

文章编号: 2096-1618(2023)02-0192-08

全球变暖背景下东亚夏季风强度潜在可预报性增加的分析

张贻¹, 王伟¹, 丁瑞强²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:针对东亚夏季风强度潜在可预报性对全球变暖响应的问题,利用国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)的模拟实验数据,采用信噪比方法预估未来东亚夏季风强度潜在可预报性的变化。研究表明:在共享社会经济路径高等情景 SSP5-8.5 下,15 个模式中共有 14 个模式(93.3%)模拟结果显示未来 100 年(2000-2099 年)相比过去 100 年(1900-1999 年)东亚夏季风强度潜在可预报性增加。未来 100 年厄尔尼诺事件发生次数增多导致 ENSO 变率增加, ENSO 变率的增加会导致更强的夏季热带印度洋海温变率,从而增强夏季西北太平洋反气旋,为东亚夏季风提供更强的外部信号,导致未来 100 年东亚夏季风强度潜在可预报性相较于过去 100 年显著增加。

关键词:气象学;气候可预报性;全球变暖;东亚夏季风强度;CMIP6

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.02.010

0 引言

东亚夏季风(East Asian summer monsoon, EASM)是亚洲气候系统的一个独特组成部分,特点是东亚地区夏季的风向逆转和强降雨^[1-2]。东亚夏季风对中国、韩国、日本、北太平洋西部的亚热带地区和南海的热带地区的天气和气候有深远影响^[3-4]。东亚夏季风向东亚地区输送了大量的水汽,提供了大约 2/3 的年降水量,对东亚地区的农业、经济和数十亿人的生活产生了巨大的影响^[5]。由东亚夏季风引起的干旱和洪水灾害将造成中国巨大的经济损失和人员伤亡,东亚夏季风的异常活动极大地影响了区域经济和社会活动,因此准确预测东亚夏季风的变化是迫切的国家需求。

可预报性是大气固有属性^[6-7],研究东亚夏季风潜在可预报性变化可以提升对气候变化的认识,有助于改善东亚夏季风的预测水平。赵晓川等^[8]利用信噪比方法研究中国季节降水量可预报性的变化特征;施洪波等^[9]研究发现强厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件对亚洲夏季风的预报有积极影响;杨德剑^[10]通过相对熵方法发现东亚夏季风可预报性来源于 ENSO;王会军等^[11]研究发现东亚夏季风与 ENSO 的关系是预测东亚夏季气候的重要基础;Wang 等^[12]发现在预测东亚夏季风时使用多模式集合预报可以提高预报技巧;李娇等^[13]研究发现南海夏季风潜在可预报性年代际变化受西太平洋局地

海温影响;李娇^[14]发现 ENSO 对东亚夏季风强度潜在可预报性的年代际变化有着重要贡献。

全球气候模式是探究历史气候变化机理和预估未来气候变化的重要工具,国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)实验数据陆续发布^[15],新一代全球气候模式在物理过程、参数化方案和分辨率等方面都有不同程度的改进,新一代全球气候模式在未来预估上采用了共享社会经济路径(SSPs)和典型浓度路径(RCPs)相结合的新结构,描述不同社会经济发展路径下人为排放和土地利用的变化。基于 CMIP6 实验,前人已经进行了一系列研究来调查亚洲降水未来的变化^[16-17],然而东亚夏季风强度潜在可预报性对温室效应的响应是一个悬而未决的问题。预测全球变暖下东亚夏季风强度潜在可预报性的变化具有极大的社会和经济意义,可以指导决策者采取相关的有效措施,维护国家安全,推动国家可持续发展。

综上,利用 CMIP6 的结果,采用信噪比方法分别计算前后 100 年东亚夏季风强度潜在可预报性大小,预估在 SSP5-8.5 情景下未来东亚夏季风强度潜在可预报性变化,探究东亚夏季风强度潜在可预报性对全球变暖的响应及可能原因。

1 资料与方法

1.1 资料

选取的月平均海温资料来自美国国家海洋大气局(NOAA)的长期重建逐月海表面温度格点数据(ERSSTv5),

格点分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。逐日环流场资料采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA20C 数据集,格点分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

对 26 个 CMIP6 模式数据进行分析,使用 1900–2014 年的历史时期模拟和 2015–2099 年的共享社会经济路径高等情景 SSP5-8.5 数据。CMIP6 数据可从网站获取 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), 26 个 CMIP6 模式的详细信息见表 1。使用每个模式的第一个集成员 (即 r1i1p1), 通过最近邻插值法将所有模式资料统一插值成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的标准网格。

