

2022-08-02T16:00

创新点:

(1) 本文首次开展德国气候预测系统 (GCFS2) 对东亚冬季风 (EAWM) 预测性能的全面研究。GCFS2 对一个与中高纬环流密切相关的东亚冬季风指数具有较高的预测技巧, 优于以往研究所涉及的模式。

(2) 前人研究表明 EAWM 技巧的预测源来自于 ENSO 信号, 本文进一步指出 GCFS2 能够合理地再现观测中的 EAWM-ENSO 关系及 ENSO 遥相关, 有助于提前几个月预测 EAWM。

(3) 本文发现北极海冰变化对 EAWM 预测的重要性, 首次提出冬季巴伦支—喀拉海区域海冰覆盖度可以作为西伯利亚高压的预测源, 进而提高 EAWM 的预测技巧。

重要意义:

(1) 对于未来改进模式性能, 提高 EAWM 的预测能力具有较高的参考价值。

(2) 海冰过程对 EAWM 预测很重要。改进模式的海冰过程及海冰初始化, 最终提高模式对海冰自身, 及与海冰过程相联系的大气遥相关的预测能力显得尤为重要, 这样可以提高模式对中高纬大气的预测能力。

(3) GCFS2 对于实际业务中预测 EAWM 具有一定的参考价值。

德国气候预测系统中东亚冬季风的季节预测及可预报性

吴昱树¹ 陈权亮² 龚海楠³ 周涛⁴ 皇彦¹

¹ 乌兰察布市气象局, 乌兰察布 012000

² 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 61022

³ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

⁴ 运城市气象局, 运城 044000

摘要 本研究使用德国气候预测系统(German Climate Forecast System, GCFS2)输出的回报数据(1993~2016年)对东亚冬季风(EAWM)的预测性能进行全面评估。GCFS2很好的预测了EAWM气候态的主要特征,包括西伯利亚高压、阿留申低压、东亚大槽、东亚高空急流及东亚上空的地表气温和降水,并可以熟练地预测东亚大槽及东亚地表气温的年际变化。GCFS2对一个海平面气压定义的EAWM指数(EAWMI)显示出了预测技巧,同时可以很好的预测与EAWM相关的位于海洋上的大气环流、地表气温及降水异常。GCFS2中EAWM的预测技巧主要得益于对观测中的EAWM-ENSO关系及ENSO遥相关的成功再现,模式中增强的EAWM-ENSO(强于观测,观测中整个24年(1993~2016)EAWM与ENSO的相关系数为-0.46)关系,有助于提前2个月或更长时间预测EAWM。GCFS2中12月初初始化的EAWMI在去除ENSO信号后仍有0.42的预测技巧,说明有另一预测源,为冬季巴伦支—喀拉海区域海冰覆盖度(BK_SIC)。观测中BK_SIC减少,增强西伯利亚高压,EAWM从而增强;模式中BK_SIC的变化可以增加西伯利亚高压东北部的可预测性,使得12月初初始化的EAWM预测技巧增加。

关键词 GCFS2 季节预测 东亚冬季风 ENSO 海冰

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Seasonal prediction and Predictability of East Asian winter monsoon in German Climate Forecast System

WU Yushu¹, CHEN Quanliang², GONG Hainan³, ZHOU Tao⁴, and HUANG Yan¹

¹ Ulanqab Meteorological Bureau, Ulanqab 012000

² College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

³ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

⁴ Yuncheng Meteorological Bureau, Yuncheng 044000

ABSTRACT This study assesses the prediction performance of the East Asian Winter Monsoon (EAWM) using seasonal hindcast data(1993-2016) from the German Climate Forecast System(GCFS2). Main features of the

收稿日期 2022-04-28; 网络预出版日期

作者简介 吴昱树, 男, 1989年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事气候预测研究。E-mail:593053968@qq.com

通讯作者 陈权亮, E-mail: chenql@cuit.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目(2018YFC1507103)和国家自然科学基金(42005057、41925020)

Funded by The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1507103) and National Natural Science Foundation of China (42005057 and 41925020)

EAWM are well predicted by the GCFS2, including the Siberian High, the East Asian trough, the East Asian jet stream, and the surface air temperature, and precipitation over East Asia. The interannual variations of East Asian trough and East Asian surface air temperature are skillfully predicted by GCFS2. GCFS2 shows prediction skills for the EAWM index (EAWMI) defined by sea level pressure. At the same time, the EAWM-related atmospheric circulation, surface air temperature, and precipitation anomalies over oceans are also well predicted. The high prediction skills of EAWM in GCFS2 are mainly due to the successful reproductions of the EAWM-ENSO relationship and the ENSO teleconnection. The correlation coefficient between EAWM and ENSO is -0.46 (1993 – 2016), which is stronger than that of observation. This means that the enhanced EAWM-ENSO relationship in GCFS2 is helpful to predict EAWM 2 months leading or longer. The EAWMI initialized in December GCFS2 still has 0.42 prediction skills after removing the ENSO signal, which indicates another source of prediction – the sea ice coverage in the Barents-Karabakh region in winter (BK_SIC) – works. The weakening of BK_SIC leads to the enhanced Siberian high pressure (SH) and the enhanced EAWM in the observation. The change of BK_SIC in the model can increase the predictability of northeastern SH, resulting in an increase in the EAWM prediction skills for December initialized.

Keywords GCFS2, Seasonal prediction, East Asian winter monsoon (EAWM), ENSO, Sea ice

1 引言

东亚冬季风 (EAWM) 是世界上最强的冬季风, 它对东亚及全球的天气和气候产生重大影响 (丁一汇, 1990; 陈隽和孙淑清, 1999; Chen et al., 2000, 2005; Yang et al., 2002; Li and Yang, 2010; Wang and Chen, 2014; 黄荣辉等, 2014)。强东亚冬季风年, 东亚常常出现大风、低温、寒潮、冰冻雨雪等灾害性天气 (丁一汇等, 2008; Wu et al., 2011; 彭京备和孙淑清, 2017, 2019; 钱卓蕾等, 2020; 韩永秋等, 2021; Zhang et al., 2022), 甚至造成严重的经济和社会灾难。尽管东亚冬季风异常会造成显著的东亚冬季气候异常, 但与东亚夏季风相比, 其季节可预报性和动力预报技巧研究较少, 更多的研究集中在夏季风 (例如 Yang et al., 2008; Wang et al., 2008; Lee et al., 2011; 郭渠等, 2017; 吴捷等, 2017; Huang et al., 2018; Shin et al., 2018; Liu et al., 2019; Takaya et al., 2021)。在当前的季节预报系统中, 东亚冬季风提前几个月的确定性预报仍然是一个具有挑战性的任务 (Wang and Chen, 2014)。

东亚冬季风具有强的年际变化特征。强冬季风年, 伴随着西伯利亚高压加强, 东亚大槽加深, 东亚急流加速, 东亚低层强烈的北风以及频繁的寒潮 (郭其蕴, 1994; 孙柏民和李崇银, 1997; Gong et al., 2001; Wang et al., 2010; Li and Yang, 2010; 贺圣平和王会军, 2012; Wang and Chen, 2014; Wu et al., 2019)。研究表明东亚冬季风的年际变化受到厄尔尼诺和南方涛动 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) 的影响 (Zhang et al., 1996, 1997a; Chen et al., 2000; Wang et al., 2000; Gong et al., 2014; Chen et al., 2018; Wu et al., 2019)。ENSO 影响东亚冬季风的动力学机制之一是太平洋—东亚遥相关 (Wang et al., 2000), 厄尔尼诺年, 在西北太平洋 (菲律宾海) 和东北太平洋低层存在异常反气旋和气旋, 导致东亚暖平流和 EAWM 减弱; 在拉尼娜年反之 (Wang et al., 2000; Wang and Chen, 2014; Gong et al., 2014; Wu et al., 2019)。此外, 东亚冬季风的主要模态可以分为北部模态和南部模态 (Wang et al., 2010; 刘

舸等, 2013)。北部模态的变化与中高纬度环流系统密切相关, 年际尺度上可能受到秋季北极海冰浓度 (SIC) 变化的影响 (Chen et al., 2014a,b)。Sun et al. (2016) 指出北部模态与前期秋季以及同期冬季北极巴伦支—拉普捷夫海冰的变化密切相关。

最近研究表明, 统计模型对东亚冬季风强度及中国东部地表气温具有较强的预测能力 (刘舸等, 2013)。刘实等 (2010) 根据前期 10 月北太平洋—北美—北大西洋异常环流型, 并结合黑潮及其延伸区和热带西印度洋海温异常信号建立了预测冬季风强度的统计方法, 取得了较好的预测效果。Zuo et al. (2016) 基于秋季北极海冰异常与冬季温度变化之间的关系, 建立了统计模型用于检验中国冬季温度异常的潜在可预报性。

以往对东亚冬季风的研究大多数是基于观测数据, 且使用统计预测模型。近年来越来越多的人开始使用数值模式研究、预测东亚冬季风的变化。Li and Wang (2012) 根据耦合模式的回报数据预测 EAWM 指数 (EAWMI) 具有较高的预测技巧, 该指数定义为东亚主要区域 (20° - 60° N, 90° - 150° N) 850hPa 气温经验正交函数 (EOF) 的第一主成分。集合模式 (ENSEMBLES) 是欧盟资助的一个综合项目, 模式对低纬度 (30° N 以南) 对流层低层风场定义的 5 个冬季风指数具有较高的预测技巧, 这五个指数的可预测性源于它们与 ENSO 密切相关 (Yang and Lu, 2014)。第二版气候预报系统对 EAWM 有较高的预测技能, 可以提前几个月很好地预测与东亚冬季风有关的位于海洋上的大气环流和地表气候异常特征, 并且强调海洋—大气耦合对 EAWM 预测具有重要意义 (Jiang et al., 2013)。第二版气候预报系统对一个与中高纬环流密切相关的 EAWMI 具有有限的预测技巧, 说明该模式对中高纬环流的预测能力有限 (Tian et al., 2018)。Gong et al. (2014) 评估了第五次国际耦合模式比较计划 (CMIP5) 中模式对 EAWM 气候学和年际变化的预测能力。他们指出模型在捕获东亚地区地表气温和东北风异常方面存在偏差, 这归因于模型在捕获与 EAWM 相关的热带—热带外相互作用的能力。尽管上述研究表明最先进模式对 EAWM 表现出了预测技能, 但是准确预测 EAWM 的年际变率仍然是一个挑战。

