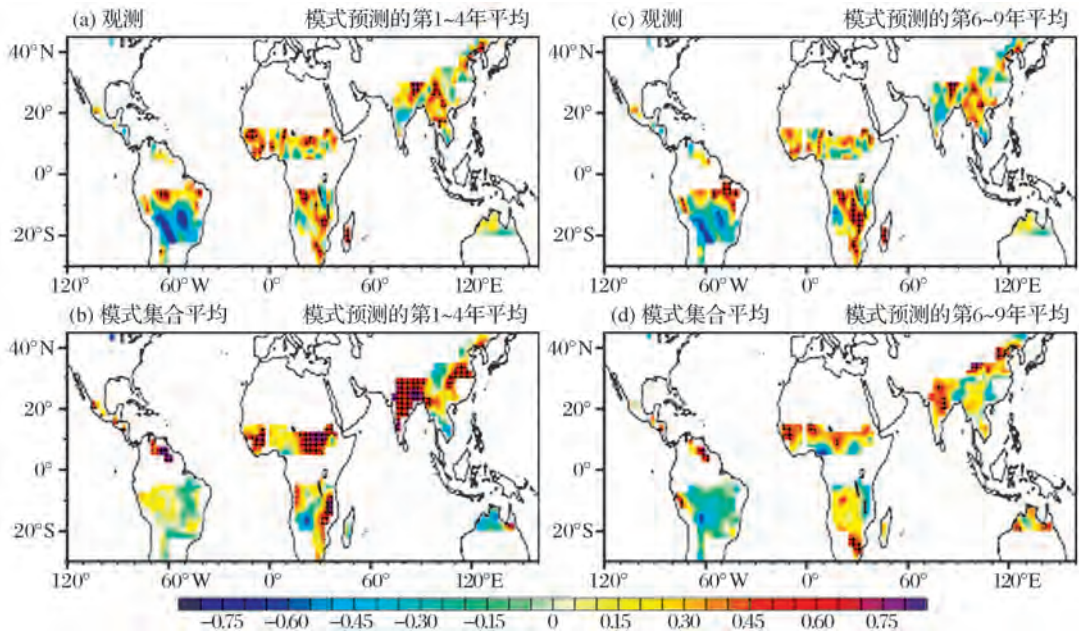


图 5 模式预测的第 1~4 年和第 6~9 年平均的北半球夏季降水与 mega-ENSO 指数的相关系数 (a), (c) 观测, (b), (d) MME  
**Fig. 5 The correlation coefficient between model predicted precipitation in boreal summer and the corresponding mega-ENSO index for the 1~4 years (left panel) and 6~9 years (right panel) derived from (a), (c) observation, (b), (d) MME**  
 划线区域通过 10% 显著性检验, mega-ENSO 指数定义为西太平洋 K 型区域平均的 SST 与东太平洋三角形区域平均的 SST 之差 (具体区域见参考文献 [7])

The dotted areas are statistically significant at 10% level. The mega-ENSO index is defined as the SST difference between the western Pacific K-shape area and eastern Pacific triangle (The regions where the mega-ENSO defined can be found in reference [7])