表 1 26 个全球气候模式概况

序号	名称	国家/地区
1	AWI-CM-1-1-MR	德国
2	BCC-CSM2-MR	中国
3	CAMS-CSM1-0	中国
4	CanESM5	加拿大
5	CESM2	美国
6	CMCC-CM2-SR5	意大利
7	CMCC-ESM2	意大利
8	CNRM-CM6-1	法国
9	CNRM-CM6-1-HR	法国
10	CNRM-ESM2-1	法国
11	EC-Earth3	欧洲
12	EC-Earth3-CC	欧洲
13	EC-Earth3-Veg	欧洲
14	EC-Earth3-Veg-LR	欧洲
15	FGOALS-g3	中国
16	GFDL-CM4	美国
17	IITM-ESM	印度
18	INM-CM4-8	俄罗斯
19	INM-CM5-0	俄罗斯
20	IPSL-CM6A-LR	法国
21	MIROC6	日本
22	MIROC-ES2L	日本
23	MPI-ESM1-2-HR	德国
24	MPI-ESM1-2-LR	德国
25	NESM3	中国
26	TaiESM1	泰国

1.2 东亚夏季风指数

东亚夏季风指数的定义有多种不同方式,本文选张庆云等^[18]定义的东亚夏季风指数,该东亚夏季风强度指数定义为 ($10^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$) 与 ($25^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$) 区域的 850 hPa 平均纬向风差,该指数能够很好地捕捉到与东亚夏季风相

关的环流系统,如热带季风槽和东亚梅雨锋之间对流活动的跷跷板变化形态。

1.3 信噪比方法

信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 方法^[19]假设气候变量存在两部分年际变率,一部分是来自大气的外部强迫可预测信号,如海表温度 (SST)、雪盖、海冰、太阳辐射等;另一部分是不可预测的噪声,如季节内振荡和天气干扰。方差用于表征年际变率的强度,潜在可预报问题是衡量年际方差中有多少可以表示出来,用信噪比方法来衡量,即总方差与噪声方差的比值。方差分析法^[20]是广泛应用于大气潜在可预报性研究的信噪比计算方法之一,计算公式如下:

$$F = \frac{\sum_{s=1}^J (x_{s*} - x_{**}) / (J-1)}{\sum_{s=1}^J \sum_{t=1}^N (x_{st} - x_{s*})^2 / NJ(N-1)}$$

式中, $x_{s*} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_{st}$, $x_{**} = \frac{1}{J} \sum_{s=1}^J x_{s*}$, 年序号 $s=1, 2, 3, \dots$, J , 季内日序号 $t=1, 2, 3, \dots, N$, $J=100$, $N=92$ 。

1.4 Bootstrap 检验

Bootstrap 检验^[21]用于检查未来变化是否具有统计学意义。对过去 100 年 (1900–1999 年) 的 15 个模式结果进行 10000 次独立随机再抽样,以构建 15 个模式的 10000 次实测,在随机再抽样过程中,样本从 15 个选定模型中独立随机抽取,任何模式都可以被再次选择。对于未来 100 年 (2000–2099 年) 同样如此,计算两个时期的 10000 次实测的标准差以及均值,如果两个时期的均值差异大于标准差的总和,那么两个时期的变化在 95% 的置信水平上是有统计学意义的。

2 结果与分析

2.1 模式筛选

2.1.1 东亚夏季风模拟与评估

东亚夏季风气候态的地理分布、强度和空间变异性在大气环流模式中是否能可靠地再现,关系到气候模式对东亚夏季风环流模拟预测的可信度。东亚夏季风环流最显著的特征是夏季东亚上空的低层南风,对 $20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ 和 $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 850 hPa 夏季经向风场的气候态进行评估,用于评估 26 个 CMIP6 模式重现当前东亚夏季风气候态的能力。基于 320 个网格点,计算了 26 个 CMIP6 模式与 ERA20C 再分析数据之间 1985–2014 年 850 hPa 夏季经向风的空间相关系

数以及标准偏差。从泰勒图上可以看出,尽管各CMIP6模式之间存在着差异(图1),但是除去CAMS-CSM1-0模式,各模式与ERA20C再分析资料的空间相关系数为0.36~0.87,使用双尾t检验,空间相关系数在95%的置信度下具有统计学意义。26个CMIP6模式相对于再分析数据的标准偏差范围为0.45~1.40。上述结果表明,大部分CMIP6模式在模拟东亚上空850 hPa夏季经向风气候态的地理分布和空间变化方面具有合理的能力。

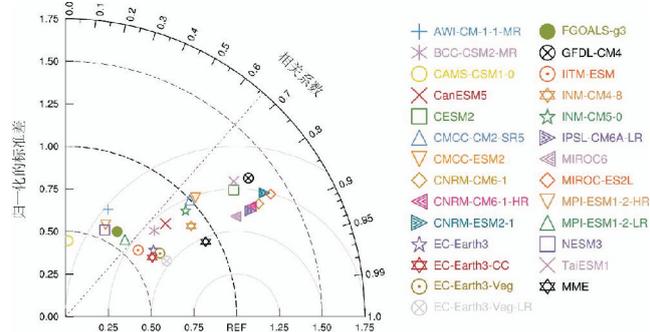
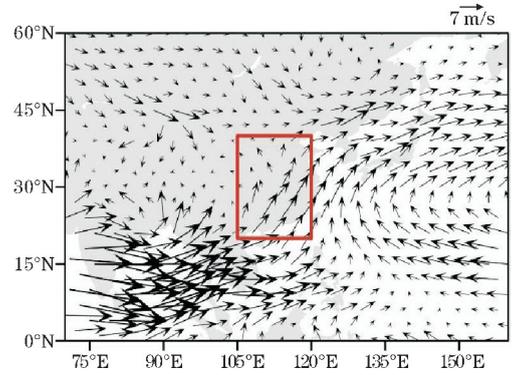