德国气候预测系统 (German Climate Forecast System, GCFS2) 由德国气象局 (DWD) 联合地球系统研究与可持续性中心 (汉堡大学 (UHH) 和马克斯·普朗克气象研究所 (MPI)) 共同开发。GCFS2 对冬季欧洲—北大西洋地区的海平面气压、地表气温有较高的预测技巧 (Dobrynin et al., 2018; Dalelane et al., 2020)。GCFS2 与 GCFS1 相比在冬季北半球地表气温、500hPa 位势高度场及阻塞高压频率方面的预测技能有所提高, 特别在预测北大西洋涛动 (NAO) 方面技能明显提升 (Frhlich et al., 2021)。然而 GCFS2 对 EAWM 的预测性能尚未有研究。在本研究中, 我们将试图探讨 GCFS2 对 EAWM 的预测性能, 重点关注与 EAWM 年际变率及可预报性相联系的动力—物理过程。

2 数据和方法

2.1 观测和回报数据

本文使用的观测与再分析数据如下: (1) 欧洲中期天气预报中心 ERA5 月平均再分析资料 (Hersbach et al., 2020), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 本文选用了海平面气压场、地表气温、850hPa、200 hPa 风场以及 500 hPa 位势高度场的月平均数据。(2) 全球降水量气候项目 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP) 是美国国家航空航天局戈达德太空飞行

中心的全球格点降水资料（Adler et al., 2003），水平空间分辨率为 2.5° （纬度） $\times 2.5^{\circ}$ （经度）。（3）英国气象局哈德来中心的月平均海冰（SIC）和海表面温度（SST）数据集，version 1 (HadISST1)（Rayner et al., 2003），水平分辨率为 1° （纬度） $\times 1^{\circ}$ （经度）。

本文使用的回报数据由德国气候预测系统（GCFS2）输出，该回报试验数据的时间段为 1993~2016 年，其中每月第一天分别从 00 时、06 时、12 时、18 时（协调世界时）这四个时刻的初始场开始积分，共 30 个集合成员回报当月并对未来 5 个月进行预测，其分辨率为 1° （纬度） $\times 1^{\circ}$ （经度）（Frhlich et al., 2021）。例如，模式 11 月预测 12 月的结果即为模式提前 1 个月预测的结果。GCFS2 基本信息见表 1。

表 1 GCFS2 基本信息

Table 1 Basic information of the GCFS2(German Climate Forecast System)

机构简称	模式名	大气模式	海洋模式	初始化日期	集合成员	回报周期
DWD	GCFS2	ECHAM6 T127/L95,0.01hPa	MPIOM 1.6.3 0.4° $\times$ 0.4°/L40	每个月第一 天	30 个	1993~2016

本文选用的数据为 1993~2017 年，只关注北半球冬季，将当年 12 月、次年 1 月及 2 月（DJF）的平均定义为北半球冬季，一共 24 个冬季（1993~2016 年）。这里 1993 年冬季是指 1993/1994 年冬天。

模式可以提前 5 个月做出预测，本文使用 9~12 月初始化预测冬季，即提前 3~0 月（Lead3~Lead0）预测冬季。将 1993~2016 年 DJF 的平均定义为冬季气候态，观测及预测中的异常由原始数据分别减去相对应的气候态得到。本文除了气候态的评估之外，其他分析均基于异常场。

2.2 方法

（1）ENSO 指数定义为 Niño3.4 区域（120~170°W，5°S~5°N）异常 SST（SSTA）的区域平均。本文使用的 EAWM 强度指数见表 2。

（2）本文用的统计方法有相关系数分析、偏相关分析、t 检验及一元线性回归分析。

表 2 本文使用的 EAWM 强度指数

Table 2 The EAWM(East Asian winter monsoon) intensity index used in this paper

指数	参考文献	定义
I _{LiY}	Li and Yang (2010)	$U_{200}, \{[(30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}) - (50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E})] + [(30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}) - (5^{\circ}\text{S}\sim 35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E})]\}/2.$
I _{WangC}	Wang and Chen (2014)	$P_s, [(40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}) - (30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}, 140^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W})] + [(40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}) - (20^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E})]$
I _{GongDY} (SH)	Gong et al. (2001)	$P_s, (40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$
I _{SunL} (EAT)	孙柏民和李崇银 (1997)	$Z_{500}, (30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}, 25^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E})$
I _{Yang} (JET)	Yang et al. (2002)	$U_{200}, (30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E})$
I _{Chen} (V10)	Chen et al. (2000)	$V_{10}, (10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}) + (25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E})$

注：SH 表示西伯利亚高压，EAT 表示东亚大槽，JET 表示东亚高空急流。 U_{200} 表示 200hPa 纬向风， P_s 表示海平面气压， Z_{500} 表示 500hPa 位势高度， V_{10} 表示 10 米风场

3 模式对 EAWM 气候态及年际变化预测性能评估

本节中我们讨论东亚冬季风的气候态及年际变化特征。将模式提前 1 个月预测的结果 (Lead1) 与观测的结果进行对比。

3.1 大气环流及地表气候的气候态特征

EAWM 是一个深厚系统，与整个对流层的大气环流有关。它与对流层低层的西伯利亚高压和阿留申低压有关。这些系统在西伯利亚高压东侧形成强烈的西北风，在 25°N 附近转为东北风，并向南吹至热带地区 (图 1a)。EAWM 还与对流层中层日本附近的东亚大槽及对流层高层日本东南部的东亚高空急流有关 (图 1d)。GCFS2 很好地再现了 EAWM 大气环流的气候态特征 (图 1b、e)，但与观测相比存在一定的偏差 (图 1c、f)。模式显示出了位于 10°N 以北北太平洋上相对于观测的海平面气压及低层环流的偶极子偏差， 40°N 以北 (南) 高于 (低于) 观测； 40°N 以北欧亚大陆上低于观测的海平面气压及偏东风偏差；及海洋性大陆上的辐散风偏差，海洋性大陆以东 (西) 偏西 (东) 风 (图 1c)。模式中 500hPa 位势高度在北太平洋上表现出对观测的南北向三极子偏差 (20°N 以北的偏差结构类似于海平面气压偏差，具有准正压结构)，在 20°N 以北、 50°N 以南有最大偏差 (偏低)，同时，200hPa 纬向风偏差与其动力耦合，最大偏差同样出现在北太平洋上，纬向风偏高的北侧、偏低的南侧为位势高度偏低区；反之为偏高区 (图 1f)。

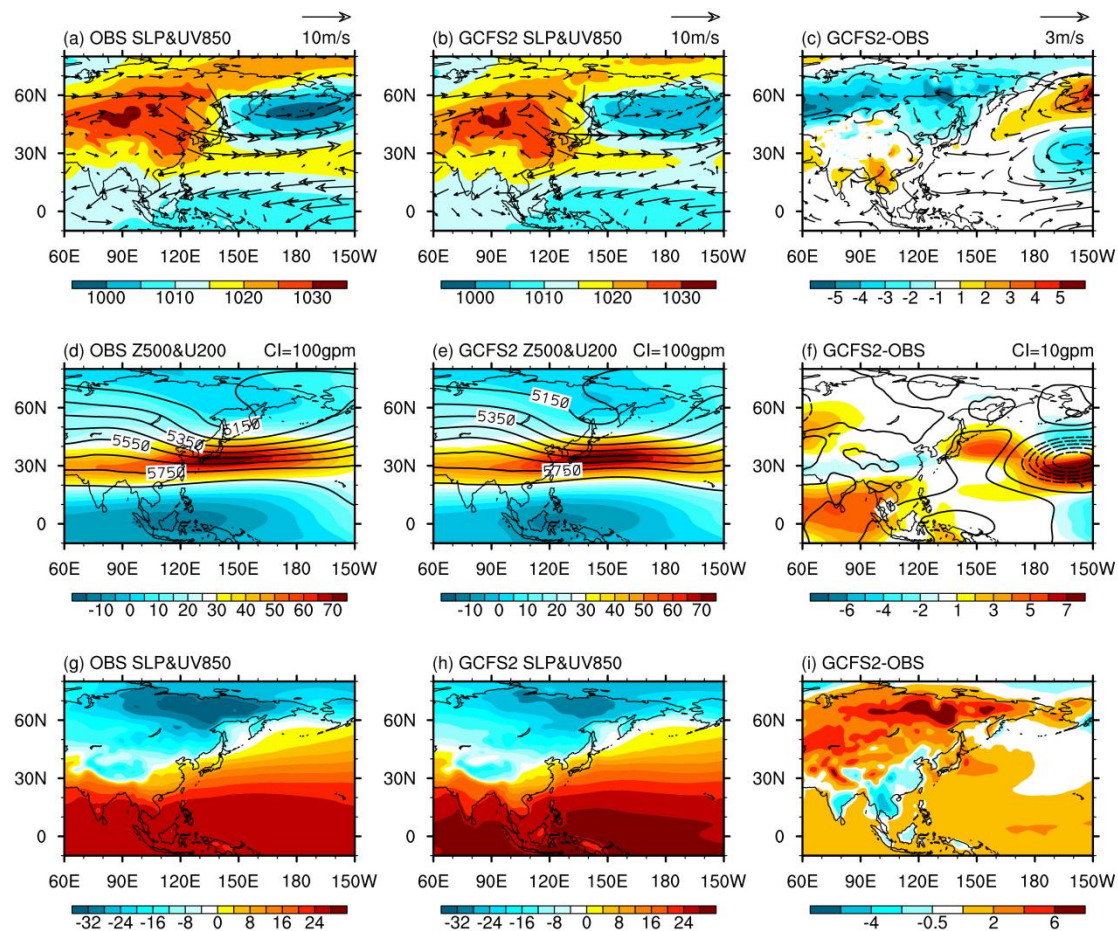


图1 1993~2016年 (a) 观测的冬季平均海平面气压 (填色, 单位: hPa), 850hPa 风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 的气候态分布, (b) GCFS2 提前一个月 (Lead1) 预测的冬季平均海平面气压, 850hPa 风场, (c) 图1b与1a的差值; 图1d-f 类似于1a-c, 然而 500hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm), 200hPa 纬向风 (填色, 单位: m s^{-1}); 图1g-i 类似于1a-c, 然而 是地表气温 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.1 Climatology of (a) winter (DJF) mean sea level pressure (shading, units: hPa) and 850hPa winds (vectors, units: m s^{-1}) during 1993~2016 for the observation, (b) DJF sea level pressure and 850hPa winds for the GCFS2 with lead 1month (Lead1) and (c) differences between Figures 1b and 1a; Figures 1d-f are the same as Figures 1a-c, but for 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm) and 200 hPa zonal wind (shading, units: m s^{-1}); Figures 1g-i are the same as Figures 1a-c, but for surface air temperature (shading, units: $^{\circ}\text{C}$)

