氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

CFSv2模式对春季逐月南极涛动预测效能及成因分析

肖哨 田宝强 范可

Predictive Ability of CFSv2 Model for Monthly Antarctic Oscillation in Boreal Spring and Analysis of Causes

XIAO Shao TIAN Baoqiang FAN Ke

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20146

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

CMIP5模式对冬季北极涛动的模拟和预估

Simulation and Projection of the Arctic Oscillation in Winter Based on CMIP5 Models

气候与环境研究. 2017, 22(5): 633 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17019

基于PMIP3和CMIP5模拟结果的过去千年特征时段北极涛动的变率特征及成因分析

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

气候与环境研究. 2020, 25(4): 429 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20011

冬季与北大西洋涛动相关波列传播特征及对下游气候的影响

Propagation Characteristics of Rossby Wave Trains Associated with the North Atlantic Oscillation in Winter and Their Impacts on Downstream Climate

气候与环境研究. 2019, 24(3): 289 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.17178

中国东北暖季气温变化特征及其与海温和大尺度环流的关系

Variability of Warm Season Surface Air Temperature over Northeastern China and Its Relationships with Sea Surface Temperature and Large-scale Atmospheric Circulation Pattern

气候与环境研究. 2018, 23(4): 479 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17085

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

Circulation Anomaly and Sea Surface Temperature Forcing in Rare Continuous Rainy Weather in Zhejiang during the Winter of 2018/2019

气候与环境研究. 2020, 25(5): 510 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060

南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及ENSO的作用

The Relationship between the East Asian Winter Monsoon Anomaly and the Subsequent Summer Monsoon Onset over the South China Sea and the Impact of ENSO

气候与环境研究. 2018, 23(4): 401 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17026

关注微信公众号，获得更多资讯信息

肖哨, 田宝强, 范可. 2021. CFSv2 模式对春季逐月南极涛动预测效能及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 26(6): 621−636. XIAO Shao, TIAN Baoqiang, FAN Ke. 2021. Predictive Ability of CFSv2 Model for Monthly Antarctic Oscillation in Boreal Spring and Analysis of Causes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (6): 621−636. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20146

CFSv2 模式对春季逐月南极涛动预测效能及成因分析

肖哨[1,2] 田宝强[1] 范可[3]

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中山大学大气科学学院，南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海），广东珠海 519082

摘 要 系统评估了美国第二代气候预测系统（CFSv2）对 1983～2019 年北半球春季逐月南极涛动（AAO）的预测效能及可能成因。结果表明，CFSv2 模式对 3 月、4 月和 5 月 AAO 空间模态预测效能较好，但是耦合模式仅对 3 月的 AAO 年际变化具有较好的预测能力，对 4 月和 5 月 AAO 年际变化的预测能力较差。热带中东太平洋和澳大利亚以东太平洋海温异常有可能是 3 月 AAO 年际变化的可预测性来源。一方面，3 月厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）与 AAO 之间关系显著，而 4、5 月两者之间关系减弱。 3 月 ENSO 激发 PSA（Pacific–South American）波列传播到南太平洋上，通过影响南太平洋海温异常以及低层气旋性环流异常影响 3 月 AAO 的年际变化。另一方面，3 月澳大利亚以东太平洋海温异常在副热带急流核心区域激发活跃的 Rossby 波列，该波列由澳大利亚东部向东南频散到南太平洋中高纬地区，造成该地区位势高度异常，使得副热带地区 30°S 西风减弱，南半球高纬 60°S 西风加强，进而影响 AAO 的变化。CFSv2 对 3 月 AAO 的预测效能高于 4 月和 5 月的主要原因是 CFSv2 模式能够很好再现 3 月 AAO 与 ENSO、澳大利亚以东海温之间的关系及其影响机制。

关键词 3 月南极涛动 预测效能 ENSO 澳大利亚以东海温 CFSv2 模式
文章编号 1006-9585(2021)06-0621-16 **中图分类号** P46 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20146

Predictive Ability of CFSv2 Model for Monthly Antarctic Oscillation in Boreal Spring and Analysis of Causes

XIAO Shao[1,2], TIAN Baoqiang[1], and FAN Ke[3]

1 *Nansen–Zhu International Research Centre*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *School of Atmospheric Sciences*, *Sun Yat-sen University*, *and Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory* (*Zhuhai*), *Zhuhai*, *Guangdong Province* 519082

Abstract The predictive ability of the Climate Forecast System version 2 (CFSv2) for the Antarctic Oscillation (AAO) is evaluated in the three boreal spring months (March, April, and May) of the period 1983–2019. Results show that the

收稿日期 2020-11-25；**网络预出版日期** 2021-04-06
作者简介 肖哨，男，1995 年出生，硕士研究生，主要从事气候预测研究。E-mail: xiaoshao@mail.iap.ac.cn
通讯作者 范可， E-mail: fanke@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 42088101、41730964，国家重点研发计划项目 2017YFA0603802，南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）创新团队建设项目 311020001
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42088101 and 41730964), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0603802), Innovation Group Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (Grant 311020001)

CFSv2 model has a good predictive capability for the spatial patterns of the AAO in the three spring months. Specifically, the CFSv2 model can effectively predict the interannual variability of the AAO in March but not in April and May. Results indicate that the tropical central and eastern Pacific sea surface temperature anomalies and the eastern Australia sea surface temperature anomalies are likely to be the predictable sources of the AAO in March. On the one hand, a significant relationship exists between El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and the AAO in March, and it weakens in April and May. In March, ENSO can excite the Pacific–South American wave train from tropical Pacific to the South Pacific, thereby influencing the interannual variability of the simultaneous AAO by affecting the South Pacific sea surface temperature anomalies and the low-level cyclonic circulation anomalies. On the other hand, the March sea surface temperature anomaly east of Australia triggers an active Rossby wave train in the core area of the subtropical jet, which propagates away from eastern Australia toward the southeast and arrives at the mid-high latitudes of the South Pacific. Consequently, the 30°S westerly wind weakens, and the 60°S high latitude in the Southern Hemisphere strengthens and eventually leads to changes in the AAO. CFSv2's predictive capability for March AAO is higher than that of April and May because this model can reproduce not only the relationship between March AAO and ENSO and the sea surface temperature east of Australia but also the physical processes between them.

Keywords Antarctic Oscillation in March, Predictive ability, ENSO, Sea surface temperature east of Australia, CFSv2 model

1 引言

南极涛动（Antarctic Oscillation，AAO）表现为南半球副热带高压带与绕极低压带之间气压场反位相的变化特征，具有明显的正压结构。其实质是南半球中高纬南北向大尺度大气质量交换（Gong and Wang, 1999; Thompson and Wallace, 2000; Fan and Liu, 2013）。AAO 作为南半球中高纬最主要的大气环流模态（Trenberth et al., 2005），不仅对南半球天气气候有显著影响，而且能够影响北半球的气候系统（Kidson and Sinclair, 1995; Silvestri and Vera, 2003; Li and Smith, 2009; 郑菲和李建平, 2012）。当 AAO 处于正位相，绕南极低压带加深，副热带高压加强，气压梯度加强导致南半球中高纬平均纬向西风加强；当 AAO 处于负位相，则反之（Fan and Wang, 2006; Screen et al., 2010）。Mendes and Cavalcanti（2014）指出 AAO 能够通过影响与阻塞相关大气环流结构从而影响南半球阻塞事件的频次。

对于北半球热带地区，有研究指出 6～9 月 AAO 与西北太平洋台风生成频次具有显著的反相关关系（Wang and Fan, 2007）。对于北半球中纬度地区，北半球冬春季期间，AAO 正异常会通过南北半球间的经向遥相关降低东亚地区冷空气活动频次，进而对沙尘相关的大气环流产生显著影响（Fan and Wang, 2004, 2006; 范可和王会军, 2007）。而对于北半球高纬度地区，张乐英等（2017）研究发现当冬季 1 月 AAO 处于正位相时，南太平洋出现显著的位势高度正异常持续到 2 月，并且扩展至北半球东太平洋地区，通过瞬变波活动形成典型的负位相斯堪的纳维亚环流型，进而引起欧亚大陆地表气温正异常。此外，春季 AAO 与东亚夏季降水也密切相关。春季异常偏强的 AAO 通过影响海洋性大陆地区对流活动，改变西太平洋副热带高压的位置，进而使得中国长江流域夏季降水偏多（Nan and Li, 2003; Gao, 2003; Fan, 2006; Sun et al., 2009）。春季 AAO 对东亚地区夏季气候具有显著的超前影响，系统评估耦合模式对春季 AAO 的预测效能对提高东亚夏季气候的预测能力有重要意义。

目前国内外已有学者评估了不同模式对 AAO 的预测效能。祝亚丽和王会军（2008）评估了参加政府间气候变化委员会（IPCC）第四次评估报告（AR4）的 24 个耦合模式对 AAO 的模拟效能，并对 AAO 的未来变化作了预估，结果表明模式对 AAO 模拟能力具有季节依赖性，冬季模拟能力好于春季，AAO 在未来全球变暖的背景下将持续增强。钱卓蕾等（2012）评估了欧洲多模式集合 DEMETER 计划的 7 个海气耦合模式对冬春季 AAO 的预测能力，结果表明模式对春季 AAO 的空间分布预测能力较强，但是对于春季 AAO 的年际变化预测能力较弱。Zhang et al.（2019）评估了美国第二代气候预测系统（CFSv2）对北半球春季 AAO 的预测效能，并利用年际增量预测方法构建春季 AAO 动力和统计相结合预测模型，提高了春季 AAO

的预测效能。

目前的研究主要集中在耦合模式对春季 AAO 模拟和预测效能的评估，但耦合模式对月际尺度 AAO 预测效能的研究相对较少。季节平均很容易掩盖气候系统季节内变化的特征，耦合模式对季内气候的预测效能也存在显著差异。Tian and Fan（2020）研究指出 CFSv2 对前冬（11～12 月）东亚冬季风的预测效能显著高于后冬（1～2 月），其主要原因是前后冬 ENSO 与东亚冬季风关系的变化。另外 CFSv2 模式对 12 月北大西洋涛动的预测能力也高于 1 月和 2 月（Tian and Fan, 2019）。杨洪卿等（2021）指出 CFSv2 对 11 月西伯利亚高压的预测效能显著高于冬半年其他月份。