图1 26个CMIP6历史时期数据和ERA20C再分析数据夏季850 hPa的气候态经向风泰勒图

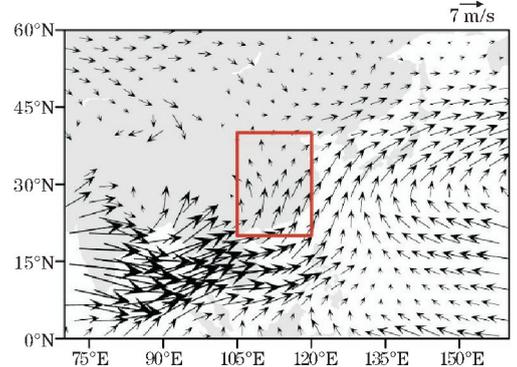
为确定对东亚夏季风模拟相对可靠的模式,挑选出与再分析资料的空间相关系数大于0.66的模式,0.66是利用Bootstrap方法得到的模拟与观测850 hPa夏季经向风场之间空间相关系数10000次抽样的标准差下限。20个CMIP6模式的模拟效果能通过该标准,这20个CMIP6模式可以很好地再现东亚夏季风的气候态。对挑选的20个模式进行多模式集合处理,发现这20个CMIP6模式的多模式集合能够很好地再现东亚地区850 hPa大尺度南风的夏季气候特征(图2)。20个CMIP6模式的多模式集合(黑色六芒星)与再分析资料的空间相关系数为0.88,标准偏差为0.93,比所有单个CMIP6模式的表现都好。

2.1.2 ENSO-EASM 关系评估

ENSO与东亚夏季风存在显著的负相关关系,是东亚夏季风可预报性的重要来源,因此计算20个挑选的CMIP6模式与ERA20C再分析数据1900-1999年的DJF(12-2月)时期Niño 3.4指数与东亚夏季风指数的相关系数(图3),可以看到ERA20C再分析资料中东亚夏季风与ENSO的相关系数为-0.28(通过95%显著性检验),但不是所有模式都能很好地模拟东亚夏季风与ENSO之间的关系,部分模式低估了东亚夏季风与ENSO之间的关系,20个CMIP6模式里有15个模式可以模拟出ENSO与东亚夏季风的显著负相关关系(通过95%显著性检验),另外5个模式只能模拟出两者间微弱的联系。



(a) 观测



(b) 模式平均

图2 850 hPa夏季气候态风场图

(红色矩形为20°N~40°N,105°E~120°E)

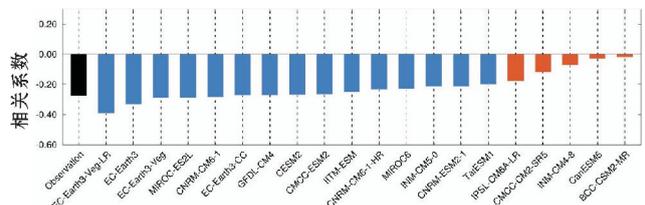


图3 东亚夏季风指数与冬季Niño 3.4指数的相关系数图

(蓝条表示两者负相关关系在95%的置信度下具有统计学意义的模式)

为描述观测到的前冬ENSO对东亚夏季环流的影响,将东亚地区850 hPa的位势高度场以及风场回归到DJF时期的Niño 3.4指数,在观测中前冬ENSO对东亚夏季上空的环流影响如图4(a)所示,东亚的副热带地区上空伴随着气压正异常中心,呈现异常的西北太平洋反气旋,异常反气旋西伸覆盖中国南部沿海地区,而负异常中心处在中高纬度地区,正负异常的交接处于中国长江流域地区,分别对择优的15个模式以及未选择的5个模式进行多模式集合,可以看到15个模式的多模式集合相当好地再现了观测到的ENSO对东亚夏季环流的影响(图4b),东亚副热带地区上空伴随着强气压正异常中心,虽然强度较观测有所偏弱,但整体分布及强度比另外5个模式的多模式集合更合理(图4c),因此后续研究使用这15个较为真实模拟了ENSO-EASM关系的模式探究东亚夏季风强度潜在可预报性对温室效应的响应。