亚洲大陆上地表气温低于海洋上, 西伯利亚东北部最低, 东亚区域最低出现在青藏高原上, 海洋性大陆上最高, 该气温空间型被认为是 EAWM 重要的热力驱动机制之一 (图 1g)。模式很好地再现了地表气温的空间分布 (图 1h)。模式中西伯利亚东北部有最大暖偏差, 热带到副热带太平洋印度洋上亦有弱的暖偏差 (图 1i)。冷偏差 (暖偏差) 与高于 (低于) 观测的海平面气压热耦合, 突出了海平面气压模拟在预测地表气温中的重要性。

3.2 年际变率的预测技巧

在本小节中, 将评估东亚区域年际变化的预测技巧。为了定量化预测技巧, 计算每个网格点上时间相关系数 (TCC)。较高 TCC 分数表明高的预测技巧, 预测结果与观测密切相关。

1993~2016 年模式提前一个月 (Lead1) 预测的海平面气压、500hPa 位势高度、200hPa 纬向风、850hPa 经向风、850hPa 纬向风及地表气温与观测之间的 TCC 空间分布如图 2 所示。海平面气压高技巧区主要位于海洋上, 最高技巧位于海洋性大陆上, ACC 超过 0.9, 并且在西伯利东北部也显示出较高技巧 (图 2a), 同时说明对与 EAWM 有关的低层环流系统预测中, 仅对海洋性大陆低压有很高的预测技巧, 而对西伯利亚高压、太平洋低压预测技巧有限。因此, 改善中高纬海平面气压的预测能力, 对 EAWM 预测十分必要。500hPa 位势高度在热带有相关系数大于 0.9 的高技巧区 (Wang et al., 2009), 45°N 以南的亚洲大陆、东北太平洋也有较高技巧区, 相关系数大于 0.6, 同时东亚大槽区域显示出较高技巧, 并且亚洲大陆高纬地区也表现出一定的技能 (图 2b)。200hPa 纬向风在海洋上有相关系数大值区, 热带太平洋上技巧比海平面气压、500hPa 位势高度低, 海洋性大陆上有相关系数大于 0.9 的高技巧 (Wang et al., 2009; Li and Wang, 2012), 此外, 巴伦支—喀拉海极地区域显示出相关系数大值区。850hPa 经向风相比于其他要素预测预测技巧明显下降 (Wang et al., 2009; Li and Wang, 2012), 高技巧区主要位于海洋上, 欧亚大陆上几乎没有预测技巧, 中南半岛到日本东南侧有一定技巧, 有趣的是西太平洋赤道附近几乎没有技巧 (图 2c)。850hPa 纬向风高技巧区主要位于 10°N 以南的热带地区, 中南半岛到中国华南沿海有较高预测技巧, 40°N 以北欧亚大陆上有一定技巧, 然而在西太平洋几乎没有技能 (图 2d)。地表气温预测技巧主要位于海洋上, 最高技巧出现在热带西太平洋上, 有相关系数大于 0.9 的区域, 类似于前人研究结果 (Wang et al., 2009; Li and Wang, 2012; Lee et al., 2013), 极区也显示出一定的预测技巧, 同时中国东部地区也显示出高技巧, 且高技巧区延伸至 45°N, 相关系数大于 0.6。Wang et al. (2009) 指出上述技巧多数来源于 ENSO 大气遥相关连接的区域, 然而, 相比于前人的研究结果, GCFS2 显示出 ENSO 影响较弱区域的预测技巧, 如对中国东部地表气温的熟练预测技巧, 说明相比于以往研究中的模式预测性能有明显提高。

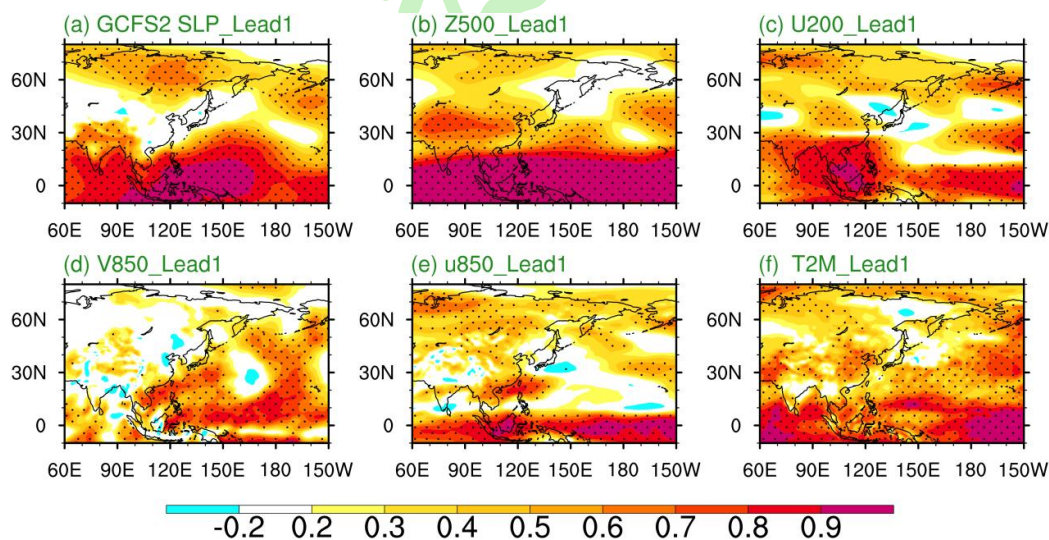


图2 GCFS2 在 Lead1 时对冬季平均的 (a) 海平面气压、(b) 500hPa 位势高度、(c) 200hPa 纬向风、(d) 850hPa 经向风、(e) 850hPa 纬向风及 (f) 地表气温异常预报技巧 TCC 空间分布, 打点区域代表相关系数通过 0.05 显著性检验

Fig. 2 TCC (Temporal Correlation Coefficient) skills for (a) sea level pressure, (b) 500 hPa geopotential height, (c) 200 hPa zonal wind, (d) 850 hPa meridional wind, (e) 850 hPa zonal wind, and (f) surface air temperature anomalies based on observations and Lead1 prediction by GCFS2 in DJF. The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level.

表 3 给出了与 EAWM 相关的主要环流系统预测技巧，可以看到 GCFS2 对 10 米风场预测技巧最高，模式 Lead3-Lead0 预测与观测之间的相关系数都在 0.75 以上，这是因为观测中 10 米风场与 ENSO 高度相关，相关系数为 0.76，有利于获得高技巧(Chen et al., 2000; Gong et al., 2014; Yang and Lu, 2014)。模式对东亚大槽也有很高的预测技巧，Lead3 相关系数高达到 0.50，相关系数通过 0.05 显著性检验，相比于前人研究为负技巧有明显提升(Wang et al., 2009; Yang and Lu, 2014)，与图 2b 结果一致；对西伯利亚高压的预测结果表明 Lead0 有一定预测技巧，相关系数为 0.40，通过 0.05 显著性检验；而对东亚高空急流预测技巧为负。说明与 EAWM 相关的中高纬环流中东亚大槽可预测性最高，而东亚高空急流几乎不可预测，对东亚大槽高预测技巧的原因值得进一步研究。

表 3 与 EAWM 相关的主要环流系统的预测技巧（预测与观测之间的相关系数）

Table 3 Prediction skills of main circulation systems related to EAWM(East Asian winter monsoon) (correlation coefficient between predictions and observations)

	SH	EAT	JET	V_{10}
Lead0	0.40**	0.58**	0.12	<u>0.75</u>
Lead1	0.22	0.42**	-0.26	<u>0.76</u>
Lead2	0.15	0.43**	-0.32*	<u>0.78</u>
Lead3	-0.21	0.50**	-0.28	<u>0.78</u>

注，*：表示相关系数通过 0.1 显著性检验，**：表示通过 0.05 显著性检验，下划线：表示通过了 0.01 显著性检验

4 EAWM 的预测技巧及可预报性的来源

上述分析表明，GCFS2 对 EAWM 大气环流及地表气候的气候态特征具有很强地再现能力。那么模式对 EAWM 年际变化特征的预测性能如何呢？

我们知道大多数研究都是利用亚洲大陆和邻近海洋之间的海陆压力差来描述东亚冬季风的变化特征（例如，郭其蕴，1994；Gong et al., 2001; Wang and Chen, 2014）。使用海平面气压定义东亚冬季风指数（EAWMI）有两个优势。首先，西伯利亚高压被东部的阿留申低气压所包围，南部是海洋性大陆周围的低压中心，可以代表寒冷亚洲大陆和邻近温暖海洋之间的热对比（Trenberth et al. 2006）。其次，与近地表风等对流层中上层的气象变量相比，海平面气压数据的可用性和质量都更好（Wang and Chen, 2014）。因此，基于海平面气压定义的指数在研究东亚冬季风的历史变化时更可靠。Shin and Moon（2018）研究表明更好的 EAWMI 应包括以下三个方面：

（1）EAWMI 应包括热带和热带外过程，以便很好地代表 EAWM 的性质（Li and Yang 2010; Wang and Chen, 2014; Chen et al., 2014a）。