相比于季节平均气候的预测研究，月际尺度的气候预测更为困难。国内外先进的气候模式的预测效能主要集中于热带，对南半球中高纬气候系统 AAO 预测能力十分有限。考虑到春季南极涛动对东亚气候有重要的影响（Fan and Wang, 2004; Wang and Fan, 2005; Fan, 2007），因此春季逐月 AAO 的预测研究有重要的意义。论文其余部分的结构如下：第 2 节是数据与方法介绍，第 3 节介绍 CFSv2 模式对春季逐月（3、4、5 月）AAO 空间结构和年际变化的可预测性评估结果，第 4 节为春季逐月 AAO 可预测性存在差异的可能原因，最后一节为论文的结论与展望。

2 数据与方法

本文所用的大气数据来源于美国国家环境预报中心和大气研究中心（NCEP/NCAR）月平均再分析资料（Kalnay et al., 1996），所选的变量场包括：海平面气压场（SLP）、位势高度场、水平风场、地表气温，水平分辨率均为 2.5°（纬度）×2.5°（经度）；海温来自美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的扩展重建海表温度资料 ERSST.v3b，水平分辨率为 2.0°（纬度）×2.0°（经度）（Smith et al., 2008）。

模式数据来自美国国家环境预测中心开发的第二代气候预测系统（CFSv2），该模式采用全新的数据同化方案，是一个全耦合的海陆气实时预测系统。CFSv2 数据集起始时间为 1982 年，其中 1982～2010 年的结果来源于回报试验，各月每隔 5 天分别从 00:00（协调世界时，下同）、06:00、12:00 和 18:00 开始积分，积分时间为 9 个月，即回报当月数据并对未来 1～9 个月进行预报。2011～2019 年的 CFSv2 资料为实时预测，每天都从上述 4 个时次开始积分，积分时间同为 9 个月，模式数据分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）（Saha et al., 2014）。ECMWF System 4 是欧洲天气预报中心开发的第四代业务预测系统，是一个全耦合的大气—海洋预报系统，提供实时季节预测和回报模式数据，ECMWF System 4 数据时间段为 1981～2019 年，由 1981～2010 年回报和 2011～2019 年的实时预测组成，其中回报试验共 15 个集合成员从每月第 1 天开始积分回报当月并对未来 6 个月进行预测，其水平分辨率为 0.75°（纬度）×0.75°（经度）（Molteni et al., 2011）。本文所用数据选取的时间段为 1982～2019 年，以北半球季节为划分标准，春季为 3、4、5 月。模式数据统一插值为水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度），并且均去除线性趋势。

南极涛动指数（AAOI）定义为：SLP 距平场在区域（20°S～90°S，0°～360°）内的经验正交函数分析（EOF）第一模态所对应的标准化时间序列（PC1）。CFSv2 模式预测的 AAOI 是利用模式预测的 SLP 距平场投影到观测 SLP 距平场 EOF 分析第一模态。Niño4 指数定义为：赤道中太平洋（5°S～5°N，160°E～150°W）区域内海温距平的区域加权平均值。

评估模式预测效能所用的指标主要有空间相关系数（Spatial Pattern Correlation Coefficient，PCC）和时间相关系数（Temporal Correlation Coefficient，TCC）以及偏相关系数（partial correlation coefficient），其中 PCC 主要反映的是预报值与观测值空间型的相关程度；TCC 能够在统计意义上较好的表征模式的预报值与观测值在时间演变上的相关程度；偏相关系数可以有效排除其他变量的影响下得到两变量之间的相关性。

3 CFSv2 模式对春季逐月 AAO 预测效能评估

3.1 空间结构预测效能

由于 AAO 指数的定义为南半球 20°S 以南 SLP 距平场的经验正交函数第一模态，本文首先评估了模式对南半球 SLP 气候态的预测效能。图 1

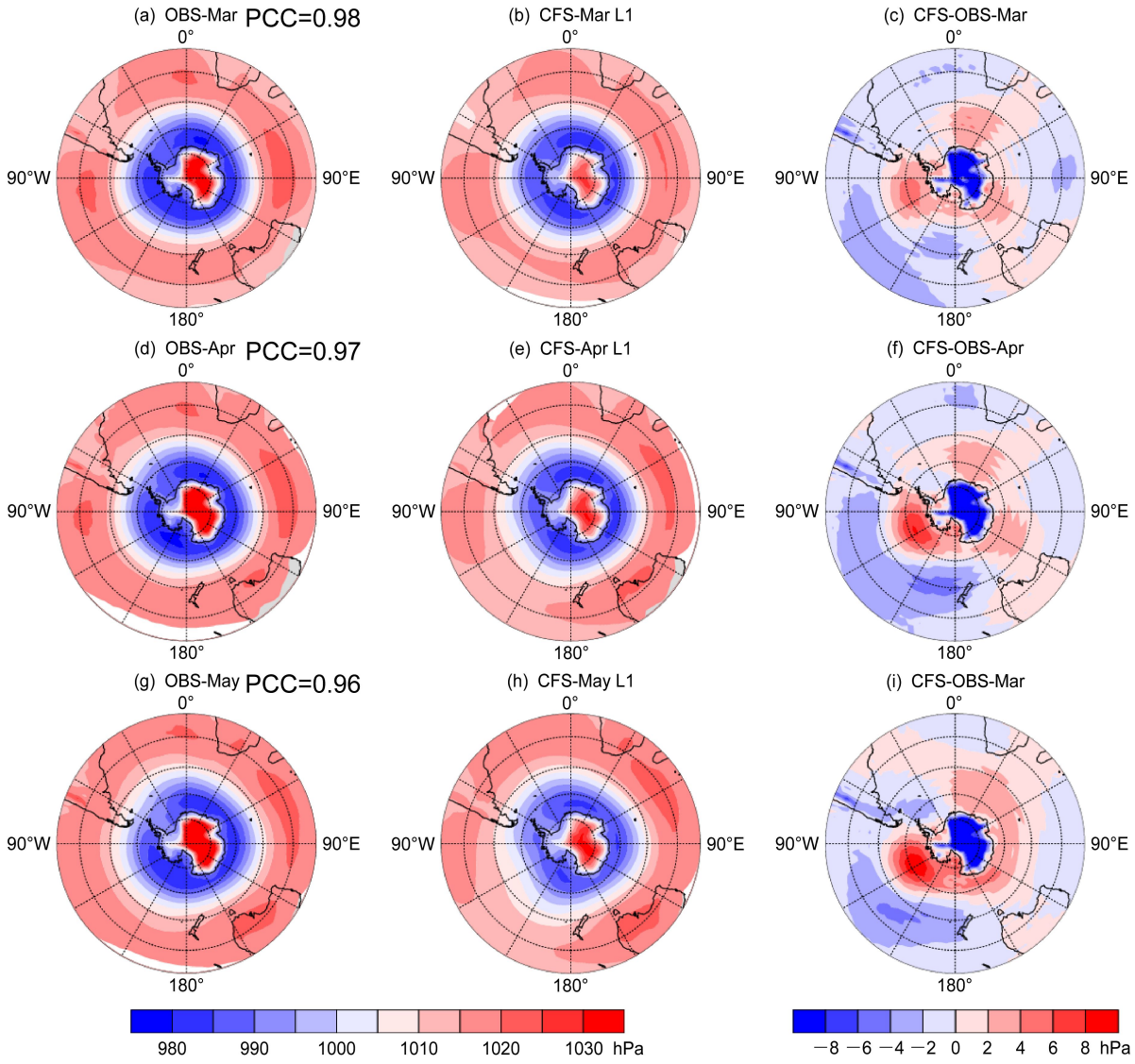

图 1 1983～2019 年（a、d、g）观测南半球春季逐月 SLP 气候态、（b、e、h）CFSv2 模式提前 1 个月预测的南半球春季逐月 SLP 气候态以及（c、f、i）观测与模式预测 SLP 差异场（观测－模式预测）：（a、b、c）3 月；（d、e、f）4 月；（g、h、i）5 月。PCC 表示观测和模式预测 SLP 气候态在区域（20°S～90°S，0°～360°）空间相关系数

Fig. 1 Mean SLP (Sea Level Pressure) over the Southern Hemisphere (20°S–90°S, 0°–360°) in (a, b, c) March, (d, e, f) April, and (g, h, i) May during the period of 1983–2019: (a, d, g) Observation; (b, e, h) CFSv2 model prediction with a 1-month lead; (c, f, i) the differences between the observation and the CFSv2 model prediction. PCC is a spatial correlation coefficient between the observation and the CFSv2 model prediction SLP over the Southern Hemisphere (20°S–90°S, 0°–360°)

为 1983～2019 年观测和 CFSv2 模式提前 1 个月预测的春季 3、4、5 月 20°S 以南 SLP 气候态及二者的差异场。从图 1a 和 1b 可以看出，CFSv2 模式基本可以预测出与观测一致的 3 月 SLP 环状结构，即位于三大洋上的高压系统、位于南极高纬度地区的绕极低压带以及南极大陆的高压系统。但从图 1c，可以看出，模式在一定程度上低估了 3 月三大洋上的高压中心强度和南极大陆上高压的强度，高估了绕极低压带的强度，且在南极大陆存在误差大值中心。对比图 1d、1e、1f 可以看出，CFSv2 模式同样低估了 4 月三大洋上的高压中心强度和南极大陆上高压的强度，高估了绕极低压带的强度，并且在罗斯海附近以及南极大陆存在误差大值中心。从图 1g、1h、1i 可以看出，CFSv2 模式对 5 月 SLP 气候态的预测效能与 4 月类似。从图 1 可以得出，春季 3、4、5 月的观测和模式 SLP 气候态 PCC 分别为 0.98、0.97、0.96，通过了 99% 的置信水平。模式对于春季逐月南半球 SLP 气候态具有

不错的预测效能，但模式对于副热带高压强度、绕南极低压带强度以及南极大陆上高压的强度的预测存在偏差。CFSv2 模式提前 2～6 个月对春季（3、4、5 月）逐月 SLP 气候态的预测也有相似的结果（图略）。

为了进一步准确地评估 CFSv2 模式对春季 3、4、5 月 AAO 的空间模态的预测效能，首先对观测和模式（20°S～90°S，0°～360°）区域的 SLP 做 EOF 分解，用第一分量表征 AAO 的空间模态，再利用观测和模式 AAO 模态之间的 PCC 定量评估 CFSv2 模式对 AAO 的空间模态预测效能。图 2 为 1983～2019 年 CFSv2 模式提前 1～6 个月预测春季 3、4、5 月 AAO 模态与观测 AAO 模态之间的 PCC。可以看出，CFSv2 模式提前 1～6 个月预测春季逐月 AAO 与观测 AAO 的 PCC 都通过了 99% 置信水平，表明 CFSv2 模式对于春季 3、4、5 月 AAO 的空间模态的预测效能较高。