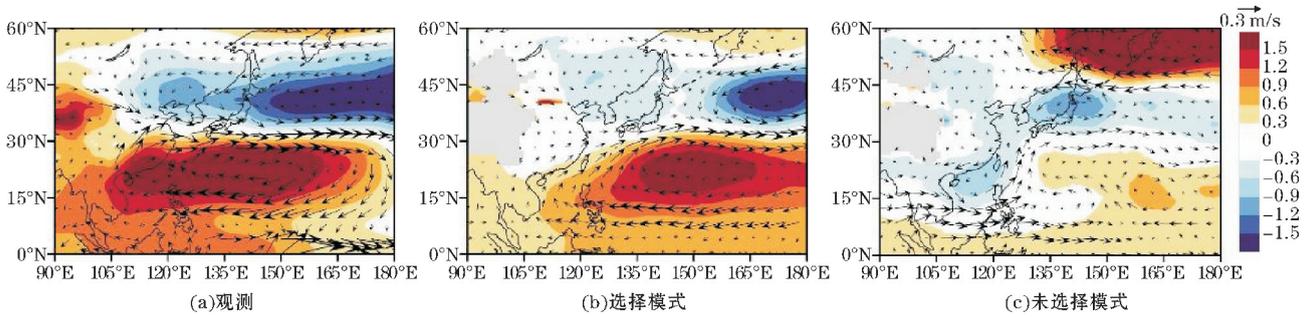


图 4 夏季 850 hPa 风场和位势高度场与冬季 Niño 3.4 指数的回归分布

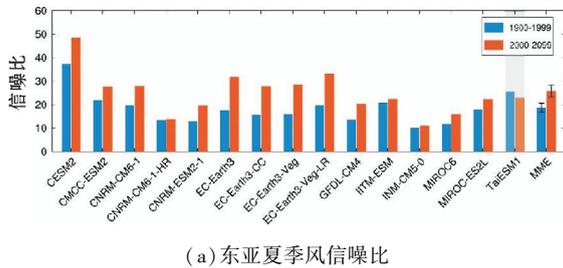
2.2 东亚夏季风强度潜在可预报性对全球变暖的响应

2.2.1 未来情景东亚夏季风强度潜在可预报性以及 ENSO 变率的变化

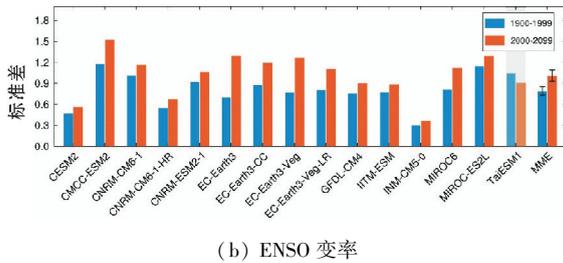
挑选的 15 个 CMIP6 模式资料受 2014 年之前的历史时期强迫和 2015 年以后的共享社会经济路径 SSP5-8.5 高等排放情景的影响。对 15 个模式使用信噪比方法分别计算了过去 100 年(1900-1999 年)和未来 100 年(2000-2099 年)两个时期东亚夏季风指数的信噪比(图 5a),尽管各 CMIP6 模式计算的东亚夏季风信噪比存在数值大小上的差异,但是各模式的信噪比大于 1,即气候信号大于噪声,东亚夏季风不管是过去时期还是未来时期都是可预报的,此外只有 TaiESM1 模式的模拟结果显示未来时期东亚夏季风强

度潜在可预报性相比过去时期是减少的,15 个模式中有 14 个模式(93.3%)模拟了未来时期东亚夏季风强度潜在可预报性相比过去时期是增加的,未来时期的东亚夏季风强度潜在可预报性的多模式集合相比过去时期增加了 37.3%,根据 Bootstrap 检验,多模式集合的增加显著高于 95% 的置信度水平(图 6a)。

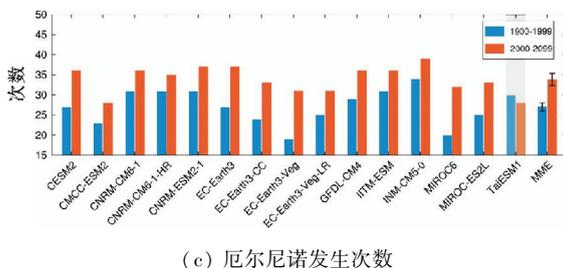
进一步探究 ENSO 对温室效应的响应情况,为定量衡量 ENSO 未来强度的变化,通过计算 Niño 3.4 指数来衡量 ENSO,首先对受 2014 年之前的历史时期强迫和 2015 年以后的共享社会经济路径 SSP5-8.5 高等排放情景的 200 年 CMIP6 资料进行海温二次去趋势处理,然后分别计算过去以及未来时期 Niño 3.4 指数的标准差代表 ENSO 变率,可以看到模型间对 ENSO 变率增加的共识是显著的(图 5b),15 个模式中有 14 个模式(93.3%)模拟了未来时期 ENSO 变率相比过去时期是增加的,未来时期的 ENSO 变率的多模式集合相比过去时期增加了 27.5%,根据 Bootstrap 检验,多模式集合的增加显著高于 95% 的置信度水平(图 6b),由于 ENSO 变率对温室效应的响应,ENSO 变率在未来显著增加,为东亚夏季风提供更强的外部信号,从而增加东亚夏季风强度的可预报性。