（2）EAWMI 可以解释东亚地表气温方差的大部分，并且可以较合理的描述极端寒冷冬季（Wang and Chen, 2014）。

（3）EAWMI 可以较好的表征热带冷涌活动。

最终，他们选择了 Wang and Chen（2014）利用海平面气压定义的 EAWMI。

4.1 EAWMI 预测技巧

图 3 显示了 EAWMI 时间序列及提前 0-3 个月 (Lead0-Lead3) 预测技巧, 可以看到观测和提前 1 个月预测 (Lead1) 的集合平均及集合成员的 EAWMI 具有明显的年际变化特征, 且集合成员之间具有显著的离散度 (图 3a)。GCFS2 表现出对该指数的预测技巧 (图 3b), 且随着初始化时间增加预测技巧减少, Lead0 的预测技巧最高, 整个 24 年 (1993~2016) 的相关系数为 0.55, Lead1 为 0.41, 都通过 0.05 显著性检验。前面的研究指出模式对西伯利亚高压的预测能力不足 (表 3), 而该指数的定义中用到了西伯利亚高压, 这影响了它的预测技巧。GCFS2 与 ENSEMBLES (Yang et al., 2014) 相比对该指数预测技巧有明显提升, ENSEMBLES 对该指数几乎没有预测技巧。有许多差异, 包括物理参数化、初始化方法和集合成员的生成, 都可能导致预测技巧的差异, 本文关注动力方面 EAWM 潜在可预测性的来源, 以及外强迫产生的遥相关连接。

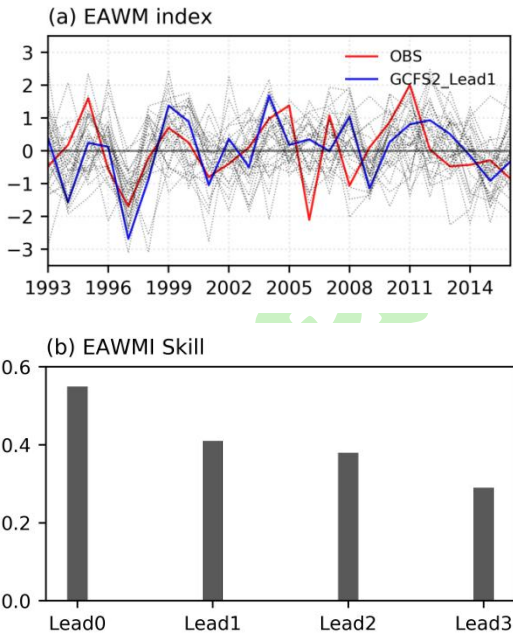


图 3 观测及 GCFS2 提前 1 个月 (Lead1) 预测的冬季平均 (a) EAWMI 时间序列, 红色折线图为观测, 蓝色折线为模式集合平均, 灰色点线为集合成员。(b) 模式提前 0-3 个月 (Lead0-Lead3) 预测的冬季平均 EAWMI 的预测技巧 (时间相关系数)

Fig.3 Time evolution of (a) EAWMI(East Asian winter monsoon Index) for predictions(red lines) and ensemble mean(blue lines) and member(dash lines with gray) of Lead1 prediction by GCFS2 in DJF. (b)Prediction skills of EAWMI for the GCFS2 with lead 0-3 month (Lead0-Lead3) (time correlation coefficient)

图 4 显示了 EAWMI 回归的海平面气压、低层水平风场、500hPa 位势高度、200hPa 纬向风及地表气温的异常场。强冬季风年, 海平面气压在乌拉山附近呈显著的正异常, 西伯利亚高压增强 (图 4a)。在北太平洋, 海平面气压异常在阿留申群岛西南部呈负异常, 在白令海周围呈正异常, 类似于北太平洋涛动负位相 (Chen et al., 2000; Yang et al., 2002; Li and Yang 2010; Wang and Chen, 2014), 负的海平面气压异常向西南延伸到海洋性大陆上, 再向西延伸至热带印度洋; 并且有 850hPa 异常流场相配合, 即日本东部的气旋性环流, 乌拉尔山脉上的反气旋性环流, 以及海洋性大陆上辐合气流, 同时可以看到从中国东部至日本大部明显的北风异常 (图 4a)。模式可以很好地捕获海洋上与 EAWM 相关的海平面气压及低

层环流异常，且印度洋上异常较观测的强度弱（图 4b）。然而，未能很好地再现亚洲大陆热带外环流异常，显示出远弱于观测的乌拉尔山异常高压（图 4b）。观测结果显示东亚低层存在气旋异常（以 40°N 和 150°E 为中心）和东北太平洋存在反气旋异常（以 50°N 和 140°W 为中心）（图 4a），与 ENSO 冷位相下东亚—太平洋遥相关一致（Chen et al., 2000; Wang et al., 2000; Jiang et al., 2013; Wang and Chen, 2014; Gong et al., 2014; Wu et al., 2019），模式可以再现该特征，只是异常环流位置略偏东（图 4b），说明模式可以再现观测中的 EAWM-ENSO 关系，有助于提高模式对 EAWM 的预测性能。

在对流层中，强冬季风一个显著特征是热带地区负的位势高度异常（图 4c），它与海平面气压异常相一致（图 4a），这意味着 EAWM 和热带地区之间的紧密联系。在北半球热带外，乌拉尔山脉附近显著的正位势高度异常，日本周围负位势高度异常，即强冬季风年东亚大槽加深（图 4c）。在上对流层，东亚西风急流在高指数年增强（图 4c）。热带和副热带东太平洋区域风异常（图 4c）与 ENSO 相关的异常相似（Wang et al., 2000; Jiang et al., 2013; Wang and Chen, 2014; Gong et al., 2014; Wu et al., 2019）。模式可以很好地捕捉海洋上与 EAWM 相关的位势高度及纬向风异常，但未能再现欧亚大陆热带外的异常（图 4d）。

强 EAWM 地表气温从西伯利亚中部到东亚副热带地区，再到南海、海洋性大陆和印度洋上，可以观察到显著的冷异常（图 4e）。热带东太平洋显示出冷异常及东北太平洋显示出暖异常类似于 ENSO 冷位相地表气温分布特征（图 4e）（Chen et al., 2000; Wang et al., 2000; Jiang et al., 2013; Wang and Chen, 2014; Gong et al., 2014; Wu et al., 2019）。模式捕获了地表气温的异常分布，但亚洲大陆上的异常强度明显弱于观测（图 4f）。这些偏差说明模式对中高纬度环流的预测能力有限（Tian et al., 2018）。

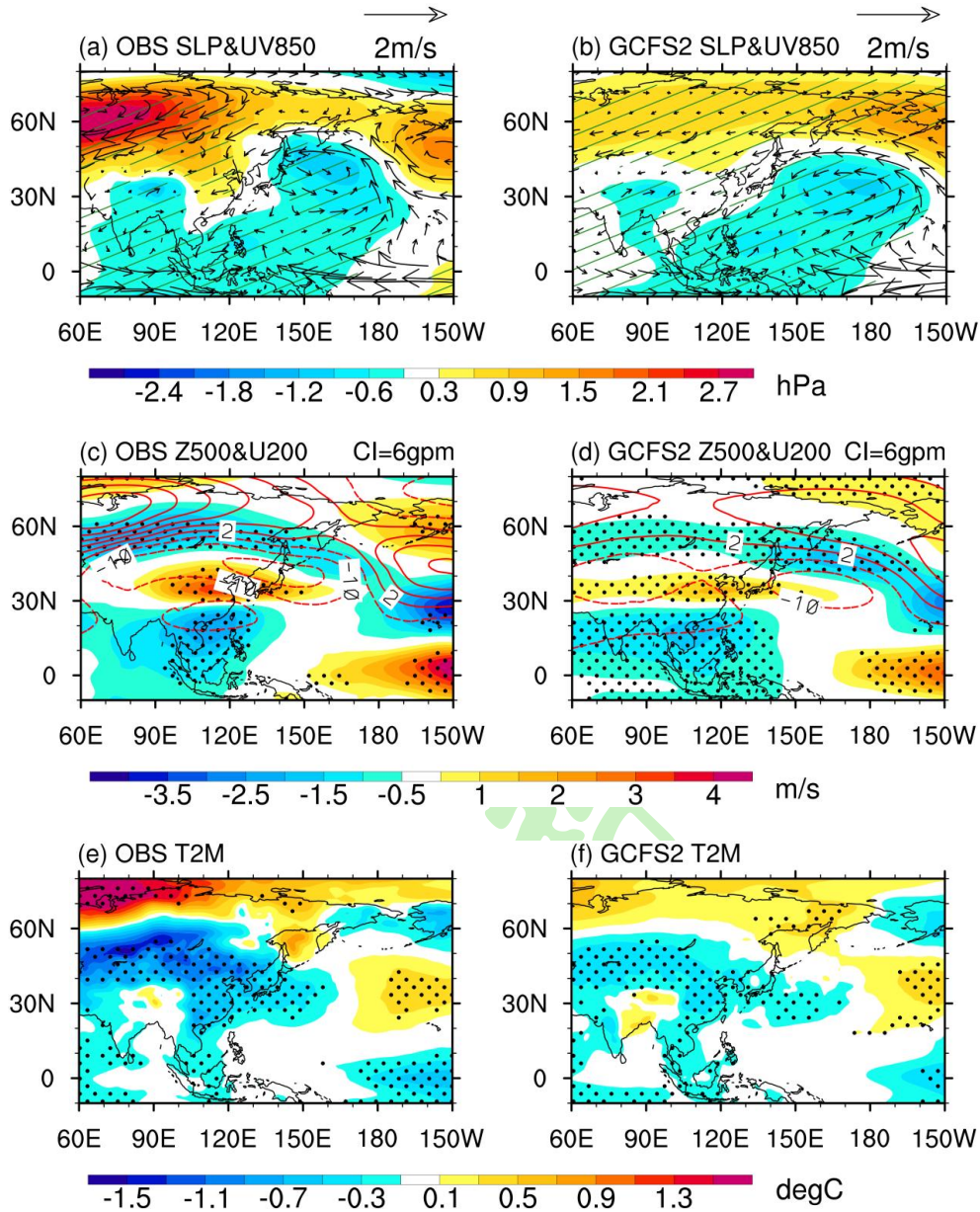


图4 (a) 1993~2016 年观测的冬季平均海平面气压 (填色, 单位: hPa), 850hPa 风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 的异常回归到 EAWMI, (b) GCFS2 提前一个月 (Lead1) 预测的冬季平均海平面气压, 850hPa 风场; 图 4c-d 类似于 4a-b, 然而而是 500hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm), 200hPa 纬向风 (填色, 单位: m s^{-1}); 图 4e-f 类似于 4a-b, 然而而是地表气温 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 绿色斜线及打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.4 (a) Regression of DJF sea level pressure (shading, units: hPa) and 850hPa winds (vectors, units: m s^{-1}) anomalies onto the EAWMI during 1993~2016 for the observation. (b) DJF sea level pressure and 850hPa winds for the GCFS2 with Lead1. Figures 4c-d are the same as Figures 4a-b, but for 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm) and 200 hPa zonal wind (shading, units: m s^{-1}). Figures 4e-f are the same as Figures 4a-b, but for surface air temperature (shading, units: $^{\circ}\text{C}$). The slash and stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