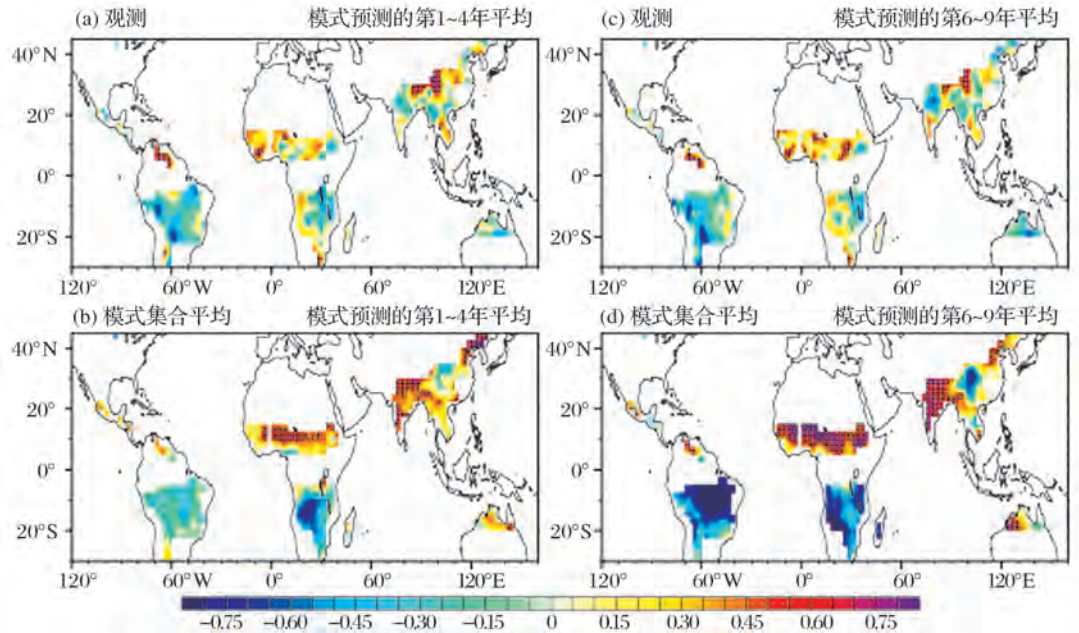


图 6 模式预测的第 1~4 年 (a), (b) 和第 6~9 年 (c), (d) 平均的北半球夏季降水与 AMO 指数的相  
 关系数 (a), (c) 观测, (b), (d) MME

**Fig. 6 The correlation coefficient between model predicted precipitation in boreal summer and the corresponding AMO index for the 1~4 years (left panel) and 6~9 years (right panel) derived from (a), (c) observation, (b), (d) MME**  
 划线区域通过 10% 显著性检验, AMO 指数定义为 (0°~60°N, 80°~0°W) 区域平均 SST 距平与 (60°S~60°N) 区域平均 SST 距平之差 [27]

The dotted areas are statistically significant at 10% level; The AMO index is defined as area-averaged SST anomalies in the (0°~60°N, 80°~0°W) minus the area-averaged near global SST anomalies in the (60°S~60°N) [27]