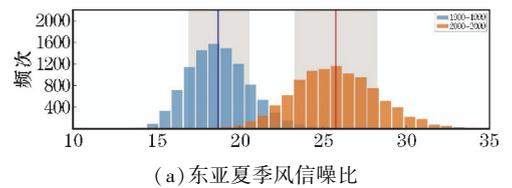
(a) 东亚夏季风信噪比



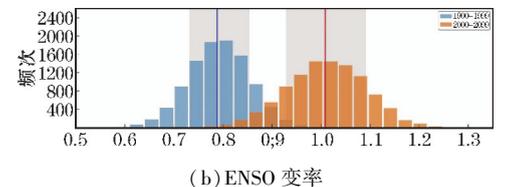
(b) ENSO 变率



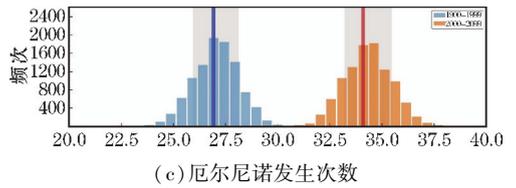
(c) 厄尔尼诺发生次数



(a) 东亚夏季风信噪比



(b) ENSO 变率



(c) 厄尔尼诺发生次数

图 5 15 个选择模型及多模式集合过去和未来时期比较图

图 6 Bootstrap 检验图(蓝线和红线分别表示过去和未来时期 10000 次抽样的平均值)

2.2.2 未来情景东亚夏季风强度潜在可预报性与 ENSO 变率关系

拉尼娜事件和厄尔尼诺事件的强度具有不对称性,拉尼娜事件强度通常会比厄尔尼诺事件弱^[22]。使用模式中 Niño 3.4 的 0.75 倍标准差作为阈值,当 3 个月滑动平均 Niño 3.4 指数大于或等于阈值,并持续至少 5 个月,就定义为发生一次厄尔尼诺事件。图 5(c) 显示了 15 个模式过去以及未来时期厄尔尼诺事件发生的次数,可以看到同样对应 15 个 CMIP6 模式中有 14 个(93.3%)模式的结果表明未来 100 年厄尔尼诺事件发生次数多于过去 100 年。多模式集合结果显示未来 100 年发生了大约 34 次厄尔尼诺事件,而过去 100 年发生了大约 27 次厄尔尼诺事件,未来时期厄尔尼诺事件相比过去时期增加了 25.9%。根据 Bootstrap 检验,多模式集合的厄尔尼诺事件增加显著高于 95% 的置信度水平(图 6c),在未来时期更多的厄尔尼诺事件将导致更强的 ENSO 变率。

图 7 横坐标代表不同模式未来 100 年 ENSO 变率与过去 100 年 ENSO 变率的差值,纵坐标代表不同模式未来 100 年东亚夏季风 SNR 与过去 100 年的差值,可以看到 ENSO 变率增强,有利于东亚夏季风强度潜在可预报性的增加,ENSO 变率增加的越多,东亚夏季风强度潜在可预报性对应增加也更多,并且 15 个模式 ENSO 变率与东亚夏季风强度潜在可预报性的变化呈现较好的关系,两者相关系数达到 0.77,通过了 95% 的置信度水平,对于 ENSO 变率与东亚夏季风强度潜在可预报性的关系在不同模式中有很好的共识。

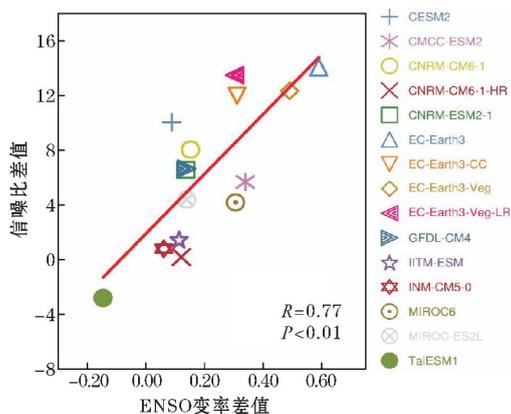


图 7 ENSO 变率与东亚夏季风信噪比未来时期相对过去时期变化的模式关系散点图

2.3 未来情景 ENSO 影响东亚夏季风强度潜在可预报性机制

2.3.1 ENSO、热带印度洋海温变率以及西北太平洋反气旋变率关系

许多研究探讨了 ENSO 影响东亚夏季风的相关机

制。Wang 等^[23]认为 ENSO 产生的罗斯贝波通过风-蒸发-海温反馈机制抑制西北太平洋反气旋; Xie 等^[24]表明印度洋暖 SST 能够激发开尔文波进而抑制西北太平洋上空的对流从而影响西北太平洋反气旋; Stuecker 等^[25]提出了“组合模式”理论,试图解释厄尔尼诺期间西北太平洋反气旋的形成和维持。这些研究表明 ENSO 影响东亚夏季风离不开西北太平洋反气旋的关键作用,西北太平洋反气旋通过影响西北太平洋上空的对流以及增强东亚上空的降水来传达 ENSO 对东亚夏季风的影响。