3.2　年际变化预测效能

CFSv2 模式对春季逐月 AAO 的年际变化的预测效能如何？图 3 为 1983～2019 年春季逐月观测 AAOI 与 CFSv2 模式不同起报月份预测春季逐月 AAOI 的 TCC。除了提前 2 个月，CFSv2 模式提前 1 个月和 3～6 个月对 3 月 AAOI 均具有较好的预测效能，与同期观测 AAOI 的 TCC 分别为 0.45、0.39、0.44、0.42、0.40，都通过了 95% 置信水平。CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 4 月 AAOI 与同期

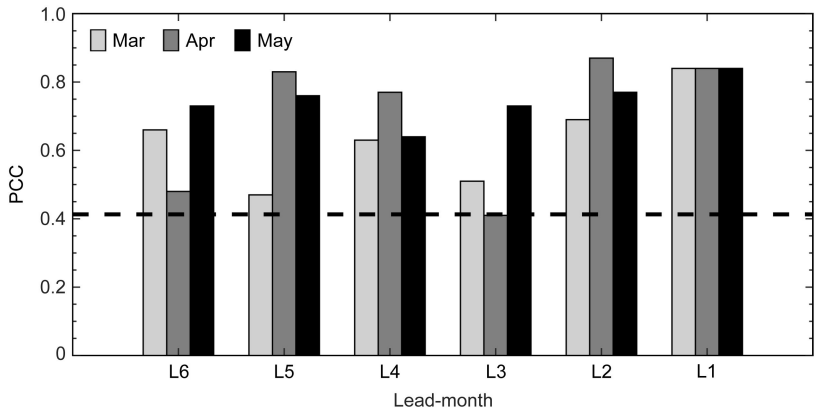

图 2　1983～2019 年观测与 CFSv2 模式提前 1～6 个月预测春季（3、4、5 月）逐月 20°S 以南 SLP 距平 EOF1 空间模态的 PCC。L1 至 L6 分别表示模式提前 1～6 个月的预测结果，下同；黑色虚线表示 99% 置信水平

Fig. 2　Spatial correlation coefficients (PCC) of leading EOF modes of SLP anomalies south of 20°S between the observation and the CFSv2 model prediction with 1–6-month leads in spring (March–May) during the period of 1983–2019. L1 represents the result predicted by CFSv2 with a 1-month lead, L2 represents the result predicted by CFSv2 with a 2-month lead, and so on. The black dashed line indicates passing the 99% confidence level

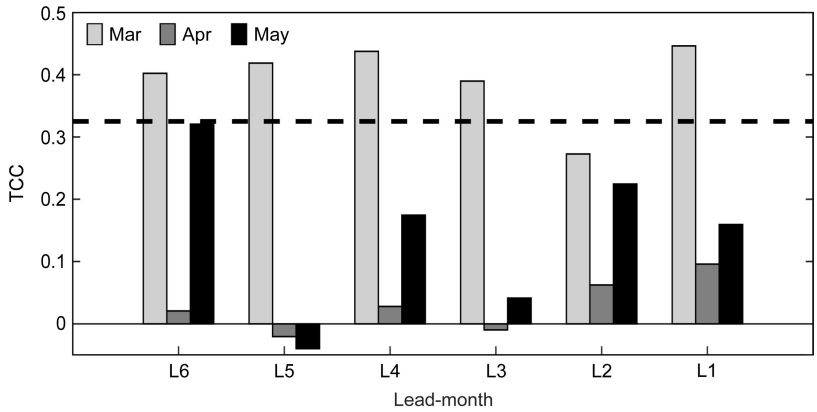

图 3　1983～2019 年春季逐月观测 AAOI 与 CFSv2 模式提前 1～6 个月预测春季（3、4、5 月）逐月 AAOI 的 TCC。黑色虚线表示 95% 置信水平，各指数均已滤去线性趋势

Fig. 3　TCC (Temporal Correlation Coefficient) between the AAOI (Antarctic Oscillation Index) predicted by CFSv2 model with 1–6-month leads (L1–L6) and the observed AAOI in spring (March–May) during the period of 1983–2019. The black dashed line indicates the statistically significant coefficients over the 95% confidence level. Each AAOI filters out the linear trend

观测 AAOI 的 TCC 分别为 0.1、0.06、−0.01、0.03、−0.02、0.02，CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 5 月 AAOI 与同期观测 AAOI 的 TCC 分别为：0.16、0.22、0.04、0.17、−0.04、0.31，都没有通过 95% 置信水平。由此可见，CFSv2 模式仅对 3 月 AAOI 的年际变化具有较高的预测效能，对 4 月和 5 月 AAOI 的年际变化预测效能较低。AAO 由绕极低压和副热带高压两个区域的环流系统构成，那么这两个区域的环流系统在 CFSv2 模式中的可预测性如何？进一步研究发现 CFSv2 模式对 3 月南太平洋副热带高压、南大西洋副热带高压、绕极低压的年际变化有较好的预测能力，但模式对 3 月南印度洋副热带高压以及 4、5 月南太平洋、南大西洋、南印度洋副热带高压以及绕极低压环流系统的年际变化预测能力较差（图略）。

春季逐月 AAO 预测效能的差异是否依赖于模式？本文进一步评估了 ECMWF System 4 模式对春季逐月 AAOI 的预测效能（图略）。在 1982～2010 年 ECMWF System 4 模式提前 1～6 个月预测 3 月 AAOI 与观测 3 月 AAOI 的 TCC 分别为 0.57、0.68、0.66、0.54、0.38、0.38，均通过了 95% 置信水平。该模式提前 1～6 个月预测 4 月 AAOI 与观测 4 月 AAOI 的 TCC 分别为 0.14、0.16、0.19、−0.2、0.16、0.24；提前 1～6 个月预测 5 月 AAOI 与观测 5 月 AAOI 的 TCC 分别为 0.22、0.37、0.07、−0.05、0.24、0.28，除了提前 3 个月预测 5 月 AAO 通过了 95% 置信水平，其余均未通过。表明 ECMWF System 4 模式和 CFSv2 模式均对 3 月 AAO 的年际变化有较好的预测技巧，而对 4 月和 5 月 AAOI 的年际变化预测效能较低。

图 4 为 CFSv2 模式对 1983～2019 年春季逐月 AAO 正、负异常年的距平符号一致率。AAO 正异常年定义为标准化 AAOI 大于 0.5，AAO 负异常年定义为标准化 AAOI 小于−0.5。AAO 正（负）异常年的距平符号一致率定义：在 AAOI 的正（负）异常年份中，如果 CFSv2 模式预测的 AAOI 也大于（小于）0.5（−0.5）个标准差时，则认为该年 CFSv2 模式对 AAO 正（负）异常预测正确，预测正确的年数占观测 AAOI 正（负）异常年总数的比例。从图 4a 可以看出，CFSv2 模式提前 1～6 个月

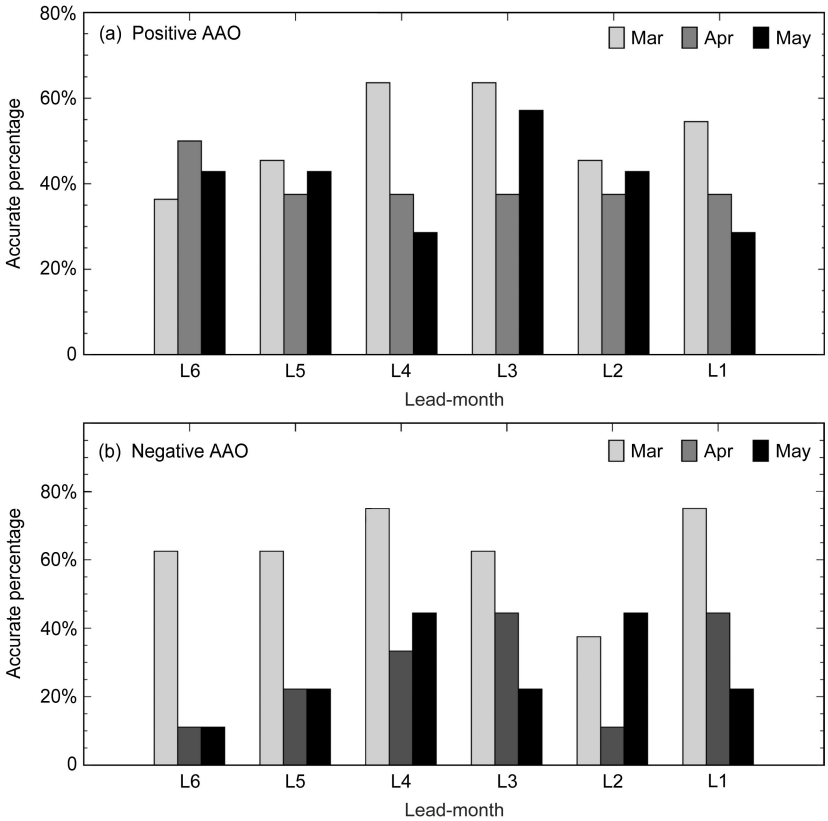

图 4 CFSv2 模式提前 1～6 个月对 1983～2019 年春季（3、4、5 月）逐月 AAO（a）正、（b）负异常年的距平符号一致率

Fig. 4 Anomaly sign consistency rate of AAO (Antarctic Oscillation) anomaly years in spring (March–May) during the period of 1983–2019 predicted by CFSv2 model with 1–6-month leads (L1–L6): (a) Positive AAO anomaly years; (b) negative AAO anomaly years

预测 3、4、5 月 AAO 正异常年的平均距平符号一致率分别为：51.5%、40%、40.7%。总体来看，CFSv2 模式对于春季 3 月 AAO 正异常年的预测准确度高于 4 月及 5 月。CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 3、4、5 月 AAO 负异常年的平均距平符号一致率分别为 62.8%、27.5%、27.5%（图 4b）。CFSv2 模式对于 3 月 AAO 负异常年的预测准确度远高于 4 月和 5 月。由此可见，CFSv2 模式不仅对于 3 月 AAO 年际变化预测效能高于 4 月和 5 月，而且对 AAO 正负异常年份的预测效能高于 4 月和 5 月。

为什么 CFSv2 模式对于北半球春季 3 月 AAO 年际变化的预测效能高，而对于 4、5 月 AAO 年际变化预测效能较低？有研究指出大尺度气候模态预测来源很大程度取决于海气相互作用（Kushnir et al., 2002）。AAO 作为南半球中高纬最主要的大气环流模态，其季节预测源可能来自与 AAO 相关的海温。