强烈的 EAWM 与西太平洋暖池 (海洋性大陆和菲律宾海) 降水增加及赤道中太平洋降水减少有关 (图 5a), 类似 ENSO 冷位相降水空间型。20°N 以北的东亚 (从中国东南部至日本南部) 降水减少及北太平洋降水增加 (图 5a)。模式可以再现观测的降水空间分布, 且比观测强度大 (图 5b), 再次说明 EAWM 的预测技巧与 ENSO 有关 (Jiang et al., 2013; Gong

et al., 2014; Yang and Lu, 2014), 可以再现观测中的 EAWM-ENSO 关系, 有助于提高 EAWM 的预测技巧。

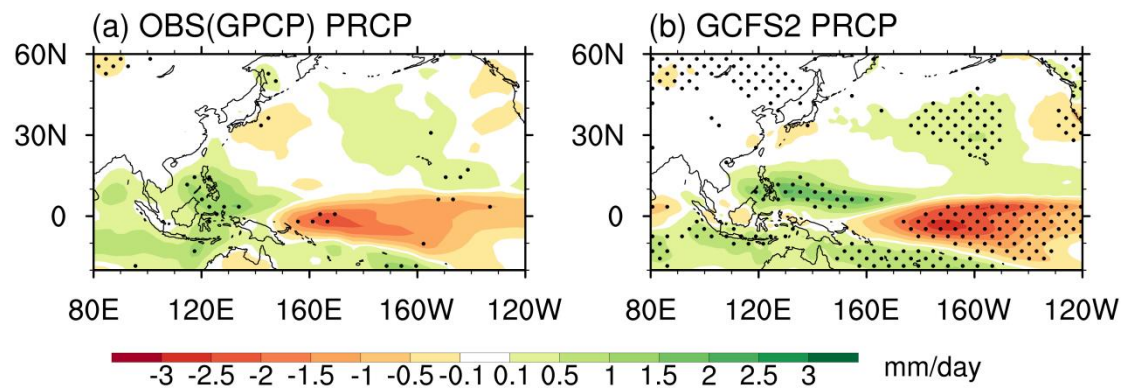


图5 1993~2016 年观测的冬季平均地面降水 (填色, 单位: mm day^{-1}) (填色, 单位: hPa) 的异常回归到 EAWMI, (b) GCFS2 提前 1 个月 (Lead1) 预测冬结果, 打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.5 (a) Regression of DJF precipitation (shading, units: mm day^{-1}) anomalies onto the EAWMI during 1993~2016 for the observation. (b) DJF precipitation for the GCFS2 with Lead1. The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

4.2 EAWMI 可预报性的来源

为了寻找 EAWM 可预报性的来源, 计算观测及模式 Lead1 预测的 SST 异常 (SSTA) 与相应 EAWMI 之间的相关系数, 结果显示在图 6。观测显示出 ENSO 冷位相特征的 SSTA 相关系数分布图, 即热带中东太平洋、印度洋表现为负相关系数, 相关系数可达-0.4 以下, 西太平洋暖池、西北太平洋表现为正相关系数 (图 6a)。GCFS2 成功再现了 SSTA 相关系数分布图 (图 6b), 且相关系数绝对值大于观测, 中东太平洋及印度洋相关系数可达-0.5 以下。再次证明 ENSO 是 EAWM 可预测性的来源, 与前人研究结果一致 (Jiang et al., 2013; Yang and Lu, 2014)。

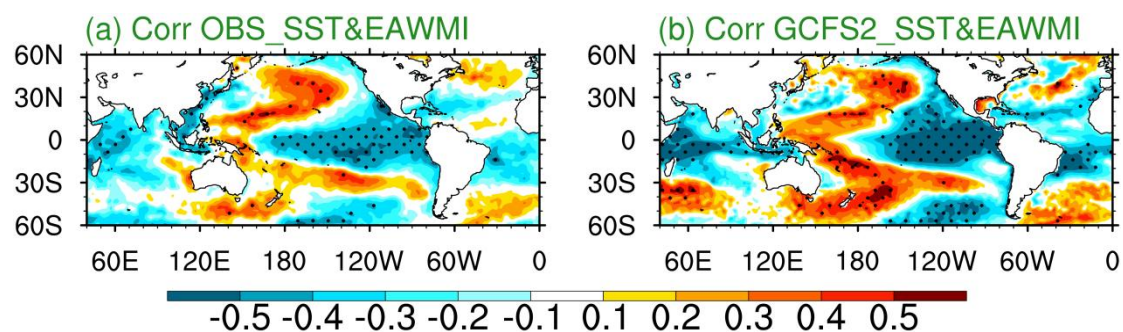


图6 1993~2016 年 (a) 观测和 (b) GCFS2 提前 1 个月 (Lead1) 预测的冬季平均的 EAWMI 与 SSTA 之间的相关系数, 打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.6 The correlation of DJF EAWMI with sea surface temperature anomalies(SSTA) during 1993~2016 for the (a) observation and the (b) GCFS2 with Lead1. The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

4.2.1 EAWM-ENSO 关系对 EAWM 预测技巧的影响

为了进一步说明 ENSO 在 EAWM 预测中的重要性, 图 7 显示了 EAWMI 预测技巧及其与 ENSO (Niño3.4 指数) 相关系数之间关系的散点图, 包括 GCFS2 集合平均及所有集成

员在 Lead1 预测结果；表 3 给出了 GCFS2 提前 0-3 月 (Lead0-3) 对 EAWMI (/后去掉 ENSO 信号后 (偏相关) 的预测技巧) 的预测技巧及 EAWMI 与 Nino3.4 指数 (EAWM-ENSO 关系) 之间的相关系数。结果表明，散点图分布显示出良好的线性关系，二者之间回归系数为-0.47，通过 0.05 显著性检验，表明模式中更显著的 EAWM-ENSO 关系 (超越观测中的关系，观测中 EAWM 与 ENSO 之间的相关系数为-0.46) 有利于更好地预测 EAWMI。尤其是初始化较长 (提前 2 两个月以上) 的情况下需要远超观测中的 EAWM-ENSO 关系值，才能获得对该指数的预测技巧 (Lead3 时 EAWMI 的预测技巧为 0.29，而 EAWM 与 ENSO 之间的相关系数为-0.81) (表 4)。说明 EAWMI 的预测技巧取决于 EAWM-ENSO 关系。

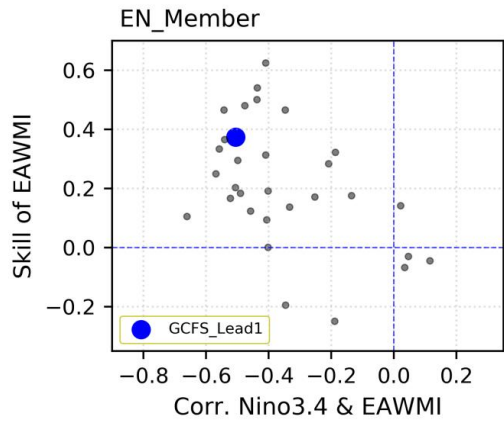


图 7 冬季平均 EAWMI 的预测技巧及其与 ENSO 相关系数之间关系的散点分布图,GCFS2 提前 1 个预测的集合平均 (蓝点)，集合成员 (灰点) 结果

Fig.7 Scatterplots showing the prediction skills of the EAWMI and its relationship with ENSO (correlation coefficient between EAWMI and ENSO). Ensemble mean(blue dots) and member(gray dots) of Lead1 prediction by GCFS2

表 4 EAWMI 预测技巧及 EAWM 与 ENSO 相关系数

Table 4 Prediction skills of the EAWMI and its relationship with ENSO (correlation coefficient between EAWMI and ENSO)

	Lead0	Lead1	Lead2	Lead3
EAWMI	0.55**/0.42**	0.41**/0.1	0.38*/0.12	0.29/0.06
预测技巧				
EAWM 与	-0.41**	-0.51**	<u>-0.59</u>	<u>-0.81</u>
ENSO 之间的				
相关系数				

注：观测中 EAWM 与 ENSO 之间相关系数：-0.46，*：表示相关系数通过 0.1 显著性检验，**：表示通过 0.05 显著性检验，下划线：表示通过了 0.01 显著性检验

图 8 显示了观测及模式 Lead1 预测的 Niño3.4 指数回归到相应的地面降水、200hPa 风场、海平面气压及 850hPa 风场的结果。与 EAWM 及 ENSO 相关的赤道太平洋降水空间分布相似 (图 5a, 8a)。观测显示了与 ENSO 相关的上对流层南北向 2 波结构的环流异常及伴随着东西向偶极子结构的降水异常 (图 8a)，这种位于太平洋上的环流型与太平洋—东亚遥相关相一致 (Wang et al., 2000)。GCFS2 倾向于再现上对流层观测的 2 波结构环流及赤道太平洋上东西向偶极子降水异常，但空间结构与观测或多或少有所不同，位于东亚地区的环流强

度弱于观测（图 8b），主要是由于模式在表示 ENSO 方面的系统偏差造成。在下对流层，赤道太平洋上空有西风，表明沃克环流减缓，海洋性大陆上的下沉气流导致西北太平洋上出现异常反气旋，东北太平洋上出现异常气旋，即太平洋—东亚遥相关，其中海洋性大陆上异常反气旋西侧的偏南气流连接着热带和东亚地区（图 8c），这个典型的 ENSO 遥相关与前人结果一致（Wang et al., 2000; Jiang et al., 2013; Gong et al., 2014; Lu et al., 2017; Wu et al., 2019）。GCFS2 可以再现观测中 ENSO 遥相关（图 8d），且西北太平洋异常反气旋强度接近观测，只是其西侧的偏南风未能延伸至 45°N 以北，同时模式中异常海平面气压分布类似于海平面气压相关系数分布图（欧亚大陆高纬地区除外，图 2a），说明 EAWM 的预测技巧主要源于受 ENSO 影响显著的海洋性大陆低压，部分源于 ENSO 遥相关连接的北太平洋低压。Lu et al. (2017) 指出模式对观测中的 ENSO 遥相关再现能力越强，越有利于华南冬季降水预测，他们进一步指出 GloSea5（Global Seasonal forecast system version 5）再现能力最强，成功捕获了西北太平洋上异常反气旋（文中图 5b），显示出对华南地区冬季降水熟练的预测技巧。总之，GCFS2 可以很好地再现观测中的 ENSO 遥相关，有助于合理再现观测中的 EAWM-ENSO 关系，从而增加 EAWM 的预测技巧。