图 8 反映了多模式对于未来时期冬季 ENSO、夏季热带印度洋海温变率以及西北太平洋反气旋变率变化关系。其中热带印度洋海温变率是根据热带印度洋区域(20°S~20°N,40°E~100°E)海温指数^[24]的标准差定义的。夏季西北太平洋反气旋指数定义为夏季平均 850 hPa 位势高度异常值在最大年际变率中心(15°N~25°N,115°E~150°E)的平均值^[26],可以看到未来时期对比过去时期 ENSO 变率增强的 14 模式,对应的夏季热带印度洋海温变率以及夏季西北太平洋反气旋有所增强,未来时期 ENSO 变率增加导致夏季热带印度洋海温变率增加,15 个模式的 ENSO 变率与夏季印度洋海温变率呈现较好的关系,在不同模式中有很好的共识,两者相关系数达到 0.84,通过了 95% 的置信度水平。由于未来时期夏季热带印度洋海温变率的增加,印度洋海温对西北太平洋反气旋施加更强的影响。夏季热带印度洋海温变率与西北太平洋反气旋变率之间的模型相关性达到 0.79,通过了 95% 的置信度水平。同样可以看到 ENSO 变率增强程度更大的模型,西北太平洋反气旋变率增加更大,ENSO 变率变化和西北太平洋反气旋变率变化之间的模型间相关性达到 0.78,通过了 95% 的置信度水平。这说明未来 ENSO 变率增加会通过影响印度洋海温变率,增强西北太平洋反气旋对东亚夏季风的影响,从而提高东亚夏季风外部信号,有利于东亚夏季风潜在可预报性的增加。

2.3.2 多模式集合结果

多模式集合平均法假设各气候模式相互独立,采用多个模式的平均弥补模式的不完整性,从而获得更好的模拟效果,在 SSP5-8.5 情景下,15 个模式的多模式集合结果表明,在未来 100 年冬季热带太平洋海温变率相比过去 100 年增加的大值中心分布在 Niño 3.4 海温区(图 9a),该海温区变率的增加通过了 95% 的置信度水平,图 9(b)是未来 100 年夏季热带印度洋海温变率减去过去 100 年的海温变率分布图,可以看到整个热带印度洋海温变率有显著增加。