已有研究表明，热带中太平洋海温正异常能够使得南半球 Hadley 环流加强，副热带急流向极地偏移，进一步导致中纬度涡动通量异常辐合，极地西风急流向赤道方向移动，在南半球靠极地一侧的高纬西风和涡动通量辐合减弱，进而导致 AAO 出现负位相（Zhou and Yu, 2004; Gupta and England, 2007; Li et al., 2015）。Grassi et al.（2005）指出南半球夏季热带太平洋海温通过改变行星波的传播来影响中纬度的急流，从而对 AAO 产生影响。北半球冬春季南太平洋中纬度海温正异常，也可以通过 Ferrel 环流和加强高纬绕极低压带影响 AAO 位相变化（Mo, 2000; 范可和王会军, 2007; Hao et al., 2017）。因此，本文从海温影响 AAO 的角度，来探寻 CFSv2 模式对 3 月 AAO 预测效能高于 4、5 月的原因。

4　春季 AAO 预测效能存在差异的原因

4.1　ENSO 对 3 月 AAO 的可能影响

已有大量研究表明，在年际尺度上北半球春季和夏季 ENSO 与 AAO 具有紧密的联系，两者在南半球表现出的环流异常具有共同的特征，ENSO 异常可以引起 AAO 低频变率发生显著的变化（Carvalho et al., 2005; L'Heureux and Thompson, 2006; Ciasto and Thompson, 2008）。

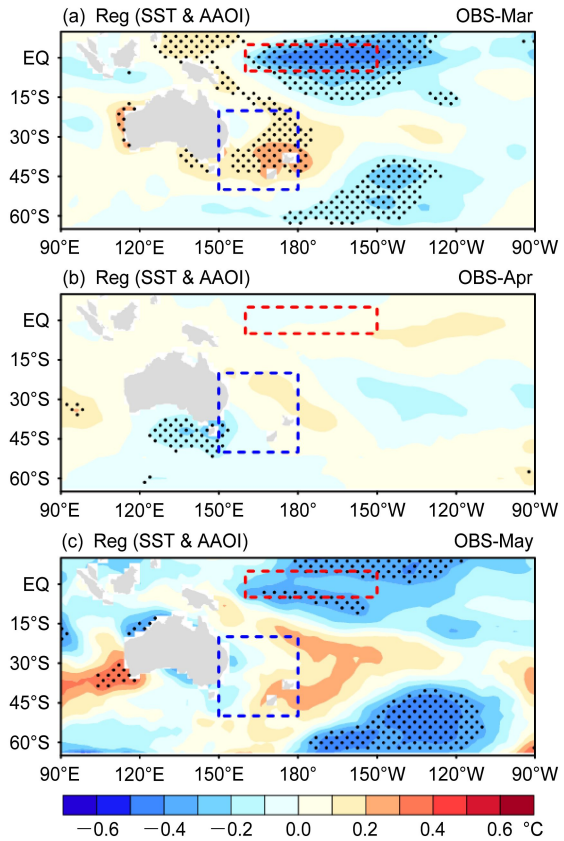

图 5　1983～2019 年春季（a）3 月、（b）4 月、（g）5 月观测逐月海温距平（填色，单位：℃）对同期 AAOI 回归场。打点区域表示通过 95% 置信水平检验；红色框为 Niño4 区域（5°N～5°S，160°E～150°W），蓝色框为澳大利亚以东的南太平洋区域（20°S～50°S，150°E～180°）

Fig. 5　Regression coefficients of sea surface temperature anomalies (SST, units: °C) on the AAOI in (a) March, (b) April, and (c) May during the period of 1983–2019. The dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test. The red box is the Niño4 area (5°N–5°S, 160°E–150°W), and the blue box is the South Pacific east of Australia (20°S–50°S, 150°E–180°)

图 5 为 1983～2019 年 3、4、5 月观测海温距平对同期观测 AAOI 的回归场。从图 5a 可以看出，当观测 3 月 AAO 为正位相时，赤道中太平洋海温为显著负异常，南半球澳大利亚以东海温为显著的正异常，南半球中高纬南太平洋海温为显著的负异常；从图 5b 可以看出，4 月观测海温与同期 AAO 基本无显著相关区域；如图 5c 所示，当 5 月 AAO 为正位相，在赤道中太平洋海温呈现弱的负异常，以及中高纬度南太平洋海温为显著的负异常。由此可见，赤道中太平洋海温、澳大利亚以东的太平洋海温、中高纬南太平洋海温等 3 个关键区海温与 3 月 AAO 显著相关，而 5 月 AAO 与赤道中太平洋

海温和中高纬南太平洋海温密切相关。

为了方便研究，将澳大利亚以东海温指数（SST_A）定义为南半球澳大利亚以东太平洋（20°S～50°S，150°E～180°）区域内海温距平的区域平均值；中高纬南太平洋海温指数（SST_B）定义为南太平洋（40°S～60°S，160°W～140°W）区域内海温距平的区域平均值；Niño4 指数定义为（5°S～5°N，160°E～150°W）区域内海表温度距平的区域平均值，−Niño4 指数为 Niño4 指数乘上−1。为了排除其他关键区海温信号的影响，只分析春季逐月中高纬南太平洋海温与赤道中太平洋海温、澳大利亚以东海温之间的关系， 本文中采用了偏相关分析。春季 3、4、5 月观测的 SST_B 与同期 Niño4 指数的偏相关系数分别为 0.58、0.67、0.63，都通过了 95% 置信水平，但与同期的 SST_A 偏相关系数分别为−0.23、−0.10、−0.11。结合前人研究发现，ENSO 可以激发太平洋南美遥相关型（PSA），然后传播到中高纬南太平洋以引起海温异常（Li et al., 2013），证明春季逐月中高纬南太平洋海温与同期 ENSO 密切相关，与澳大利亚以东海温相互独立。

为了进一步验证观测春季 3、4、5 月 AAO 与 ENSO、SST_A 之间的关系，表 1 为观测春季逐月 Niño4、SST_A 与 AAOI 指数之间的偏相关系数。3 月 AAOI 与 Niño4、SST_A 的偏相关系数通过了 95% 置信水平，5 月 AAOI 与 Niño4 的偏相关系数通过了 90% 置信水平。上述分析表明，春季观测 3 月 AAO 与 ENSO、SST_A 都存在显著相关，且 ENSO 与 SST_A 相互独立；4 月 AAO 与 ENSO、SST_A 均不存在显著相关；5 月 AAO 与 ENSO 存在弱的相关性，与 SST_A 不存在显著相关。因此，ENSO、SST_A 两个相互独立的因子，两者有可能是 3 月 AAO 可预测性来源，4 月 AAO 没有显著的海温信号作为可预测性来源，而 5 月 AAO 可预测性来源为 ENSO。AAO 由绕极低压和副热带高压两个区域的环流系统构成，那么这两个区域的外强迫是否存在显著差异呢？进一步研究发现 3 月绕极低压和副热带高压的外强迫信号的确存在显著差异性，3 月南太平洋副热带高压同时受到 ENSO 以及澳大利亚以东海温的影响，而 3 月南大西洋副热带高压和绕极低压仅受到 ENSO 的影响，5 月南太平洋副热带高压与 ENSO 密切相关。

表 1　1983～2019 年春季逐月各观测指数之间的偏相关系数

Table 1　Partial correlation coefficients between monthly observed indices in spring from 1983 to 2019

	偏相关系数		
	AAOI与Niño4指数	AAOI与SST_A	Niño4指数与SST_A
3月	−0.55**	0.33**	0.03
4月	0.12	0.23	−0.38**
5月	−0.30*	0.22	−0.31*

注：SST_A 表示澳大利亚以东太平洋（20°S～50°S，150°E～180°）海表温度距平指数，Niño4指数表示赤道中太平洋（5°N～5°S，160°E～150°W）海表温度距平指数。表中各指数均已滤去线性趋势。**表示通过95%置信度水平检验，*表示通过90%置信度水平检验。

上述分析表明，春季逐月观测 AAO 与 ENSO 之间的关系存在季节内的变化，那么 3 月 ENSO 是如何影响 AAO 的变化。图 6a 和 6b 分别为观测 500 hPa 位势高度距平场对同期 3 月 AAOI 和 −Niño4 指数的回归，两者的回归场均呈现为 PSA 正位相。当 3 月 AAO 为正位相，新西兰东部南太平洋高度场为正异常、阿蒙森海高度场为负异常以及南美洲南端大西洋附近高度场为正异常。3 月 ENSO 能够激发 PSA，然后传播到南太平洋。Ding et al.（2012）指出热带外的波－流正反馈作用和来自热带太平洋的行星波活动（即 ENSO 激发的 PSA）对 AAO 变率有显著的贡献。PSA 遥相关型是由热带对流产生的 Rossby 波列的一部分，这些 Rossby 波列被认为是 ENSO 信号向南半球高纬度地区的传播以引起南太平洋海温异常，进而影响 AAO 位相的变化（Karoly, 1989; Mo and Higgins, 1998; Garreaud and Battisti, 1999; Li et al., 2013; Han et al., 2017）。

为了进一步确认 3 月 ENSO 能够激发 PSA 波列传播到南太平洋进而影响 AAO，本文分析了 3 月观测 AAOI、Niño4 指数与南半球大气环流之间的关系。在 3 月 SLP 距平对 AAOI 的回归场（图 6c）上可以看到，南太平洋上呈现显著的 PSA 模态，同时在 SLP 距平对−Niño4 指数的回归场（图 6d）上也可以看到南太平洋上对应的 PSA 模态。在年际尺度上，ENSO 负位相对应于 PSA 正位相，ENSO 负位相通过 PSA 波列在阿蒙森海上空形成持续的低压中心，对应低层的气旋异常，同时通过热力和动力过程在罗斯海以东和威德尔海附近产生反相的温度异常（Mo, 2000; Renwick, 2002）。3 月 850 hPa 水平风场、海温距平对 AAOI 和−Niño4 的回归场（图 6e 和 6f）可以看出，在阿蒙森海存