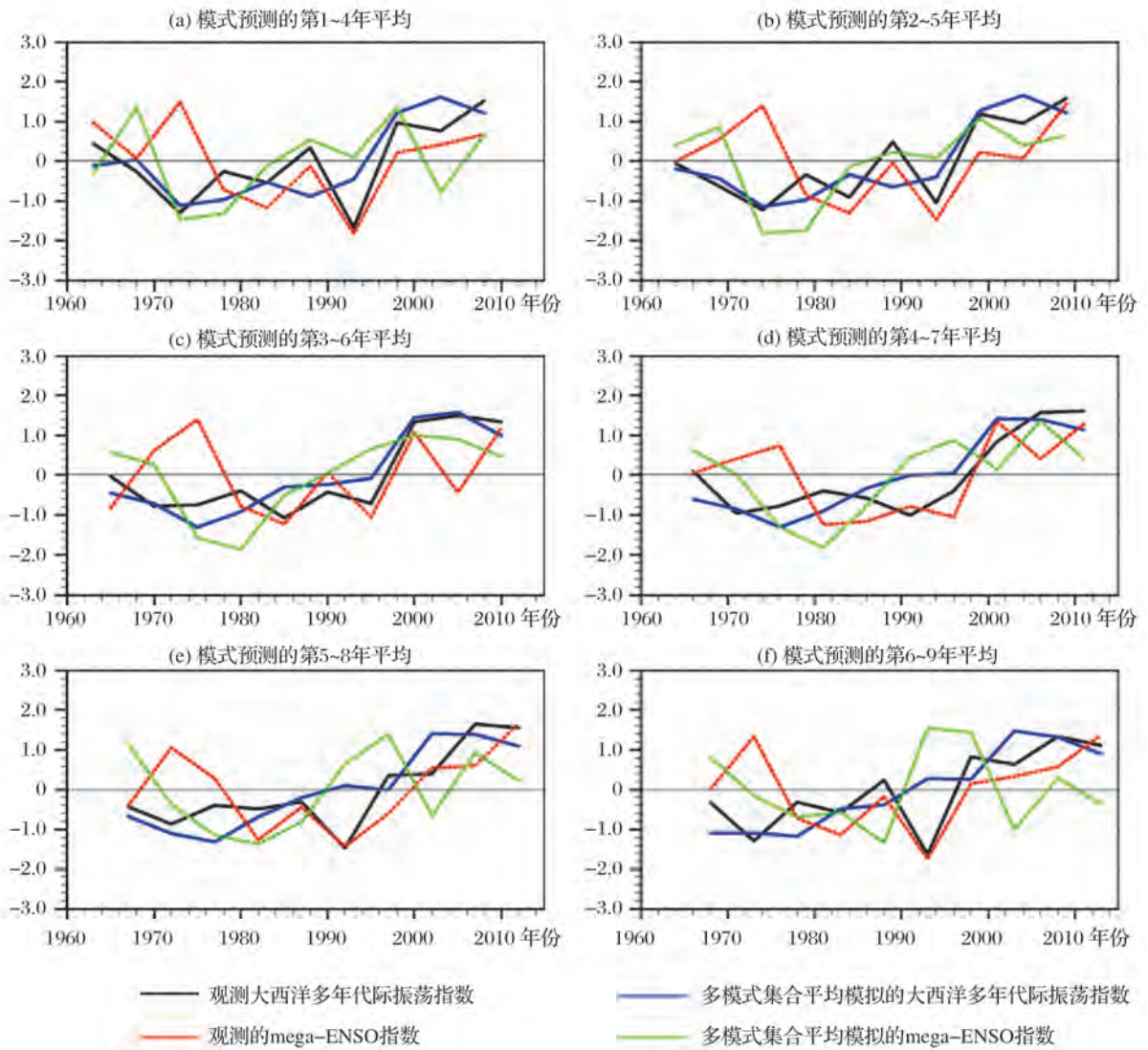


图 7 标准化之后多模式集合平均预测的第(a) 1~4 年平均,(b) 2~5 年,(c) 3~6 年,(d) 4~7 年,(e) 5~8 年和 (f) 6~9 年及相应年份观测的 AMO 指数和 mega-ENSO 指数距平

Fig. 7 The normalized AMO and mega-ENSO indices evolutions in MME hindcast and observation for (a) 1~4 years, (b) 2~5 years, (c) 3~6 years, (d) 4~7 years, (e) 5~8 years and (f) 6~9 years

分别出现在 1972 年和 1980 年左右,之后分别在 1990s 初期和 1980s 转为正位相,1980s 之后 2 个指数均为增加趋势,较之观测的 mega-ENSO 增加趋势分别提前 15 年,进而使得模式模拟的 NHSM 降水最小值出现 1980s 左右,未能合理回报出从 1980 年至 1990s 的干旱期。比较模式对 mega-ENSO 和 AMO 指数的回报,可以发现,模式对 AMO 具有较高的回报技巧,如 1970 年之前的减弱趋势,1970—1990 年的负位相,1970s 初期和 1990s 中期的位相转变,及 1990s 之后的增加趋势。MME 仅能回报出 mega-ENSO 从 1960 年至 1970s 末的下降趋势和 1990s 中