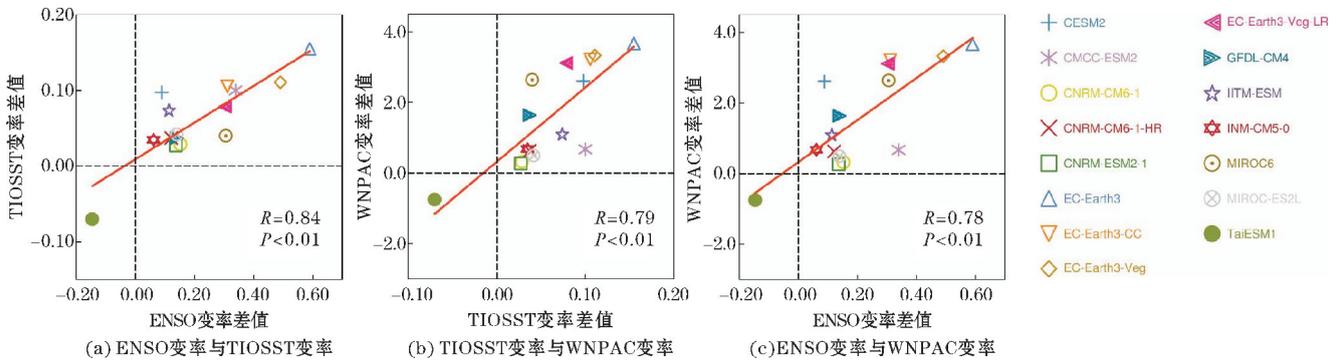


图 8 ENSO、TIOSST 与 WNPAC 变率三者未来时期相对过去时期变化的模式关系散点图

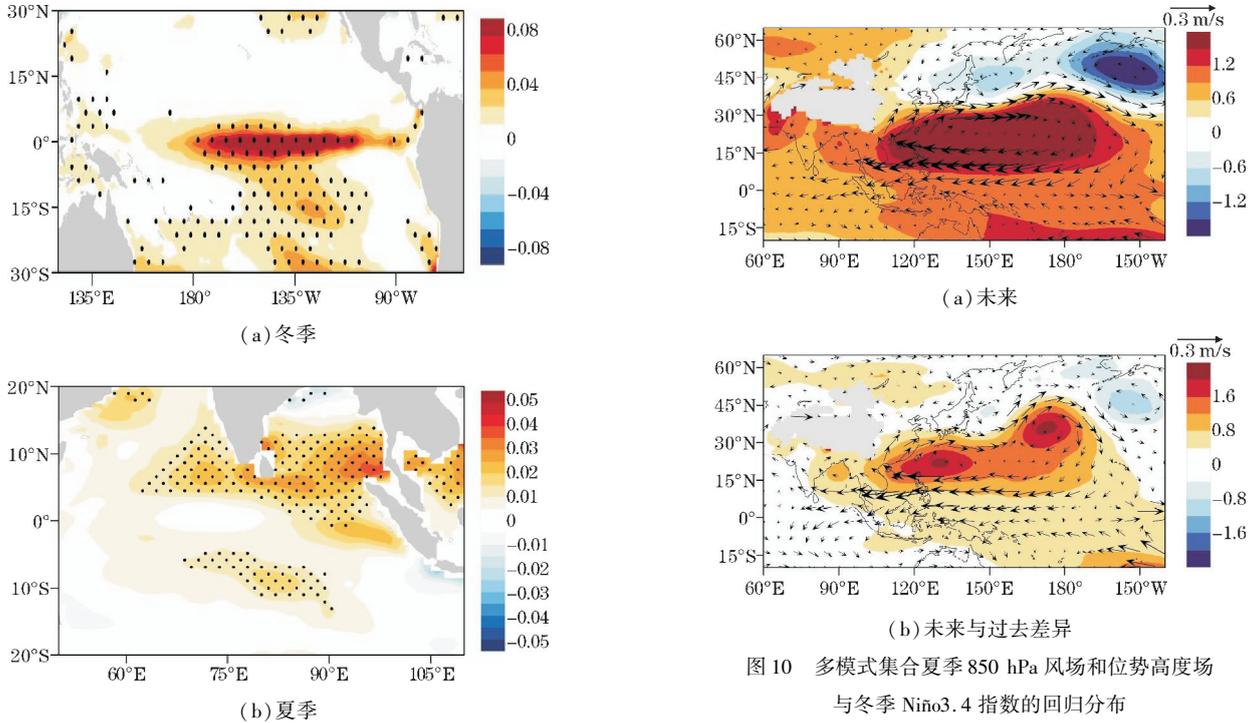


图 9 未来与过去时期海温变率差异图

(打点区域表示差异显著性通过 95% 信度检验)

为进一步描述未来时期 ENSO 对东亚夏季风环流影响的变化,使用 200 年的 Niño 3.4 指数,以增强模型间的可比性,通过将东亚地区 850 hPa 的位势高度场以及风场回归到 DJF 时期 Niño 3.4 指数,然后将回归系数乘以 Niño 3.4 指数的一倍标准差值,可以看到未来时期 ENSO 通过影响东亚上空的环流来影响东亚夏季风(图 10a),西北太平洋上空伴随着大范围的气压正异常,异常反气旋西伸覆盖中国东南部沿海地区,而气压负异常中心位于北太平洋,表明未来时期 ENSO 通过影响东亚上空的环流来影响东亚夏季风。图 10(b) 显示出未来东亚上空环流对 ENSO 响应强于过去时期,更强的 ENSO 变率以及东亚地区环流对 ENSO 响应的增加导致未来时期西北太平洋反气旋变率的增加,从而为东亚夏季风提供更强的外部可预测性信号,导致东亚夏季风强度潜在可预报性变得更高。

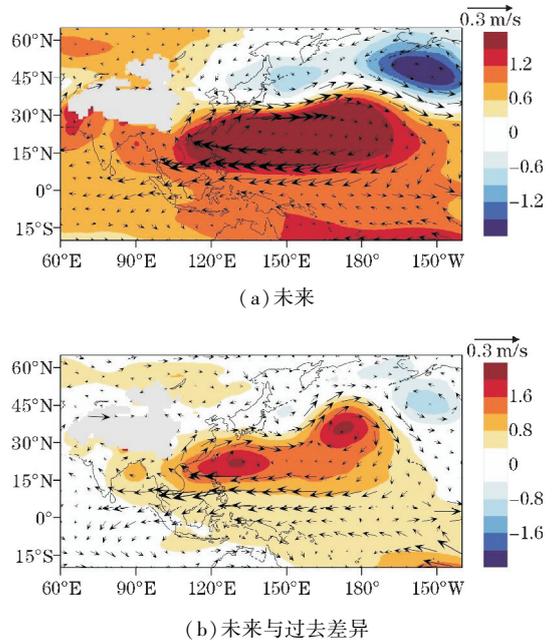


图 10 多模式集合夏季 850 hPa 风场和位势高度场与冬季 Niño3.4 指数的回归分布

3 结论

利用 CMIP6 的模式输出结果以及 ERA20C 再分析观测资料,首先通过评估 26 个全球气候模式对东亚夏季风的模拟能力,筛选出 20 个对东亚夏季风具有较好的模拟效果的 CMIP6 模式,而后在 20 个模式中进一步择优选择 ENSO 和东亚夏季风关系模拟较好的 15 个模式,采用信噪比方法预估了 SSP5-8.5 情景下东亚夏季风强度潜在可预报性在 21 世纪的变化,所得主要结论有:

(1) 大部分 CMIP6 模式对东亚地区夏季经向风有合理的模拟能力,模式间的一致性较好,20 个择优模式的多模式集合对东亚夏季风空间及强度上有很好的模拟效果,20 个模式中有 15 个模式能模拟出 ENSO 和东亚夏季风之间显著负相关关系,15 个模式的多模式集合很好地再现了观测中东亚夏季风对前冬 ENSO