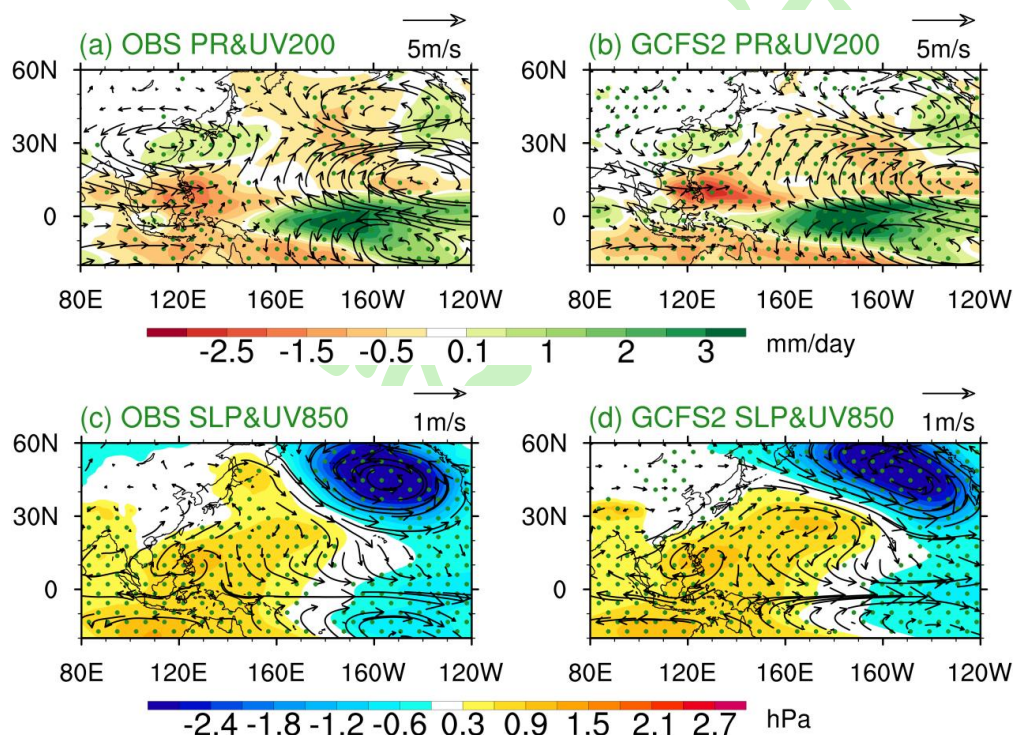


图 8 1993~2016 年 (a) 观测的冬季平均地表降水（填色，单位： mm day^{-1} ）及 200hPa 风场（箭头，单位： m s^{-1} ）的异常回归到 Niño3.4 指数，(b) GCFS2 提前一个月 (Lead1) 预测的地表降水，200hPa 风场；图 8c-d 类似于 8a-b，然而而是海平面气压（填色，单位： hPa ），850hPa 流场（箭头，单位： m s^{-1} ），打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.8 (a) Regression of DJF precipitation (shading, units: mm day^{-1}) and 200hPa winds (vectors, units: m s^{-1}) anomalies onto the Niño3.4 index during 1993~2016 for the observation. (b) DJF sea level pressure and 850hPa winds for the GCFS2 with Lead1. Figures 8c-d are the same as Figures 8a-b, but for sea level pressure (shading, units: hPa) and 850hPa winds (vectors, units: m s^{-1}). The slash and stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

4.2.2 12 月起报的 (Lead0) EAWM 可预报性的另一种可能来源

前面的研究表明，EAWMI 的可预测性主要源于 ENSO 相联系的热带地区。GCFS2 提前

0 个月 (Lead0) 预测的 EAWMI 在去除 ENSO 信号后仍有较高的技巧, 相关系数为 0.42 (表 3), 通过 0.05 显著性检验, 说明除了 ENSO 信号, 还可能其他的预测源。那么该预测源是什么呢, 是否与 ENSO 没影响的西伯利亚高压有关?

如图 9 显示了观测及 12 月初始化 (Lead0) 的 EAWMI 与相应的冬季海冰覆盖度之间的相关系数分布图。观测中, 巴伦支—喀拉 (BK) 海区域有一负相关区 (图 9a)。GCFS2 在该区域也显示出了显著的负相关, 并通过 0.05 显著性检验 (图 9b)。将图中方框 (68~77°N, 40~76°E) 海冰异常值的区域平均定义为海冰覆盖度指数 (SICI)。表 5 给出了 EAWMI 与 SICI 相关系数、西伯利亚高压指数 (SHI) 与 SICI 相关系数及 SHI 预测技巧 (观测与预测的 SHI 相关系数)。观测中, EAWMI 与 SICI 相关系数为-0.36, SHI 与 SICI 相关系数-0.37, 都通过 0.1 显著性检验, 且 SHI 与 EAMWI 的相关系数为 0.85, 说明冬季巴伦支—喀拉海海冰 (BK_SIC) 可能通过影响西伯利亚高压从而影响 EAWM 变化。GCFS2 中 EAWMI 与 SICI 相关系数为-0.48, SHI 与 SICI 相关系数为-0.45, SHI 预测技巧为 0.4, 同时 SICI 的预测技巧高达 0.85, 都通过 0.05 显著性检验。那么 BK_SIC 是如何影响 EAWM 的变化, 其动力机制是什么呢?

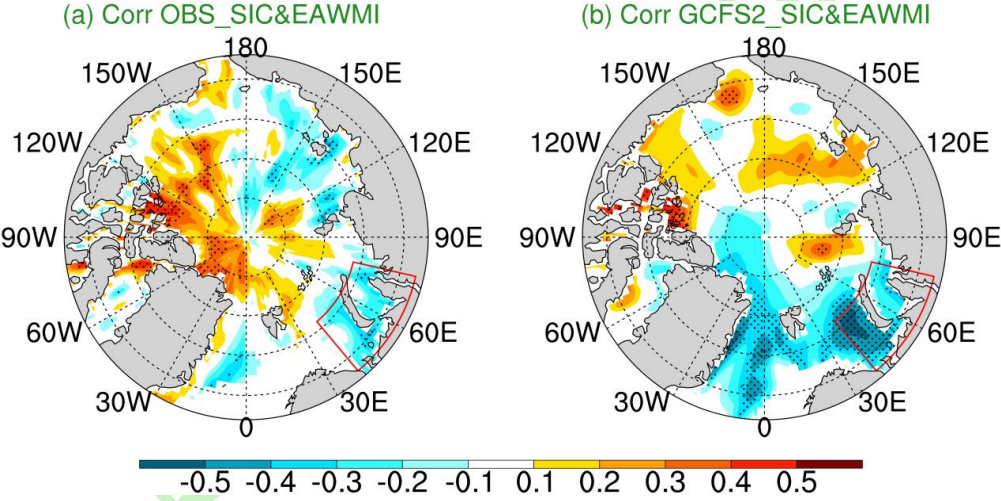


图9 1993~2016 年 (a) 观测和 (b) GCFS2 提前 1 个月 (Lead1) 预测的冬季平均的 EAWMI 与海冰覆盖度异常之间的相关系数, 打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.9 The correlation of DJF EAWMI with sea ice coverage (SIC) anomalies during 1993~2016 for the (a) observation and the (b) GCFS2 with Lead1. The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

表 5 西伯利亚高压指数 (SHI) 预测技巧、EAWMI 与 SICI 相关系数 (EAWMI-SICI) 及 SHI 与 SICI 相关系数 (SHI-SICI)

Table 5 Prediction skills of the Siberian high pressure index (SHI) and correlation coefficient between SIC index and EAWMI(EAWMI-SICI) and SHI(SHI-SICI)

	GCFS2	OBS
EAWMI-SICI	-0.48**	-0.36*
SHI-SICI	-0.45**	-0.37*
SHI 预测技巧	0.40**	

注, *: 表示相关系数通过 0.1 显著性检验, **: 表示通过 0.05 显著性检验

图 10 显示了-1*SICI 回归的 500hPa 位势高度、海平面气压及地表气温异常分布场。观测中，冬季巴伦支—喀拉海一带海冰减少时，产生向上的感热通量（图略），巴伦支—喀拉海及周边区域地表气温升高（图 10c），大气柱受热，根据静力学平衡原理，气柱膨胀，中对流层等压面抬升，500hPa 产生正位势高度异常，同时在 40°N 附近的欧亚大陆产生负位势高度异常（图 10a）。低层欧亚大陆中高纬地区有海平面气压正异常，西伯利亚高压增强，冷空气入侵东亚地区，导致蒙古及东亚地区出现冷异常（图 10c），类似于强冬季风造成的欧亚大陆上地表气温异常分布特征（Li and Yang, 2010; Wang and Chen, 2014）（图 3e）。因此，冬季 BK_SIC 变化影响 EAWM 的动力机制之一是减少的海冰加强了西伯利亚高压，从而使得 EAWM 异常增强。GCFS2 中可以很好再现观测中各场变量的异常特征，并且振幅强于观测，说明模式可以很好的捕获冬季 BK_SIC 变化对 EAWM 的影响（图 10b, d）。从图 10d 还可以看出 GCFS2 中与冬季 BK_SIC 变化相联系的贝加尔湖附近的异常海平面气压空间分布类似于 12 月初始化（Lead0）的海平面气压预测技巧分布图（图 11），说明该区域冬季海冰变化是西伯利亚高压重要的可预测源，BK_SIC 变化增加西伯利亚高压东北部的可预测性，最终提高了 EAWM 的预测技巧。但是模式更长初始化时间中未能再现观测中的 EAWM 与 BK_SIC 关系，使得西伯利亚高压预测技巧有限，最终影响了 EAWM 的预测技巧。因此，海冰变化产生的北极信号也是 EAWM 一种可能的预测源，同样也说明了北极区域在 EAWM 预测中的重要性。