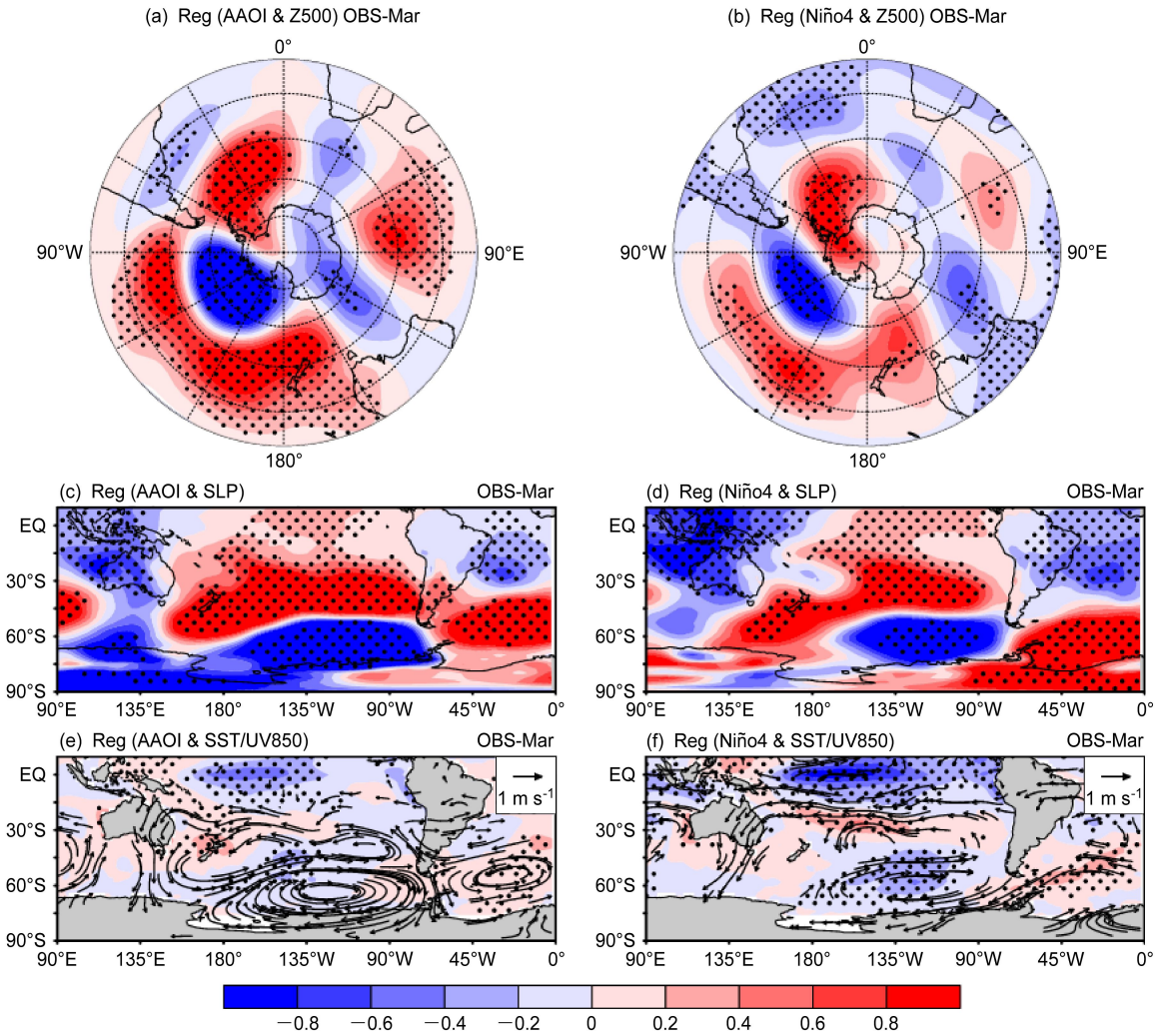

图 6　1983～2019 年 3 月观测（a、b）500 hPa 高度距平（填色，单位：gpm）、（c、d）SLP 距平（填色，单位：hPa）、（e、f）海温 SST 距平（填色，单位：°C）和 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）对同期 AAOI（左列）和－Niño4 指数（右列）的回归分析。打点区域表示通过 95% 置信水平检验

Fig. 6　(a, b) 500-hPa geopotential height anomalies (shaded, units: gpm), (c, d) SLP anomalies (shadied, units: hPa), and (e, f) SST anomalies (shadings, units: °C) and 850-hPa horizontal wind (vectors, units: m s^{-1}) in March regression on the simultaneous AAOI (left column) and －Niño4 index (right column) from observations during the period of 1983–2019. The dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test

在显著的海温异常和气旋性环流异常，而该异常能够导致南半球绕极西风加强，副热带急流减弱。以上研究进一步说明，3 月 ENSO 能够激发 PSA 传播到南太平洋上，导致阿蒙森海海温异常和低层显著的气旋异常从而影响 3 月 AAO 的年际变化。

4.2　CFSv2 对 3 月 AAO 与 ENSO 关系及其物理过程的再现能力

CFSv2 模式能否再现 3 月 AAO 与 ENSO 之间的关系及其物理过程？图 7a 为 CFSv2 模式对 1983～2019 年春季逐月观测和 CFSv2 预测的 Niño4 指数之间的 TCC。可以看出，CFSv2 模式对春季逐月 ENSO 均具有较好的预测效能。模式提前 1～6 月预测的春季 3、4、5 月 Niño4 指数与同期观测 Niño4 指数的平均 TCC 为 0.82、0.79、0.70，都通过了 99% 的置信水平。图 7b 为 CFSv2 模式对 1983～2019 年春季逐月 Niño4 指数与 AAOI 关系的预测结果。可以看出，CFSv2 模式提前 1～6 月很好再现 3 月 AAO 与 ENSO 之间的关系，两者之间 TCC 分别为−0.61、−0.52、−0.70、−0.83、−0.67、−0.81，通过了 99% 的置信水平，同时在去除 3 月 ENSO 信号后，CFSv2 提前 1～6 个月预测 3 月 AAOI 与观测 AAOI 之间 TCC 分别为 0.05、0.27、

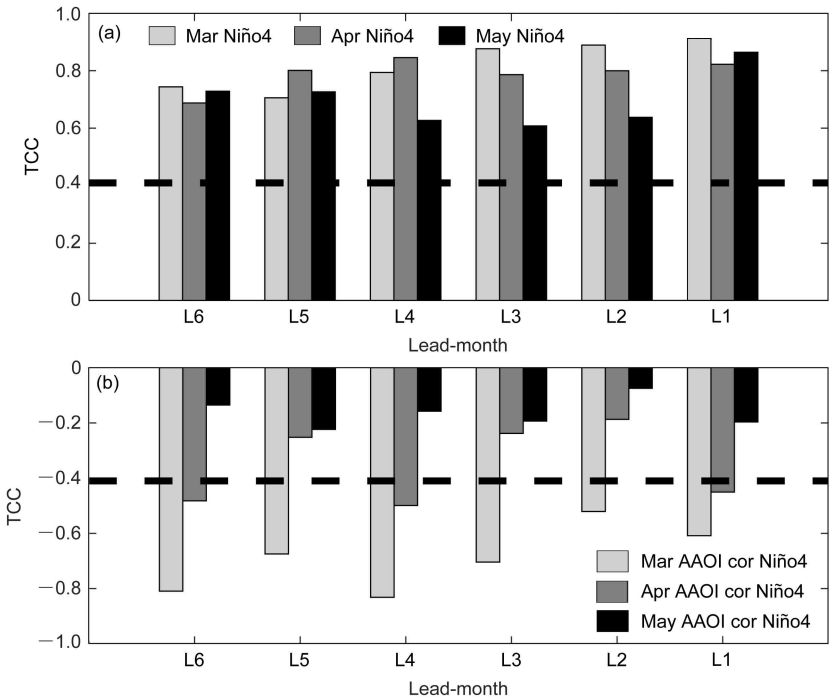

图 7 （a）CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 1983～2019 年春季逐月 Niño4 指数与同期观测 Niño4 指数的 TCC；（b）CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 1983～2019 年春季逐月 AAOI 与观测 Niño4 指数的 TCC。黑色虚线表示 99% 置信水平，各指数均已滤去线性趋势

Fig. 7 TCC (a) between the Niño4 index predicted by CFSv2 at 1–6-month leads (L1–L6) and the observed Niño 4 index and (b) between observed Niño4 index and the AAOI predicted by CFSv2 at 1–6-month leads (L1–L6) in spring (March–May) during the period of 1983–2019. The black dashed line indicates the statistically significant coefficients over the 99% confidence level. Each Niño4 index and each AAOI filter out the linear trend

0.17、0.15、0.21、0.17，均未通过 90% 的置信水平，CFSv2 模式提前 1～6 月对 3 月 AAO 的预测效能都显著降低，表明 3 月 ENSO 是同期 AAO 的可预测性来源。然而，CFSv2 模式高估了 4 月 AAO 与 ENSO 之间的关系，不能再现 5 月 AAO 与 ENSO 之间的关系。

既然 CFSv2 模式能够很好的再现 3 月 AAO 与同期 ENSO 的关系，那么模式能否再现 3 月 ENSO 影响同期 AAO 的物理过程呢？图 8 为 CFSv2 模式提前 1 个月预测 3 月 AAOI 和−Niño4 指数回归南半球大气环流各变量场。图 8a 和 8b 为 CFSv2 模式提前 1 个月预测的 3 月 500 hPa 位势高度距平场对模式提前 1 个月预测的 AAOI 和−Niño4 指数的回归场，可以发现 CFSv2 模式能够很好地在南太平洋上再现与观测一致的 PSA 模态。从模式提前 1 个月预测 SLP 距平场对 AAOI 和−Niño4 指数回归场（图 8c 和 8d）均可以看到在南太平洋上显著的 PSA 模态。CFSv2 模式也能够提前 1 个月再现阿蒙森海海温负异常以及低层气旋性环流异常（图 8e 和 8f）。综上所述，CFSv2 模式不仅提前 1 月很好的再现 3 月 AAO 与 ENSO 之间关系，而且能够再现 3 月 ENSO 激发 PSA 波列传播至南太平洋上，通过引起阿蒙森海海温异常和低层气旋异常，使得南半球绕极西风加强，副热带急流减弱，从而影响 AAO 的年际变化。此外，CFSv2 模式也能提前 6 个月再现 3 月 ENSO 影响同期 AAO 的物理过程（图略）。

4.3 澳大利亚以东海温对 3 月 AAO 的影响过程

3 月 AAO 不仅与 ENSO 密切相关，而且受到澳大利亚以东海温异常的影响。已有研究表明澳大利亚东部的热带海温异常能够在副热带急流核心区域激发活跃的 Rossby 波源，该副热带急流核心区域位于澳大利亚东部 30°S 附近，与副热带急流有关的强位涡梯度与澳大利亚东部暖海温上方对流层高层辐散平流强变率共同形成位于副热带急流核心区域活跃的 Rossby 波源。因此在南太平洋地区有从澳大利亚副热带地区出发到南极大陆的 Rossby 波列（Renwick and Revell, 1999; Lachlan-Cope and Connolley, 2006; Eichelberger and Hartmann, 2007; Ding et al., 2012）。