响应的空间模态。

(2)在共享社会经济路径高等情景 SSP5-8.5下,15个模式中有14个模式(93.3%)模拟出未来100年东亚夏季风强度潜在可预报性相对于过去100年显著增加,进一步发现15个模式有14个模式(93.3%)模拟了未来100年 ENSO 变率相对于过去100年显著增加,而模式间前冬 ENSO 变率与东亚夏季风强度潜在可预报性有显著的正相关关系,未来时期 ENSO 变率的增加归因于未来100年厄尔尼诺的发生次数有显著增加,更多的厄尔尼诺事件导致更强的 ENSO 变率,进而导致东亚夏季风强度潜在可预报性的升高。

(3)在 SSP5-8.5情景下,未来时期增强的前冬热带太平洋海温变率会导致更强的夏季热带印度洋海温变率,从而增强西北太平洋反气旋,强的西北太平洋变率为东亚夏季风提供更强的外部信号,通过以上过程, ENSO 海温变率在未来时期显著增加,对东亚夏季风影响增强,使东亚夏季风外部信号增加,导致未来100年东亚夏季风强度潜在可预报性相比过去100年显著升高。

参考文献:

- [1] 陈隆勋,张博,张瑛. 东亚季风研究的进展[J]. 应用气象学报,2006(6):711-724.
- [2] 蒋诗威,周鑫. 中国东南地区中世纪暖期和小冰期夏季风降水研究进展[J]. 地球科学进展,2019,34(7):9.
- [3] 何金海,赵平,祝从文,等. 关于东亚副热带季风若干问题的讨论[J]. 气象学报,2008(5):683-696.
- [4] Tao S Y. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China[J]. Monsoon meteorology,1987:60-92.
- [5] 黄荣辉,周连童. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究[J]. 自然灾害学报,2002(1):1-9.
- [6] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of atmospheric sciences,1963,20(2):130-141.
- [7] Li J,Chou J. Existence of the atmosphere attractor[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,1997,40(2):215-220.
- [8] 赵晓川,吴洪宝,何浪. 中国季降水量的气候噪声和潜在可预报性估计[J]. 南京气象学院学报,2008,31(6):819-827.
- [9] 施洪波,周天军,万慧,等. SMIP2 试验对亚洲夏季风的模拟能力及其可预报性的分析[J]. 大气科学,2008,32(1):36-52.
- [10] 杨德剑. 亚洲夏季风季节可预报性的表征和评估研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [11] 王会军,周广庆,林朝晖. 我国近年来短期气候预测研究的若干进展[J]. 气候与环境研究,2002(2):220-226.
- [12] Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/ClipAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004) [J]. Climate Dynamics,2009,33(1):93-117.
- [13] 李娇,丁瑞强,吴志伟,等. 南海夏季风强度潜在可预报性的年代际变化及可能原因[J]. 气候与环境研究,2019,24(3):302-312.
- [14] 李娇. 东亚夏季风可预报性的年代际变化及可能原因[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.
- [15] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. Geoscientific Model Development,2016,9(5):1937-1958.
- [16] He C, Zhou W. Different enhancement of the East Asian summer monsoon under global warming and interglacial epochs simulated by CMIP6 models: role of the subtropical high [J]. Journal of Climate,2020,33(22):9721-9733.
- [17] Ha K J, Moon S, Timmermann A, et al. Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP6 simulations [J]. Geophysical Research Letters,2020,47(8).
- [18] 张庆云,陶诗言,陈烈庭. 东亚夏季风指数的年代际变化与东亚大气环流[J]. 气象学报,2003(5):559-568.
- [19] Trenberth K E. Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part II: Potential predictability [J]. Monthly Weather Review,1984,112(12):2369-2379.
- [20] Jones R H. Estimating the variance of time averages [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,1975,14(2):159-163.
- [21] Yang Y, Wu L, Guo Y, et al. Greenhouse warming intensifies north tropical Atlantic climate variability [J]. Science advances,2021,7(35).
- [22] Monahan A H, Dai A. The spatial and temporal structure of ENSO nonlinearity [J]. Journal of Climate,2004,17(15):3026-3036.

- [23] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13 (9): 1517–1536.
- [24] Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33 (4): 411–432.
- [25] Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (3): 1093–1111.
- [26] Wang B, Xiang B, Lee J Y. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(8): 2718–2722.

Enhanced Potential Predictability of East Asia Summer Monsoon Intensity under Global Warming

ZHANG Yi¹, WANG Wei¹, DING Ruiqiang²

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to investigate the impact of global warming on the potential predictability of East Asia summer monsoon (EASM) intensity, the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) simulated experimental data is used and the method of signal-to-noise ratio approach is used to predict changes in the potential predictability of future EASM intensity. The results show that 14 out of 15 models (93.3%) simulated under the Shared Society-economic Pathways (SSP) 5-8.5 scenario show an increase in the potential predictability of EASM intensity in the next 100 years (2000–2099) compared to the last 100 years (1900–1999). An increase in the number of El Niño events over the next 100 years leads to an increase in ENSO variability, which leads to stronger summer tropical Indian Ocean SST variability, which enhances the summer northwest Pacific anticyclone and provides a stronger external signal for the EASM, leading to a significant increase in the potential predictability of EASM intensity over the next 100 years compared to the past 100 years.

Keywords: meteorology; climate predictability; global warming; East Asian summer monsoon intensity; CMIP6