期之后的增加趋势,无法合理再现 mega-ENSO 在 1970s 末和 2000s 初的位相转变。

为了更清楚地体现模式对 mega-ENSO 与 AMO 的回报技巧,图 8 进一步给出模式回报的 2 个指数与观测之间的相关系数,可以看出,模式对 mega-ENSO 的回报技巧比较低,最大相关系数出现在模式回报的第 4~7 年,仅 0.20,未通过显著性检验。模式回报的任意 4 年平均的 AMO 指数与观测之间的相关系数均高于 0.6,通过 10% 显著性检验,其中模式回报的第 3~6 年 AMO 指数与观测相关最大,高达 0.85。可见,ENSEMBLES 对 AMO 具有较好的



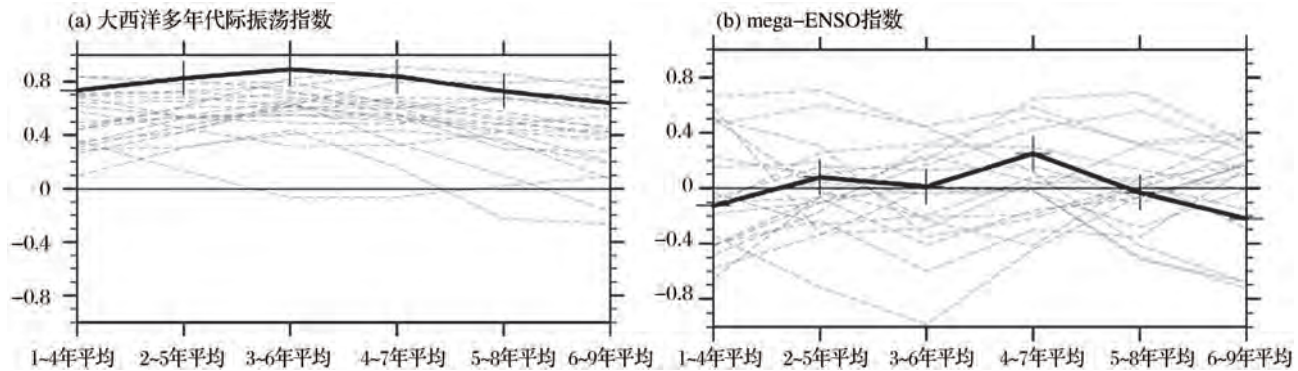


图8 模式预测的4年平均夏季(a)AMO指数与(b)mega-ENSO指数与观测的相关系数随预报时长的变化

Fig. 8 The evolution of correlation coefficient between model predicted 4 years summer mean (a) AMO index and (b) mega-ENSO index and that of observation

年代际回报技巧。

上述分析表明,模式回报的NHSM降水与mega-ENSO和AMO的年代际变化紧密相关,其相关系数及范围明显大于观测,且AMO对NHSM降水年代际变化的调制作用强于mega-ENSO。模式合理回报出mega-ENSO与AMO在1960年至1970s末期的下降趋势和1990s后的增加趋势,进而合理回报出这2个时段NHSM降水的变化。比较而言,模式对AMO的回报技巧显著高于mega-ENSO。虽然ENSEMBLES对AMO的模拟技巧很高,但仍无法再现NHSM降水在1980s中期至1990s初期的干旱期,表明模式对mega-ENSO的回报技巧对NHSM降水预测的重要作用。

## 4 结语

本文采用欧洲联盟ENSEMBLES海气耦合模式对1960—2005年的年代际回报试验结果,评估了其对于全球陆地季风降水年代际变化的回报能力,并探讨了NHSM降水年代际变化可预报性的可能来源,主要结论如下:

(1) 总体而言,ENSEMBLES回报对全球和南半球陆地季风区降水的年代际回报能力有限。全球陆地季风降水与观测之间的高相关区位于北非季风区、印度南部、中国华北地区和北美季风区南部地区,且模式回报的第6~9年技巧略高于第1~4年,说明随着模式回报时长的增加,模式对全球陆地季风降水的年代际回报能力有所提高。