由于 3 月 ENSO 对 AAO 有显著影响，在分析澳大利亚以东海温异常对 AAO 的影响过程时，去

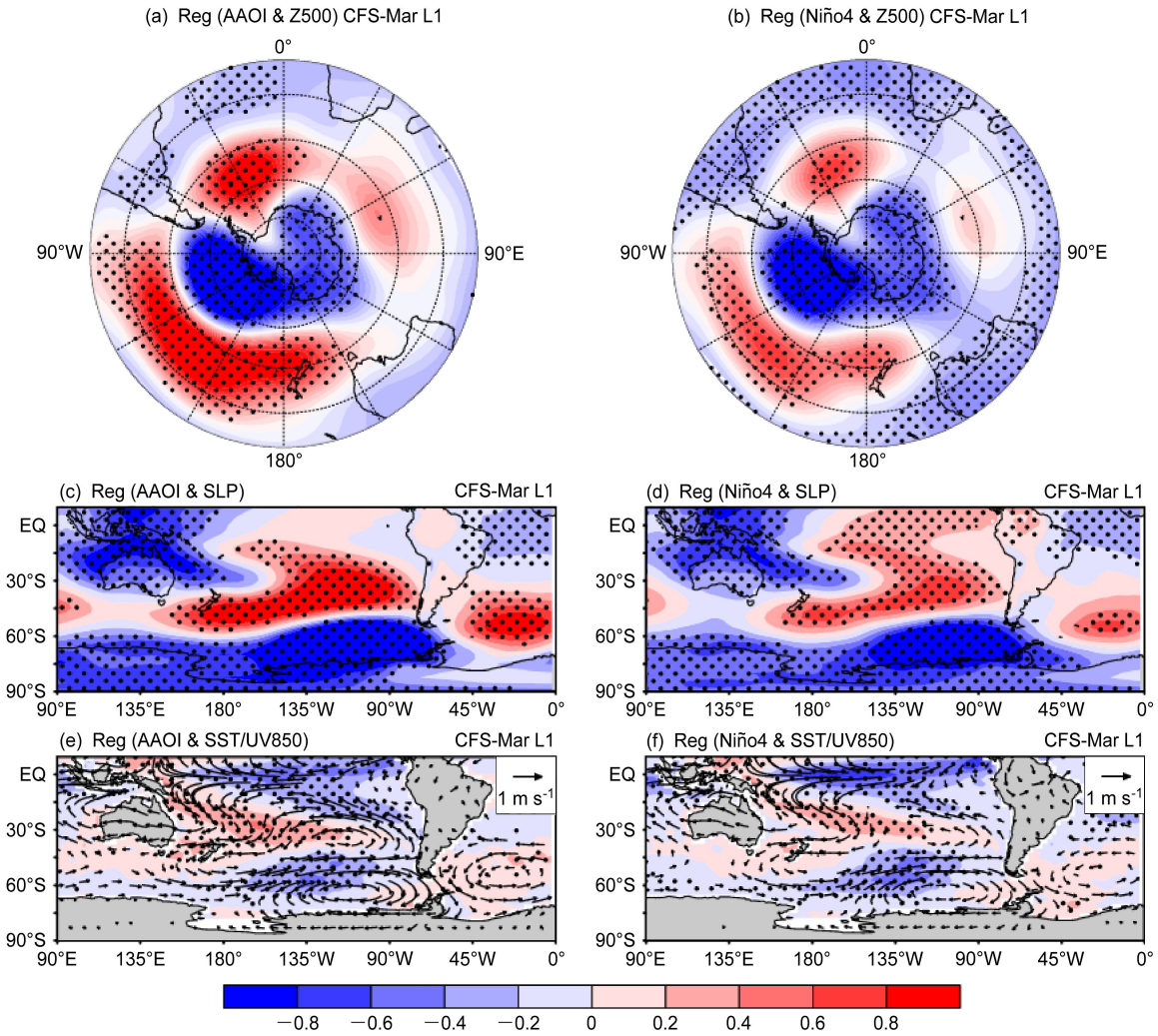

图 8　CFSv2 模式提前 1 个月预测 1983～2019 年 3 月（a, b）500 hPa 位势高度距平（填色，单位：gpm）、（c, d）SLP 距平（填色，单位：hPa）、（e、f）海温 SST 距平（填色，单位：°C）和 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）对同期 AAOI（左列）和－Niño4 指数（右列）的回归分析。打点区域表示通过 95% 置信水平检验

Fig. 8　Regression coefficients of (a, b) 500-hPa geopotential height anomalies (shadings, units: gpm), (c, d) SLP anomalies (shadings, units: hPa), and (e, f) SST anomalies (shadings, units: °C) and 850 hPa horizontal wind (vectors, units: m s^{-1}) in March regression on the simultaneous AAOI (left column) and －Niño4 index (right column) during the period of 1983–2019, predicted by CFSv2 with a 1-month lead. The dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test

掉了各变量场中 ENSO 的信号。3 月 500 hPa 位势高度场和波作用通量对 3 月 AAOI、SST_A 指数的回归场呈现出类似的分布型，在澳大利亚以东的副热带区域都有 Rossby 波从位势高度场正异常区向东南频散南太平洋中高纬地区，并引起该地区位势高度负异常（图 9a 和 9b）。如图 9c 所示，澳大利亚以东太平洋地区 850 hPa 位势高度为显著的正异常，低层风场上为反气旋性环流异常、南太平洋中高纬地区位势高度为显著的负异常，低层风场上对应气旋性环流异常，使得副热带地区西风减弱，南半球高纬 60°S 西风加强。图 9d 也呈现出与图 9c 类似的结果。综上所述，澳大利亚东部的热带海温异常在副热带急流核心区域激发了活跃的 Rossby 波源，该 Rossby 波从位势高度场正异常区向东南频散南太平洋中高纬地区，并引起该地区位势高度负异常，使得澳大利亚以东太平洋地区风场出现反气旋性环流异常，南太平洋中高纬地区出现气旋性环流异常，进而使得副热带地区西风减弱，南半球高纬 60°S 西风加强，从而导致 AAO 出现正异常。

4.4　CFSv2 对 3 月澳大利亚以东海温与 AAO 关系及其物理过程再现能力

前文分析表明 3 月观测 AAO 与同期 SST_A 显

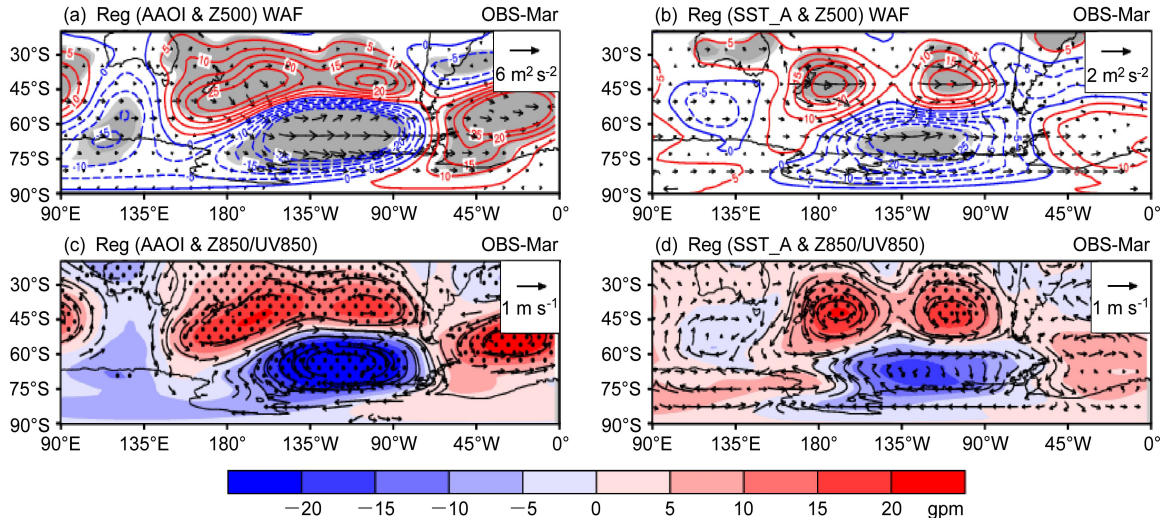

图 9 1983～2019 年观测 3 月 500 hPa 位势高度距平（等值线，单位：gpm）和波作用通量（箭头，单位：$m^2 s^{-2}$）对同期（a）AAOI 和（b）SST_A 指数的回归分析（阴影表示位势高度异常通过 95% 置信水平检验的区域）；1983～2019 年观测 3 月 850 hPa 高度距平（填色，单位：gpm）、850 hPa 风场（箭头，单位：$m s^{-1}$）对同期（c）AAOI 和（d）SST_A 指数的回归分析（打点区域表示通过 95% 置信水平检验）

Fig. 9 Regression coefficients of geopotential height anomalies (contours, units: gpm) at 500 hPa and wave activity fluxes (vectors, units: $m^2 s^{-2}$) in March on the corresponding period (a) AAOI and (b) SST_A index during the period of 1983–2019 (the shadings represent the height anomalies that are statistically significant at the 95% confidence level). The observed geopotential height anomalies (shadings, units: gpm) and horizontal wind (vectors, units: $m s^{-1}$) at 850 hPa regressions on the corresponding (c) AOI and (d) SST_A index during the period of 1983–2019 (the dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test)

著相关，且 4 月和 5 月 AAO 与同期 SST_A 关系均不显著，本节将分析 CFSv2 模式对春季逐月 AAO 与 SST_A 关系的预测效能差异以及能否再现 3 月 SST_A 影响同期 AAO 的物理过程。

图 10a 为 CFSv2 模式提前 1～6 月对 1983～2019 年春季 3、4、5 月 SST_A 的预测结果，CFSv2 模式提前 1～6 月预测 3、4、5 月 SST_A 指数与同期观测 SST_A 指数的平均 TCC 为 0.38、0.55、0.53，且都通过了 95% 置信水平，表明 CFSv2 模式对于春季逐月 SST_A 具有较高的预测效能。图 10b 为 CFSv2 模式提前 1～6 月对 1983～2019 年春季 3、4、5 月 AAOI 与 SST_A 指数相关性的预测结果。CFSv2 模式提前 1～6 月预测 3 月 AAOI 与 SST_A 之间的关系，两者之间 TCC 分别为 0.61、0.27、0.56、0.57、0.52、0.62。可以看出，CFSv2 模式除了提前 2 个月预测效果较差，其他提前月份对 3 月 AAOI 与 SST_A 两者相关性表现出较好的预测效果。模式提前 1～6 月预测 4 月和 5 月 AAOI 与 SST_A 指数的平均 TCC 分别为 0.51、0.45，预测结果表明 CFSv2 模式高估了 4 月及 5 月 AAO 与 SST_A 的关系。CFSv2 模式提前 2 个月对 3 月 AAOI 与同期 SST_A 关系预测较差，两者之间的 TCC 为 0.27，没有通过 95% 置信水平，而 CFSv2 模式提前 2 个月对 3 月 AAO 的预测能力也较低（如图 3），进一步说明澳大利亚以东海温异常可能是 3 月 AAO 的可预测性来源之一。