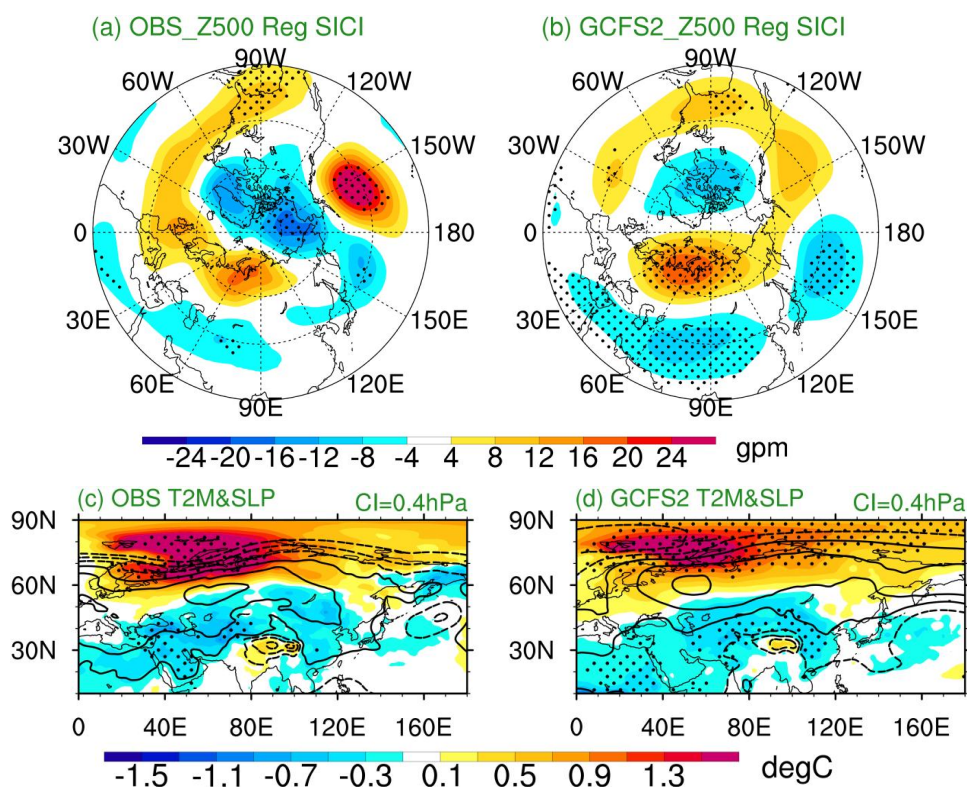


图 10 (a) 1993~2016 年观测的 500hPa 位势高度 (填色, 单位: gpm, 的异常回归到 $-1 \times \text{SICl}$, (b) GCFS2 提前一个月 (Lead1) 预测的冬季平均 500hPa 位势高度; 图 10c-d 类似于 10a-b, 然而海平面气压 (等值线, 单位: hPa), 地表气温 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)。打点区域表示通过 0.05 显著性检验

Fig.10 (a) Regression of DJF 500 hPa geopotential height (shading, units: gpm) anomalies onto the $-1 \times \text{SIC}$ Index during 1993~2016 for the observation. (b) DJF 500 hPa geopotential height for the GCFS2 with Lead1. Figures 10c-d are the same as Figures 10a-b, but for sea level pressure (shading, units: hPa) and surface air temperature (shading, units: $^{\circ}\text{C}$). The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level

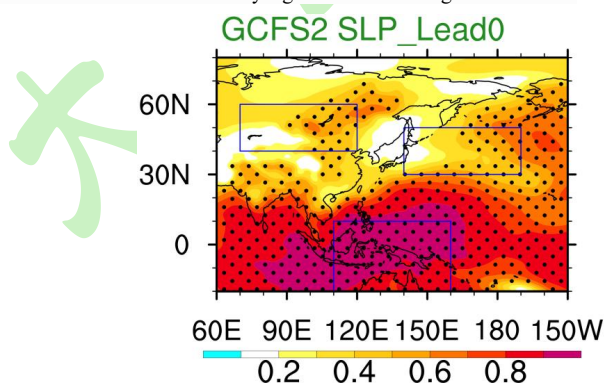


图 11 GCFS2 在 Lead0 时对冬季平均的海平面气压异常预报技巧 TCC 空间分布, 打点区域代表相关系数通过 0.05 显著性检验

Fig. 11 TCC (Temporal Correlation Coefficient) skills for sea level pressure anomalies based on observations and Lead0 seasonal prediction by GCFS2 in DJF. The stipple areas represent the correlation coefficients are statistically significant at 0.05 significance level.

5 结论与讨论

本文全面探讨了 GCFS2 对 EAWM 的预测性能, 包括气候态及年际变化特征, 重点关注与 EAWM 年际变率及可预报性相联系的动力—物理过程。得到如下结论:

(1) GCFS2 很好地预测了 EAWM 气候态的主要特征, 包括低层西伯利亚高压、阿留申低压、东亚上空低层的风、中层东亚大槽、高层东亚高空急流及地表气温和降水的强度及位置。模式对东亚区域年际变化预测技巧大值区主要位于海洋上, 有相关系数大于 0.9 的区域, 这些区域的高技巧来源于 ENSO 遥相关影响 (Wang et al., 2009), 然而在欧亚大陆中纬度 ENSO 影响较弱的区域也显示出较高预测技巧, 尤其对东亚大槽及东亚地表气温, 这在以往研究中所不及 (Wang et al., 2009; Li and Wang, 2012; Lee et al., 2013)。

(2) GCFS2 对一个用 SLP 定义的 EAWMI 显示出了预测技巧, 整个 24 年 (1993-2016 年) Lead0 的相关系数高达 0.55, 与 ENSEMBLES (Li and Wang, 2012) 相比预测性能有明显提升。模式可以很好的预测与 EAWM 相关的位于海洋上的大气环流、地表气温及降水异常, 显示出与 ENSO 冷位相一致的降水空间型及大气遥相关, 但对欧亚大陆热带外环流异常预测不足。GCFS2 中 EAWM 的预测技巧来源于 ENSO, 当模式合理再现观测中的 EAWM-ENSO 关系 (甚至是超越观测) 时, 有助于增加 EAWM 的预测技巧。模式中 EAWM-ENSO 关系, 主要取决于模式合理地再现观测中 ENSO 遥相关。GCFS2 可以再现与 ENSO 相关的流场及赤道太平洋上的降水异常, 低层西北太平洋异常反气旋西侧的偏南气流连接着热带和东亚地区, 增强了 EAWM 的预测技巧。

(3) 观测中, EAWM 的变化与冬季巴伦支—喀拉海区域海冰覆盖度 (BK_SIC) 的变化有关, 用这一区域平均海冰覆盖度定义的指数 (SICI) 与 EAWMI 的相关系数为-0.36, 与 SHI 相关系数为-0.37。BK_SIC 的损失可以通过增强西伯利亚高压, 使得东亚大陆地表气温出现冷异常。12 月初始化 (Lead0) 的 GCFS2 中再现了绝对值大于观测的 EAWMI 与海冰相关系数, 模式中 SICI 与 EAWMI 及 SHI 的相关系数分别为-0.48 和-0.45, 且 SHI 预测技巧为 0.4。同时, 模式中可以再现观测中与 BK_SIC 变化相关的环流及地表气温异常分布, 且振幅强于观测, BK_SIC 变化产生的位于西伯利亚高压东北部的海平面气压异常分布型类似于 Lead0 时海平面气压预测技巧分布图。因此, 说明冬季巴伦支—喀拉海区域海冰变化可以增加西伯利亚高压东北部的可预测性, 使得 12 月初始化的 EAWM 预测技巧增加。我们使用 Li and Yang (2010) 定义的 EAWMI 仍然可以得到 (2)、(3) 中类似的结论。

由本研究可知, GCFS2 对东亚大槽 (EAT) 及东亚地表气温显示出很高的预测技巧, 那么它们的可预测源是什么, 可预测源相联系的动力—物理过程是什么? 本文并未深入研究模式对 EAWM 预测技巧不足的原因。这些问题值得进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)[J]. *Journal of hydrometeorology*, 4(6): 1147-1167. doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2
- 陈隽, 孙淑清. 1999. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究[J]. *大气科学*, 23(1): 101-111.
- Chen Jun, Sun Shuqing. 1999. Eastern Asian Winter Monsoon Anomaly and Variation of Global Circulation Part. I: A Comparison Study on Strong and Weak Winter Monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(in Chinese), 23(1): 101-111. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.12

- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17(1): 48–60. doi:10.1007/s00376-000-0042-5
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D14). doi:10.1029/2004JD005669
- 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展 [J]. *大气科学*, 42(3): 640-655. Wen CHEN, Shuoyi DING, Juan FENG, et al. Progress in the Study of Impacts of Different Types of ENSO on the East Asian Monsoon and their Mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(3): 640-655. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17248
- Chen Z, Wu R, Chen W. 2014a. Distinguishing interannual variations of the northern and southern modes of the East Asian winter monsoon [J]. *Journal of Climate*, 27(2): 835-851. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00314.1
- Chen Z, Wu R, Chen W. 2014b. Impacts of autumn Arctic sea ice concentration changes on the East Asian winter monsoon variability [J]. *Journal of Climate*, 27(14): 5433-5450. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00731.1
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究 [J]. *热带气象学报*, 45(2): 119-128. Ding Yihui. 1990. A STATISTICAL STUDY OF WINTER MONSOONS IN EAST ASIA [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, (2): 119-128.
- 丁一汇, 王遵亲, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, (5): 808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66(5): 808-825. doi: 10.11676/qxxb2008.074
- Dobrynin M, Domeisen D, WA Müller, et al. 2018. Improved Teleconnection-Based Dynamical Seasonal Predictions of Boreal Winter. *Geophysical Research Letters*, 45(8), 3605–3614. doi:10.1002/2018gl077209
- Dalelane C, Dobrynin M, Frhlich K. 2020. Seasonal Forecasts of Winter Temperature Improved by Higher-Order Modes of Mean Sea Level Pressure Variability in the North Atlantic Sector. *Geophysical Research Letters*, 47(16). doi:10.1029/2020gl088717
- Frhlich K, Dobrynin M, Isensee K, et al. 2021. The German Climate Forecast System: GCFS [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, e2020MS002101. doi.org/10.1029/2020MS002101
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系 [J]. *应用气象学报*, 5(002): 218-225. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies China. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 5(2): 218-225.
- 郭渠, 刘向文, 吴统文, 程炳岩, 等. 2017. 基于 BCC_CSM 模式的中国东部夏季降水预测检验及订正 [J]. *大气科学*, 41(1): 71-90. Qu GUO, Xiangwen LIU, Tongwen WU, Bingyan CHENG, et al. 2017. Verification and Correction of East China Summer Rainfall Prediction Based on BCC_CSM Model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(1): 71-90. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15280
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2073-2076. doi.org/10.1029/2002GL015373
- Gong H, Wang L, Chen W, et al. 2014. The climatology and interannual variability of the East Asian winter monsoon in CMIP5 models [J]. *Journal of Climate*, 27(4): 1659-1678. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00039.1