(2) ENSEMBLES可以合理回报出观测中NHSM降水在1960年至1970s末的减弱趋势和1990s中期之后的增强趋势,但是模式中NHSM降水最小

值出现在1970s末期,较之观测的1980s末期提前了近10年,未能回报出1980s中期至1990年代初期北半球陆地季风区的干旱期。

(3) mega-ENSO与AMO是调制NHSM降水的2个重要自然因子。分析发现,ENSEMBLES回报的NHSM降水与mega-ENSO和AMO的正相关系数明显大于观测。ENSEMBLES合理回报出mega-ENSO与AMO在1960年至1970s末期的下降趋势和1990s后的增加趋势,进而合理回报出2个时段内NHSM降水的演变趋势。比较而言,ENSEMBLES对mega-ENSO的回报能力偏弱,最大相关系数仅0.2,但是模式能够合理回报AMO的年代际变化,与观测之间的相关系数高达0.85。虽然ENSEMBLES对AMO的模拟技巧很高,但仍无法再现NHSM降水在1980s中期至1990s初期的干旱期,表明mega-ENSO的回报的重要作用。未来提高mega-ENSO年代际变化的预报能力,是有效提高NHSM降水预报技巧的重要途径之一。

## 参考文献(References):

- [1] Wang Shaowu. Global monsoon[J]. *Advances in Climate Change Research*, 1997, 6(6): 473-474. [王绍武. 全球季风[J]. 气候变化研究进展, 1997, 6(6): 473-474.]
- [2] Fu Congbin, Zeng Zhaomei. Monsoon—The region with the largest variability of precipitation in the world[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(21): 2306-2309. [符淙斌, 曾昭美. 季风区——全球降水变化率最大的地区[J]. 科学通报, 1997, 42(21): 2306-2309.]
- [3] Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(6): 805-813. [曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化和季风[J]. 大气科学, 1998, 22

- (6): 805-813].
- [4] Qian W. Dry/wet alteration and global monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(22): 3 679-3 682.
- [5] Trenberth K, Stepaniak D, Caron J. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(22): 3 969-3 993.
- [6] Wang B, Ding Q. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008, 44(3): 165-183.
- [7] Wang B, Liu J, Kim H, et al. Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(14): 5 347-5 352.
- [8] Zhang Lixia, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. The annual modes of tropical precipitation simulated by LASG/IAP ocean-atmosphere coupled model Fgoals\_s1. 1 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(6): 968-981. [张丽霞, 周天军, 吴波, 等. 气候系统模式 FGOALS\_s1.1 对热带降水年循环模态的模拟[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 968-981.]
- [9] Zhang L, Zhou T. An assessment of monsoon precipitation changes during 1901-2001[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(1/2): 279-296.
- [10] Wang B, Ding Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6), doi:10.1029-2005G2025347.
- [11] Zhou T, Yu R, Li H, et al. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half-century[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(15): 3 833-3 852.
- [12] Hsu P, Li T, Luo J, et al. Increase of global monsoon area and precipitation under global warming: A robust signal? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6), doi: 10.1029/2012GL051037.
- [13] Wang B, Liu J, Kim H, et al. Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008) [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5):1-13.
- [14] Lin R, Zhou T, Qian Y. Evaluation of global monsoon precipitation changes based on five reanalysis datasets[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(3): 1 271-1 289.
- [15] Zhou T, Zhang L, Li H. Changes in global land monsoon area and total rainfall accumulation over the last half century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): doi: 10.1029/2008GL034881.
- [16] Lee J, Wang B. Future change of global monsoon in the CMIP5 [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(1):101-119.
- [17] Zhang L, Zhou T. An assessment of improvements in global monsoon precipitation simulation in FGOALS-s2[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(1): 165-178.
- [18] Kim H J, Wang B, Ding Q. The global monsoon variability simulated by CMIP3 coupled climate models[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(20): 5 271-5 294.
- [19] Polson D, Bollasina M, Hegerl G, et al. Decreased monsoon precipitation in the Northern Hemisphere due to anthropogenic aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(16): 6 023-6 029, doi:10.1002/2014GL060811.
- [20] Liu F, Chai J, Wang B, et al. Global monsoon precipitation responses to large volcanic eruptions[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:1-11, doi:10.1038/Srep 24331.
- [21] Meehl G, Goddard L, Boer G, et al. Decadal climate prediction an update from the trenches[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(2): 243-267.
- [22] Wu B, Chen X, Song F, et al. Initialized decadal prediction by LASG/IAP climate system model FGOALS-s2: Evaluations of strengths and weaknesses [J]. *Advances in Meteorology*, 2015, doi:10.1155/2015/904826.
- [23] Weisheimer A, Doblas-Reyes F, Palmer T, et al. ENSEMBLES: A new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions: Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): 1-6.
- [24] Horris I, Jones P, Osborn T, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the Cru TS3. 10 Dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623-642, doi:10.1002/joc.3711.
- [25] Smith T, Reynolds R, Peterson T, et al. Improvements NOAA's historical merged land-ocean temp analysis (1880-2006) [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(10):2 283-2 296.
- [26] Doblasreyes F, Andreuburillo I, Chikamoto Y, et al. Initialized near-term regional climate change prediction[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1-9, doi:10.1038/ncomms2704.
- [27] Trenberth K, Shea D. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(12): 1-4.