CFSv2 模式对 3 月澳大利亚以东海温异常影响 3 月 AAO 物理过程的再现能力如何？图 11a 和图 11b 分别为 CFSv2 模式提前 1 个月预测 3 月 500 hPa 位势高度距平场及其对应的波作用通量、850 hPa 位势高度距平场及 850 hPa 风场对 AAOI 和 SST_A 指数的回归场。可以看出，澳大利亚以东的位势高度为正异常，且 Rossby 波从澳大利亚以东太平洋向东南频散到南太平洋中高纬地区，并引起该地区位势高度负异常。CFSv2 模式也能够再现 3 月 AAO、SST_A 与低层环流异常之间的关系。图 11c 和 11d 分别为 CFSv2 模式提前 1 个月预测 3 月 850 hPa 位势高度距平场和水平风场对 AAOI、SST_A 指数的回归场。可以看出，澳大利亚以东位势高度为正异常，其上空风场为显著的反气旋性环流异常，而中高纬南太平洋地区的位势高度为显著的负异常，其对应的风场为气旋性环流异常，因此在南半球副热带地区西风减弱，高纬 60°S 西风加强，这与观测 3 月 SST_A 影响同期 AAO 的过程一

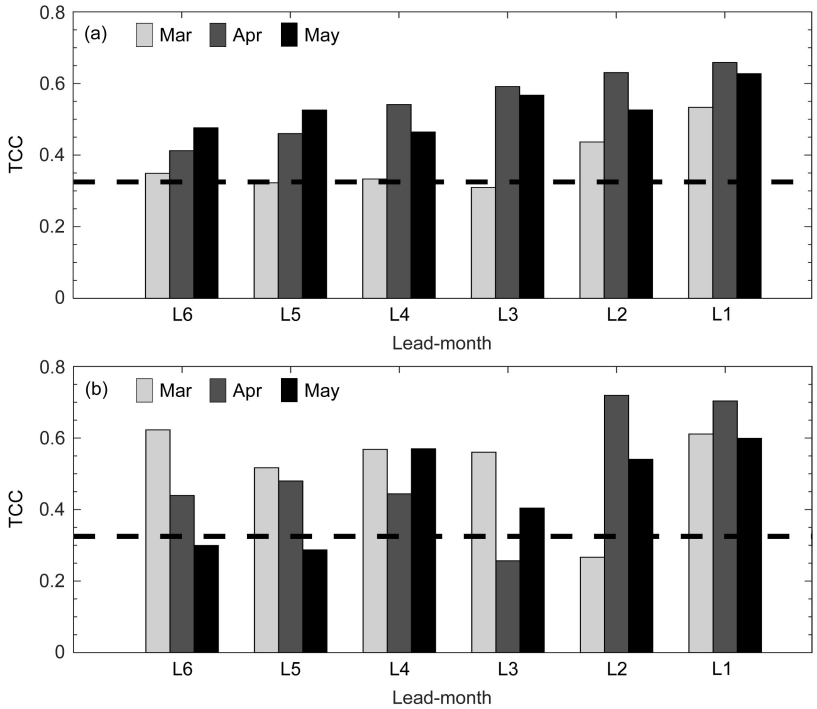

图 10　（a）CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 1983～2019 年春季（3、4、5 月）逐月 SST_A 指数与同期观测 SST_A 指数的 TCC；（b）CFSv2 模式提前 1～6 个月预测 1983～2019 年春季逐月 AAOI 与观测 SST_A 指数的 TCC。黑色虚线表示 95% 置信水平，各指数均已滤去线性趋势

Fig. 10　(a) Prediction capability (TCC) between the SST_A index predicted by CFSv2 model with 1–6-month leads (L1–L6) and the observed SST_A index in spring (Mar–May) during the period of 1983–2019. (b) Prediction capability (TCC) between the SST_A index and the AAOI predicted by CFSv2 model with 1–6-month leads (L1–L6) in spring (Mar–May) during the period of 1983–2019. The black dashed line indicates the statistically significant coefficients over the 95% confidence level. Each SST_A index and each AAOI filter out the linear trend

致。以上研究表明，CFSv2 模式能够提前 1 个月再现 3 月 SST_A 异常在副热带急流核心区域激发活跃的 Rossby 波列，该波列由向澳大利亚东部太平洋地区向东南频散到南太平洋高纬地区，造成该地区位势高度异常，使得副热带地区 30°S 西风减弱，南半球高纬 60°S 西风加强进而影响 AAO。此外，CFSv2 模式也能够提前 6 个月也能再现 3 月澳大利亚以东海温异常对 AAO 影响过程。

5　结论与展望

本文利用 CFSv2 模式对北半球春季 3、4、5 月 AAO 的空间模态和年际变化的可预测性进行了评估。并且分析了春季逐月 AAO 的可预测性来源。得到以下结论：

（1）CFSv2 模式对于 1983～2019 年春季 3、4、5 月 SLP 气候态的可预测性较高，但是都低估了南极大陆的高压强度，4 月和 5 月高估了绕极低压的强度。CFSv2 模式对于北半球春季 3、4、5 月 AAO 的空间模态的可预测性较高。CFSv2 模式不仅对 3 月 AAO 年际变化预测效能较高，而且 CFSv2 模式对 3 月 AAO 正负异常年也有不错的预测效能，但对于 4 月和 5 月 AAO 年际变化及其正负异常年的预测效能较低。ECMWF System 4 模式对春季 3、4、5 月 AAO 的年际变化预测结果与 CFSv2 模式基本一致。

（2）通过研究发现 ENSO、澳大利亚以东海温异常是 3 月 AAO 的可预测性来源，4 月 AAO 没有显著的海温信号作为可预测性来源，而 5 月 AAO 可预测性来源为 ENSO。CFSv2 模式能够很好的再现观测 3 月 AAO 与同期 ENSO、SST_A 之间的关系，但是 CFSv2 模式高估了 4 月 AAO 与 ENSO、SST_A 的关系，低估了 5 月 AAO 与 ENSO 之间的关系。

（3）CFSv2 模式对于北半球春季 3 月 AAO 年际变化具有较高预测效能原因在于：CFSv2 模式能够很好的再现 3 月 ENSO、SST_A 影响 AAO 年际变化的物理过程。3 月 ENSO 影响 AAO 的物理过程为：ENSO 通过激发 PSA 波列传播到南太平洋上，导致阿蒙森海海温异常及其低层显著的气旋异

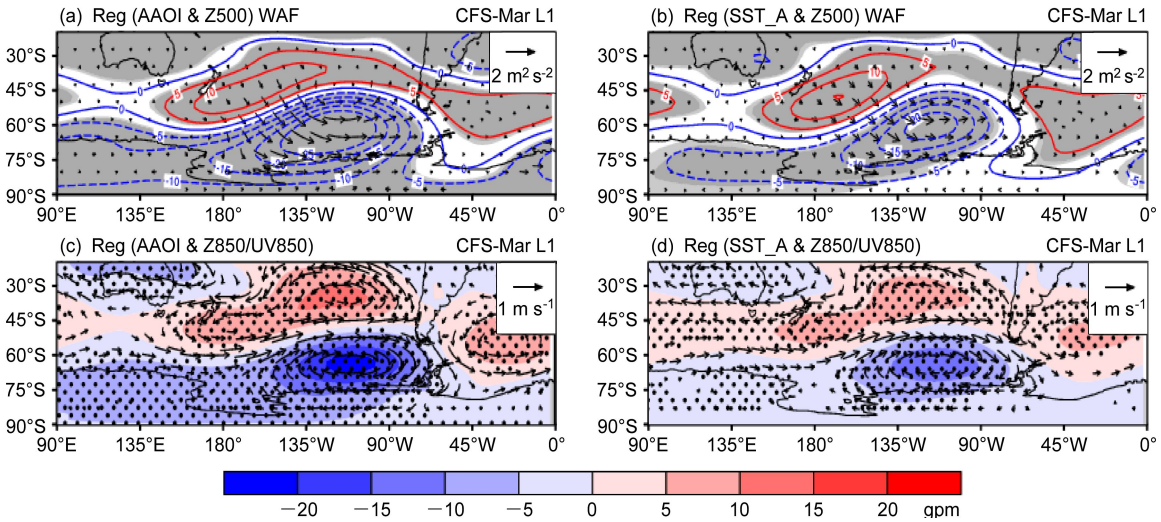

图 11 CFSv2 模式提前 1 个月预测 1983～2019 年 3 月 500 hPa 位势高度距平（等值线，单位：gpm）和波作用通量（箭头，单位：$m^2 s^{-2}$）对同期（a）AAOI 和（b）SST_A 指数的回归分析（阴影表示位势高度异常通过 95% 置信水平检验的区域）；CFSv2 模式提前 1 个月预测 1983～2019 年 3 月 850 hPa 位势高度距平（填色，单位：gpm）、850 hPa 风场（箭头，单位：$m s^{-1}$）对同期 3 月（c）AAOI 和（d）SST_A 指数的回归分析（打点区域表示通过 95% 置信水平检验）

Fig. 11 Geopotential height anomalies (contours, units: gpm) at 500 hPa and wave activity fluxes (vectors, units: $m^2 s^{-2}$) in March predicted by CFSv2 model with a 1-month lead regression on the corresponding (a) AAOI and (b) SST_A index during the period of 1983–2019 (the shadings represent the height anomalies that are statistically significant at the 95% confidence level). Geopotential height anomalies (contours, units: gpm) and horizontal wind (vectors, units: $m s^{-1}$) at 850 hPa in March regression on the corresponding (c) AAOI and (d) SST_A index during the period of 1983–2019, predicted by CFSv2 model with a 1-month lead (the dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test)

常，使得南半球绕极西风加强，副热带急流减弱从而影响 AAO。

澳大利亚以东海温异常作为 3 月 AAO 的可预测性来源之一，其影响同期 AAO 的物理过程：SST_A 异常在副热带急流核心区域激发活跃的 Rossby 波列，该 Rossby 波从澳大利亚以东位势高度场正异常区向东南频散南太平洋中高纬地区，并引起该地区位势高度负异常，使得澳大利亚以东太平洋地区风场出现反气旋性环流异常，南太平洋中高纬地区出现气旋性环流异常，进而使得副热带地区西风减弱，南半球高纬 60°S 西风加强，从而导致 AAO 出现正异常。