- 贺圣平, 王会军. 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J]. 大气科学, 36(3): 523-538. HE Shengping, WANG Huijun. 2012. An Integrated East Asian Winter Monsoon Index and Its Interannual Variability[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(3): 523-538. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11083
- 黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 2014. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因[J]. 大气科学, 38(4): 627-644. HUANG Ronghui, LIU Yong, HUANGFU Jingliang, et al. 2014. Characteristics and Internal Dynamical Causes of the Interdecadal Variability of East Asian Winter Monsoon near the Late 1990s[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, (in Chinese), 38(4): 627-644. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13245
- Huang B, Cubasch U, Kadow C. 2018. Seasonal prediction skill of East Asian summer monsoon in CMIP5 models[J]. Earth System Dynamics, 9(3):985-997. doi.org/10.5194/esd-9-985-2018, 2018
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146(730): 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 2021. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J]. 气候与环境研究, 26(1): 1–17. HAN Yongqiu, ZHOU Liantong, HUANG Ronghui. 2021. Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 1–17 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018
- Jiang X, Yang S, Li Y, et al. 2013. Dynamical prediction of the East Asian winter monsoon by the NCEP Climate Forecast System[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(3): 1312-1328. doi.org/10.1002/jgrd.50193
- 刘实, 布和朝鲁, 陶诗言, 等. 2010. 东亚冬季风强度的统计预测方法研究[J]. 大气科学, (1): 35-44. LIU Shi, Bueh Cholaw, TAO Shiyang, et al. 2010. A Study of the Statistical Prediction Method for the East Asian Winter Monsoon Intensity[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 34(1): 35-44. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.04
- 刘舸, 纪立人, 孙淑清, 等. 2013. 关于东亚冬季风指数的一个讨论——东亚中、低纬冬季风的差异[J]. 大气科学, 37(3): 755-764. LIU Ge, JI Liren, SUN Shuqing, et al. 2013. A Discussion on the East Asian Winter Monsoon Index—Differences between the East Asian Winter Monsoon at Mid-high and Low Latitudes[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 755-764. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12054
- 刘舸, 宋文玲, 朱艳峰. 2013. 一个反映中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数的统计预测方法[J]. 气象学报, 71(2): 275-285. LIU Ge, SONG Wenling, ZHU Yanfeng. 2013. A statistical prediction method for an East Asian winter monsoon index reflecting winter temperature changes over the Chinese mainland[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (2): 275-285. doi: 10.11676/qxxb2013.025
- Li Y, Song Y. 2010. A Dynamical Index for the East Asian Winter Monsoon[J]. Journal of Climate, 23(15):4255-4262. doi.org/10.1175/2010JCLI3375.1
- Li F, Wang H. 2012. Predictability of the East Asian winter monsoon interannual variability as indicated by the DEMETER CGCMS[J]. Adv. Atmos. Sci, 29(3): 441-454., doi: 10.1007/s00376-011-1115-3.
- Lee S S, Lee J Y, Ha K J, et al. 2011. Deficiencies and possibilities for long-lead coupled climate prediction of the Western North Pacific-East Asian summer monsoon[J]. Climate dynamics, 36(5-6): 1173-1188. doi:10.1007/s00382-010-0832-0
- Lee J Y, Lee S S, Wang B, et al. 2013. Seasonal prediction and predictability of the Asian winter temperature variability[J]. Climate Dynamics, 41(3):573-587. doi.10.1007/s00382-012-1588-5

- Lu B, Scaife A A, Dunstone N, et al. 2017. Skillful seasonal predictions of winter precipitation over southern China[J]. *Environmental Research Letters*, 12(7): 074021.doi.org/10.1088/1748-9326/aa739a
- Liu Y, Ke Z, Ding Y. 2019. Predictability of East Asian summer monsoon in seasonal climate forecast models[J]. *International Journal of Climatology*, 39(15): 5688-5701.doi.org/10.1002/joc.6180
- 彭京备, 孙淑清. 2017.我国南方持续性低温与东亚冬季风“北弱南强”模态的关系[J]. *大气科学*, 41(4): 691-701. Jingbei PENG, Shuqing SUN. 2017. The Relationship between Persistent Cold Spell in Southern China and the Variation Mode of East Asian Winter Monsoon with Opposite Signs in the North and South[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(in Chinese),41(4): 691-701. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16145
- 彭京备, 孙淑清. 2019. 2018 年 1 月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系 [J]. *大气科学*, 43(6): 1233-1244. Formation of Rainy and Snowy Weather in South China in January 2018 and Its Relationship with the Abnormal East Asian Winter Monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2019, 43(6):1233-1244. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18188
- 钱卓蕾, 罗玲, 马洁华, 等. 2020. 2018/2019 年冬季浙江罕见持续阴雨天气的环流异常与海温强迫[J]. *气候与环境研究*, 25(5): 510–520. QIAN Zhuolei, LUO ling, MA Jiehua, et al. 2020. Circulation Anomaly and Sea Surface Temperature Forcing in Rare Continuous Rainy Weather in Zhejiang during the Winter of 2018/2019 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 25 (5): 510–520 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060
- Rayner, N. A . 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).doi.org/10.1029/2002JD002670
- 孙柏民, 李崇银. 1997.冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系[J]. *科学通报*, (05):54-58. Sun, B., and C. Li, 1997:Relationship between the disturbances of East Asian trough and tropical convective activities in boreal winter. *Chin. Sci. Bull.*, 42, 500–504.
- Sun C, Yang S, Li W, et al. 2016. Interannual variations of the dominant modes of East Asian winter monsoon and possible links to Arctic sea ice[J]. *Climate Dynamics*, 47(1): 481-496.doi.10.1007/s00382-015-2851-3
- Shin S H, Moon J Y. 2018. Prediction skill for the East Asian winter monsoon based on APCC multi-models[J]. *Atmosphere*, 9(8): 300.doi.org/10.3390/atmos9080300
- Chul-Su S , Huang B , Zhu J , et al. 2018. Improved seasonal predictive skill and enhanced predictability of the Asian summer monsoon rainfall following ENSO events in NCEP CFSv2 hindcasts[J]. *Climate Dynamics*, 1-20. doi.org/10.1007/s00382-018-4316-y
- Trenberth K E, Hurrell J W, Stepaniak D P. 2006. The Asian monsoon: global perspectives[M].*The Asian Monsoon*. Springer, Berlin, Heidelberg, 67-87.
- Tian B, Fan K, Yang H. 2018. East Asian winter monsoon forecasting schemes based on the NCEP's climate forecast system[J]. *Climate Dynamics*, 51(7): 2793-2805.doi.org/10.1007/s00382-017-4045-7
- Takaya Y , Yu K , Watanabe M , et al. 2021. Skilful predictions of the Asian summer monsoon one year ahead[J]. *Nature Communications*, 12(1).doi.org/10.1038/s41467-021-22299-6
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?[J]. *Journal of Climate*, 13(9): 1517-1536.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2

- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2008. How accurately do coupled climate models predict the leading modes of Asian-Australian monsoon interannual variability?[J]. *Climate Dynamics*, 30(6): 605-619.doi.10.1007/s00382-007-0310-5
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004)[J]. *Climate Dynamics*, 33(1): 93-117.doi. 10.1007/s00382-008-0460-0
- Wang B, Wu Z, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes[J]. *Journal of Climate*, 23(6): 1495-1512.doi.org/10.1175/2009JCLI3243.1
- Wang L, Chen W. 2014. An intensity index for the East Asian winter monsoon[J]. *Journal of Climate*, 27(6): 2361-2374. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00086.1
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等. 2017. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. *大气科学*, 41(6): 1300-1315.
- Jie WU, Hongli REN, Shuai ZHANG, et al. 2017. Evaluation and Predictability Analysis of Seasonal Prediction by BCC Second-Generation Climate System Model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 2017, 41(6): 1300-1315. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16256
- Wu Z, Li J, Jiang Z, et al. 2011. Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: once-in-a-century snowstorms in 2007/2008 winter[J]. *Climate Dynamics*, 37(7-8): 1661-1669.doi.org/10.1007/s00382-010-0938-4
- Wu J, Liu Q, Cui QY, et al. 2019. Shrinkage of East Asia winter monsoon associated with increased ENSO events since the mid-Holocene. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124:3839–3848.doi.org/10.1029/2018JD030148
- Yang S , Lau K M , Kim K M . 2002.Variations of the East Asian Jet Stream and Asian-Pacific-American Winter Climate Anomalies[J]. *Journal of Climate*,, 15(3):306-325.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0306:VOTEAJ>2.0.CO;2
- Yang S, Zhang Z, Kousky V E, et al. 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP Climate Forecast System[J]. *Journal of Climate*, 21(15): 3755-3775.doi.org/10.1175/2008JCLI1961.1
- Yang S H, Lu R Y. 2014. Predictability of the East Asian winter monsoon indices by the coupled models of ENSEMBLES [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(6): 1279–1292. doi:10.1007/s00376-014-4020-8
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 74(1): 49-62.doi.org/10.2151/jmsj1965.74.1_49
- Zhang Y, Sperber KR, Boyle JS. 1997. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis[J]. *Mon Weather Rev*, 125:2605-2619.doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2605:CAIVOT>2.0.CO;2
- X. D. Zhang, Y. F. Fu, Z. Han, et al. 2022. Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: Comparisons, causes, and future implications. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(4), 553–565. doi.org/10.1007/s00376-021-1229-1.
- Zuo J, Ren H L, Wu B, et al. 2016. Predictability of winter temperature in China from previous autumn Arctic sea ice[J]. *Climate Dynamics*, 47(7): 2331-2343.doi:10.1007/s00382-015-2966-6