# Assessment of the Decadal Prediction Skill on Global Land Summer Monsoon Precipitation in the Coupled Models of ENSEMBLES\*

Zhang Lixia<sup>1,2</sup>, Zhang Wenxia<sup>1,3</sup>, Zhou Tianjun<sup>1,3</sup>, Wu Bo<sup>1</sup>

(1. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Global monsoon precipitation plays a crucial role in the local social economy and global large-scale circulation and energy cycle. Using the decadal prediction output for 1960-2015 from ENSEMBLES Stream 2, the decadal hindcast skill of climate models on global land monsoon precipitation and the potential source of predictability were examined in this paper. It is found that the decadal variation of global and southern hemispheric land monsoon precipitation is not well hindcasted by ENSEMBLES. However, the Northern Hemispheric land Summer Monsoon (NHSM) precipitation in hindcast is well predicted, including the observed downward trend from 1960 to the late 1970s and upward trend since the 1990s. The main deficiency is that the minimum NHSM precipitation occurred in mid-1970s, which is 10-year earlier than the observation, leading to poor prediction of NHSM precipitation from the mid-1980s to early 1990s. Mega-ENSO and Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) are the two main factored that modulate the decadal variation of NHSM precipitation. The result shows that the relationships of NHSM precipitation with mega-ENSO and AMO in ENSEMBLES are higher than the observation. The climate models well predicted the increase from 1960 to the late 1970s and decrease trend since the 1990s of mega-ENSO and AMO. It is the primary source of the prediction skill on NHSM changes during the two periods. Although AMO is well predicted by ENSEMBLES (highest correlation coefficient with observation is 0.85), the prediction skill of mega-ENSO is limited, leading to poor performance in predicting NHSM precipitation from the mid-1980s to early 1990s. Thus, improving the prediction of mega-ENSO can be seen as one important method of better decadal prediction of NHSM precipitation.

**Key words:** Global monsoon; Decadal prediction; Predictability; Coupled mode.

---

\* **Foundation item:** Project supported by the R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) "Development and research of ensemble decadal climate prediction system based on global climate models FGOALS-s, CAMS and CESM" (No. GYHY201506012); The National Natural Science Foundation of China "Global monsoon: 20<sup>th</sup> Century change simulation and future change" (No: 41330423).

**First author:** Zhang Lixia (1982-), female, Baoding County, Hebei Province, Associate Professor. Research areas include changes of drought and flood over monsoon regions. **E-mail:** lixiazhang@mail.iap.ac.cn