（4）相比于 AAO 的季节预测，AAO 的次季节预测能力仍需进一步提高，尤其是对于 4 月和 5 月 AAO 的预测能力。如何提高 4 月和 5 月 AAO 的预测能力需要进一步探索，考虑到秋季南极海冰超前 6 个月对春季 AAO 有显著影响（Gao, 2003），是春季 AAO 潜在可预测源，下一步考虑海冰对 4 月和 5 月 AAO 的影响，来提高 4 月和 5 月 AAO 的预测能力。

参考文献（References）

Carvalho L M V, Jones C, Ambrizzi T. 2005. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer [J]. J. Climate, 18(5): 702−718. doi:10.1175/JCLI-3284.1

Ciasto L M, Thompson D W J. 2008. Observations of large-scale ocean−atmosphere interaction in the Southern Hemisphere [J]. J. Climate, 21(6): 1244−1259. doi:10.1175/2007JCLI1809.1

Ding Q H, Steig E J, Battisti D S, et al. 2012. Influence of the tropics on the southern annular mode [J]. J. Climate, 25(18): 6330−6348. doi:10.1175/jcli-d-11-00523.1

Eichelberger S J, Hartmann D L. 2007. Zonal jet structure and the leading mode of variability [J]. J. Climate, 20(20): 5149−5163. doi:10.1175/jcli4279.1

Fan K. 2006. Atmospheric circulation in Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(3): 599−606. doi:10.1002/cjg2.873

Fan K. 2007. Zonal asymmetry of the Antarctic Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 34(2): L02706. doi:10.1029/2006GL028045

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. Geophys. Res. Lett., 31(10): L10201. doi:10.1029/2004GL019465

Fan K, Wang H J. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. Science in China Series D, 49(5): 554−560. doi:10.1007/s11430-006-0554-7

范可, 王会军. 2007. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值模拟试验 [J]. 地球物理学报, 50(2): 397−403. Fan Ke, Wang Huijun. 2007. Simulation of the AAO anomaly and its influence on the Northern Hemispheric circulation in boreal winter and spring [J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(2): 397−403. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.009

Fan K, Liu H. 2013. Evaluation of atmospheric circulation in the Southern Hemisphere in 20CRv2 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6(5): 337−342. doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0009

Gao H. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic oscillation on Meiyu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance to prediction [J]. Chinese Science Bulletin, 48(S2): 61−67. doi:10.1360/03wd0452

Garreaud R, Battisti D S. 1999. Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation [J]. J. Climate, 12(7): 2113−2123. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2113:IEAIEL>2.0.CO;2

Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic Oscillation index [J]. Geophys. Res. Lett., 26(4): 459−462. doi:10.1029/1999GL900003

Grassi B, Redaelli G, Visconti G. 2005. Simulation of Polar Antarctic trends: Influence of tropical SST [J]. Geophys. Res. Lett., 32(23): L23806. doi:10.1029/2005gl023804

Gupta A S, England M H. 2007. Coupled ocean–atmosphere feedback in the southern annular mode [J]. J. Climate, 20(14): 3677−3692. doi:10.1175/jcli4200.1

Han T T, Wang H J, Sun J Q. 2017. Strengthened relationship between the Antarctic Oscillation and ENSO after the mid-1990s during austral spring [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(1): 54−65. doi:10.1007/s00376-016-6143-6

Hao X, He S P, Wang H J, et al. 2017. The impact of long-term oceanic warming on the Antarctic Oscillation in austral winter [J]. Sci. Rep., 7(1): 12321. doi:10.1038/s41598-017-12517-x

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Karoly D J. 1989. Southern hemisphere circulation features associated with El Niño –Southern Oscillation events [J]. J. Climate, 2(11): 1239−1252. doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1239:SHCFAW>2.0.CO;2

Kidson J W, Sinclair M R. 1995. The influence of persistent anomalies on Southern Hemisphere storm tracks [J]. J. Climate, 8(8): 1938−1950. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1938:tiopao>2.0.co;2

Kushnir Y, Robinson W A, Bladé I, et al. 2002. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation [J]. J. Climate, 15(16): 2233−2256. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2233:AGRTES>2.0.CO;2

Lachlan-Cope T, Connolley W. 2006. Teleconnections between the tropical pacific and the Amundsen–Bellinghausens Sea: Role of the El Niño/Southern Oscillation [J]. J. Geophys. Res., 111(D23): D23101. doi:10.1029/2005JD006386

L' Heureux M L, Thompson D W J. 2006. Observed relationships between the El Niño–Southern Oscillation and the extratropical zonal-mean circulation [J]. J. Climate, 19(2): 276−287. doi:10.1175/JCLI3617.1

Li Y, Smith I. 2009. A statistical downscaling model for southern Australia winter rainfall [J]. J. Climate, 22(5): 1142−1158. doi:10.1175/2008jcli2160.1

Li G, Li C Y, Tan Y K, et al. 2013. Impacts of the central and eastern Pacific types of ENSO on sea surface temperature in the South Pacific [J]. Theor. Appl. Climatol., 114(1–2): 315 –327. doi:10.1007/s00704-013-0840-1

Li F, Wang H J, Gao Y Q. 2015. Modulation of aleutian low and Antarctic Oscillation co-variability by ENSO [J]. Climate Dyn. , 44(5–6): 1245–1256. doi:10.1007/s00382-014-2134-4

Mendes M C D, Cavalcanti I F A. 2014. The relationship between the Antarctic Oscillation and blocking events over the South Pacific and Atlantic Oceans [J]. Int. J. Climatol., 34(3): 529−544. doi:10.1002/joc.3729

Mo K C. 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies [J]. J. Climate, 13(20): 3599−3610. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3599:RBLFVI>2.0.CO;2

Mo K C, Higgins R W. 1998. The Pacific–South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 126(6): 1581−1596. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<1581:TPSAMA>2.0.CO;2

Molteni F, Stockdale T, Alonso-Balmaseda M, et al. 2011. The New ECMWF Seasonal Forecast System (System 4) [M]. Sheffield: European Centre for Medium Range Weather Forecasts Press. doi:10.21957/4nery093i

Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. Geophys. Res. Lett., 30(24): 2266. doi:10.1029/2003GL018381

钱卓蕾, 王会军, 孙建奇. 2012. 耦合模式对冬春季节南、北极涛动的季节气候预测能力研究 [J]. 气象学报, 70(2): 222−235. Qian Zhuolei, Wang Huijun, Sun Jianqi. 2012. The hindcast of winter and spring Arctic and Antarctic Oscillation with the coupled climate models [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(2): 222−235. doi:10.11676/qxxb2012.022

Renwick J A. 2002. Southern Hemisphere circulation and relations with sea ice and sea surface temperature [J]. J. Climate, 15(21): 3058−3068. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<3058:SHCARW>2.0.CO;2

Renwick J A, Revell M J. 1999. Blocking over the South Pacific and rossby wave propagation [J]. Mon. Wea. Rev., 127(10): 2233−2247. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<2233:BOTSPA>2.0.CO;2

Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast

system version 2 [J]. J. Climate, 27(6): 2185−2208. doi:10.1175/jcli-d-12-00823.1

Screen J A, Gillett N P, Karpechko A Y, et al. 2010. Mixed layer temperature response to the southern Annular Mode: Mechanisms and model representation [J]. J. Climate, 23(3): 664−678. doi:10.1175/2009JCLI2976.1

Silvestri G E, Vera C S. 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America [J]. Geophys. Res. Lett., 30(21): 2115. doi:10.1029/2003GL018277

Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land–ocean surface temperature analysis (1880 –2006) [J]. J. Climate, 21(10): 2283−2296. doi:10.1175/2007jcli2100.1

Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Int. J. Climatol., 29(9): 1276−1284. doi:10.1002/joc.1773

Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. J. Climate, 13(5): 1000−1016. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2

Tian B Q, Fan K. 2019. Why is the North Atlantic Oscillation more predictable in December? [J]. Atmosphere, 10(8): 477. doi:10.3390/atmos10080477

Tian B Q, Fan K. 2020. Different prediction skill for the East Asian winter monsoon in the early and late winter season [J]. Climate Dyn., 54(3–4): 1523–1538. doi:10.1007/s00382-019-05068-6

Trenberth K E, Stepaniak D P, Smith L. 2005. Interannual variability of patterns of atmospheric mass distribution [J]. J. Climate, 18(15): 2812−2825. doi:10.1175/JCLI3333.1

Wang H J, Fan K. 2005. Central-North China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty: Signal of the Antarctic Atmospheric Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 32(24): L24705. doi:10.1029/2005GL024562

Wang H J, Fan K. 2007. Relationship between the Antarctic Oscillation in the western North Pacific typhoon frequency [J]. Chinese Science Bulletin, 52(4): 561−565. doi:10.1007/s11434-007-0040-4

杨洪卿, 范可, 田宝强, 等. 2021. 为什么 NCEP-CFSv2 模式对 11 月西伯利亚高压强度的预测性能较好 [J]. 大气科学, 45(4): 697−712. Yang Hongqing, Fan Ke, Tian Baoqiang, et al. 2021. Why is the november Siberian High intensity more predictable by NCEP-CFSv2model?[J].ChineseJournalofAtmosphericSciences,45(4):697−712. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20106

张乐英, 徐海明, 施宁. 2017. 冬季南极涛动对欧亚大陆地表气温的影响 [J]. 大气科学, 41(4): 869−881. Zhang Leying, Xu Haiming, Shi Ning. 2017. Influence of the Antarctic Oscillation on surface air temperature over the Eurasian Continent during boreal winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 41(4): 869−881. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16228

Zhang D P, Huang Y Y, Sun B, et al. 2019. Verification and improvement of the ability of CFSv2 to predict the Antarctic Oscillation in boreal spring [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(3): 292−302. doi:10.1007/s00376-018-8106-6

郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理 [J]. 地球物理学报, 55(11): 3542−3557. Zheng Fei, Li Jianping. 2012. Impact of preceding boreal winter Southern Hemisphere annular mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(11): 3542−3557. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004

Zhou T J, Yu R C. 2004. Sea-surface temperature induced variability of the southern annular mode in an atmospheric general circulation model [J]. Geophys. Res. Lett., 31(24): L24206. doi:10.1029/2004GL021473

祝亚丽, 王会军. 2008. 基于 IPCC AR4 耦合模式的南极涛动和北极涛动的模拟及未来变化预估 [J]. 气象学报, 66(6): 993−1004. Zhu Yali, Wang Huijun. 2008. The Arctic and Antarctic Oscillations in the IPCC AR4 coupled models [J]. Acta Meteorologica Sinica, 66(6): 993−1004. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.06.013